



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**

República de Colombia

<i>NOMBRE</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>DOMINIO</i>
IDENTIFICACIÓN		
Información de la citación		
CITACIÓN		
Nombre del responsable	Nombre de la organización	Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS
Tipo de responsable	Autor Corporativo	Autor corporativo
Nombre del responsable		Grupo de Trabajo Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto;
Tipo de responsable	Autor intelectual. Si hay varios autores hay que escribirlo cada uno.	Grupo de Trabajo Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto;
Nombre del responsable		
Tipo de responsable	Procesador: persona encargada de recibir y organizar la información	Grupo de Trabajo Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto
Nombre del responsable		EDGAR ANTONIO MUÑOZ HIDALGO
Fecha	De publicación/disposición tres primeras letras del mes/año	Abr/2010
Título		Boletín Semestral de Actividad de Volcanes de Nariño. Julio a Diciembre de 2009.
Edición	Primera versión.- Actualización conjunto de datos la numeración va del 0.1 al 0.9	0.1
Serie		No aplica
<i>Identificador</i>	<i>En proceso de definición</i>	
Descripción	Breve descripción del conjunto de datos, se destacan los objetivos, metodologías y productos entregados	Presentación de resultados y análisis de datos obtenidos del monitoreo continuo de la actividad de Galeras, en áreas como: funcionamiento de estaciones, actividad sísmica, actividad superficial, muestreos geoquímicos, climatología y deformación. Se utiliza gráficas, tablas, esquemas, mapas y fotografías que ilustran el trabajo.
Uso/Información complementaria	Información básica sobre aplicaciones específicas donde el conjunto de datos ha sido o se está utilizando. Incluye opcionalmente lista de anexos, fuentes y documentos relacionados con el conjunto de datos.	
Programa-Proyecto		
Tipo de programa o proyecto	Cobertura macro y la capa a la cual pertenece el conjunto de datos según las estrategias institucionales. (Investigación, plan, programa, proyecto)	Proyecto
Nombre del programa/proyecto	Nombre del proyecto	Investigación y Monitoreo de la Actividad Volcánica (AME09 – 42).
Nombre del programa/Proyecto	Nombre del proyecto	
Periodo de tiempo	Lapso de tiempo que corresponde a la información contenida en el conjunto de datos	Julio /2009 a Diciembre /2009
Dominio Espacial		
	Descripción del área geográfica. Incluir el nombre del territorio que cubre el producto.	Zona de influencia – volcanes de Nariño.



NOMBRE	DESCRIPCION	DOMINIO
	Incluir área geográfica dada en km ² .	
Coordenadas /límites		
Oeste		No aplica.
Este		No aplica.
Norte		No aplica.
Sur		No aplica.
Nivel de resolución	Escala	No aplica.
Descriptores		
Descriptor de tema	Palabra o frase común que describe aspectos temáticos del conjunto de datos	Descriptores primarios: -Actividad Sísmica -Número diario -Energía diaria -Frecuencia -Localizaciones -Deformación -Variación -Emisiones -Flujo -Campo eléctrico -Campo magnético -Emisiones -Actividad Superficial -Temperaturas -Estación climatológica -Cenizas -Observaciones
Descriptor de lugar	Nombre de lugares geográficos cubiertos por el conjunto de datos. Nombre de zonas, regiones, municipios	-Zona de influencia – volcanes de Nariño: Galeras, Cumbal, Azufral, Doña Juana -Cono activo -Municipios de la carretera Circunvalar a Galeras -Pasto, Túquerres, Cumbal, Las Mesas
Código temático		Capas de información
Restricción de acceso	Limitaciones para el acceso del conjunto de datos incluye restricciones que aseguren protección de la privacidad o propiedad intelectual o limitaciones en la obtención del conjunto de datos.	Derechos de propiedad intelectual. Prohibida su reproducción total o parcial con fines comerciales. Incluye información básica para documentos e investigación
Muestra gráfica	Ilustración gráfica del conjunto de datos. Se especifica la dirección del computador, trayectoria, nombre y extensión del archivo.	Los datos se encuentran en el Servidor: \\Chapacual\Vigilancia\informes\informes_finales\VIGILANCIA\Boletines semestrales\09\bol II 09
Calidad de los datos		
Informe general de calidad	Incluye conceptos sobre limitaciones, exactitud temática, contenido, normatividad	Se vigila y monitorea las diferentes manifestaciones de la actividad volcánica y sísmica en la zona de influencia del Volcán Galeras, en orden a entender los diferentes fenómenos internos que las producen y a un pronóstico de eventos eruptivos.
Distribución		
Distribuidor		
Tipo de producto	Artículo, boletín, fotografía aérea, mapa,	Boletín



NOMBRE	DESCRIPCION	DOMINIO
	imagen satelital, informe técnico	
Proceso estandar de pedido		
Productos impresos	Identificación que tipo de producto impreso. Ej. mapa impreso a color	No aplica.
Forma digital		
Formato	Nombre, versión del formato Ejm: PDF.- Si no se encuentra en forma digital se escribe "No disponible"	El informe se encuentra en formato PDF
Opción de transferencia digital		
Dirección en línea	Dirección electrónica donde se puede obtener el conjunto de datos	http://intranet.ingominas.gov.co/pasto/Boletines semestrales
Medio digital/Ubicación	Opciones del medio digital en el cual puede ser entregado el conjunto de datos y su ubicación física. Disquete de 3-1/2; CD-ROM	CDROM
Contacto		
Organización	Nombre de la organización	Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. Subdirección de Información Geológico Minera. Oficina de Atención al cliente.
Cargo/persona	Nombre e identificación del cargo o persona asociado al conjunto de datos	Asesores de Oficina de Servicio al Cliente
Sede		Bogotá
Dirección		Diag. 53 No. 34-53
Ciudad		Bogotá, D.C.
Departamento		Cundinamarca
País		Colombia
Teléfono		57-2221811/57-1-2220020
Fax		57-1-2220438
Correo electrónico		Cliente@ingominas.gov.co



**BOLETÍN SEMESTRAL DE ACTIVIDAD DE VOLCANES DE NARIÑO
JULIO A DICIEMBRE DE 2009**

Edición:

EDGAR ANTONIO MUÑOZ HIDALGO

San Juan de Pasto, abril de 2010



**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
JULIO A DICIEMBRE DE 2009**

Edición:

EDGAR ANTONIO MUÑOZ HIDALGO

San Juan de Pasto, abril de 2010



2. VOLCANES DE NARIÑO



CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
2. VOLCANES DE NARIÑO	5
2.1 VOLCAN GALERAS	6
2.1.1 RED DE VIGILANCIA	6
2.1.2 SISMOLOGÍA	12
2.1.2.1 Episodios eruptivos del segundo semestre de 2009	36
2.1.2.1.1 Episodio eruptivo del 30 de septiembre de 2009	36
2.1.2.1.2 Episodio eruptivo del 20 de noviembre de 2009	46
2.1.3 DEFORMACION	56
2.1.4 FISICOQUIMICA	62
2.1.5 GEOLOGIA	67
2.1.5.1 Evento eruptivo del 30 de septiembre de 2009	68
2.1.5.2 Evento eruptivo del 20 de noviembre de 2009	76
2.1.6 ACTIVIDAD SUPERFICIAL Y CAMBIOS MORFOLOGICOS	81
2.1.7 IMÁGENES TERMICAS	96
2.1.8 CONCLUSIONES	104
2.2 VOLCAN DOÑA JUANA	106
2.2.1 RED DE VIGILANCIA	106
2.2.2 SISMOLOGIA	110
2.2.3 DEFORMACION	112
2.2.4 ACTIVIDAD SUPERFICIAL	114
2.2.5 CONCLUSIONES	114
2.3 VOLCAN AZUFRAL	115
2.3.1 RED DE VIGILANCIA	116
2.3.2 SISMOLOGIA	118
2.3.2.1 Episodios eruptivos del segundo semestre de 2009	122
2.3.2.1.1 Episodio eruptivo en julio de 2009	122
2.3.3 DEFORMACION	132
2.3.4 FISICOQUIMICA	132
2.3.5 ACTIVIDAD SUPERFICIAL	133
2.3.6 CONCLUSIONES	134
2.4 VOLCAN CUMBAL	135
2.4.1 RED DE VIGILANCIA	135
2.4.2 SISMOLOGIA	138
2.4.3 DEFORMACION	143
2.4.4 ACTIVIDAD SUPERFICIAL	144
2.4.5 CONCLUSIONES	144
2.5 BIBLIOGRAFIA	146
2.6 PERSONAL PARTICIPANTE	146



TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1.1	7
Tabla 2.1.2	8
Tabla 2.1.3	9
Tabla 2.1.4	11
Tabla 2.1.5	12
Tabla 2.1.6	13
Tabla 2.1.7	54
Tabla 2.1.8	67
Tabla 2.1.9	67
Tabla 2.1.10	96
Tabla 2.2.1	108
Tabla 2.3.1	116
Tabla 2.4.1	136

FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1.1	Mapa de localización de algunas de las estaciones (sismómetros de corto periodo-CP y banda ancha-BA, acelerómetros, acústico, climática y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el segundo semestre de 2009.	7
Figura 2.1.2	Red para el monitoreo de la deformación volcánica del Galeras, conformada por cinco inclinómetros electrónicos, que funcionaron en el segundo semestre de 2009.	8
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 segundo semestre de 2009.	9
Figura 2.1.4	Mapa de localización de la cámara web que funcionó durante el segundo semestre de 2009. Esta cámara se encuentra instalada en la sede del OVSP en Pasto.	10
Figura 2.1.5	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009 (julio a diciembre de 2009), 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 enero de 2009 a diciembre de 2009. 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 enero de 2009 a diciembre de 2009. 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 primer semestre del 2009 en comparación con el segundo semestre de 2009. Arriba, la ocurrencia de sismos y abajo, la energía sísmica liberada.	14
Figura 2.1.9	Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el primer semestre de 2009 (izquierda) y el segundo semestre de 2009 (derecha).	15
Figura 2.1.10	Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y acumulado de sismos LP (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	16
Figura 2.1.11	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	17
Figura 2.1.12	Histograma de número diario de episodios TRE (arriba) y acumulado de episodios TRE (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	18
Figura 2.1.13	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos TRE (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	19
Figura 2.1.14	Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y acumulado de sismos HYB (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	20
Figura 2.1.15	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	21
Figura 2.1.16	Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y acumulado de sismos VT (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	22
Figura 2.1.17	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	23
Figura 2.1.18	Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el segundo semestre de 2009. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2 Km.	24
Figura 2.1.19	Relaciones porcentuales por rangos de profundidad (izquierda) y por rangos de magnitud	24

	local (derecha) para los sismos VT localizados durante el segundo semestre de 2009.	
Figura 2.1.20	Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestre de 2009. En la gráfica superior se muestra las latitudes y en la inferior las longitudes.	25
Figura 2.1.21	Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestre de 2009. En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes.	26
Figura 2.1.22	Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del evento LP (pseudo-tornillo) registrado en las estaciones Anganoy (arriba) y Cufiño (abajo), a las 4:27 a.m. del 5 de julio de 2009.	27
Figura 2.1.23	Sismogramas (arriba) y espectros (abajo) para las estaciones Anganoy (ANGV), Urcunina (URCR), Cobanegra-3 (COB3), Cóndor (COND), Obonuco (OBVR) y Nariño-2 (NAR2), del evento tipo LP ocurrido a las 8:45 p.m. del 5 de julio de 2009; el cual fue el más energético presentado ese día.	28
Figura 2.1.24	Sismograma, espectrograma y espectro del episodio de TRE registrado por la estación Anganoy (sismómetro de corto periodo ubicado a 0,9 Km al este del cráter principal) a las 8:30 a.m. del 9 de julio de 2009.	29
Figura 2.1.25	Sismograma (arriba), espectro (en medio) y espectrograma (abajo) del evento Pseudo-Tornillo registrado el 24 de julio de 2009, a las 00:47 a.m. en la estación base de clasificación (Anganoy).	29
Figura 2.1.26	Sismograma y espectro de frecuencia del tornillo de agosto 8 a las 8:49 p.m.	30
Figura 2.1.27	Sismograma y espectro de frecuencia del tornillo de agosto 9 a las 9:57 p.m.	31
Figura 2.1.28	Sismograma del episodio de tremor armónico, registrado el 10 de agosto de 2009 entre la 1:48 a.m. y las 4:36 a.m., en la estación de banda ancha Cufiño (1,9 km ENE del cráter, 3800 m sobre el nivel del mar).	31
Figura 2.1.29	Sismograma y espectro de frecuencia de un pulso del episodio de tremor armónico de agosto 10, registrado entre las 2:47:44 y las 2:48:41 a.m.	32
Figura 2.1.30	Registro de sismos del día 19 entre las 7:00 a.m. y las 6:00 p.m. (parte superior izquierda); ejemplo de las señales superficiales previas (lado derecho) que precedieron al evento de las 2:42 p.m., que se resalta en la parte inferior de la figura con su espectro respectivo.	32
Figura 2.1.31	Sismograma, espectro en frecuencia y espectrograma, para la estación Anganoy del episodio de tremor registrado el día 19 de septiembre de 2009, a la 1:36 p.m.; y un segmento de este mismo evento donde se detallan las bajas frecuencias dominantes, particularmente, un pico en 1,3 Hz.	33
Figura 2.1.32	Sismograma del 22 al 24 de septiembre del 2009. Se observa que antes del 23 de septiembre predominan los eventos relacionados con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico tipo TRE (1) y tipo LPS (2). A partir del 23 de septiembre, se observa la ausencia de episodios de tremor y la ocurrencia de eventos de bajo nivel energético tipo HYB (3).	34
Figura 2.1.33	Sismogramas, espectros y espectrogramas en frecuencia del evento tipo tornillo ocurrido el día 24 de septiembre a las 9:04 p.m., el cual fue registrado por seis de las estaciones de la red para la vigilancia del volcán Galeras.	35
Figura 2.1.34	Sismogramas, espectros y espectrogramas del evento tipo tornillo, ocurrido el día 28 de septiembre a las 00:39 a.m., el cual fue registrado claramente por tres de las estaciones de la red de vigilancia de Galeras.	35
Figura 2.1.35	Sismogramas de las estaciones Anganoy, Cufiño (banda ancha) y Calabozo; y registro del sensor acústico de Calabozo, para el episodio eruptivo registrado el 30 de septiembre de 2009, a las 9:14 a.m.	36
Figura 2.1.36	Señal del evento eruptivo del 30 de septiembre (9:14 a.m.) registrado por las estaciones de la red de vigilancia del volcán Galeras. En las estaciones de corto periodo ANGV, NAR2, URCR y COND, se observa la señal saturada.	37
Figura 2.1.37	Ondas acústicas de las erupciones del 24 de abril (erupción con la onda acústica de mayor nivel energético de las registradas durante el año) y del 30 de septiembre del 2009 (erupción con la onda acústica de menor nivel energético de las registradas durante el año). Comparativamente, la onda acústica de la erupción del 30 de septiembre de 2009 es aproximadamente 10 veces menor a la del 24 de abril de 2009.	37



Figura 2.1.38	Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del evento de tremor con segmentos de características armónicas del 6 de octubre a la 12:00 P.M., registrado por la estación Anganoy.	39
Figura 2.1.39	Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del segmento final (más armónicos de frecuencia) del evento de tremor con características armónicas del 6 de octubre a las 12:00 p.m., registrado por la estación Anganoy.	39
Figura 2.1.40	Formas de onda (izquierda) y espectros (derecha) del segmento más energético del evento de tremor con características armónicas del 6 de octubre a las 12:00 m., para la mayoría de estaciones que conforman la red de vigilancia volcánica de Galeras.	40
Figura 2.1.41	Sismograma y espectrograma del total (arriba) y un segmento (abajo) del episodio de tremor armónico registrado por la estación Anganoy; este sismo se presentó el día 26 de octubre, a la 1:22 a.m.	40
Figura 2.1.42	Sismograma del 26 de octubre al 3 de noviembre del 2009, se observa la ausencia de eventos tipo TRE a partir de la madrugada del 28 de octubre y el incremento en el nivel energético de los eventos LP, HYB y VT a partir del medio día del 29 de octubre.	42
Figura 2.1.43	Señal sísmica y espectro de Fourier del evento pseudo-Tornillo de noviembre 5 (1:44 am).	43
Figura 2.1.44	Señal sísmica y espectro de Fourier del evento tornillo de noviembre 6 (8:52 am).	43
Figura 2.1.45	Sismogramas (izquierda) y espectros (derecha), para las estaciones: Anganoy, Cráter-2, Urcunina, Cobanegra-3 y Nariño-2, del evento pseudo-tornillo registrado el 11 de noviembre a la 4:55 p.m.	44
Figura 2.1.46	Evolución temporal de la duración de los eventos tipo Tornillo, registrados entre el 5 y el 19 de noviembre de 2009 por la estación Anganoy.	44
Figura 2.1.47	Evolución temporal de los espectros en frecuencia (entre 0 y 15 Hz) de los eventos tipo tornillo (azul) y pseudo-tornillo (rojo), registrados entre el 5 y el 19 de noviembre de 2009 por la estación Anganoy.	45
Figura 2.1.48	Comparación de los niveles energéticos de las señales sísmicas asociadas con las erupciones de Galeras registradas entre el 2004 y el 2009.	46
Figura 2.1.49	Sismogramas y espectrogramas para las estaciones Anganoy, Cráter-2 y Calabozo, del evento eruptivo de Galeras registrado el 20 de noviembre de 2009 a las 8:37 p.m. El alto nivel energético de la señal sísmica superó el rango de detección de la instrumentación de la estación Anganoy, generando saturación en la amplitud.	47
Figura 2.1.50	Registros del evento eruptivo del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. para los sensores en la estación sísmica Calabozo de componente vertical (A), acústico ISLA14 (B) y acústico EENTECSA-4 (C).	48
Figura 2.1.51	Imágenes captadas por la cámara web ubicada en la sede del OVSP de las manifestaciones en superficie del evento eruptivo registrado el 20 de noviembre a las 8:37 p.m.	49
Figura 2.1.52	Sismograma de la estación Anganoy entre el 20 y 23 de noviembre de 2009. Luego de la erupción explosiva del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. (cuyo inicio se resalta con el cuadro amarillo), se presentó un enjambre de sismos volcánicos que de manera gradual fueron disminuyendo en número y en nivel energético.	50
Figura 2.1.53	Sismograma y espectro de Fourier del episodio de tremor espasmódico de diciembre 2 de 2009 a las 5:04 a.m.	52
Figura 2.1.54	Sismograma y espectro de Fourier del sismo híbrido de diciembre 10 a las 3:38 a.m.	52
Figura 2.1.55	Sismograma y espectro de Fourier del sismo LP de diciembre 21 a las 2:45 p.m.	53
Figura 2.1.56	Sismograma y espectro de Fourier del sismo LP de diciembre 21 a las 2:45 p.m.	53
Figura 2.1.57	Sismograma y espectro de Fourier del evento Tornillo de diciembre 23 a las 9:30 a.m.	54
Figura 2.1.58	Comportamiento de la duración, amplitud y frecuencia dominante de los Tornillos de diciembre de 2009.	55
Figura 2.1.59	Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Cráter, entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.	56
Figura 2.1.60	Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Peladitos entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.	57



Figura 2.1.61	Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Calabozo entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.	57
Figura 2.1.62	Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Huairatola entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.	58
Figura 2.1.63	Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Cobanegra entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.	59
Figura 2.1.64	Comportamiento de la componente tangencial y radial de los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo. Las líneas verdes identifican los tres periodos: Primer periodo, entre el 3 de abril y 15 de julio de 2009, segundo periodo, 16 de julio a 14 de octubre de 2009; tercer periodo, 17 de octubre a 31 de diciembre de 2009.	59
Figura 2.1.65	Izquierda: vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos, Huairatola y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 3 de abril y el 16 de julio de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación. Derecha, Curva que se ajusta a los vectores resultantes obtenidos, utilizando el modelo de Mogi.	60
Figura 2.1.66	Vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 16 de julio y el 14 de octubre de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación.	60
Figura 2.1.67	Vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 15 de octubre y el 31 de diciembre de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación. Derecha, Curva que se ajusta a los vectores resultantes obtenidos, utilizando el modelo de Mogi.	61
Figura 2.1.68	Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS.	62
Figura 2.1.69	Flujo de SO ₂ de Galeras, medido con instrumentos Scan-DOAS y móvilDOAS. Julio a diciembre de 2009.	64
Figura 2.1.70	Columna de SO ₂ y recorrido de medida con móvilDOAS entre Santa Bárbara y Sandoná. Diciembre 30 de 2009.	64
Figura 2.1.71	Concentración de SO ₂ en la atmósfera a una altura de 5.000 m sobre el nivel del mar. Datos OMI, julio a diciembre de 2009.	65
Figura 2.1.72	Imagen satelital OMI de concentración de SO ₂ en la atmósfera a una altura de 5.000 m sobre el nivel del mar. Septiembre 30 de 2009, 2:39 p.m.	66
Figura 2.1.73	Volumen mínimo emitido por los eventos eruptivos registrados en el 2009, el 24 de abril se registraron 2 eventos eruptivos.	68
Figura 2.1.74	Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL350 (35000 pies, alrededor de 10,7 km sobre la cima volcánica) para una primera fase de dispersión, hasta las 9:45 a.m.	69
Figura 2.1.75	Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL600 (60000 pies, alrededor de 18,3 km sobre la cima volcánica) para una segunda fase de dispersión, hasta las 10:45 a.m.	69
Figura 2.1.76	Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL450 (45000 pies, alrededor de 13,7 km sobre la cima volcánica) para una tercera fase de dispersión, hasta las 4:45 p.m.	70
Figura 2.1.77	Efectos de la caída de ceniza emitida por el evento eruptivo del 30 de septiembre del 2009, en diferentes sectores al noroeste de Galeras: Santa Bárbara (superior izquierda), El Ingenio (superior derecha), Sandoná (inferior izquierda) y vía a La Florida (inferior derecha).	71
Figura 2.1.78	Mapa de distribución de caída de cenizas (<i>isópacas</i>) del evento eruptivo del 30 de septiembre. En la tabla arriba a la derecha, se indican los espesores, las áreas y los volúmenes calculados para cada isópaca, junto con el volumen total estimado, cercano a los dos millones de metros cúbicos de material emitido.	72
Figura 2.1.79	Detalle del mapa de distribución de caída de cenizas (<i>isópacas</i>) del evento eruptivo del 30 de septiembre. En la tabla arriba a la derecha, se indican los espesores, las áreas y los volúmenes calculados para cada isópaca, junto con el volumen total estimado, cercano a los dos millones de metros cúbicos de material emitido.	73
Figura 2.1.80	Mapa de de tamaño máximo de grano del material depositado (<i>isoplefas</i>) del evento eruptivo	74

	del 30 de septiembre.	
Figura 2.1.81	Detalle del mapa de tamaño máximo de grano del material depositado (<i>isopletras</i>) del evento eruptivo del 30 de septiembre.	75
Figura 2.1.82	Mapas de dispersión de cenizas de la erupción de Galeras del 20 de noviembre a las 8:37 p.m., elaborados por VAAC con base en las imágenes del sensor satelital GOES-12. A) 9:15 p.m. B) 9:45 p.m. Las altitudes máximas de columna se expresan en unidades FL (<i>Flight Lines</i> : Líneas de Vuelo). Una FL equivale a aproximadamente 100 pies sobre la superficie terrestre. Las horas se expresan en UT (<i>Universal Time</i> , Tiempo Local menos 5 horas).	76
Figura 2.1.83	Secuencia de imágenes del satélite GOES-12 (canal infrarrojo, resolución de 4 km por píxel) en las que se observa la evolución de la columna de gases y cenizas (asociada al episodio eruptivo del volcán Galeras registrado a las 8:37 p.m. del 20 de noviembre de 2009), entre las 8:15 p.m. (previo a la erupción) hasta las 12:15 a.m. del día siguiente.	77
Figura 2.1.84	Imágenes térmicas de la columna eruptiva tomadas, desde la sede del OVSP, aproximadamente a los 10 minutos (A) y 30 minutos (B) después del inicio del evento eruptivo del 20 de noviembre, a las 8:37 p.m.	78
Figura 2.1.85	Zonas donde se tomaron muestras de la ceniza emitida en la erupción del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. A) Vía circunvalar al Galeras, cerca de la entrada al sector de Barranco (municipio de La Florida), a unos 7 km al nor-noroeste del cráter principal. B) Pista del Aeropuerto Antonio Nariño (municipio de Chachagüí), a 19,8 Km al nor-noreste del cráter volcánico.	78
Figura 2.1.86	Vista al microscopio de una de las muestras colectadas de las cenizas emitidas en la erupción de Galeras del 20 de noviembre de 2009. Muestra recogida en la escuela del corregimiento de Santa Rosa (municipio de Sandoná), localizada a 11,5 km al noroeste del cráter principal.	79
Figura 2.1.87	Mapa de isópacas para la erupción de Galeras del 20 de noviembre de 2009. La tabla arriba a la derecha indica las áreas efectivas, los volúmenes calculados para las isópacas de cada espesor estimado y el volumen total estimado.	80
Figura 2.1.88	Vista del cono activo de Galeras, observado en el sobrevuelo realizado el 12 de julio de 2009 en horas de las mañanas.	82
Figura 2.1.89	Detalle del cono activo del volcán Galeras, visto en el sobrevuelo del 13 de julio de 2009.	82
Figura 2.1.90	Emisión de gases, en pequeña cantidad, observada desde la población de Consacá el día 31 de julio.	83
Figura 2.1.91	Fotografía del cráter principal de Galeras tomada en el sobrevuelo del 23 de agosto a las 7:33 a.m., con el apoyo de la FAC. Se identifican los principales focos de emisión.	84
Figura 2.1.92	Fotografías del cono activo de Galeras tomadas el día 14 de septiembre de 2009. Izquierda: Vista desde el sur oriente. Derecha: Detalle cráter principal.	85
Figura 2.1.93	Vista del volcán, desde la sede del OVSP, el 15 de septiembre hacia las 4:53 p.m., luego de la fuerte lluvia ocurrida.	85
Figura 2.1.94	Vista del volcán, desde la sede del OVSP, el 16 de septiembre a las 6:19 a.m. (izquierda) y a las 6:53 a.m. (derecha).	85
Figura 2.1.95	Fotografía de una parte de la columna de emisión (resaltada por la línea inferida) asociada a la erupción del 30 de septiembre; tomada a las 9:15 a.m., desde la sede del OVSP, ubicado a 11,8 km al sureste del cráter principal del volcán Galeras.	86
Figura 2.1.96	Columna eruptiva asociada a la erupción de Galeras del 30 de septiembre de 2009, a las 9:14 a.m., como fue vista desde poblaciones del norte del área de influencia volcánica. Imágenes capturadas del video publicado por el usuario de YouTube <i>Alcaldía de Pasto</i> .	86
Figura 2.1.97	Columna de gases y cenizas asociada al episodio eruptivo del 30 de septiembre de 2009 (9:14 a.m.), como fue vista desde Berruecos, cabecera municipal de Arboleda (Nariño), ubicada a 39 km al nororiente de la cima volcánica. Fotografía tomada por el Señor Fabio Martínez.	87
Figura 2.1.98	Emisiones de gases volcánicos, como fueron registradas por la cámara <i>web</i> instalada en la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (ubicada a unos 11 km al Este del cráter principal). Izquierda: Emisión de gases volcánicos registrada el día 12 de octubre a las 4:57 p.m., la columna alcanza una altura aproximada de 650 m y se dirige hacia el norte. Derecha: Emisión de gases volcánicos registrada el día 12 de octubre a las 5:07 p.m., la columna alcanza una altura aproximada de 650 m y se dirige hacia el norte	87



Figura 2.1.99	Vista del volcán desde la sede del OVSP el 16 de octubre de 2009. Izquierda: Emisión de gases volcánicos, 16 de octubre 6:06 p.m. Derecha: Emisión de gases volcánicos, 16 de octubre 6:16 p.m.	88
Figura 2.1.100	Vista del volcán desde la sede del OVSP, las condiciones climáticas favorecieron la observación de la cima los días 20 (izquierda) y 23 (derecha) de octubre de 2009. Izquierda: Imagen del día 20 de octubre a las 7:13 a.m. Derecha: Imagen del día 23 de octubre a las 10:46 a.m.	88
Figura 2.1.101	Fotografías de emisiones observadas el 28 de octubre a las 5:47 p.m. (Izquierda) y 5:55 p.m. (derecha) desde la sede del OVSP ubicado al este-sureste del cráter principal de Galeras.	89
Figura 2.1.102	La cima de Galeras y detalles de la región del cono activo, vistos sobrevolando al norte del edificio volcánico, el 7 de octubre de 2009 en horas de la mañana.	89
Figura 2.1.103	Vista del volcán durante sobrevuelo del 16 de octubre a las 6:55 a.m.	90
Figura 2.1.104	Imágenes tomadas durante el sobrevuelo realizado el día 24 de octubre en horas de la mañana.	90
Figura 2.1.105	Imagen de la manifestación en superficie del evento eruptivo registrado el 20 de noviembre, captado por la cámara web ubicada en la sede del OVSP.	91
Figura 2.1.106	Imágenes tomadas durante reconocimiento por parte del personal del Ejército Nacional el día 25 de Noviembre (izquierda) y durante sobrevuelo realizado el día 26 de noviembre en horas de la mañana (derecha).	91
Figura 2.1.107	Vista del cráter de Galeras desde el occidente. Se aprecia que no hay salida de gases desde el interior del cráter principal.	92
Figura 2.1.108	Vista del cráter de Galeras desde la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto, al sector oriental de la ciudad. Imagen corresponde al día 8 de noviembre, a las 5:01 p.m.	93
Figura 2.1.109	Vista del helicóptero Hughes de la Fuerza Aérea Colombiana, en el sector de Chapalito donde cayó, luego de ser azotado por una ráfaga de viento, en el momento en que se disponía a aterrizar, luego del sobrevuelo de reconocimiento realizado en el área del volcán Galeras.	93
Figura 2.1.110	Emisión de gases, diciembre 3 de 2009, 6:45 a.m.	94
Figura 2.1.111	Emisión de gases vista desde el OVSP, diciembre 9 de 2009, 3:47 p.m.	94
Figura 2.1.112	Emisión de gases en el cono activo de Galeras, diciembre 17 de 2009, 6:43 a.m.	95
Figura 2.1.113	Emisión de gases vista desde el OVSP, diciembre 30 de 2009, 6:20 a.m.	95
Figura 2.1.114	Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 15300 pies sobre el nivel del mar, empleando la termocámara FLIR.	97
Figura 2.1.115	Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 15300 pies sobre el nivel del mar (a unos 600 metros sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. En esta imagen, las zonas en color verde indican temperaturas mayores a 20°C (isoterma).	97
Figura 2.1.116	Imagen térmica del cráter principal de Galeras, tomada en el sobrevuelo del 23 de agosto en horas de la mañana, identificando algunas anomalías; la mayor de ellas con una temperatura cercana a los 180 °C.	98
Figura 2.1.117	Imagen térmica de la zona centro-oriente del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar, empleando la termocámara. En esta imagen, los colores más claros indican temperaturas más altas, de acuerdo con la escala cromática de la derecha. La temperatura más alta fue de 180°C, en una pequeña zona al fondo del cráter principal.	98
Figura 2.1.118	Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar (a unos 430 m sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. En esta imagen, los colores más claros indican temperaturas más altas, entre 0 y 100°C (de acuerdo con la escala cromática de la derecha), mientras que las zonas en color verde indican temperaturas mayores a 20°C (isoterma).	99
Figura 2.1.119	Imagen térmica del cono activo de Galeras.	100
Figura 2.1.120	Imagen isoterma del interior del cono activo de Galeras.	100
Figura 2.1.121	Imágenes térmicas tomadas sobrevolando el costado occidental del edificio volcánico, a una altitud de 15500 pies (aproximadamente, 675 m sobre el nivel de la cima volcánica).	101
Figura 2.1.122	Imagen térmica volcán Galeras, vista del fondo del cráter principal. Los valores en grados	102

	centígrados indican la temperatura de las zonas señaladas.	
Figura 2.1.123	Imagen térmica del cráter de Galeras, tomada en el sobrevuelo del 26 de noviembre. Las zonas con colores más claros representan mayores valores de temperatura de acuerdo a la escala cromática ubicada a la derecha de la imagen. Una zona puntual cercana al cráter el Paisita alcanzó un valor de temperatura de 195° C, valores similares se encontraron hacia el fondo del cráter.	102
Figura 2.1.124	Imagen térmica del cono activo de Galeras, diciembre 3 de 2009, 6:45 a.m.	103
Figura 2.2.1	Imagen de la cima del volcán Doña Juana.	106
Figura 2.2.2	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2009.	108
Figura 2.2.3	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2009. 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.	109
Figura 2.2.4	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana.	109
Figura 2.2.5	Histograma de ocurrencia de los diferentes tipos de sismicidad volcánica, para el período comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	110
Figura 2.2.6	Sismogramas registrados por la componentes vertical (arriba) y norte-sur (abajo) de la estación Florida, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido, ocurrido el 18 de octubre a las 09:13 p.m.	111
Figura 2.2.7	Espectros de la componentes vertical (arriba) y norte-sur (abajo) de la estación Florida, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido, ocurrido el 18 de octubre a las 09:13 p.m.	111
Figura 2.2.8	Sismogramas de evento asociado a fracturamiento de material cortical registrado el 15 de septiembre a las 8:15 p.m. por las estaciones Florida y Lavas.	112
Figura 2.2.9	Componentes de inclinación radial (X) y tangencial (Y), junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	113
Figura 2.2.10	Componentes de inclinación radial (Y) y tangencial (X), junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	113
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.	115
Figura 2.3.2	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.	115
Figura 2.3.3	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2009.	117
Figura 2.3.4	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2009. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.	117
Figura 2.3.5	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral.	118
Figura 2.3.6	Sismogramas de las tres componentes en la estación Chaitán, del evento tipo VT ocurrido el 20 de julio de 2009 a las 6:36 p.m.	119
Figura 2.3.7	Sismogramas y espectros de las tres componentes en la estación Chaitán, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluidos al interior del sistema volcánico, ocurrido el 11 de julio de 2009 a la 1:38 a.m.	119
Figura 2.3.8	Sismogramas de las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Chaitán, del registro de un evento que podría relacionarse a dinámica de fluido al	120

	interior del sistema volcánico ocurrido el día 19 de octubre de 2009 a las 12:50 p.m.	
Figura 2.3.9	Espectros de las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Chaitán, del registro del evento que podría relacionarse a dinámica de fluido al interior del sistema volcánico ocurrido el día 19 de octubre de 2009 a las 12:50 p.m.	120
Figura 2.3.10	Sismograma de la componente vertical de la estación Chaitán, registrado el 1 de julio de 2009 entre las 8:00 a.m. y las 9:00 a.m. Con el óvalo de color naranja se resaltan los incrementos en el nivel de ruido o tremor de fondo del registro.	121
Figura 2.3.11	Sismograma de la estación Chaitán del 13 de septiembre entre las 6:59 a.m. y las 9:02 a.m. en el cual se observan señales que podrían asociarse a movimiento de fluido de fuente persistente.	121
Figura 2.3.12	Espectro estación Chaitán de uno de los pulsos observados en la figura 19, en el espectro se puede observar el dominio de las frecuencias bajas, característica de los eventos asociados a movimiento de fluidos.	122
Figura 2.3.13	Imagen de la zona de alteración hidrotermal (playa) en donde se aprecia el depósito, los gases emitidos y los visitantes (cortesía Sr. Oliver Oviedo).	123
Figura 2.3.14	Imagen de detalle del sitio colapsado, emanando gases (cortesía Sr. Oliver Oviedo).	124
Figura 2.3.15	Imagen de la Laguna Verde, los domos con actividad y la "playa", tomada en julio 12 de 2009 (cortesía Geo. Hugo Murcia).	124
Figura 2.3.16	Imagen aérea de la playa, la laguna y el domo activo (sector norte de la laguna), tomada en julio 13 de 2009, durante sobrevuelo efectuado por personal del OVSP con apoyo de la FAC. Con el círculo rojo se resalta la zona donde unos días después, se presentó el fenómeno eruptivo.	125
Figura 2.3.17	Imagen térmica infrarroja de detalle del sector norte del contacto entre el material de depósito de la erupción hidrotermal de julio de 2009 y las aguas de la Laguna Verde. Los puntos P1, P2, P4 y P5 están sobre las aguas de la laguna y los puntos P3 y P6 sobre la parte solidificada del depósito.	126
Figura 2.3.18	Imagen térmica infrarroja de detalle del sector de colapso y agrietamientos por donde se originó el proceso eruptivo de julio de 2009. Las temperaturas promedio máximas de las anomalías están entre 29 y 40 °C. Varios sectores presentan anomalías con temperaturas cercanas a los 19°C. En la parte inferior derecha de la imagen aparece una persona de pie como referente.	126
Figura 2.3.19	Imagen térmica infrarroja de los domos con actividad fumarólica e hidrotermal vistos desde el suroccidente. El punto AR01 corresponde al valor máximo promedio de la zona de contacto de los domos con la laguna verde y los puntos AR02, AR03 y AR04, a valores sobre las anomalías medidas sobre la superficie de los domos.	127
Figura 2.3.20	Columna de SO ₂ , medida con MovilDOAS en la playa de la Laguna Verde.	128
Figura 2.3.21	Detalles del material emitido durante el evento eruptivo hidrotermal de julio de 2009, que fluyó desde una zona de agrietamientos y colapso en la playa del sector noroccidental del cráter del volcán Azufral y entró en contacto con las aguas de la Laguna Verde.	129
Figura 2.3.22	Panorámicas aéreas del cráter del volcán Azufral desde el noroccidente, tomadas en diciembre 5 de 2006 (superior) y agosto 23 de 2009 (inferior) con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana en las que se puede observar las variaciones en los niveles de las aguas de la laguna, particularmente al costado norte.	130
Figura 2.3.23	Imagen de la zona de agrietamientos y colapsos en la playa del sector noroccidental del cráter del volcán Azufral por donde se originó el fenómeno eruptivo de julio de 2009.	131
Figura 2.3.24	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 12 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	132
Figura 2.3.25	Laguna Verde y Laguna Barrosa del volcán Azufral. Diciembre 9 de 2009 10:00 a.m.	133
Figura 2.3.26	El cráter del volcán Azufral, visto sobrevolando su zona norte. Se alcanza a observar parcialmente, la ladera nororiental del cráter, donde se aprecian signos de alteración hidrotermal (coloración blanquecina).	133
Figura 2.3.27	Imagen térmica del sector norte de la laguna cratérica, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar (680 m sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. De acuerdo con la escala cromática de la derecha (ajustada para efectos de visualización entre 1 y 28°C), las temperaturas más altas se registraron en esta zona, con	134

valores entre 25 y 30 °C).

Figura 2.4.1	Imagen del complejo volcánico Cumbal.	135
Figura 2.4.2	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2009.	137
Figura 2.4.3	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2009. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.	137
Figura 2.4.4	Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal.	138
Figura 2.4.5	Histograma de ocurrencia de los diferentes tipos de sismicidad volcánica, para el período comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	138
Figura 2.4.6	Porcentajes de ocurrencia sísmica por tipo de evento, para el segundo semestre de 2009.	139
Figura 2.4.7	Sismograma, espectro y espectrograma en la componente vertical de la estación Limones, el evento tipo Tornillo ocurrido el 2 de julio de 2009 a las 12:43 a.m. En el espectro se resaltan la frecuencia dominante de 1,43 Hz.	139
Figura 2.4.8	Sismograma, espectro y espectrograma en la componente vertical de la estación Limones, del evento tipo Tornillo ocurrido el 7 de julio de 2009, a la 1:59 p.m. En el espectro se resalta la frecuencia dominante de 1,75 Hz.	140
Figura 2.4.9	Sismogramas registrados por las componentes: vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Limones, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 01 de agosto de 2009 a las 02:03 p.m.	140
Figura 2.4.10	Espectros calculados para las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Limones, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 01 de agosto de 2009 a las 02:03 p.m.	141
Figura 2.4.11	Sismogramas registrados por las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Lavas, del evento tipo Tornillo ocurrido el 02 de octubre de 2009 a las 05:27 a.m.	141
Figura 2.4.12	Espectros calculados para las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Lavas, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 02 de octubre de 2009 a las 05:27 a.m.	142
Figura 2.4.13	Registro de la estación sismológica Limones de Banda Anchas componentes vertical (arriba), y espectro de esta señal, con un pulso de frecuencia alrededor de los 2.4 Hz, del evento Tornillo ocurrido el 12 de noviembre de 2009 a las 3:35 p.m.	142
Figura 2.4.14	Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Limones, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 13 de diciembre de 2009.	144
Figura 2.4.15	Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Limones, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.	144

RESUMEN

El segundo semestre de 2009 comenzó con la actividad volcánica en Nivel II ◆ (ERUPCIÓN PROBABLE EN TÉRMINOS DE DÍAS O SEMANAS) que se había establecido el 26 de junio de 2009 y estuvo marcado por la continuación en la ocurrencia de sismos relacionados con dinámica de fluidos similares a eventos que antecedieron algunas erupciones en Galeras (eventos tipo Tornillo y Pseudo-Tornillo) y bajas tasa de emisión de gases y de dióxido de azufre.

Hacia el 4 de agosto de 2009, la actividad de Galeras retornó a nivel III amarillo ■ (CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA), decisión que se tomó teniendo en cuenta que el sistema volcánico presentó mecanismos de liberación de los gases acumulados, reflejados por lapsos de ausencia de eventos tipo Tornillo y el registro de episodios de tremor y sismos pequeños superficiales, que hicieron que se disipen las sobrepresiones y que el sistema volcánico no alcance aún un punto crítico que pueda disparar un evento eruptivo explosivo.

Luego de un incremento de las señales asociadas con dinámica de fluidos y la presencia de señales que evidencian presencia de material magmático, se desencadenó el evento eruptivo registrado el 30 de septiembre de 2009, por lo cual la actividad de Galeras cambia a Nivel I ▲ (ERUPCIÓN INMINENTE O EN CURSO) y se cambia nuevamente a Nivel II el 1 de octubre de 2009, y tras un incremento en las señales asociadas con procesos de emisión de gases (con valores de flujo de dióxido de azufre SO_2 considerados como moderados a bajos) la actividad de galeras cambia a Nivel III el 6 de octubre de 2009.

Hacia el 30 de octubre de 2009, se evidencia una disminución notoria de sismicidad relacionada con procesos de emisión, además de presentar bajas tasas de emisión de SO_2 , por lo cual se decide cambiar la actividad de galeras a Nivel II. Tras el registro de eventos tipo Tornillo, el 20 de noviembre de 2009, la actividad de galeras cambia a Nivel I luego del evento eruptivo registrado en horas de la noche, el 21 de noviembre de 2009 se retorna a Nivel II, conservándose así hasta el 27 de noviembre de 2009, fecha en la cual la actividad de Galeras cambia a Nivel III y posteriormente vuelve a Nivel II el 9 de diciembre de 2009 luego de que las tasas de emisión de SO_2 fueran bajas, identificar anomalías térmicas en el fondo del cráter y presentarse nuevamente el registro de sismos tipo Tornillo. Hasta la fecha de cierre de este informe la actividad de galeras continúa en Nivel II

En este semestre y con respecto al semestre anterior, se resalta la disminución de los tipos de sismicidad que involucran movimiento de fluidos y es notable también el incremento del tipo de eventos que involucran tanto fractura de material cortical como movimiento de fluidos, de la misma forma para los eventos cuya génesis es el fracturamiento de material cortical. Se resalta también un cambio en los niveles de energía sísmica liberada.

Respecto a las variaciones de los inclinómetros, Cráter, Peladitos y Calabozo, se definieron tres periodos en los cuales coincidieron los principales cambios de los inclinómetros, definidos así: primer periodo, entre el 3 de abril y 15 de julio de 2009, segundo periodo, 16 de julio a 14 de octubre de 2009; tercer periodo, 17 de octubre a 31 de diciembre de 2009. Se resalta las variaciones



observadas en las componentes radial y tangencial del inclinómetro Calabozo, que posiblemente estuvieron asociadas con cambios en la actividad volcánica.

Por otra parte, del volumen mínimo del domo emplazado hacia septiembre de 2008, se estimó en 5'000.000 m³, y de acuerdo con los cálculos realizados del volumen mínimo emitido durante las diez erupciones registradas en 2009, este se encuentra alrededor de los 8'347.000 m³, de los cuales 2'467.000 m³ fueron expulsados por los dos eventos eruptivos del segundo semestre de 2009.

En el segundo semestre de 2009 se realizaron 12 sobrevuelos, en los que fue posible evidenciar que los principales focos de emisión fueron el cráter principal y los cráteres secundarios denominados como El Paisita, y Las Chavas, además, los puntos de emisión conocidos como Las Deformes. En estos sobrevuelos se tomaron imágenes térmicas que permitieron observar anomalías térmicas 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.

De acuerdo al comportamiento histórico e instrumental de Galeras, la presencia de un cuerpo magmático a manera de domo en el fondo del cráter, incrementa la posibilidad de que en el futuro se puedan generar nuevos eventos eruptivos explosivos.

En cuanto a los volcanes de Doña Juana, Azufral y Cumbal, se ha mantenido el monitoreo de la actividad, lo que ha permitido comenzar a establecer la línea base de la actividad de cada uno de ellos, tanto para conocer el tipo de sismicidad característica en cada volcán, como para plantear sus posibles escenarios de actividad futura. Por el momento, los tres volcanes mantienen **NIVEL VERDE (IV): "Volcán activo y comportamiento estable"**.



INTRODUCCIÓN

En el segundo semestre de 2009, el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS mantuvo sus labores de vigilancia de los volcanes activos del territorio colombiano. En este período de tiempo, el instituto, por medio del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP), continuó con el monitoreo permanente de los volcanes Galeras, Doña Juana, Azufral y Cumbal, con redes de monitoreo continuo y en tiempo real de sismología y deformación. Adicionalmente, para el volcán Galeras se implementó el monitoreo continuo de campos electromagnéticos, de muestreos de dióxido de Azufre, monitoreos de actividad superficial y cambios de temperatura en la zona del cráter volcánico, durante sobrevuelos de reconocimiento a la cima del volcán, trabajo realizado con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), a quienes INGEOMINAS expresa sus más sinceros agradecimientos. Para el desarrollo de este seguimiento aéreo de la actividad superficial, tanto en Galeras como en los volcanes de Doña Juana, Azufral y Cumbal, la FAC tiene a disposición del INGEOMINAS, un helicóptero Hughes 530 y ocasionalmente se ha contado con un helicóptero Huey equipado con una cámara Flir de alta tecnología.

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.

Para el trabajo que el OVSP-INGEOMINAS realiza en los volcanes, es importante resaltar el apoyo y colaboración de Instituciones como La Fuerza Aérea Colombiana (FAC), La Policía Nacional de Colombia, el Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) de Alemania, el United States Geological Survey (USGS) de los Estados Unidos y al Proyecto NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change) de la Unión Europea; a quienes INGEOMINAS expresa su agradecimiento.

En este boletín de actividad de actividad volcánica se han consignado los resultados obtenidos a partir del monitoreo y seguimiento de la actividad volcánica y la información del funcionamiento de los equipos que conforman las redes de monitoreo utilizados, las cuales tuvieron un desempeño satisfactorio, a pesar de las extremas condiciones climáticas reinantes en la cima de los volcanes y a las condiciones de intemperie en campo.

Cuando las condiciones atmosféricas lo permitieron, fue posible la observación de actividad superficial del volcán Galeras, además, se tomó una cantidad satisfactoria de videos y fotografías digitales desde el aire, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. El flujo de SO₂ en el aire se midió con un equipo MiniDOAS (DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy – Espectroscopia Óptica Diferencial de Absorción) escáner, en virtud de la vinculación de INGEOMINAS al proyecto internacional NOVAC (*Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change* – Red de Observación de Cambios Atmosféricos y Volcánicos).

Los datos y la información contenidos en este boletín son una guía de consulta preliminar que pueden servir como base para el desarrollo de estudios posteriores que requieran mayor detalle y



nivel de análisis, pero siempre respetando y citando la fuente primaria. Este boletín se publica en Internet, en la dirección electrónica: [http://intranet.ingehominas.gov.co/pasto/Boletines semestrales](http://intranet.ingehominas.gov.co/pasto/Boletines_semestrales)

A nivel digital, este informe se encuentra disponible en el servidor de archivos del Observatorio identificado como Chapacual, en la siguiente estructura:

\\Chapacual\Vigilancia\informes\informes finales\VIGILANCIA\Boletines semestrales\2009\bol II 09

Con el nombre de BOL_II_09_VOLCANES_NARIÑO.DOC



2. VOLCANES DE NARIÑO

2.1 VOLCÁN GALERAS

2.1.1 RED DE VIGILANCIA

Durante el segundo semestre de 2009, la red instalada para la vigilancia del volcán Galeras estuvo conformada por las siguientes estaciones:

- Ocho estaciones sismológicas telemétricas de corto periodo (3 triaxiales y 5 de componente vertical) (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.1). Las estaciones sísmicas de banda ancha Cráter y Cufiño salieron de funcionamiento. 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: Cráter-2 y Cóndor (repiten por Cruz de Amarillo); Calabozo (repite por Bruma); 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 el OVSP.
- Cinco inclinómetros electrónicos telemétricos (Tabla 2.1.2, Figura 2.1.2). La transmisión de los datos para cuatro de estos inclinómetros (Cráter, Peladitos, Huairatola, y Cobanegra) se realiza 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 (SO_2), 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 SO_2 , a través de mediciones efectuadas recorriendo la vía circunvalar al volcán Galeras.
- 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).

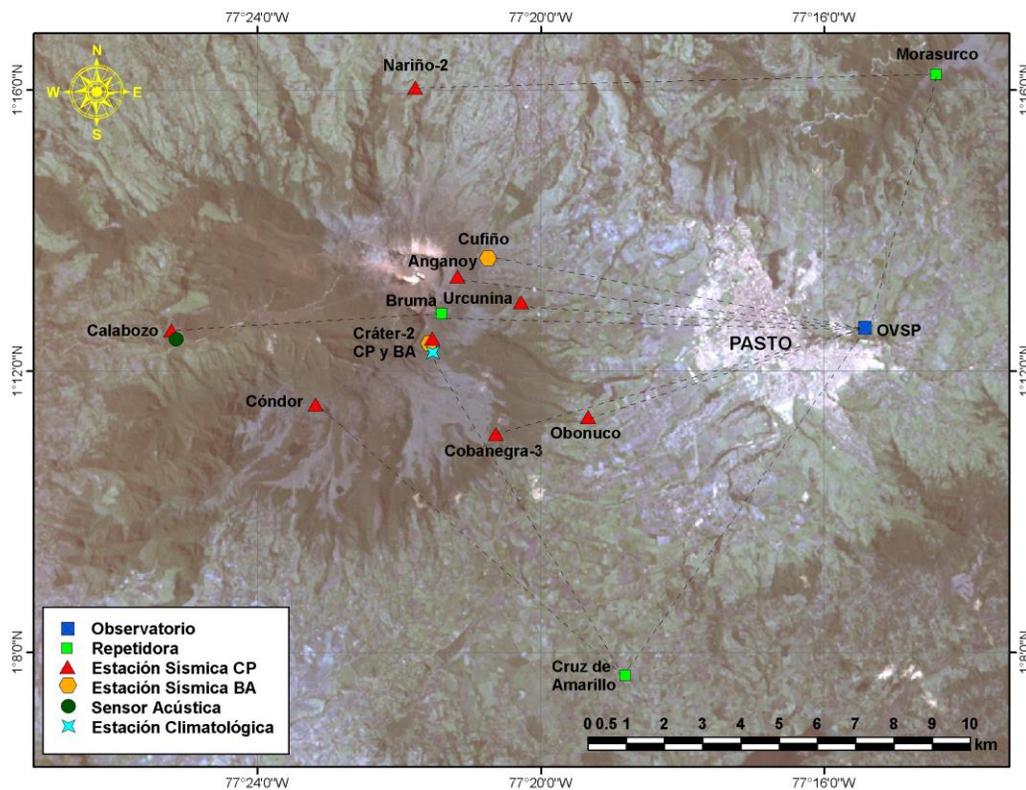


Figura 2.1.1. Mapa de localización de algunas de las estaciones (sismómetros de corto periodo-CP y banda ancha-BA, acelerómetros, acústico, climática y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el segundo semestre de 2009.

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 92% 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, inclinometría electrónica, mediciones de gas SO₂ de Galeras, acústica, video y térmica, durante el segundo semestre de 2009.

Tabla 2.1.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad sísmica del volcán Galeras durante el segundo semestre de 2009.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia al cráter (km)	Dirección respecto al cráter	Altitud (msnm)
Anganoy	Análogica	Corto Período	Vertical	0.84	ESE	4170
Cráter-2	Digital	Corto Período	Vertical	1.48	S	4048
Urcunina	Análogica	Corto Período	Triaxial	2.26	ESE	3494
Cobanegra-3	Análogica	Corto Período	Vertical	3.94	SSE	3625
Cónдор	Análogica	Corto Período	Vertical	4.86	SW	3985
Obonuco	Análogica	Corto Período	Triaxial	4.94	SE	3010
Nariño-2	Análogica	Corto Período	Vertical	5.00	NNW	2870
Calabozo	Digital	Corto Período	Triaxial	6.83	SSW	2353

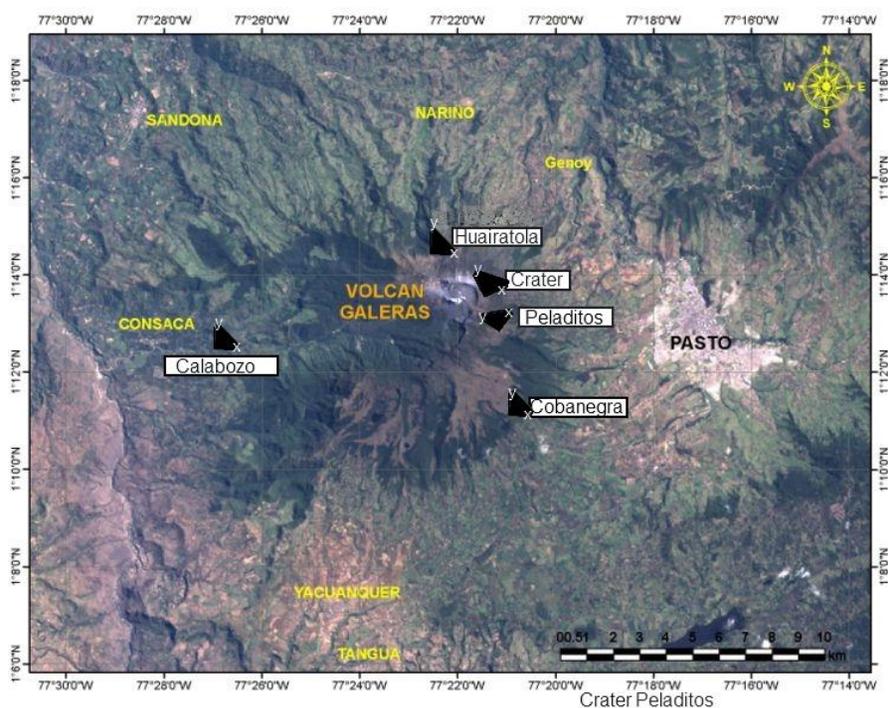


Figura 2.1.2. Red para el monitoreo de la deformación volcánica del Galeras, conformada por cinco inclinómetros electrónicos, que funcionaron en el segundo semestre de 2009.

Tabla 2.1.2. Inclinómetros electrónicos telemétricos que conformaron la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras durante el segundo semestre de 2009.

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

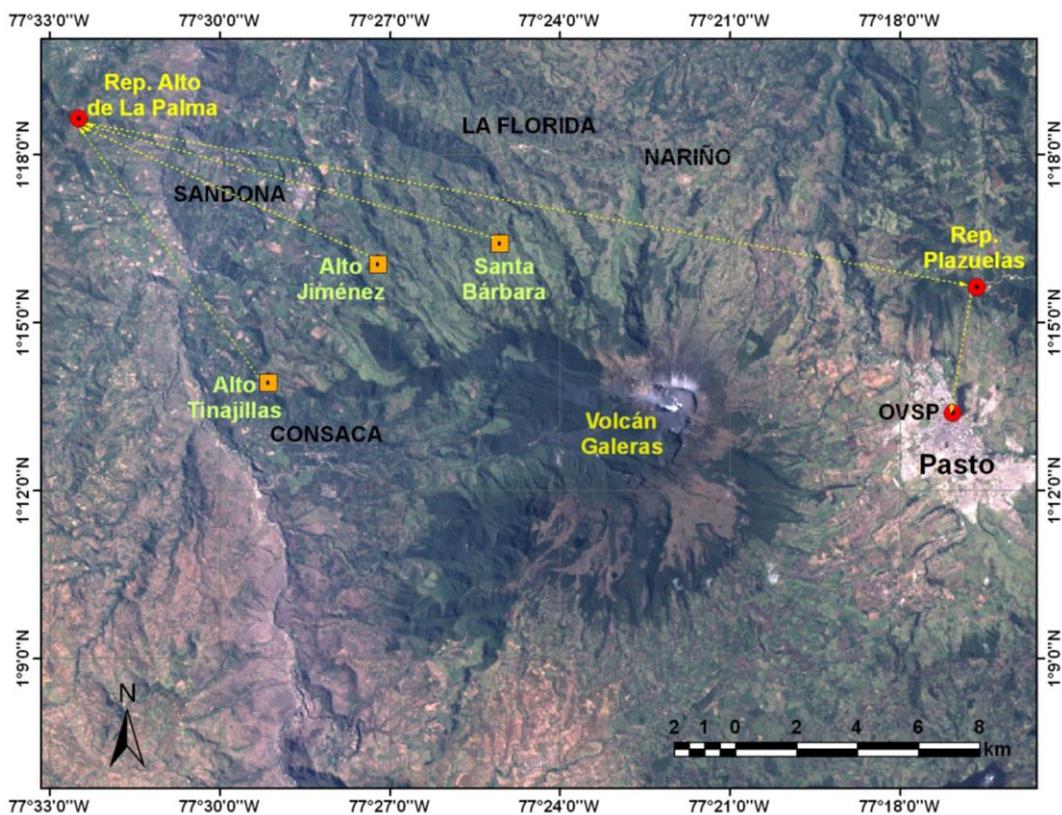


Figura 2.1.3. Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS del proyecto NOVAC para el monitoreo de emisiones de Dióxido de Azufre (SO₂), que funcionaron durante el segundo semestre de 2009.

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 segundo semestre de 2009.

Estación	Distancia al cráter (km)	angulo del scan (°)	Altura de referencia de la pluma* (m)	Dirección compás (° contra-azimut)	Ubicación respecto al cráter	Altitud (msnm)
Santa Bárbara	7.9	60	1600	131	NNW	2600
Alto Jiménez	10.8	90	1800	115	NE	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).

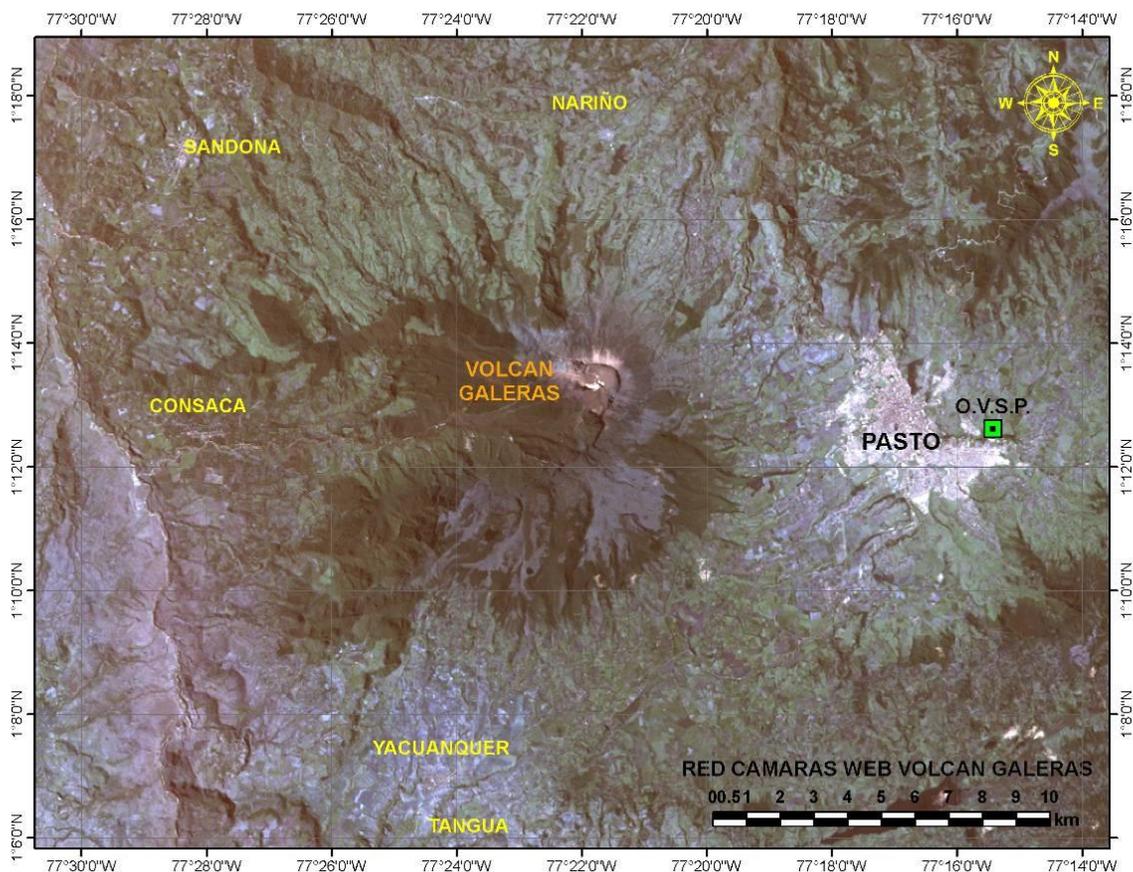


Figura 2.1.4. Mapa de localización de la cámara web que funcionó durante el segundo semestre de 2009. Esta cámara se encuentra instalada en la sede del OVSP en Pasto.

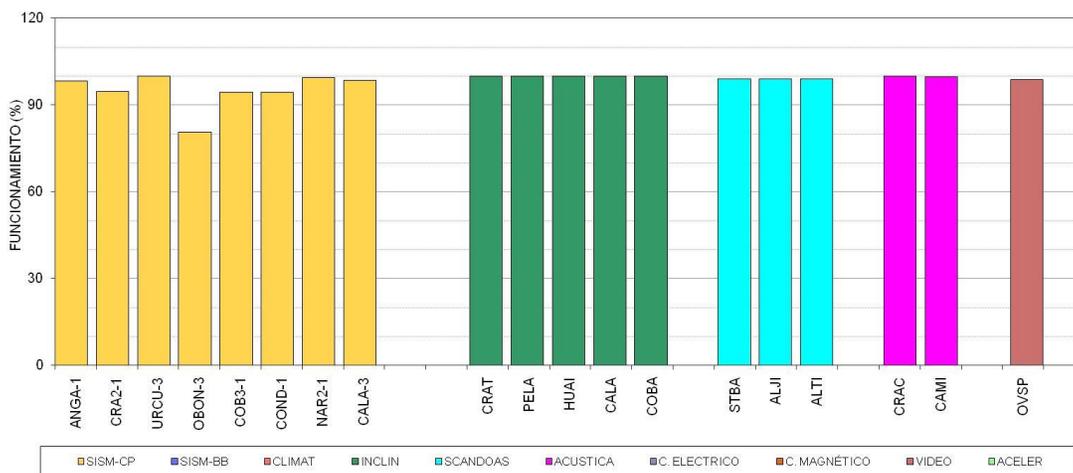


Figura 2.1.5. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009 (julio a diciembre de 2009), de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo del volcán Galeras.

Durante el segundo semestre de 2009, 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 período debido a bajo voltaje en las

baterías, desacople en la multiplexación de las señales y dificultades en el radio enlace, hurto de estaciones; 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 2.1.4.

Tabla 2.1.4. Principales aspectos relacionados con el funcionamiento y cambio de equipos en la red de Galeras, durante el segundo semestre de 2009.

FECHA	ESTACION	DESCRIPCIÓN
Julio	CHIGUACO-EM	La estación se encuentra fuera de funcionamiento. No se puede realizar mantenimiento debido al nivel de actividad del volcán ya que la estación se encuentra en zona de amenaza alta.
Agosto	CHIGUACO-EM	La estación se encuentra fuera de funcionamiento. No se puede realizar mantenimiento debido al nivel de actividad del volcán ya que la estación se encuentra en zona de amenaza alta.
Septiembre	CRATER-2	La estación sale de funcionamiento por daño debido a tormenta eléctrica.
Setiembre	CLIMATOLOGICA	El porcentaje de funcionamiento de esta estación en este mes es de 48%, y sale de funcionamiento por daño debido a tormenta eléctrica.
Octubre	CHIGUACO-EM	En visita realizada a la estación se detecta que esta fue robada y no se posee equipos para reinstalar.
Octubre	CUFIÑO	Sale por daño debido a tormenta eléctrica.
Octubre	COBA NEGRA	Se reinstala la estación en el nuevo sistema de protección, adicionalmente se instala una nueva estación de inclinometría electrónica.
Octubre	CRATER-2	Instalación de sensor de acústica.
Octubre	FRAILEJON	No se pudo instalar estaciones de campo eléctrico y campo magnético debido a cambio de nivel en la actividad de Galeras.

2.1.2 SISMOLOGÍA

Para el segundo semestre de 2009 se destaca el registro de dos erupciones de carácter explosivo. Con estas erupciones se completan diez en lo que va corrido del año, por tanto, 2009 se convierte en el año con mayor actividad eruptiva desde que Galeras se encuentra monitoreado. Entre los cambios más notorios respecto al primer semestre de 2009 está la notable disminución de los tipos de sismicidad que involucran movimiento de fluidos como son los sismos de Largo Periodo (LP - movimiento de fluidos de fuente transitoria) y tremor, (TRE - movimiento de fluidos de fuente persistente). Por otro lado, es notable el incremento de los eventos de tipo Híbrido (HYB - que involucran tanto fractura de material cortical como movimiento de fluidos) y de los eventos cuya génesis es el fracturamiento de material cortical (VT - Volcano-Tectónicos). (Figura 2.1.6 y Tabla 2.1.5).

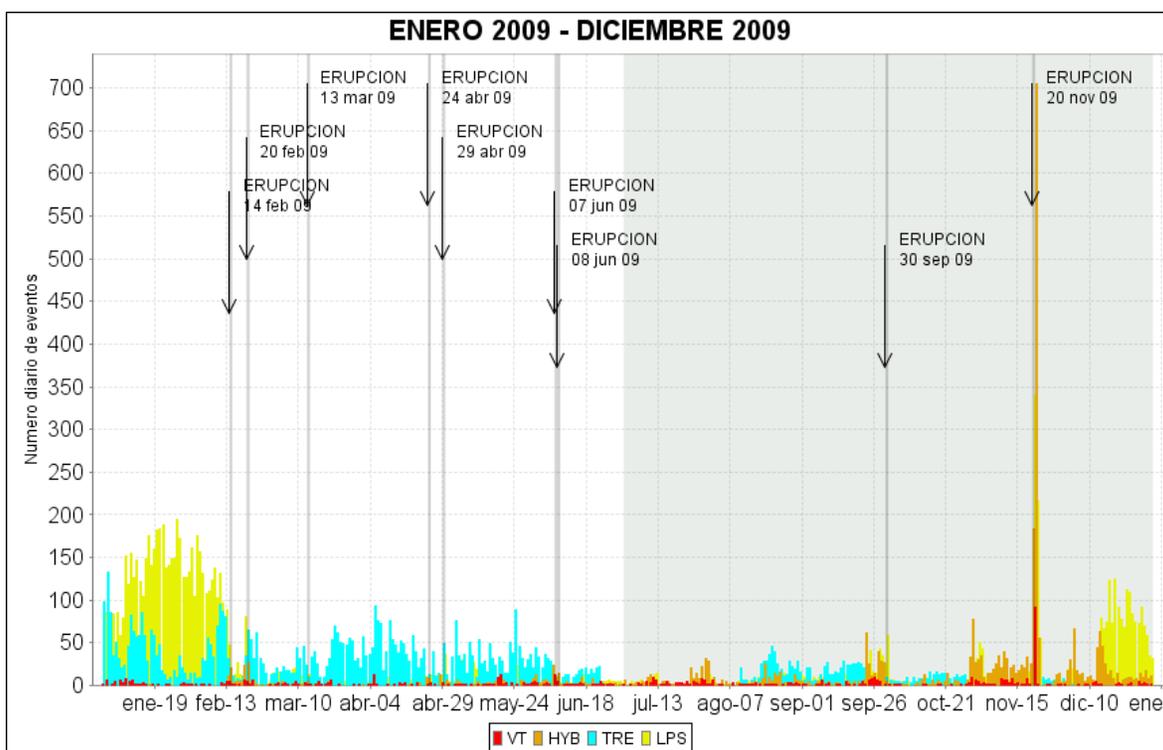


Figura 2.1.6. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, entre enero de 2009 y diciembre de 2009. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

Tabla 2.1.5. Número de sismos volcánicos por tipo, registrados en los periodos indicados.

TIPO DE SISMO	Semestre I de 2009	Semestre II de 2009
Largo Periodo (LP)	6.831	3.365
Híbrido (HYB)	387	2.864
Volcano-Tectónico (VT)	301	421
Tremor (TRE)	5.867	1.241
TOTAL	13.386	7.891

En cuanto a la energía sísmica liberada, se destaca el incremento en la sismicidad tipo LP días antes de los eventos eruptivos de este semestre y en los últimos 15 días del semestre, también se observa un incremento en la energía liberada por los sismos tipo VT, esto se debe a la ocurrencia de dos sismos que se reportaron como sentidos en la zona de influencia de Galeras durante el mes de diciembre. La sismicidad de tipo Tremor registró un descenso en su energía liberada respecto al semestre anterior (Figura 2.1.7, y Tabla 2.1.6).

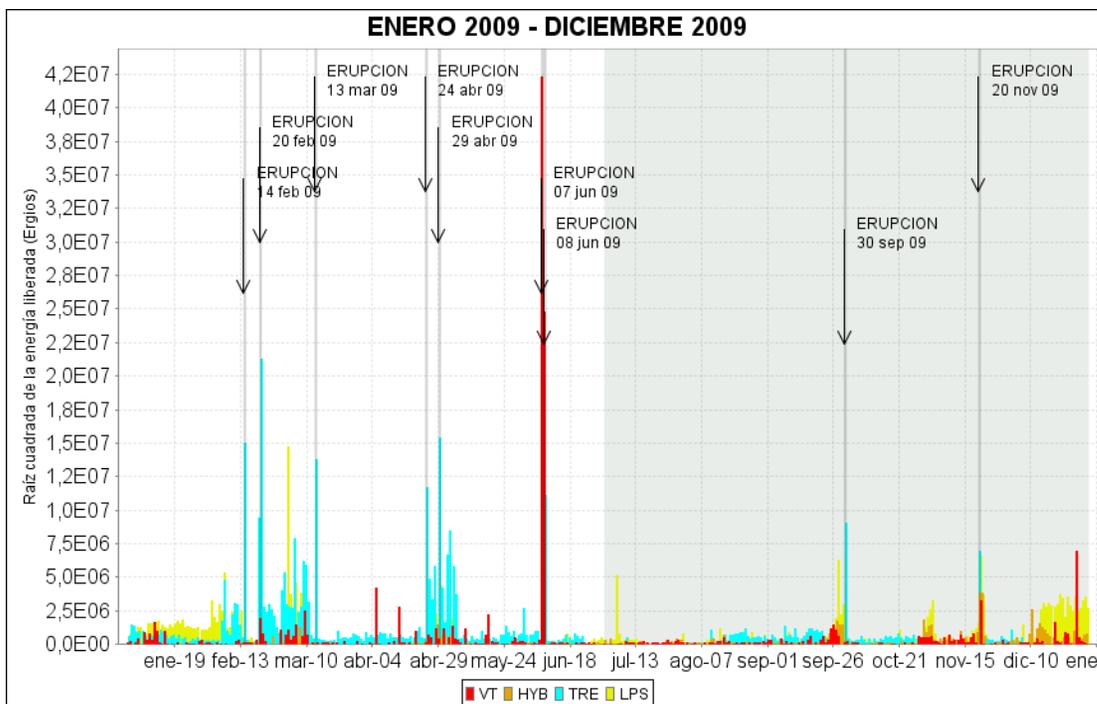


Figura 2.1.7. Histograma de energía diaria liberada, en términos de su raíz cuadrática, de eventos volcánicos por tipo, entre enero de 2009 y diciembre de 2009. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

Tabla 2.1.6. Energía sísmica liberada para cada tipo de evento, en los periodos indicados.

TIPO DE SISMO	Semestre II de 2008	Semestre I de 2009
Largo periodo (LP)	5,09E+14	3,57E+14
Híbrido (HIB)	9,49E+12	6,82E+13
Volcano-Tectónico (VT)	2,46E+15	7,44E+13
Tremor (TRE)	2,13E+15	1,58E+14
TOTAL	5,11E+15	6,58E+14

En cuanto a las variaciones en porcentaje de la ocurrencia y energía por tipo de evento, en relación con el semestre anterior, se muestran los histogramas de la figura 2.1.8. La distribución en porcentajes de número y energía de los diferentes tipos de sismicidad asumiendo el total de los sismos del semestre como el 100 %, se muestran en los diagramas de torta de la figura 2.1.9.

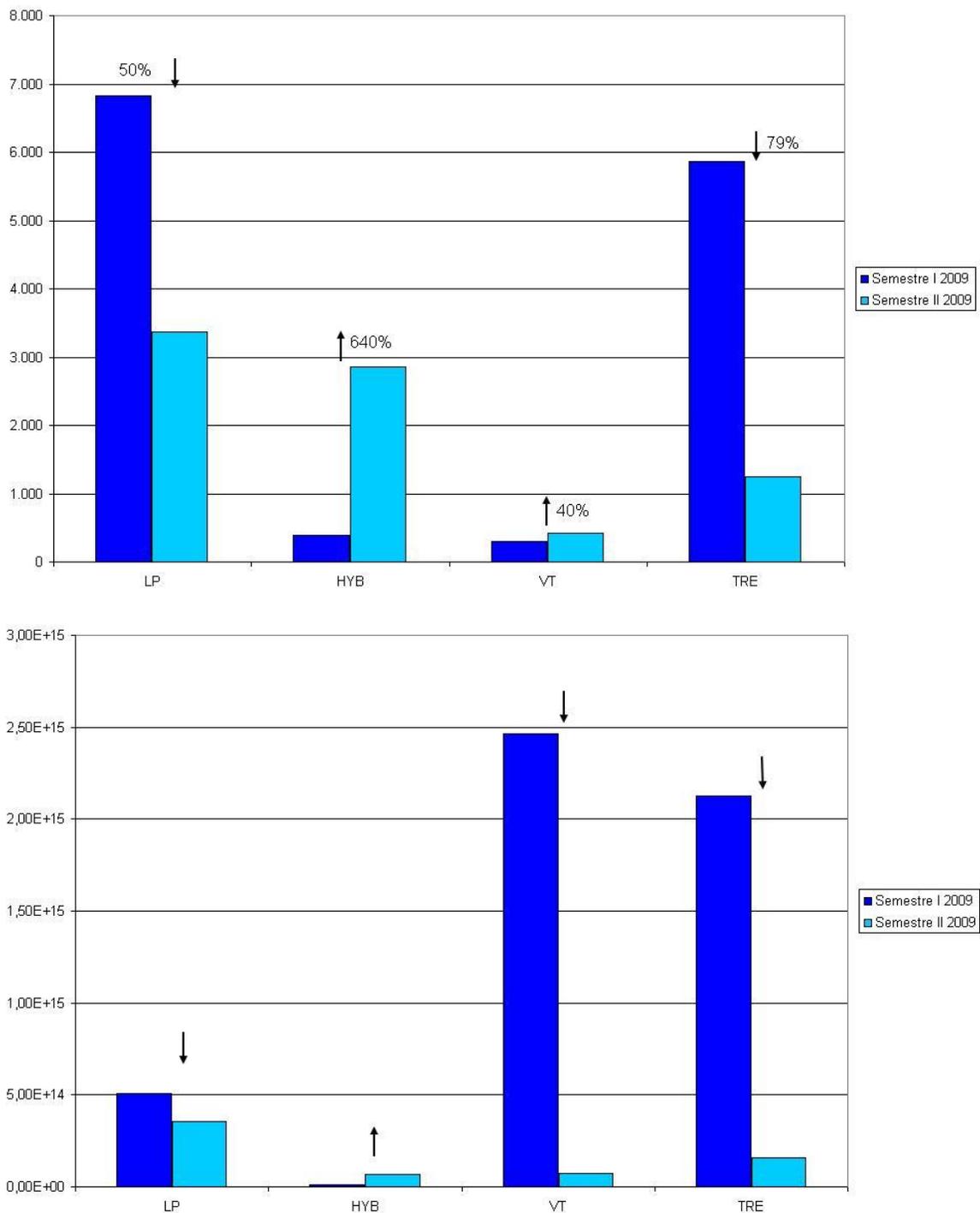


Figura 2.1.8. Relaciones porcentuales de la variación de la sismicidad del primer semestre del 2009 en comparación con el segundo semestre de 2009. Arriba, la ocurrencia de sismos y abajo, la energía sísmica liberada.

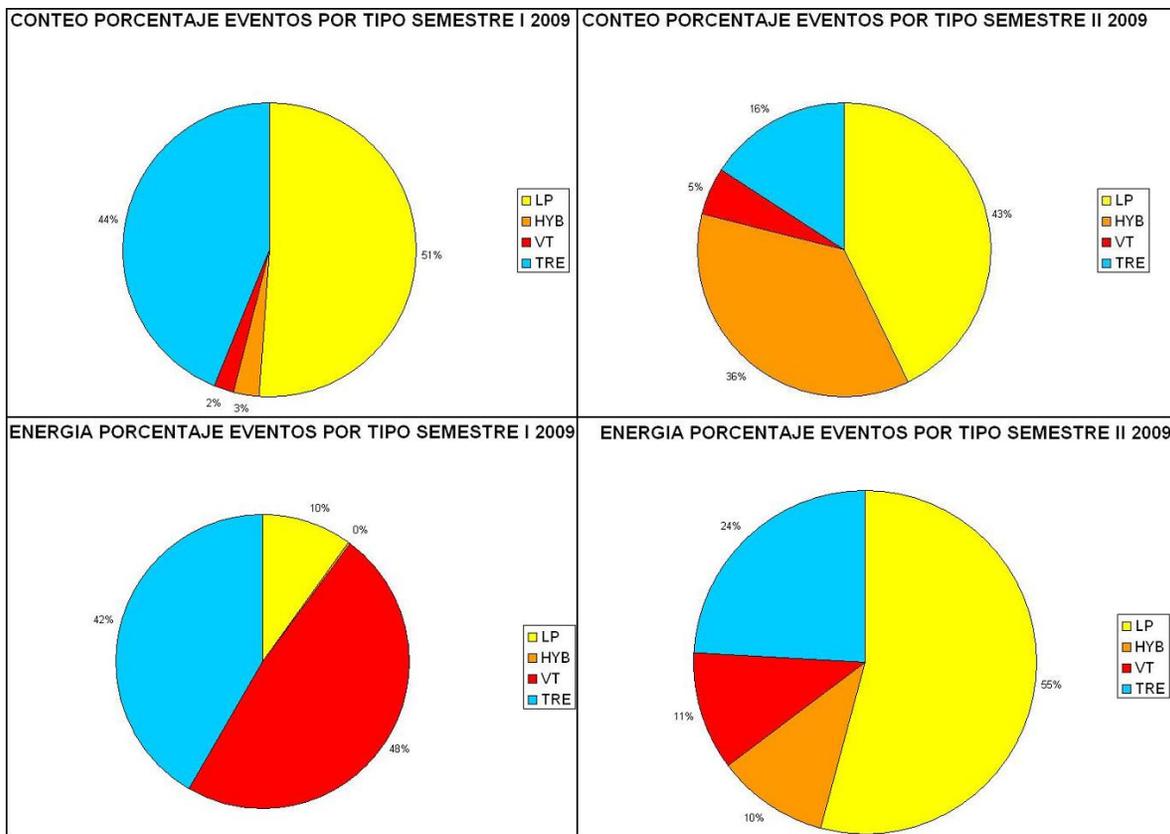
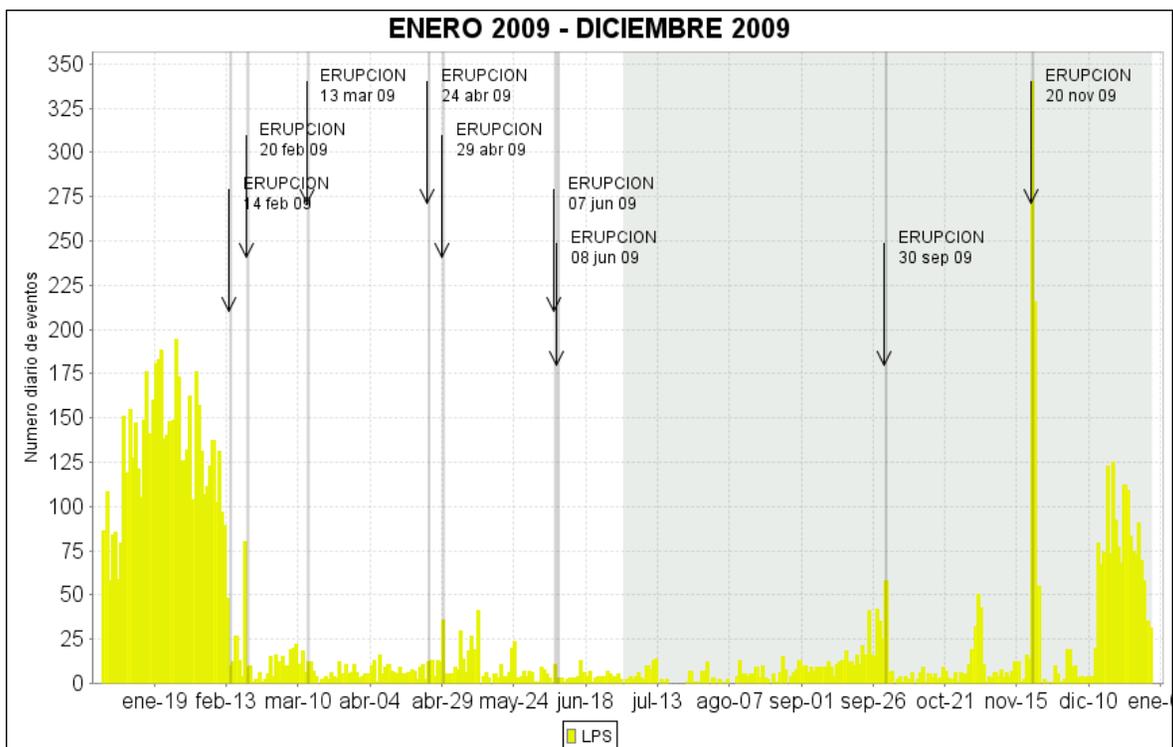


Figura 2.1.9. Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el primer semestre de 2009 (izquierda) y el segundo semestre de 2009 (derecha).

Las figuras 2.1.10 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.



ACUMULADO LP

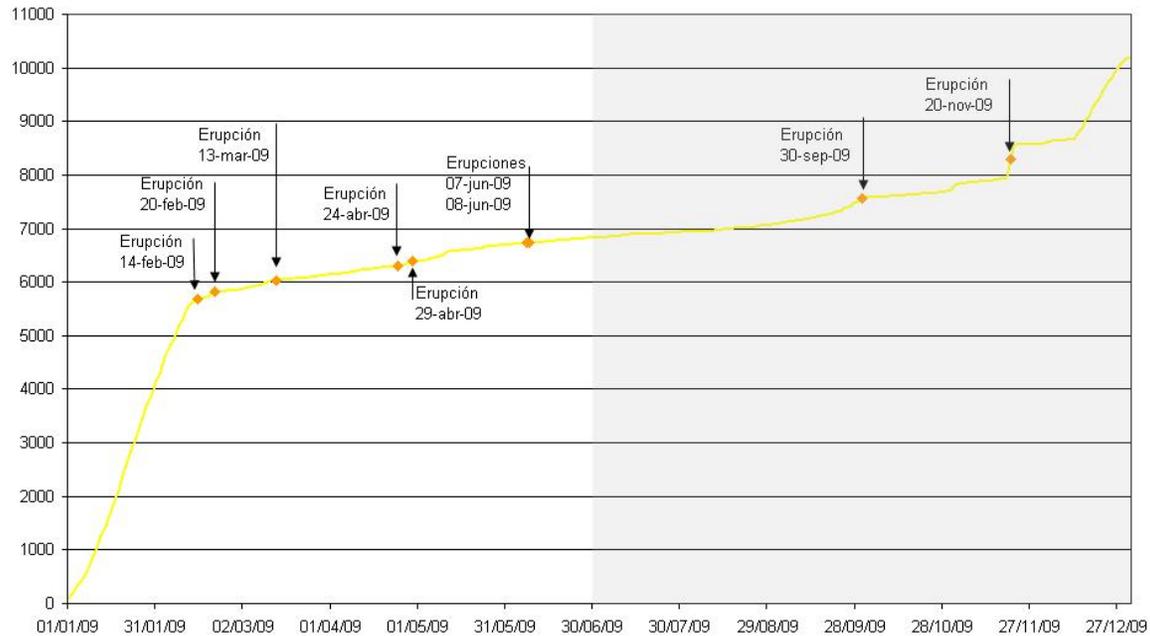


Figura 2.1.10. Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

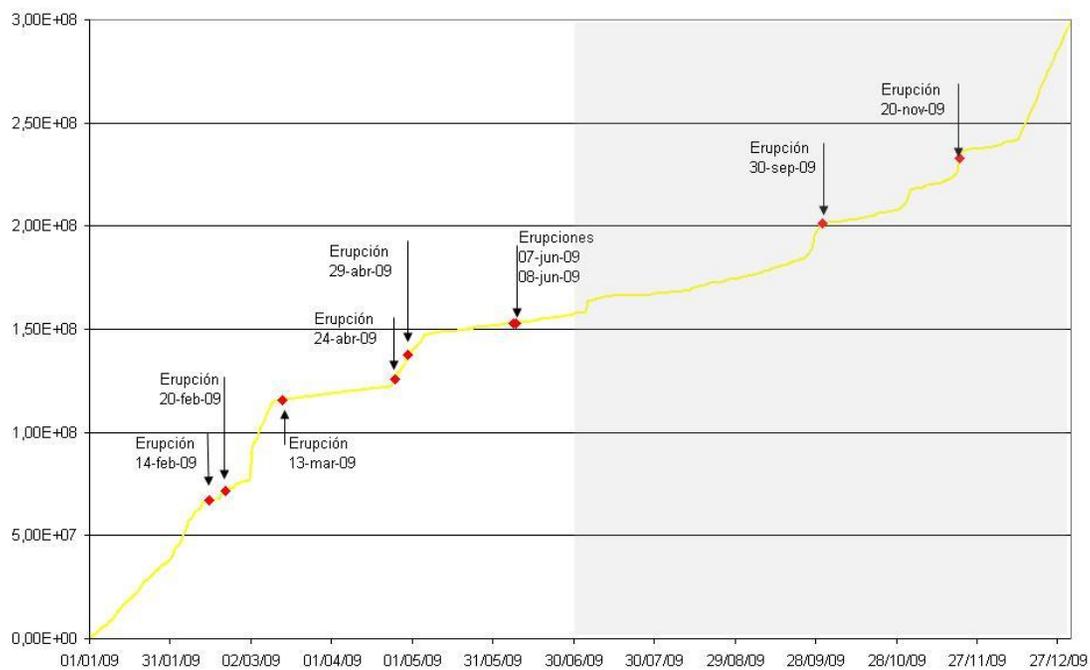
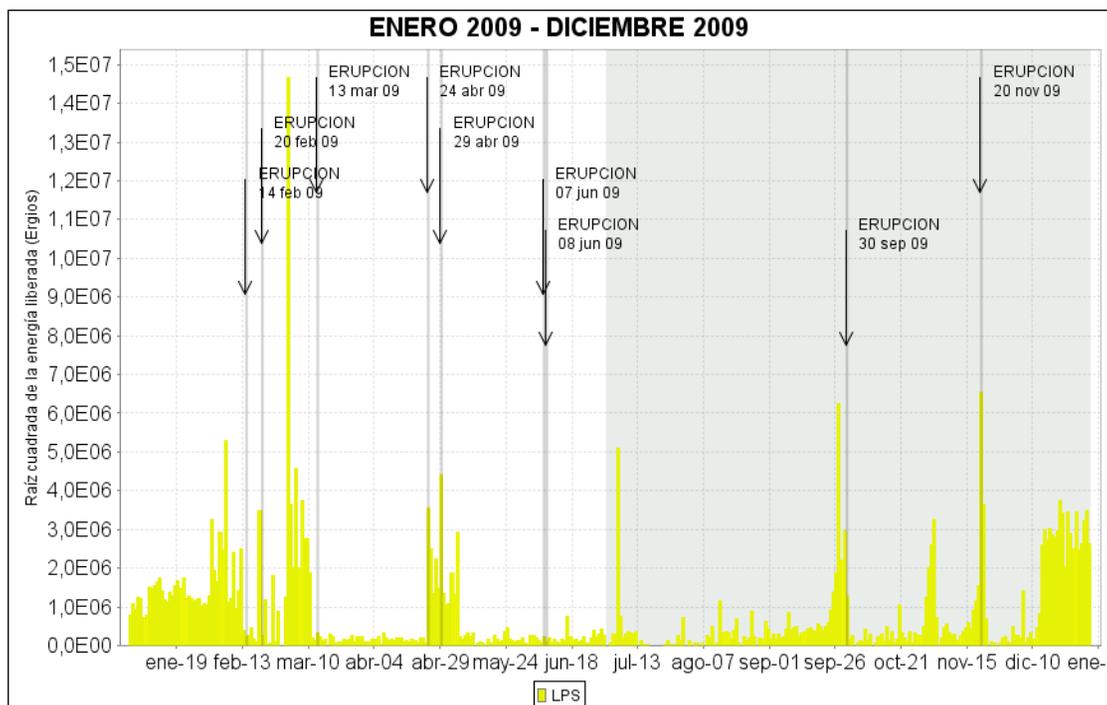
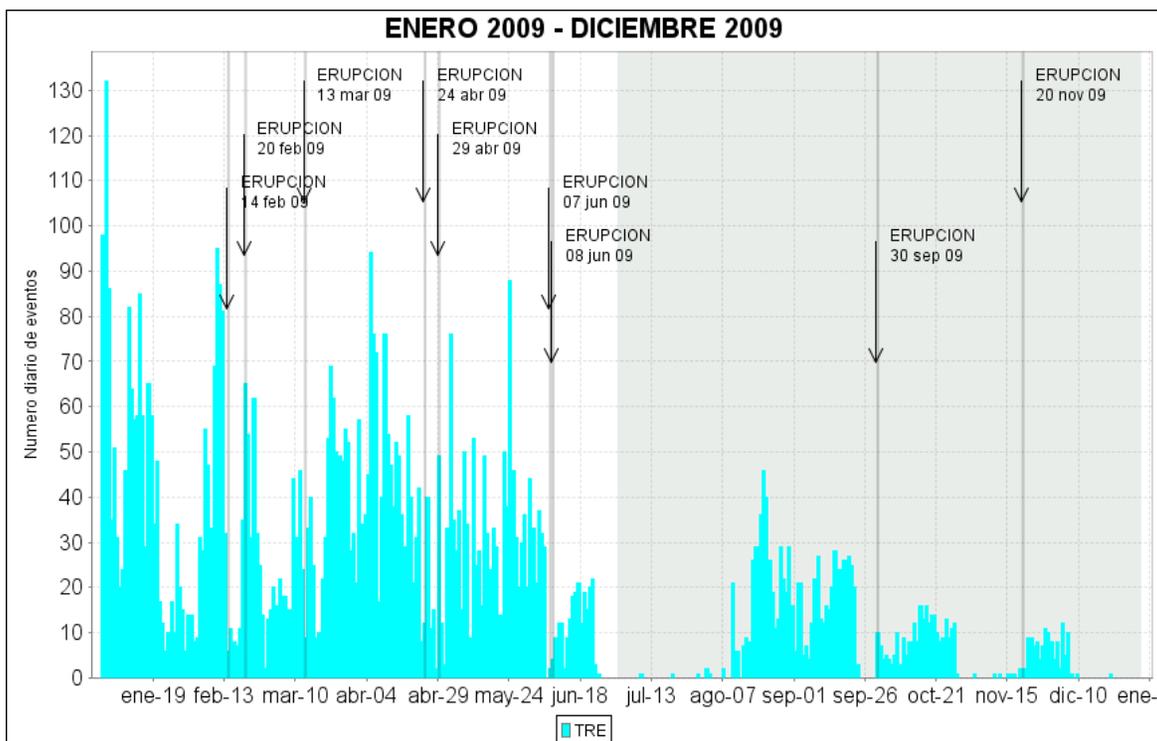


Figura 2.1.11. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.



ACUMULADO TRE

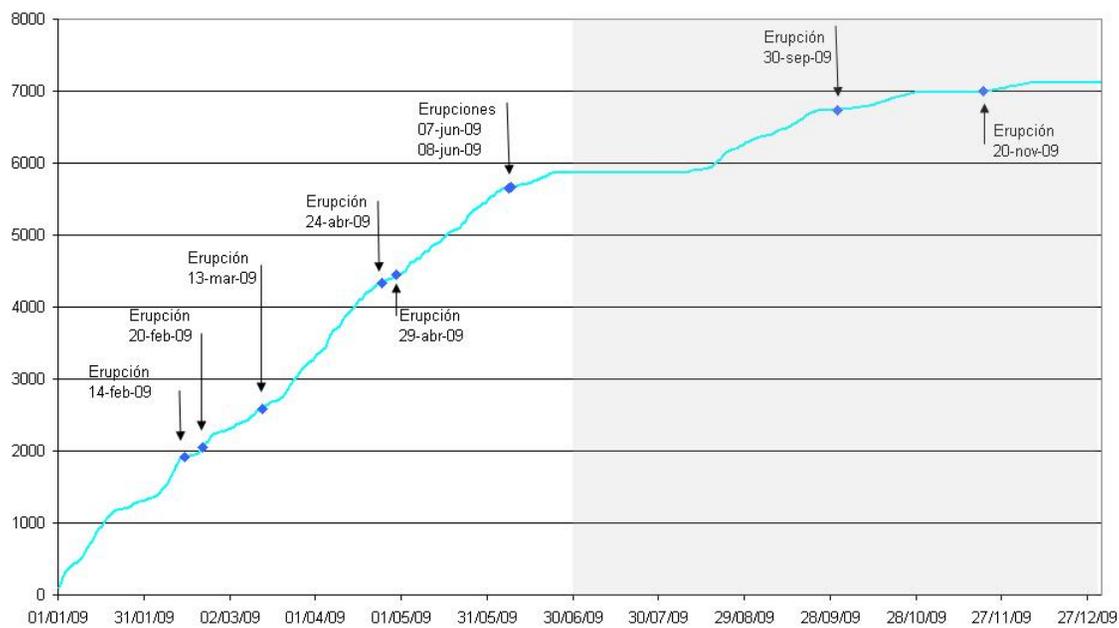


Figura 2.1.12. Histograma de número diario de episodios de TRE (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

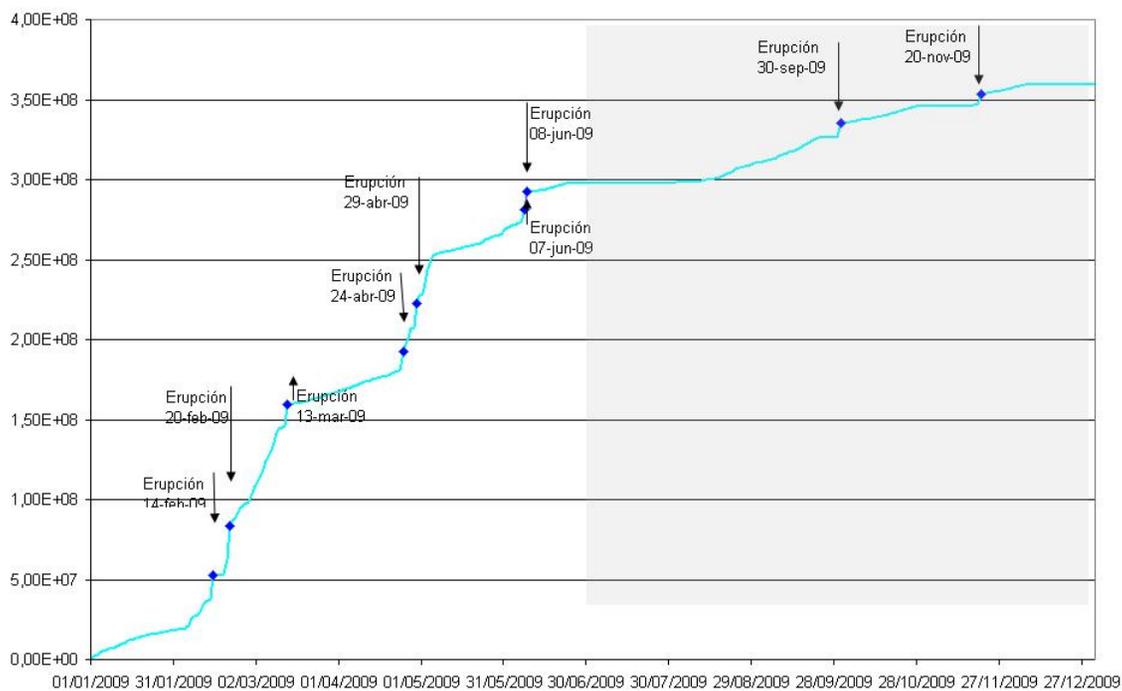
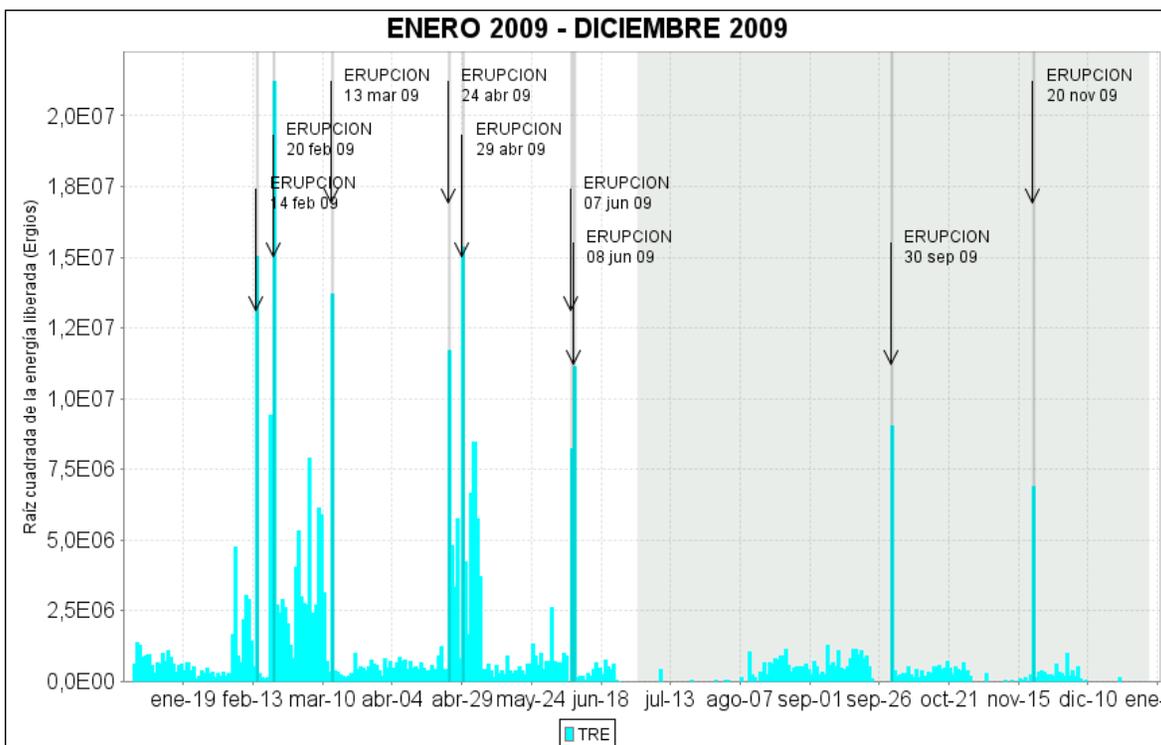
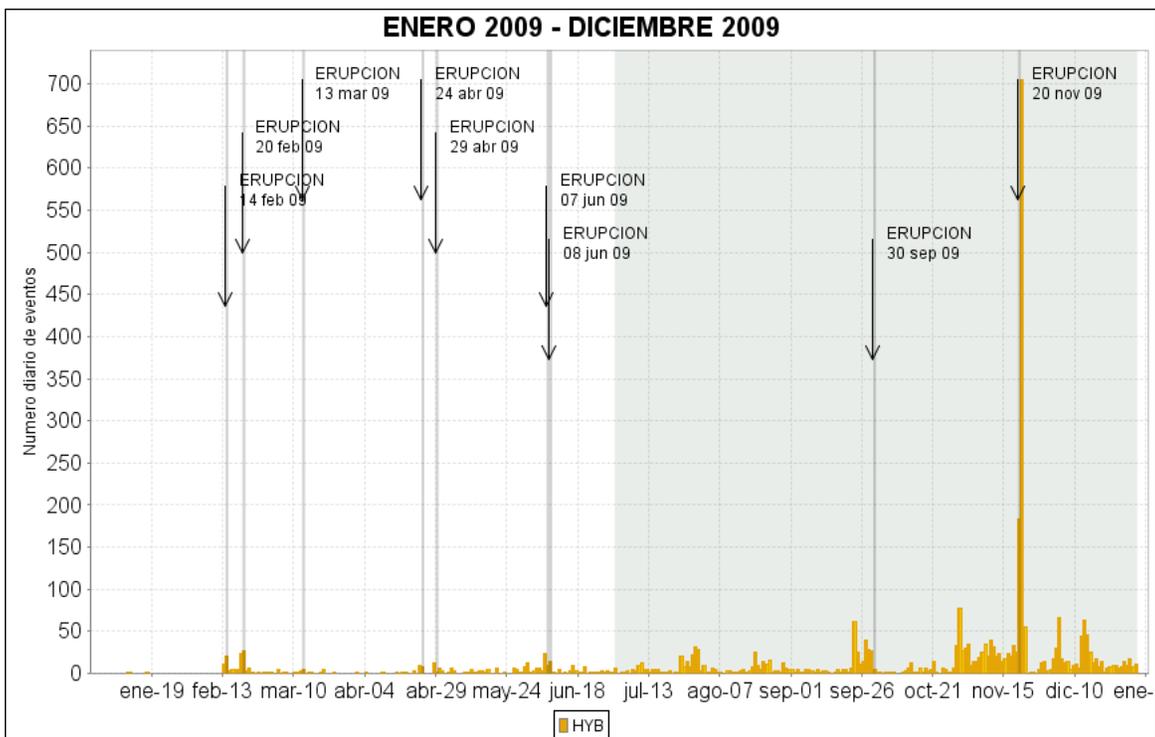


Figura 2.1.13. Histograma de energía sísmica liberada diaria de episodios de TRE (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.



ACUMULADO HYB

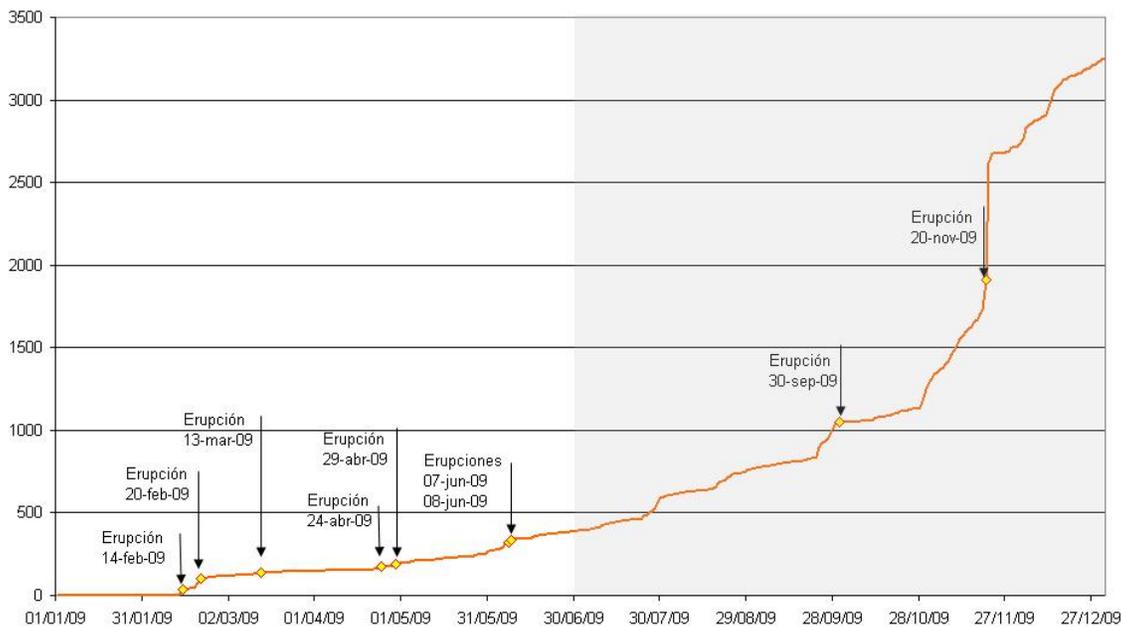


Figura 2.1.14. Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

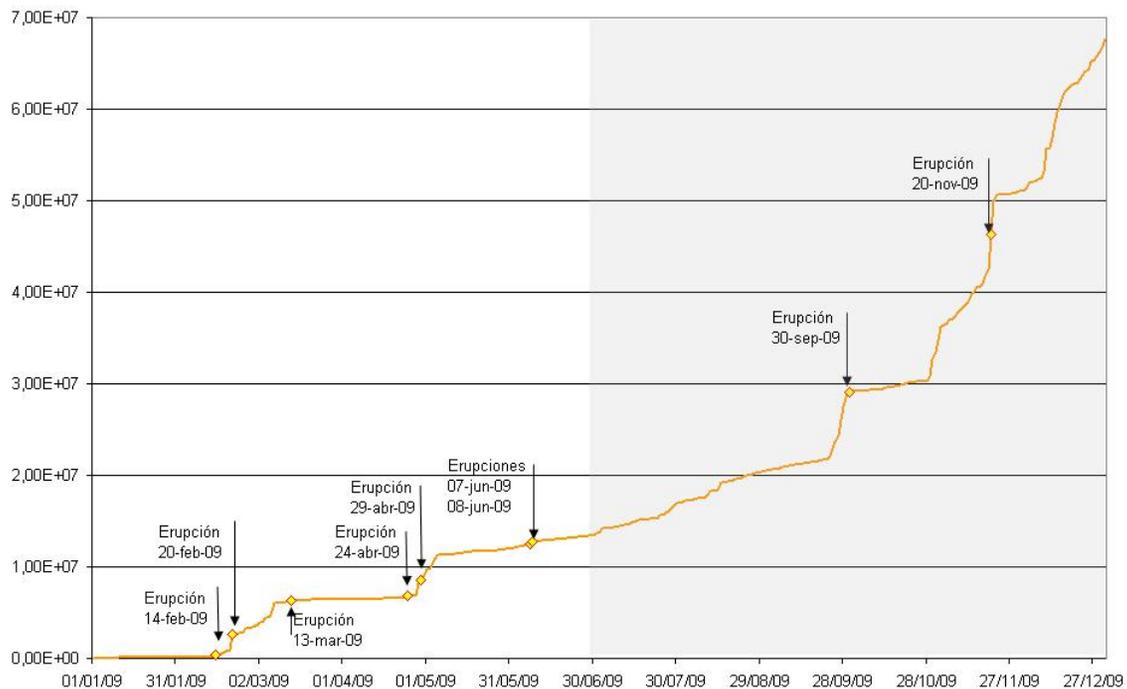
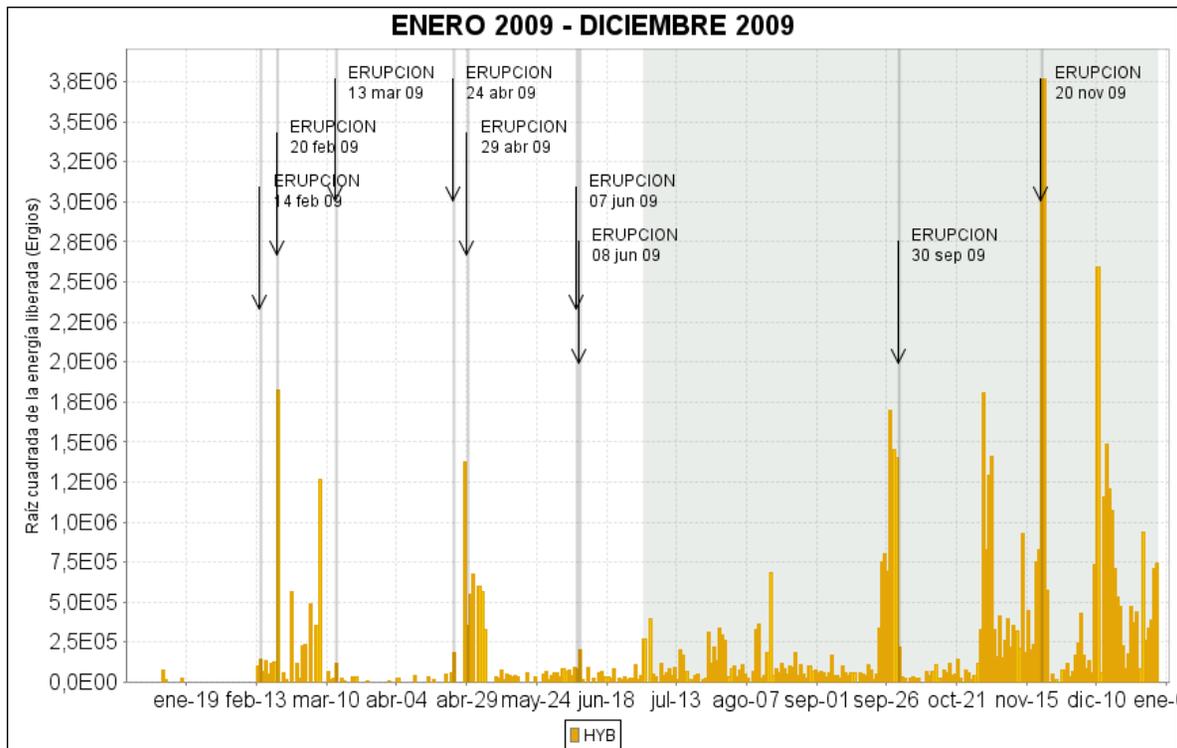


Figura 2.1.15. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

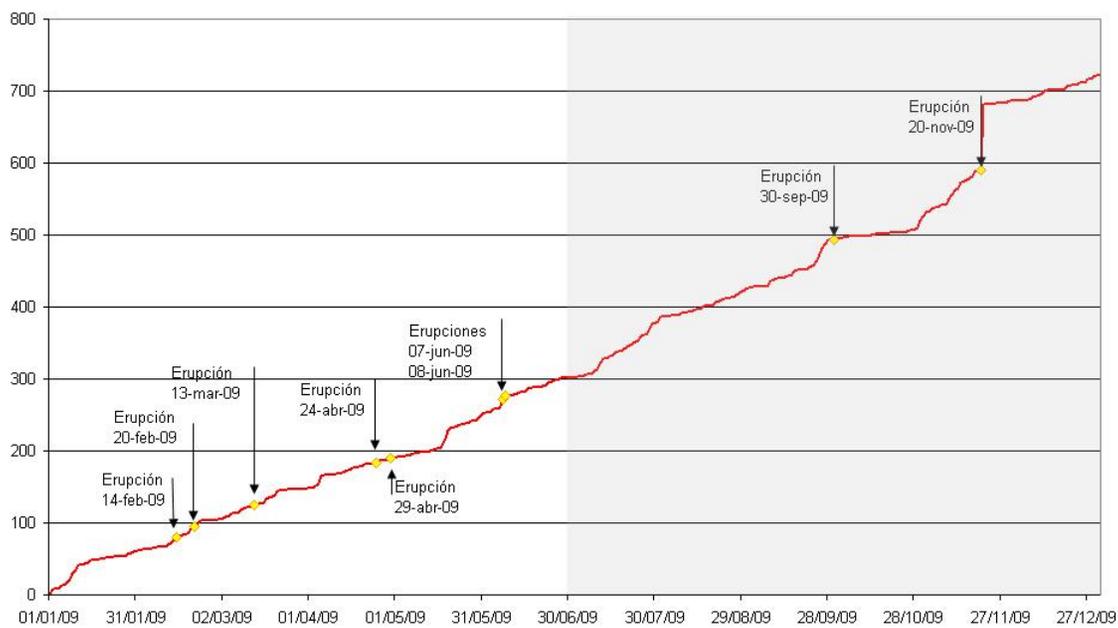
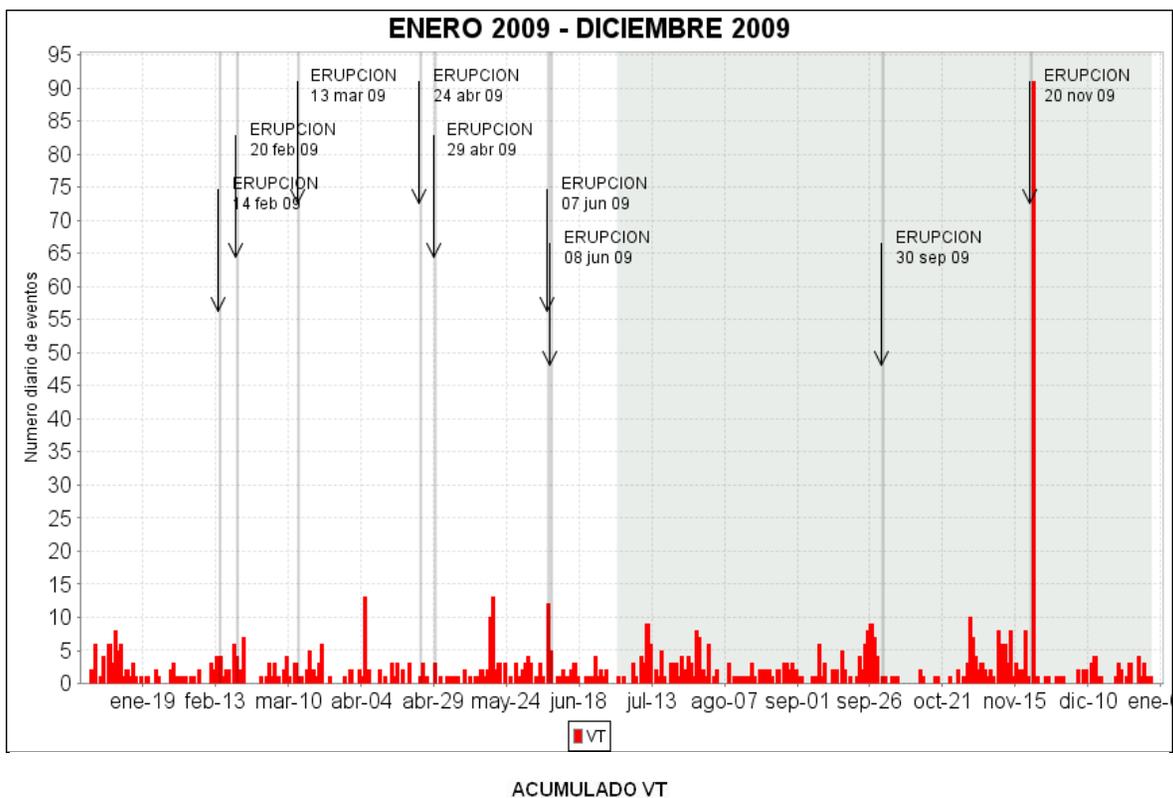


Figura 2.1.16. Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

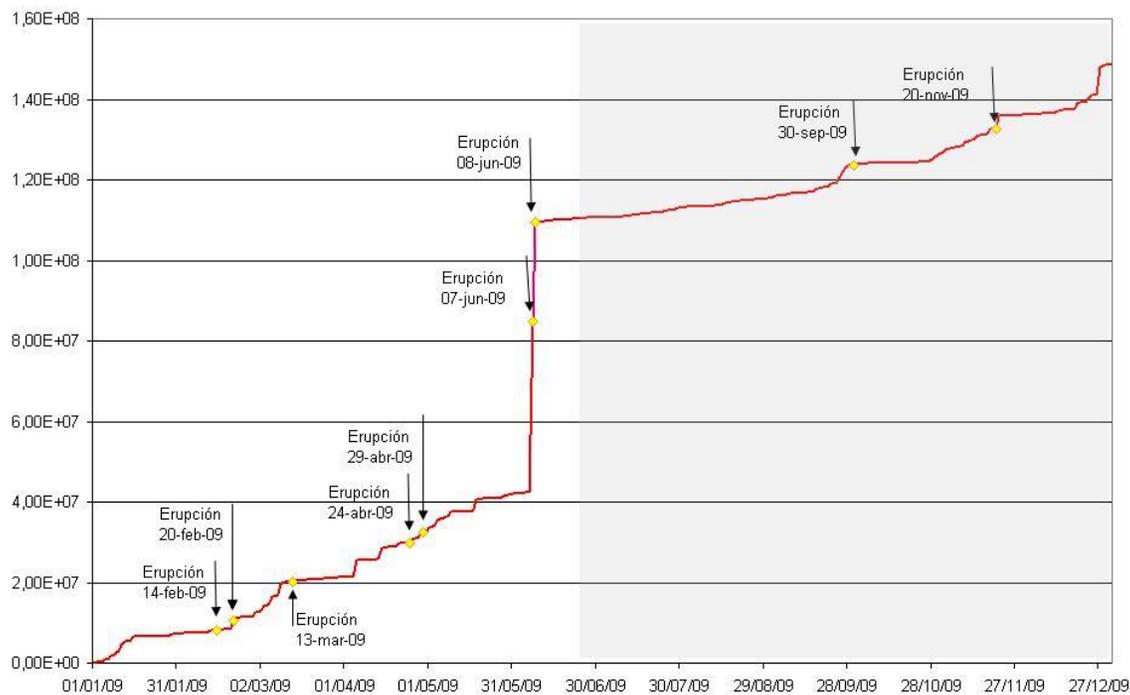
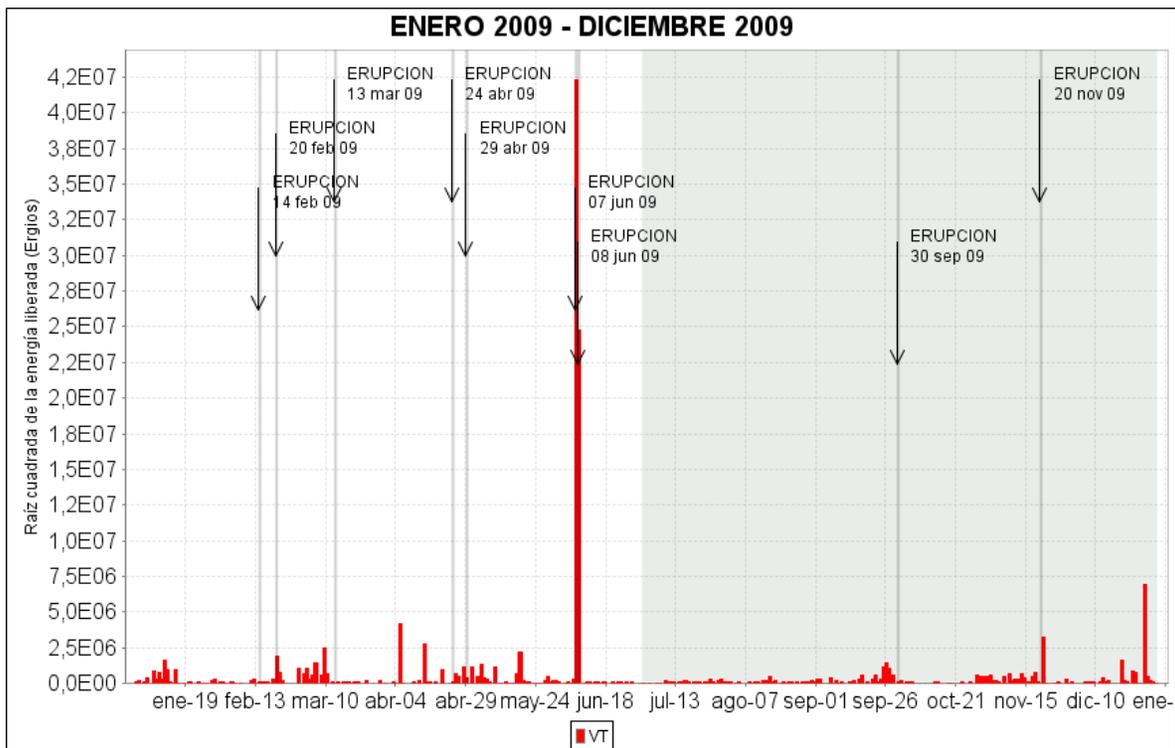


Figura 2.1.17. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y su acumulado (abajo) durante 2009. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

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 (VT) y sismos que contienen la mezcla de este fenómeno con movimiento de fluidos (HYB).

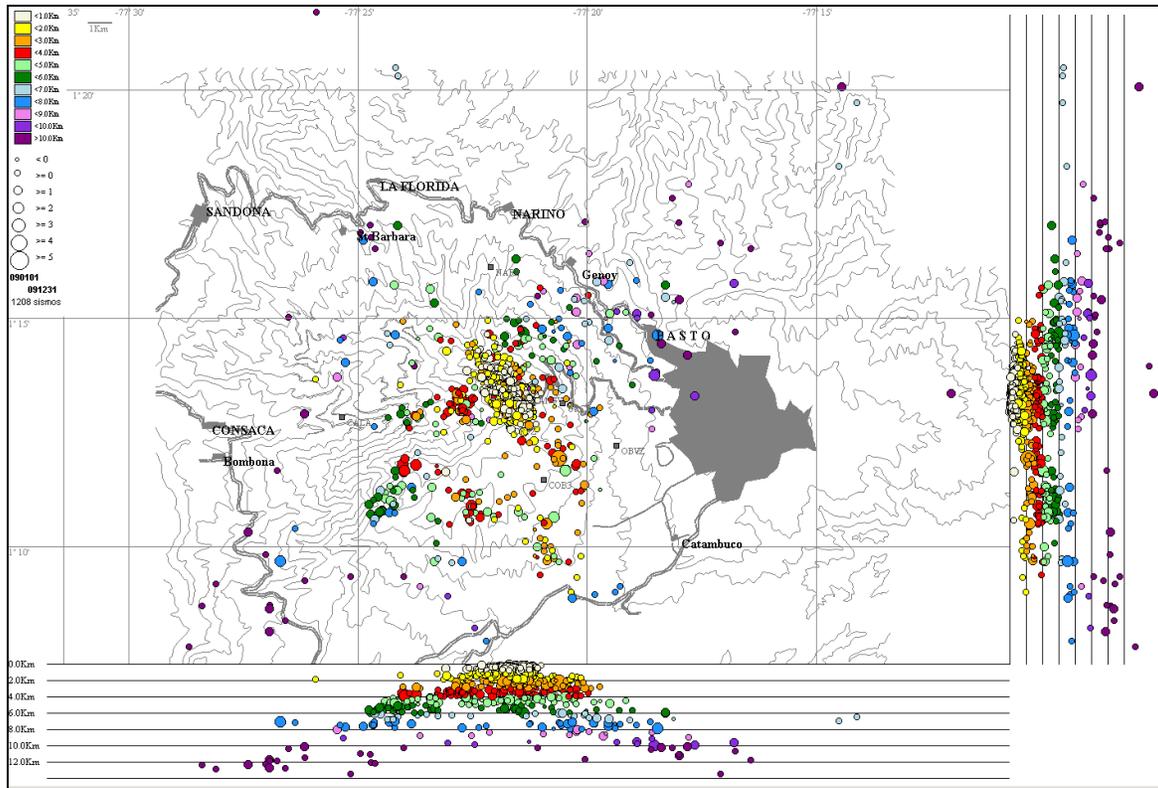


Figura 2.1.18. Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el segundo semestre de 2009. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2 Km.

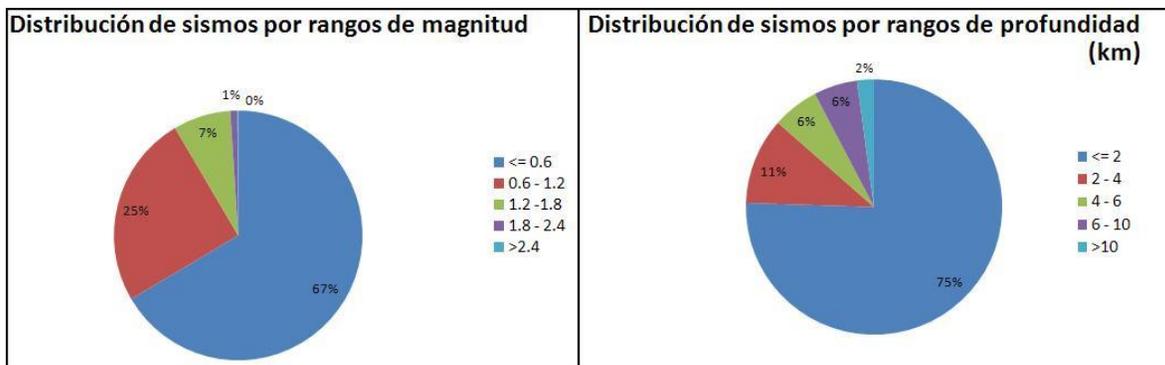


Figura 2.1.19. Relaciones porcentuales por rangos de magnitud local (izquierda) y por rangos de profundidad (derecha) para los sismos VT localizados durante el segundo semestre de 2009.

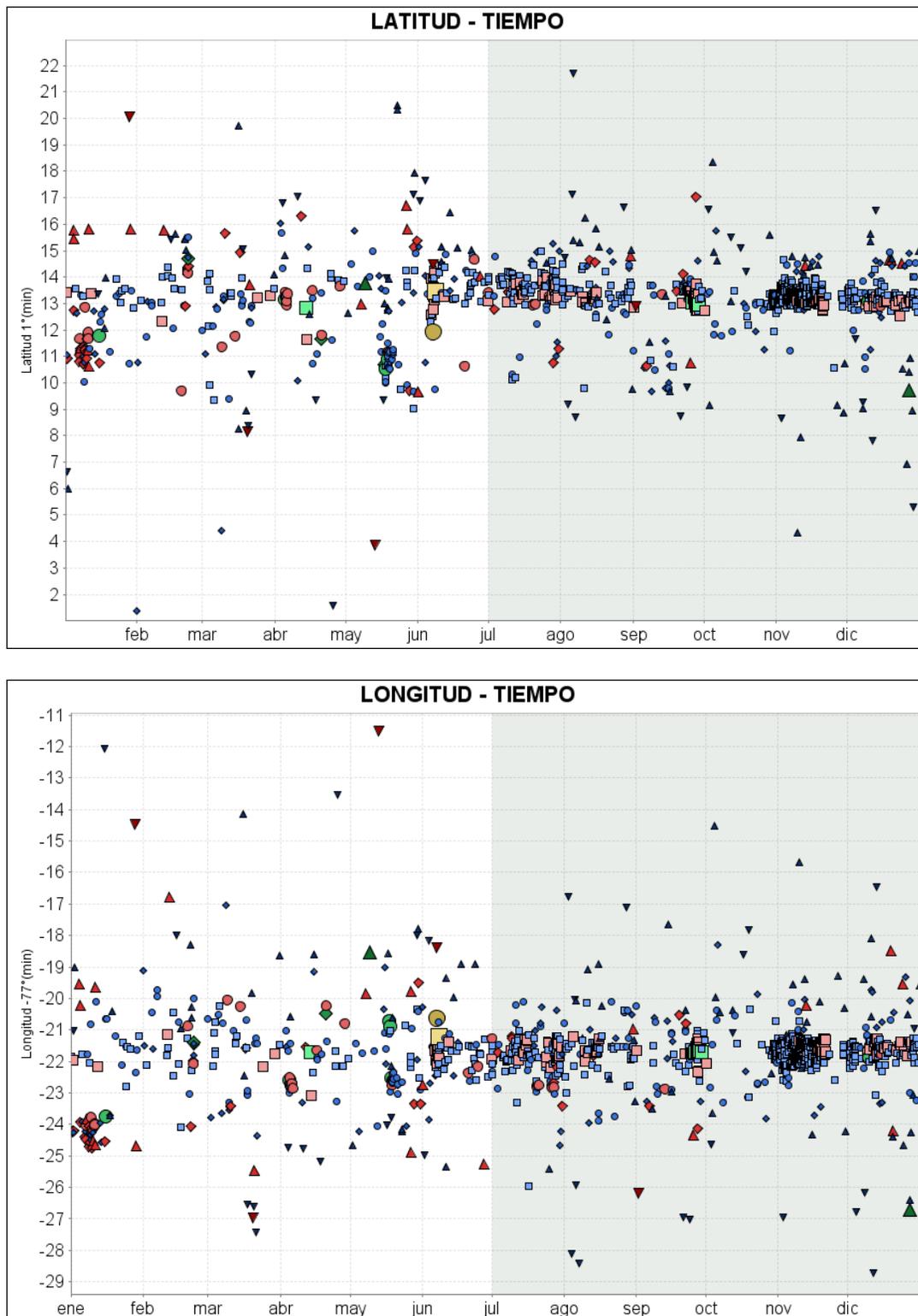


Figura 2.1.20. Evolución espacio temporal de sismos VT durante 2009.
En la gráfica superior se muestra las latitudes y en la inferior las longitudes.

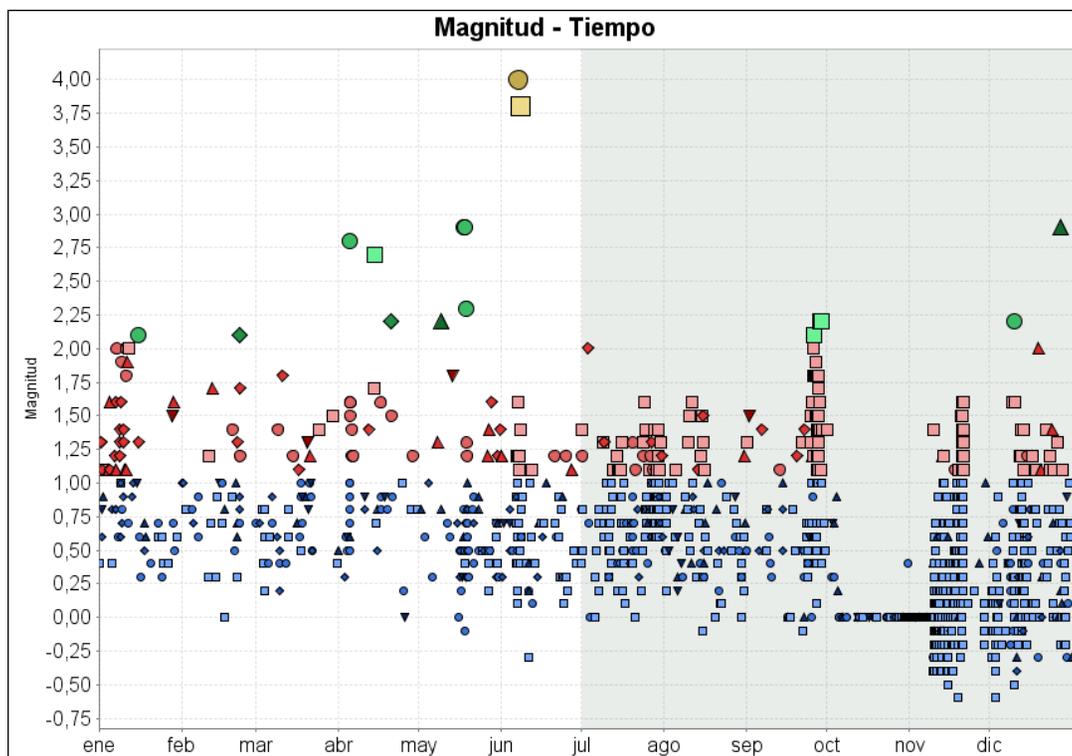
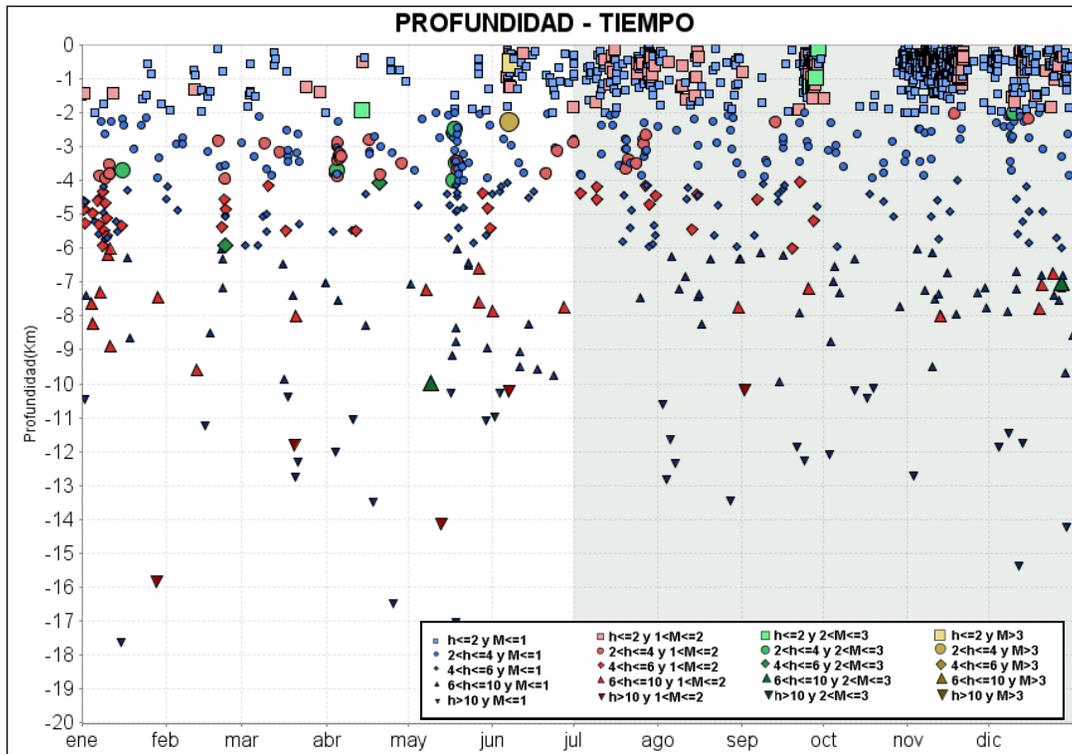


Figura 2.1.21. Evolución espacio temporal de sismos VT durante 2009.
En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes.

La sismicidad total durante el mes de julio de 2009 registró una disminución del 40% en su ocurrencia en comparación con junio. Se resalta una reducción considerable del 99% en la ocurrencia de eventos asociados con procesos de dinámica de fluidos, tanto de tipo LP como TRE; mientras que los sismos tipo VT e HYB tuvieron un incremento del 56% y 80%, respectivamente.

En cuanto a la energía liberada total, durante el mes de julio se observó un descenso del 99% respecto al mes de junio; por tipo de evento, se notó un aumento en la energía liberada de los eventos tipo LP e HYB en aproximadamente 16 y 6 veces respectivamente; la energía de los eventos tipo VT y TRE también disminuyó notablemente.

Finalizando junio y durante la primera semana de julio, después de la drástica ausencia de eventos tipo temblor, se resalta la ocurrencia de varios eventos asociados con movimiento de fluidos tipo LP, que presentaron características similares a los sismos tipo pseudo-Tornillo, en los que se tiene un decaimiento relativamente lento de las ondas de coda y espectro cuasi-monocromático, con frecuencias dominantes cercanas a los 15 Hz; un ejemplo es el pseudo-Tornillo registrado el día 5 de julio a las 4:27 a.m., cuyas características se muestran en la figura 2.1.22.

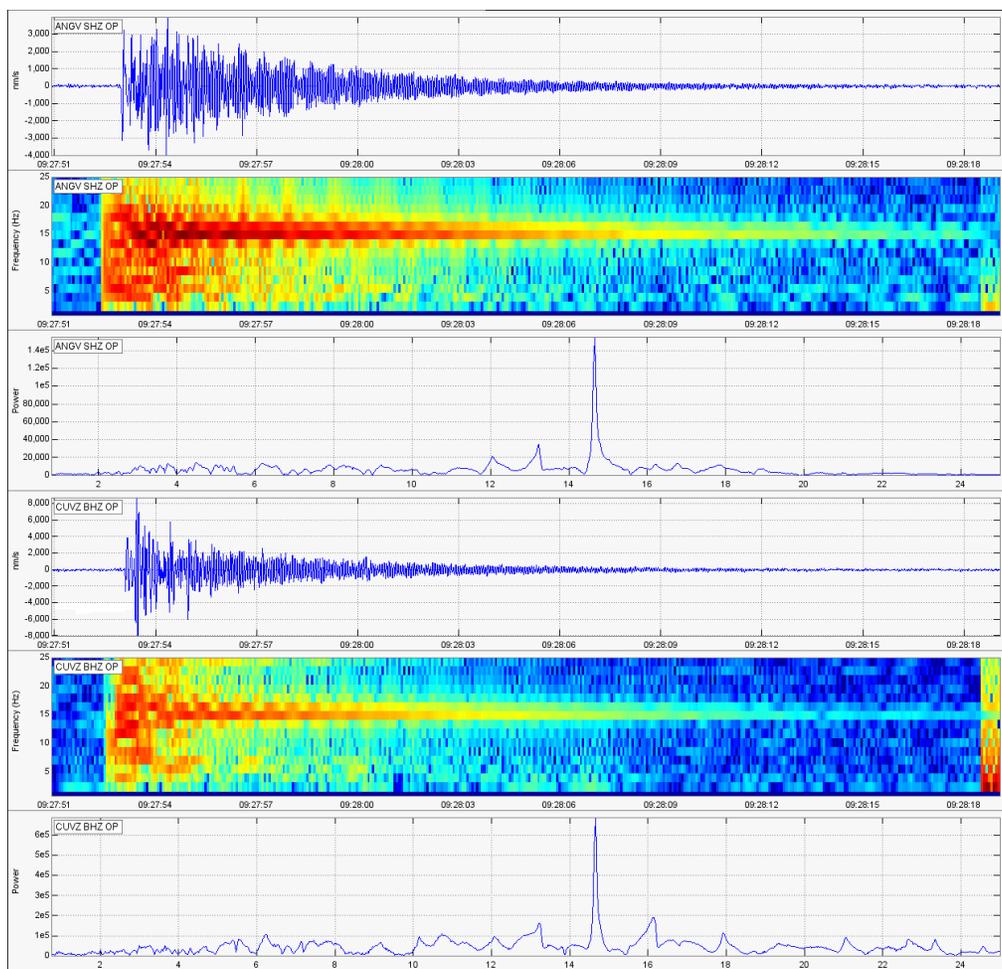


Figura 2.1.22. Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del evento LP (pseudo-tornillo) registrado en las estaciones Anganoy (arriba) y Cufiño (abajo), a las 4:27 a.m. del 5 de julio de 2009.

Adicionalmente, se resalta el día 5 de julio porque se liberó la mayor energía sísmica diaria del mes, debido a la ocurrencia de cuatro eventos tipo LP, uno de los cuales se muestra en la figura 2.1.23.

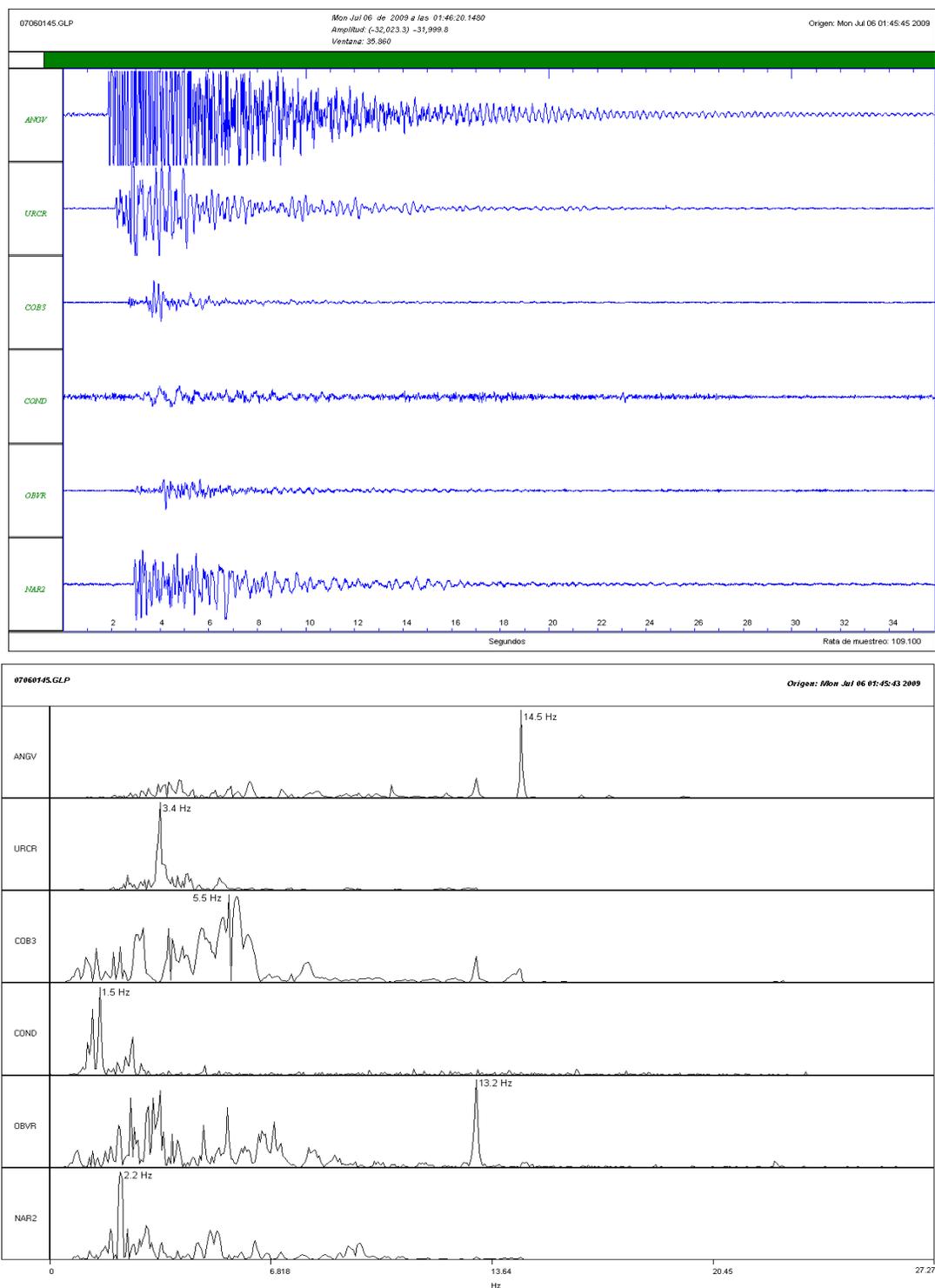


Figura 2.1.23. Sismogramas (arriba) y espectros (abajo) para las estaciones Anganoy (ANGV), Urcunina (URCR), Cobanegra-3 (COB3), Cónдор (COND), Obonuco (OBVR) y Nariño-2 (NAR2), del evento LP ocurrido a las 8:45 p.m. del 5 de julio de 2009; el cual fue el más energético presentado ese día.

El 9 de julio a las 8:31 a.m., ocurrió un episodio de temblor espasmódico con una duración de 20 minutos cuyo espectro de Fourier mostró una banda espectral amplia, hasta los 20 Hz. El evento presentó un arribo emergente y durante el primer minuto se observa la mayor amplitud; al finalizar el episodio se observan tres pulsos con arribos impulsivos y con amplitudes máximas similares a las observadas en la parte inicial del temblor (Figura 2.1.24). Es posible que la ocurrencia de este episodio de temblor haya cambiado las condiciones del sistema, al parecer facilitando la liberación de sobrepresiones y muy posiblemente, estuvo asociado con emisión de gases y/o ceniza, que no fue posible corroborar debido a las condiciones climáticas adversas. A partir de este evento de temblor, la actividad cambió de ser predominantemente de tipo LP, a presentar eventos tipo HYB y VT.

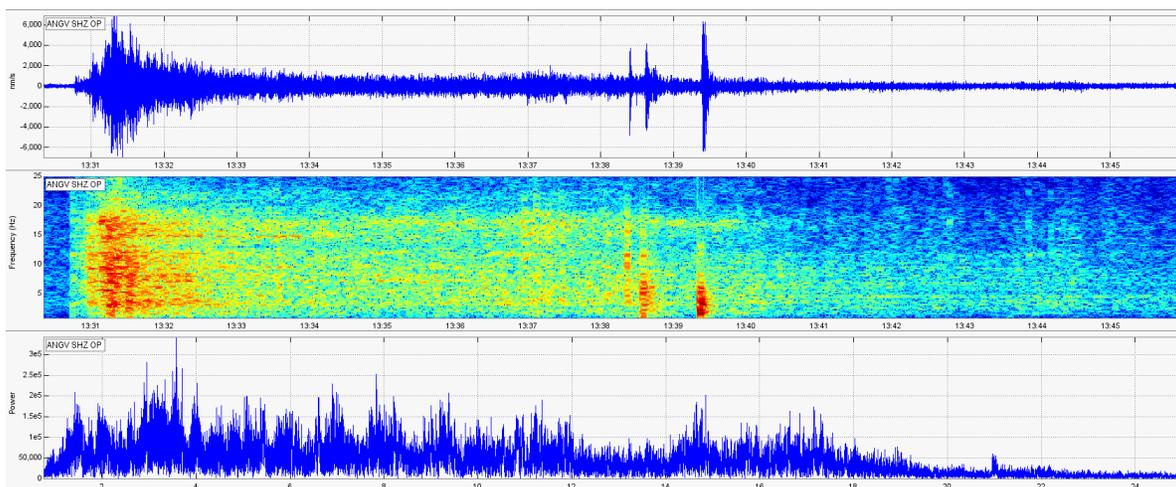


Figura 2.1.24. Sismograma, espectrograma y espectro del episodio de TRE registrado por la estación Anganoy (sismómetro de corto periodo ubicado a 0,9 Km al este del cráter principal) a las 8:30 a.m. del 9 de julio de 2009.

Se destaca el registro de un evento pseudo-Tornillo el 24 de julio de 2009 a las 00:47 a.m., con una frecuencia dominante de 6,2 Hz (Figura 2.1.25), este fue el último evento de este tipo registrado en julio.

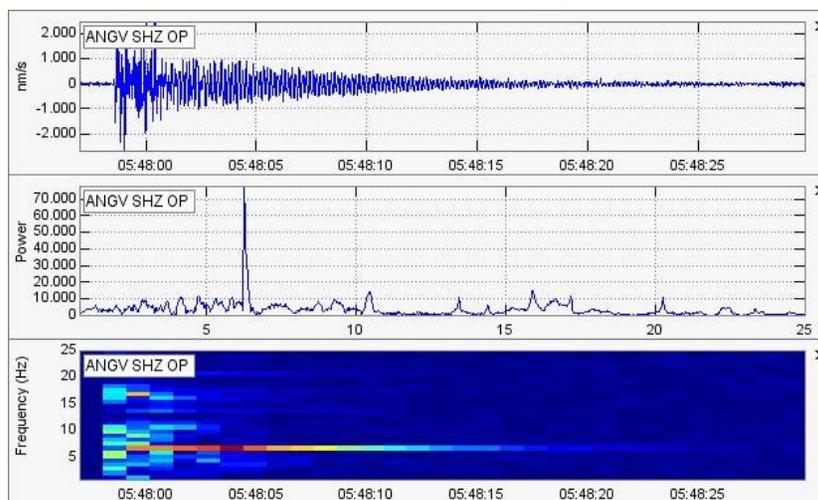


Figura 2.1.25. Sismograma (arriba), espectro (en medio) y espectrograma (abajo) del evento Pseudo-Tornillo registrado el 24 de julio de 2009, a las 00:47 a.m. en la estación base de clasificación (Anganoy).

Por otro lado, en la distribución temporal de las profundidades de los sismos tipo VT e HYB ocurridos en el mes de julio, a partir del 9 de julio se destaca una tendencia a la ocurrencia de sismos cada vez más profundos.

En el mes de agosto la actividad sísmica mostró un cambio en las características de las fuentes que generan los sismos asociados a movimiento de fluidos; siendo más notable la ocurrencia de los de tipo HYB y los de tipo LP. Desde mediados de agosto las fuentes se mostraron más sostenidas en el tiempo dando lugar a la ocurrencia de episodios de tremor que en su gran mayoría fueron de tipo espasmódico y en escasas ocasiones de tipo armónico. Sin embargo, la ocurrencia de episodios de tremor no implicó una disminución en número de eventos LP, los eventos híbridos si disminuyeron en comparación al mes anterior. El total de eventos fue de aproximadamente el doble que lo registrado en el mes de julio. En términos de energía se observó un incremento en el acumulado de los episodios de tremor y una disminución en los LP. Las relaciones porcentuales en términos de energía muestran el predominio de los eventos tipo TRE sobre los LP para el mes de agosto.

Entre la sismicidad ocurrida a lo largo del mes de agosto se destaca la ocurrencia de dos sismos tipo Tornillo. El primero fue registrado en agosto 8 a las 8:49 p.m. y el segundo en agosto 9 a las 9:57 p.m. Estos Tornillos mostraron frecuencias similares en su espectro y se registraron en varias de las estaciones de vigilancia de Galeras.

El espectro de frecuencias del primer tornillo mostró picos en 3,1 Hz, 4,4 Hz, 7,8 Hz, 9,4 Hz y 11,9 Hz, siendo el dominante de 9,4 Hz (Figura 2.1.26); su duración fue de 100 segundos y su energía de $6,85 \times 10^{10}$ erg, calculadas en la estación más cercana al cráter de Galeras, Anganoy.

Para el segundo tornillo, el espectro de frecuencias mostró picos en 3,5 Hz, 4,8 Hz, 8,3 Hz, 9,9 Hz, 13,1 Hz y 15,1 Hz, siendo el pico dominante de 8,3 Hz (Figura 2.1.27); su duración fue de 46 segundos y su energía de $2,65 \times 10^{10}$ erg, calculadas en la estación más cercana al cráter de Galeras, Anganoy.

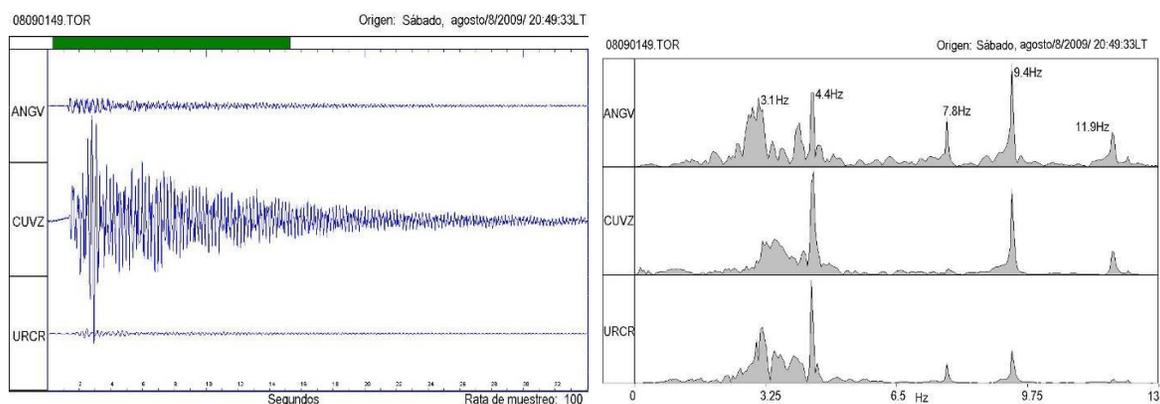


Figura 2.1.26. Sismograma y espectro de frecuencia del tornillo de agosto 8 a las 8:49 p.m.

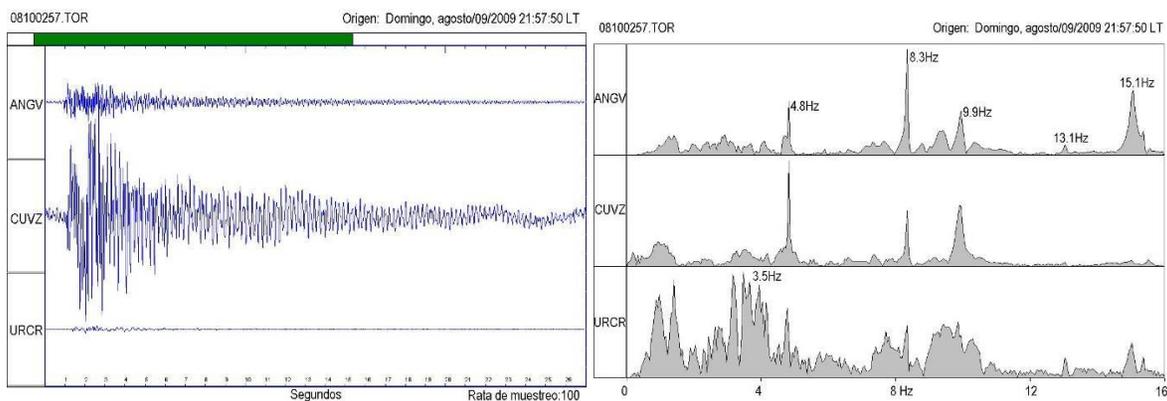


Figura 2.1.27. Sismograma y espectro de frecuencia del tornillo de agosto 9 a las 9:57 p.m.

De la misma manera se destaca el episodio de tremor armónico, con un corto arribo de tipo espasmódico, este fue registrado entre la 1:48 a.m. y las 4:36 a.m. del 10 de agosto, con aproximadamente tres horas de registro, no fue continuo sino por pulsos de diferente duración y con lapsos de tiempo diferentes entre cada pulso (Figura 2.1.28). Este tremor se registró en todas las estaciones de la red sísmica de Galeras y en la totalidad de sus pulsos su frecuencia dominante estuvo alrededor de 1,15 Hz (Figura 2.1.29).

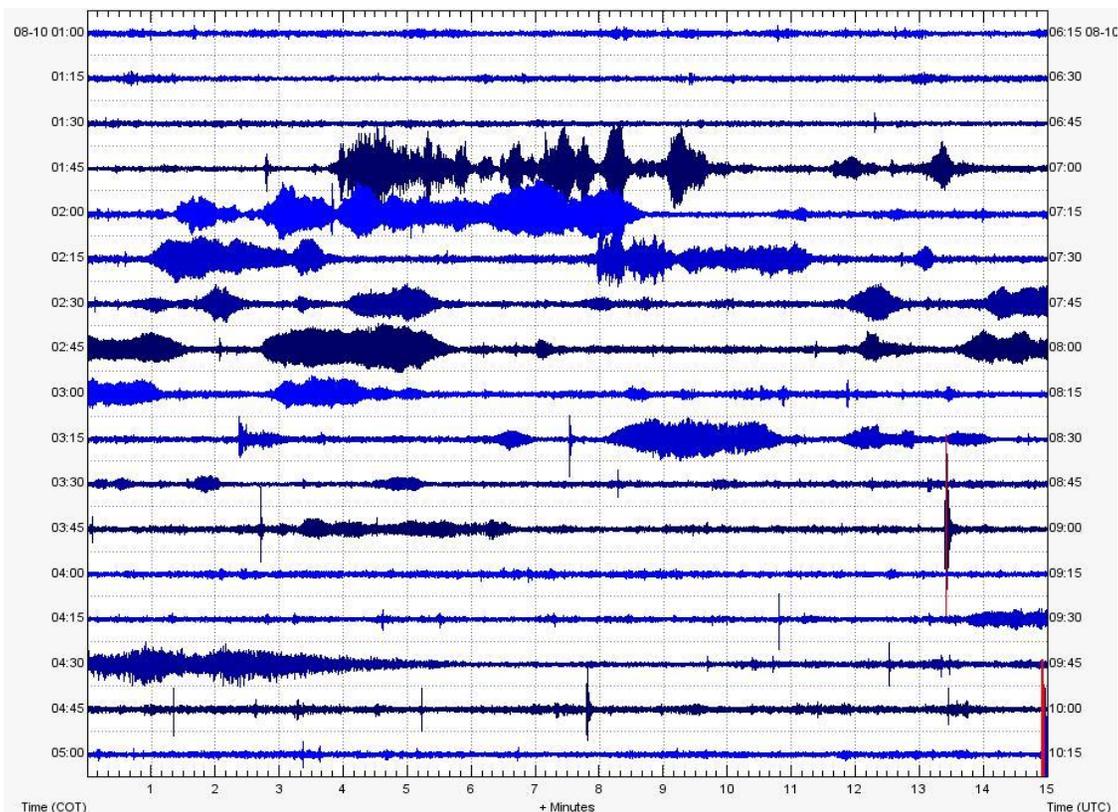


Figura 2.1.28. Sismograma del episodio de tremor armónico, registrado el 10 de agosto de 2009 entre la 1:48 a.m. y las 4:36 a.m., en la estación de banda ancha Cufiño (1,9 km ENE del cráter, 3800 m sobre el nivel del mar).

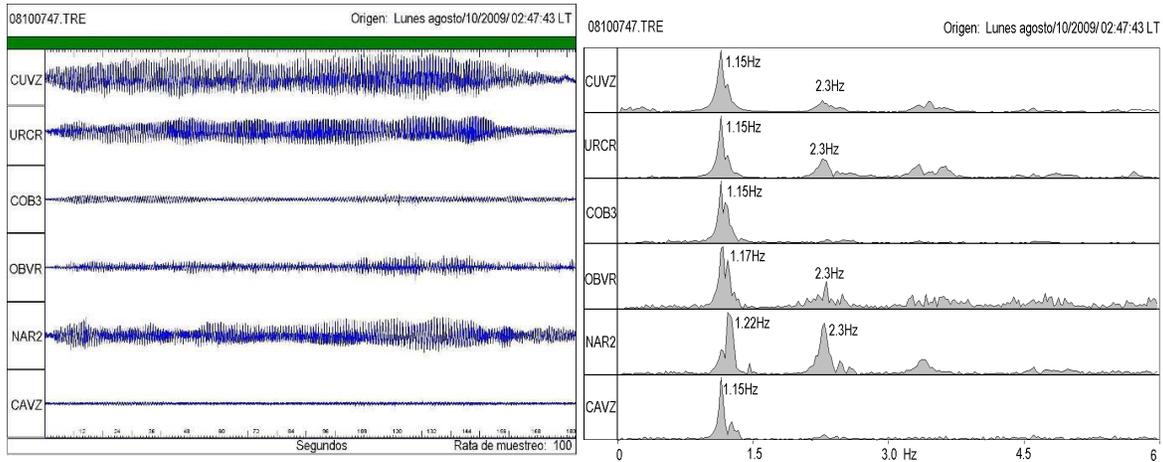


Figura 2.1.29. Sismograma y espectro de frecuencia de un pulso del episodio de tremor armónico de agosto 10, registrado entre las 2:47:44 y las 2:48:41 a.m.

El 19 de agosto a las 2:42 p.m., se resalta la ocurrencia de un sismo LP asociado con una pequeña explosión que mostró un comportamiento similar al observado en erupciones explosivas en Galeras en lo que va transcurrido del presente año. Antes del evento, se presenta una disminución en la ocurrencia de sismos y luego empieza el registro de sismos HYB o VT superficiales hasta que ocurre la explosión. La señal sísmica asociada mostró una banda frecuencial amplia, con mayor nivel energético en los armónicos alrededor de 2,9 Hz (Figura 2.1.30).

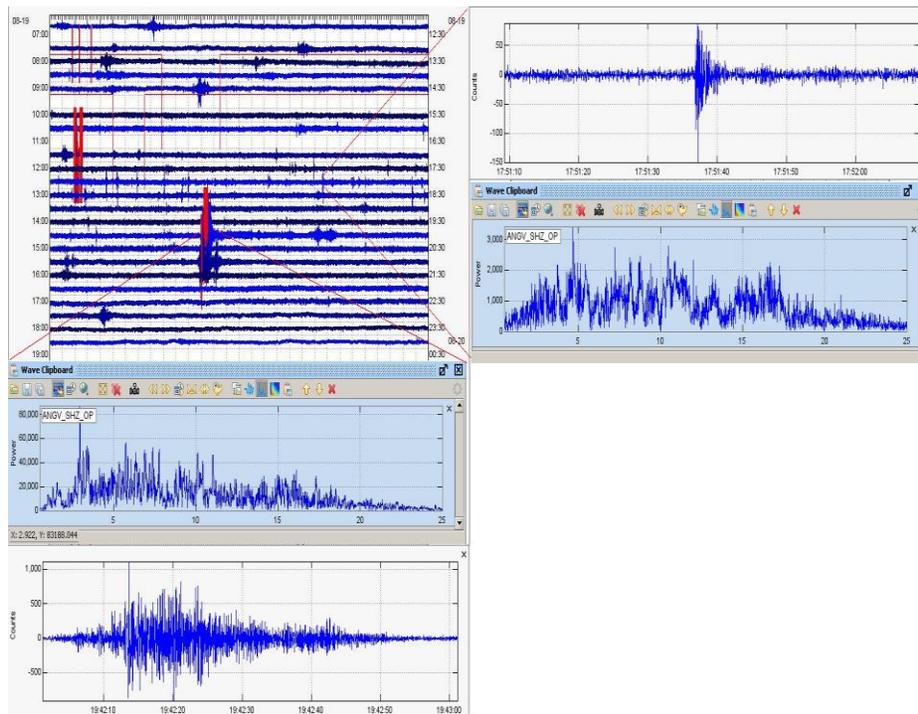


Figura 2.1.30. Registro de sismos del día 19 entre las 7:00 a.m. y las 6:00 p.m. (parte superior izquierda); ejemplo de las señales superficiales previas (lado derecho) que precedieron al evento de las 2:42 p.m., que se resalta en la parte inferior de la figura con su espectro respectivo.

Durante el mes de septiembre la sismicidad dominante fue la relacionada con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico con un 72% del número total de eventos registrados: 39% correspondiente a eventos LP y 33% correspondiente a eventos TRE.

Se registraron de manera esporádica (y con un nivel energético bajo) eventos tipo TRE con características armónicas, los cuales dentro de la actividad del volcán Galeras se han interpretado como señales sísmicas asociadas con procesos de recarga del sistema, destacándose los registrados el 16 de septiembre a las 10:52 p.m. y el 19 de septiembre a la 1:36 p.m. El evento del 19 de septiembre, a la 1:36 a.m., se caracteriza por tener un espectro cuasi monocromático, con frecuencia dominante en 1,3 Hz (Figura 2.1.31).

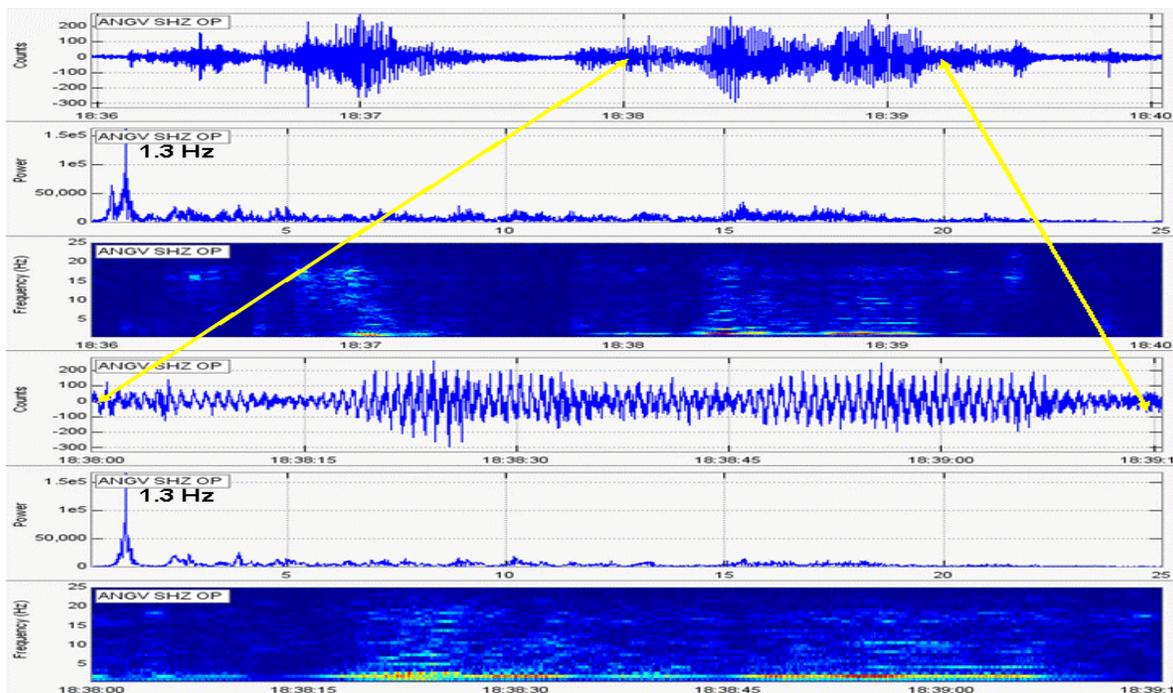


Figura 2.1.31. Sismograma, espectro en frecuencia y espectrograma, para la estación Anganoy del episodio de temblor registrado el día 19 de septiembre de 2009, a la 1:36 p.m.; y un segmento de este mismo evento donde se detallan las bajas frecuencias dominantes, particularmente, un pico en 1,3 Hz.

En los últimos días de septiembre, la actividad sísmica mostró cambios importantes que permiten describir el comportamiento del mes en los siguientes seis periodos:

Primer periodo, anterior al 23 de septiembre con el predominio de eventos asociados a movimientos de fluidos al interior del sistema, tanto de tipo persistente (TRE), como transitorio, LPS (Figura 2.1.32).

Segundo periodo, a partir del 23 de septiembre, con la ausencia de episodios de temblor (el último evento de este tipo ocurrió a las 3:32 a.m. del 23 de septiembre) y la ocurrencia de eventos de bajo nivel energético asociados tanto con el fracturamiento de material cortical como con el movimiento de fluidos al interior del sistema (eventos tipo HYB) (Figura 2.1.32). Desde el 24 de septiembre se

empiezan a presentar tanto eventos de tipo HYB como eventos de tipo LPS; a las 9:04 p.m. del mismo día, se registra un evento de tipo tornillo (Figura 2.1.33).

Tercer periodo, a partir de la noche del 26 de septiembre, se nota un incremento en el nivel energético de las señales de los eventos de tipo transitorio asociados con el movimiento de fluidos (LPS); mostrando que para septiembre la mayor energía liberada se registró el día 27. También se observa una mezcla de eventos de tipos HYB, LPS y VT, junto con la ocurrencia de dos eventos tipo Tornillo el 27 de septiembre a las 6:32 a.m. y el 28 de septiembre a las 00:38 a.m., respectivamente (Figura 2.1.34).

Cuarto periodo, a partir del 29 de septiembre en horas de la mañana, con la presencia de varios eventos concatenados, de nivel energético alto.

Quinto periodo, evento eruptivo ocurrido el día 30 de septiembre a las 9:14 a.m.

Sexto periodo, después de ocurrido el evento eruptivo, con actividad predominante de eventos asociados al movimiento de fluido al interior del sistema de nivel energético bajo.

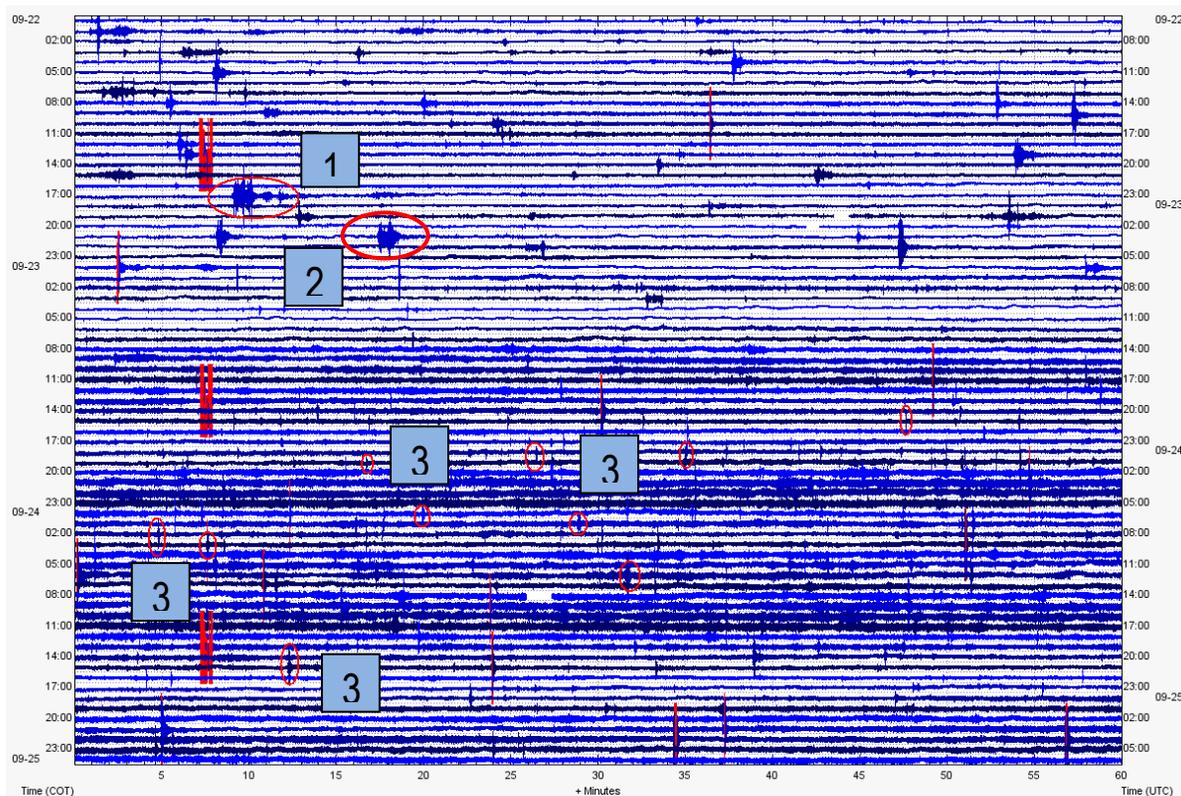


Figura 2.1.32. Sismograma del 22 al 24 de septiembre del 2009. Se observa que antes del 23 de septiembre predominan los eventos relacionados con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico tipo TRE (1) y tipo LPS (2). A partir del 23 de septiembre, se observa la ausencia de episodios de tremor y la ocurrencia de eventos de bajo nivel energético tipo HYB (3).

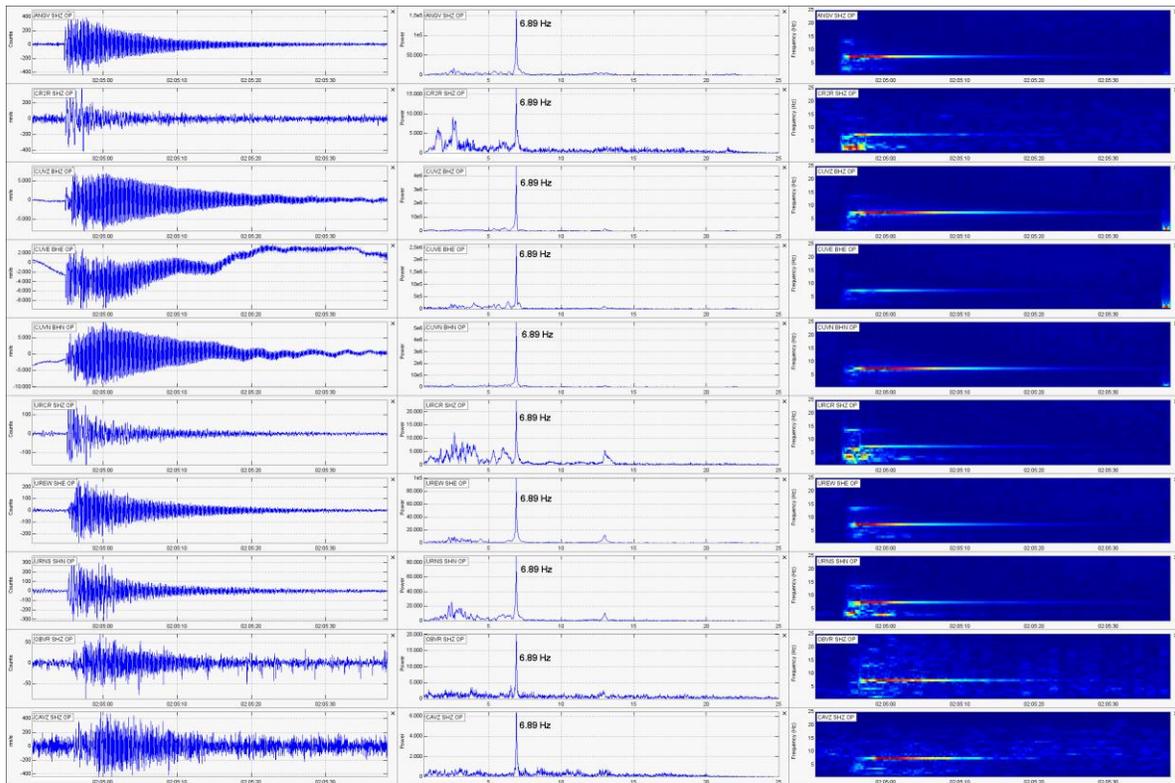


Figura 2.1.33. Sismogramas, espectros y espectrogramas en frecuencia del evento tipo tornillo ocurrido el día 24 de septiembre a las 9:04 p.m., el cual fue registrado por seis de las estaciones de la red de vigilancia del volcán Galeras.

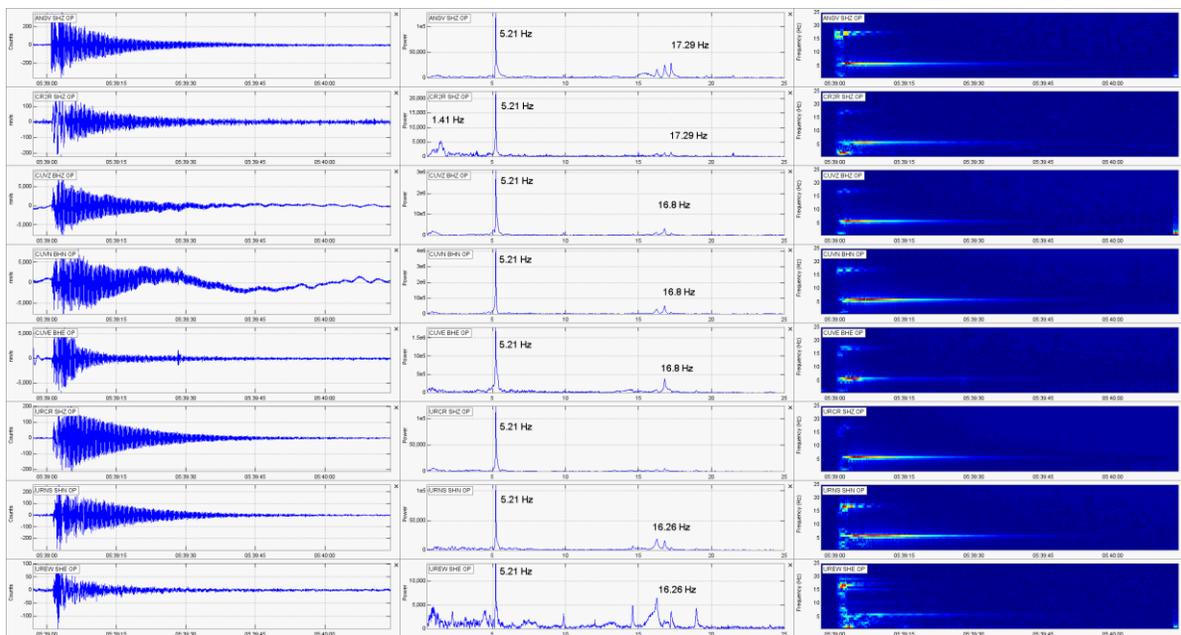


Figura 2.1.34. Sismogramas, espectros y espectrogramas del evento tipo tornillo, ocurrido el día 28 de septiembre a las 00:39 a.m., el cual fue registrado claramente por tres de las estaciones de la red de vigilancia de Galeras.

2.1.2.1 Episodios eruptivos del segundo semestre de 2009

2.1.2.1.1 Episodio eruptivo del 30 de septiembre de 2009

El 30 de septiembre a las 9:14 a.m., se registró en las estaciones que componen la red de monitoreo del volcán Galeras la señal sísmica de un evento eruptivo (Figuras 2.1.35 y 2.1.36), en la señal registrada se pueden diferenciar claramente dos pulsos, siendo el segundo el más energético; la energía de ondas de cuerpo liberada por el evento eruptivo se calculó en $7,79 \times 10^{13}$ erg; y su desplazamiento reducido se calculó en 970 cm^2 (valores obtenidos utilizando la componente vertical de la estación de banda ancha Cufiño, ubicada a 1,9 Km al este-noreste del cráter principal).

El sensor acústico de la estación Calabozo (ubicado a 6,8 Km al oeste-suroeste del cráter principal) registró las ondas acústicas producidas por el evento eruptivo; la onda de máxima amplitud registrada fue de aproximadamente 0,15 pascales, siendo ésta señal acústica la de menor nivel energético de las 9 erupciones ocurridas en el año y aproximadamente 10 veces menor a la registrada en la erupción del 24 de abril de 2009, que es la de mayor nivel energético de las ocurridas durante el año 2009 (Figura 2.1.37).

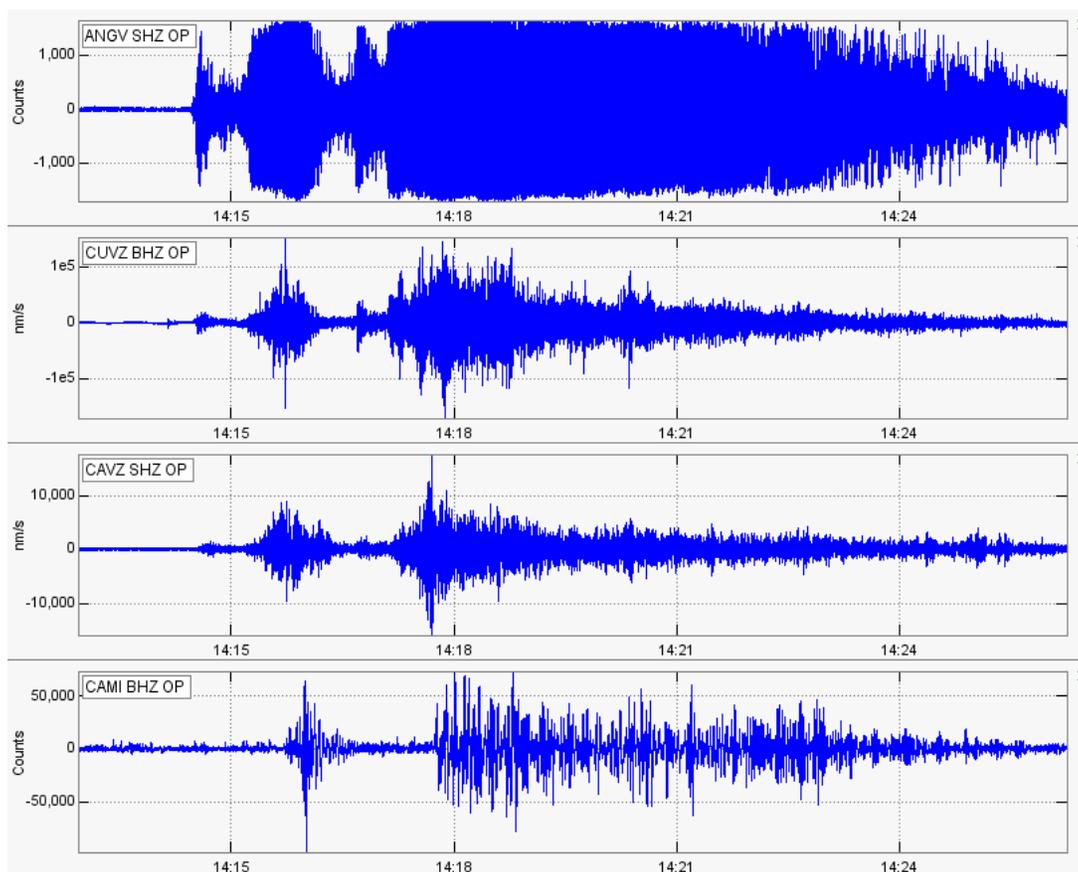


Figura 2.1.35. Sismogramas de las estaciones Anganoy, Cufiño (banda ancha) y Calabozo; y registro del sensor acústico de Calabozo, para el episodio eruptivo registrado el 30 de septiembre de 2009, a las 9:14 a.m.

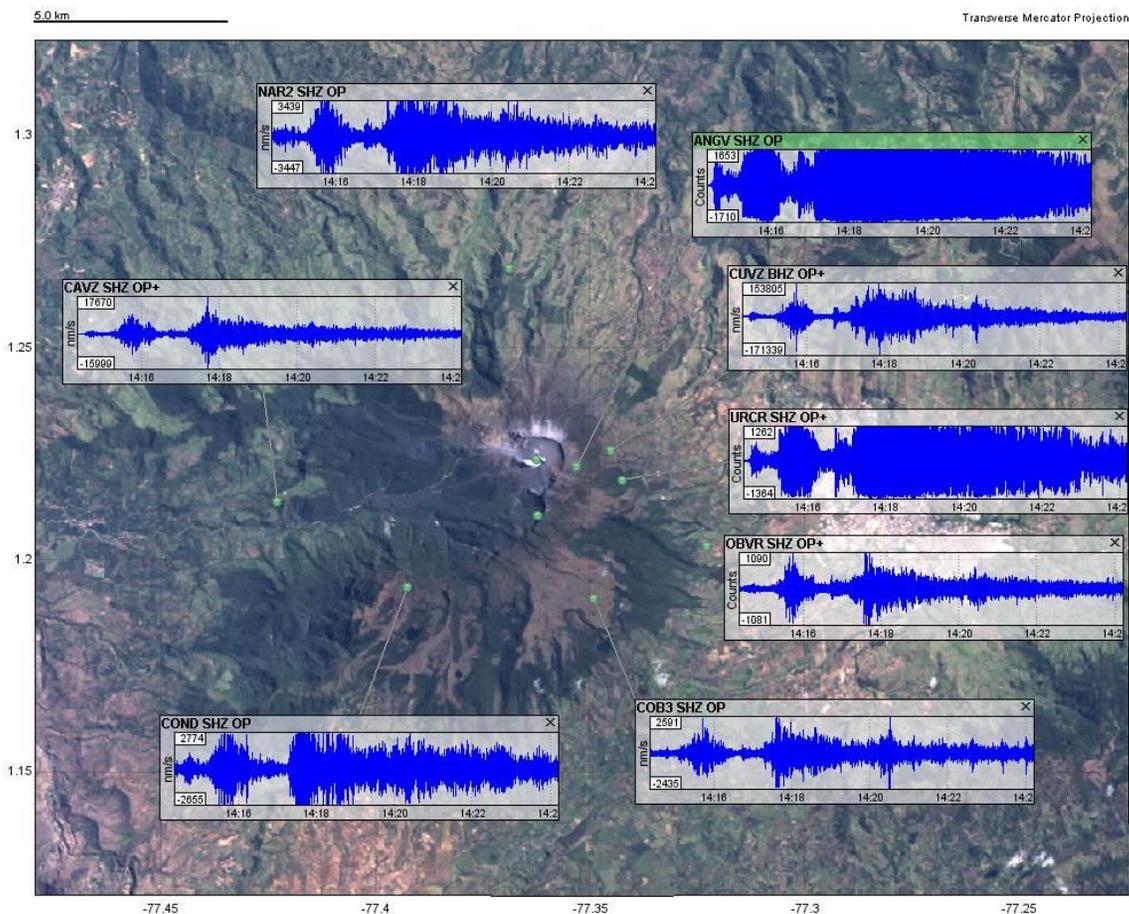


Figura 2.1.36. Señal del evento eruptivo del 30 de septiembre (9:14 a.m.) registrado por las estaciones de la red de vigilancia del volcán Galeras. En las estaciones de corto periodo ANGV, NAR2, URRCR y COND, se observa la señal saturada.

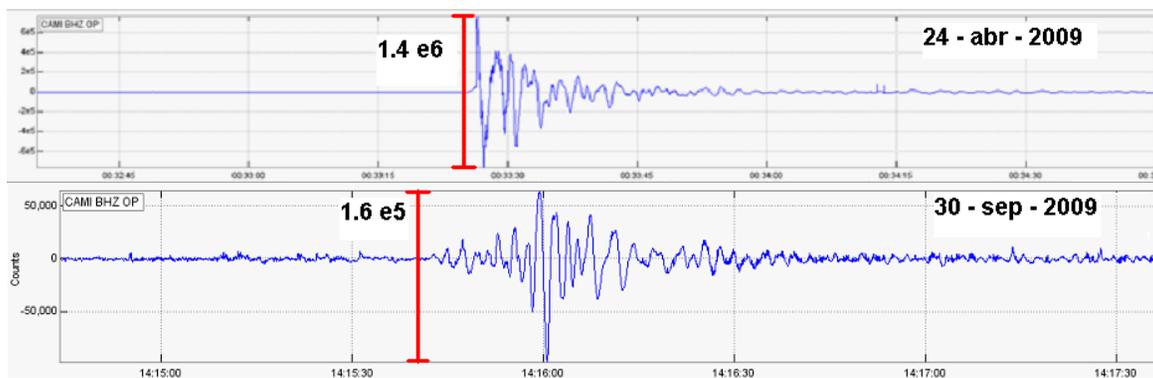


Figura 2.1.37. Ondas acústicas de las erupciones del 24 de abril (erupción con la onda acústica de mayor nivel energético de las registradas durante el año) y del 30 de septiembre del 2009 (erupción con la onda acústica de menor nivel energético de las registradas durante el año). Comparativamente, la onda acústica de la erupción del 30 de septiembre de 2009 es aproximadamente 10 veces menor a la del 24 de abril de 2009.

Después de la erupción explosiva del 30 de septiembre de 2009, la sismicidad dominante estuvo relacionada con movimiento de fluidos, especialmente episodios de Tremor.

Durante las tres primeras semanas de octubre el tremor espasmódico, relacionado con emisiones de gases volcánicos hacia la atmósfera, fue el fenómeno más recurrente; para la última semana se registraron episodios de tremor con características armónicas, que se asocian con movimiento de material magmático a niveles superficiales. A partir del 28 de octubre la ocurrencia de sismos relacionados con movimiento de fluidos disminuye notablemente y se incrementa el número de eventos de tipo VT e HYB.

La cantidad de sismos en los que la fuente actúa movilizándolo de manera transitoria, denominados como sismos tipo LP, mostró niveles de ocurrencia relativamente bajos, si se compara con el mes anterior (septiembre).

En cuanto a las características de la sismicidad que motivaron el cambio de nivel a II (definido como “Erupción probable en términos de días o semanas”) el día 30 de octubre de 2009, se encuentra su similitud con la etapa pre-eruptiva que desembocó en la erupción del 30 de septiembre de 2009. Recordemos que durante el mes de septiembre y buena parte de agosto, la sismicidad se destacó por la abundancia de tremor espasmódico y algunos episodios de tremor armónico; unos días antes del 30 de septiembre, el incremento de los eventos tipos VT e HYB caracterizaron la etapa inmediatamente anterior a la erupción registrada.

De la misma manera, respecto a niveles energéticos se observa la similitud entre los meses de septiembre y octubre; aunque en términos generales la cantidad de energía liberada por tipo durante el mes de septiembre fue menor que la que se liberó en octubre. Si bien es cierto que, aunque los niveles de ocurrencia no muestran predominio de la sismicidad tipo LP con relación a los demás tipos, en la cantidad de energía liberada su comportamiento es diferente, siendo mayor el porcentaje para eventos de este tipo respecto a los demás. Este hecho pone de manifiesto que las fuentes persistentes en el tiempo fueron más recurrentes y las fuentes transitorias más energéticas.

De la sismicidad destacada durante el mes de octubre podemos citar los episodios de tremor armónico ocurridos los días 6, 16 y 26 de octubre.

Para el 6 de octubre se tienen dos eventos de tremor con segmentos de características armónicas, ocurridos a las 8:39 a.m. y las 12:00 p.m., siendo este último el más energético, liberando una energía de ondas de cuerpo (E_{OC}) de $7,7 \times 10^{10}$ erg, un desplazamiento reducido de ondas de cuerpo (DR_{OC}) de $10,2 \text{ cm}^2$, con una duración cercana a los 9 minutos y un rango frecuencial amplio entre 0,8 y 19 Hz, con un pico de frecuencia dominante para toda la señal de 1,16 Hz. La figura 2.1.38 muestra el sismograma, el espectrograma y el espectro en frecuencia de todo el evento, como fue registrado por la estación Anganoy. La figura 2.1.39 ilustra el segmento final del evento, el cual registra de mejor manera los armónicos que aportan significativamente a la señal. La figura 2.1.40 muestra las formas de onda y los espectros del segmento de mayor nivel energético del evento, para la mayoría de estaciones que conforman la red de vigilancia volcánica de Galeras.

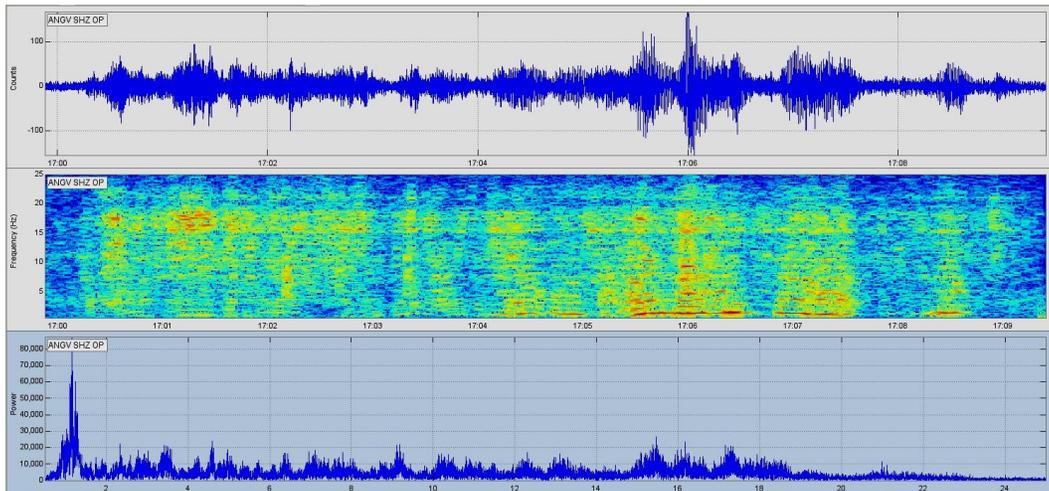


Figura 2.1.38. Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del evento de temblor con segmentos de características armónicas del 6 de octubre a la 12:00 P.M., registrado por la estación Anganoy.

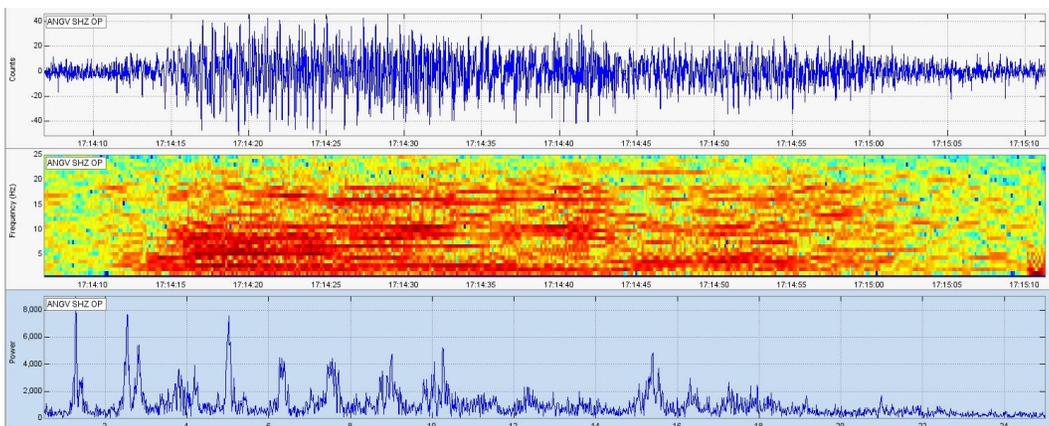


Figura 2.1.39. Sismograma, espectrograma y espectro en frecuencia del segmento final (más armónicos de frecuencia) del evento de temblor con características armónicas del 6 de octubre a las 12:00 p.m., registrado por la estación Anganoy.

Otro evento con características armónicas ocurrido el día 26 de octubre a la 1:22 a.m. (Figura 2.1.41) tuvo una duración aproximada de ocho minutos, con un inicio pulsátil y que posteriormente continúa con variaciones en su amplitud. Su información espectral muestra diez armónicos sobresalientes por debajo de los 12 Hz y el armónico dominante difiere a lo largo de la señal. Una animación de este sismo puede ser consultada en la página web del INGEOMINAS en el siguiente enlace: http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto/Registros_en_l%C3%ADnea

Episodios como los descritos anteriormente están asociados con movimiento de fluidos viscosos como magma o mezcla de este con gases volcánicos que se movilizan a través de conductos resultando en firmas especiales como el sismograma que se muestra en la figura 2.1.41.

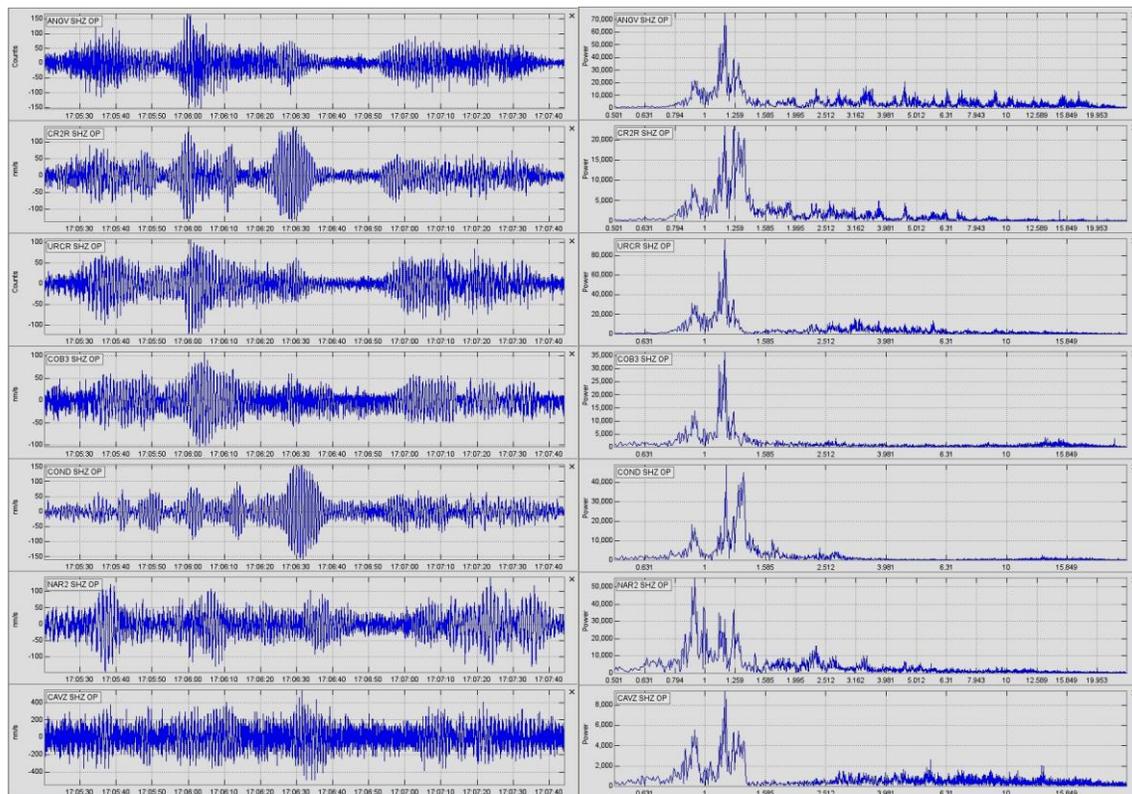


Figura 2.1.40. Formas de onda (izquierda) y espectros (derecha) del segmento más energético del evento de tembor con características armónicas del 6 de octubre a las 12:00 m., para la mayoría de estaciones que conforman la red de vigilancia volcánica de Galeras.

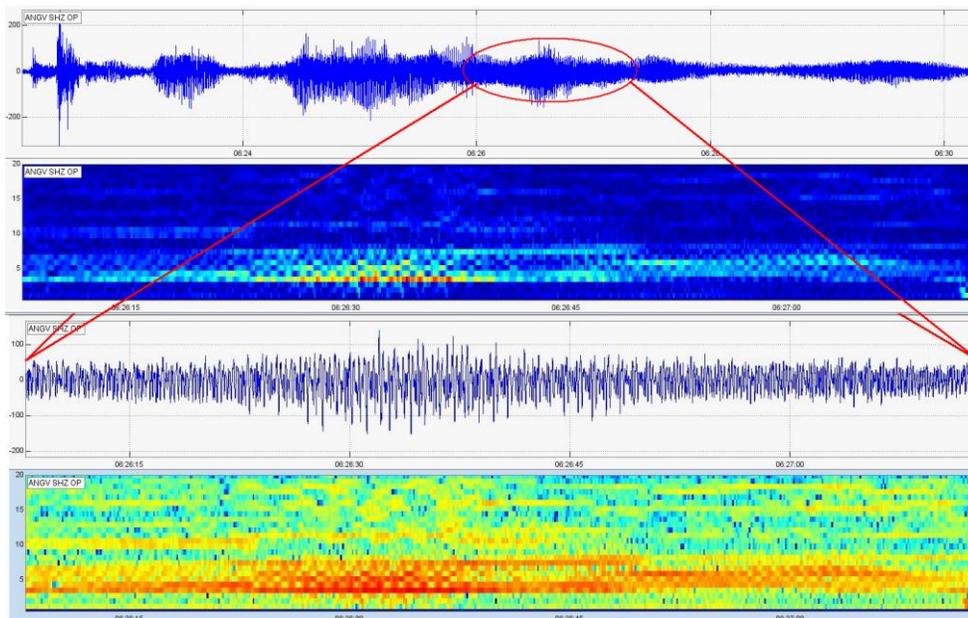


Figura 2.1.41. Sismograma y espectrograma del total (arriba) y un segmento (abajo) del episodio de tembor armónico registrado por la estación Anganoy; este sismo se presentó el día 26 de octubre, a la 1:22 a.m.

El grupo técnico-científico del OVSP tomó la decisión de cambiar el nivel de actividad el día 30 de octubre a las 9:40 a.m. de Nivel III (Amarillo) a Nivel II (Naranja), por los cambios registrados en la sismicidad durante la última semana de octubre, que mostraron similitudes con varios periodos pre-eruptivos registrados en Galeras, especialmente con lo observado antes del evento eruptivo del 30 de septiembre de 2009.

A continuación se describen algunos detalles de la sismicidad cuya interpretación formó parte de los argumentos que motivaron el cambio de nivel, y que se observa claramente figura 2.1.42.

El día 28 de octubre inicia un periodo de ausencia de eventos asociados con movimiento de fluido de fuente persistente (TRE) al interior del sistema volcánico, que se relacionan con procesos de desgasificación y liberación de sobrepresiones; el 28 de octubre a las 12:37 a.m. se registró el último evento de este tipo. Después del último episodio tipo TRE registrado y hasta finalizar el día 28 la actividad sísmica se caracterizó por la presencia de muy pocos eventos de bajo nivel energético, algunos de tipo LP y otros de tipo HYB.

A partir del día 29 se observa un incremento en la ocurrencia de eventos tipo HYB de bajo nivel energético, luego del medio día se registra un incremento en el nivel energético de estos sismos y un incremento tanto en ocurrencia como en nivel energético de los eventos tipo LPS. Después del medio día del 30 de octubre se registra un nuevo incremento en los niveles energéticos de los eventos HYB y LPS. Al finalizar octubre, se observa que tanto la ocurrencia como la energía liberada diariamente por los eventos tipo LPS e HYB se han incrementado gradualmente desde el 29 de octubre.

Con relación a estos eventos LPS e HYB, de mayor recurrencia en Galeras, en el mes de noviembre de 2009, para los eventos tipo LPS se presentó un incremento aproximado del 382 % respecto al mes anterior, de igual forma, los eventos tipo HYB mostraron un aumento del 533 % respecto al mes de octubre de 2009; y aun cuando los eventos tipo VT mostraron un incremento, se observa que su ocurrencia es muy baja en comparación con los eventos LP e HYB. Los eventos tipo TRE mostraron descenso y un muy bajo registro en el mes de noviembre.

En cuanto a la energía liberada, el comportamiento es muy similar al de la ocurrencia de eventos, destacándose el máximo incremento en los niveles energéticos de los eventos tipo LP, con un incremento aproximado de 846 % respecto al mes anterior.

Para el 5 de noviembre, sumado a la sismicidad que se venía presentando, inició el registro de eventos tipo Tornillo y pseudo-Tornillo, que hasta el 19 de noviembre, fecha en la cual se presentó el último de estos eventos, se totalizaron 13 eventos previos a la erupción del 20 de noviembre. Los eventos Tornillo corresponden a un tipo especial de sismicidad de largo periodo caracterizada por el decaimiento lento de las amplitudes sísmicas con el tiempo y contenido en frecuencia generalmente monocromático. Este tipo de señales sísmicas se han observado, a nivel mundial, en algunos volcanes de composición andesítica, en diferentes etapas del proceso volcánico. Para el caso de Galeras, la importancia de los Tornillos radica en que se han observado en etapas previas a varios de los episodios eruptivos registrados entre 1992 y 2009, en la mayoría de los casos, mostrando disminución en las frecuencias e incremento en las duraciones, en intervalos variables de registro de tornillos de horas a meses antes del evento eruptivo.



Libertad y Orden

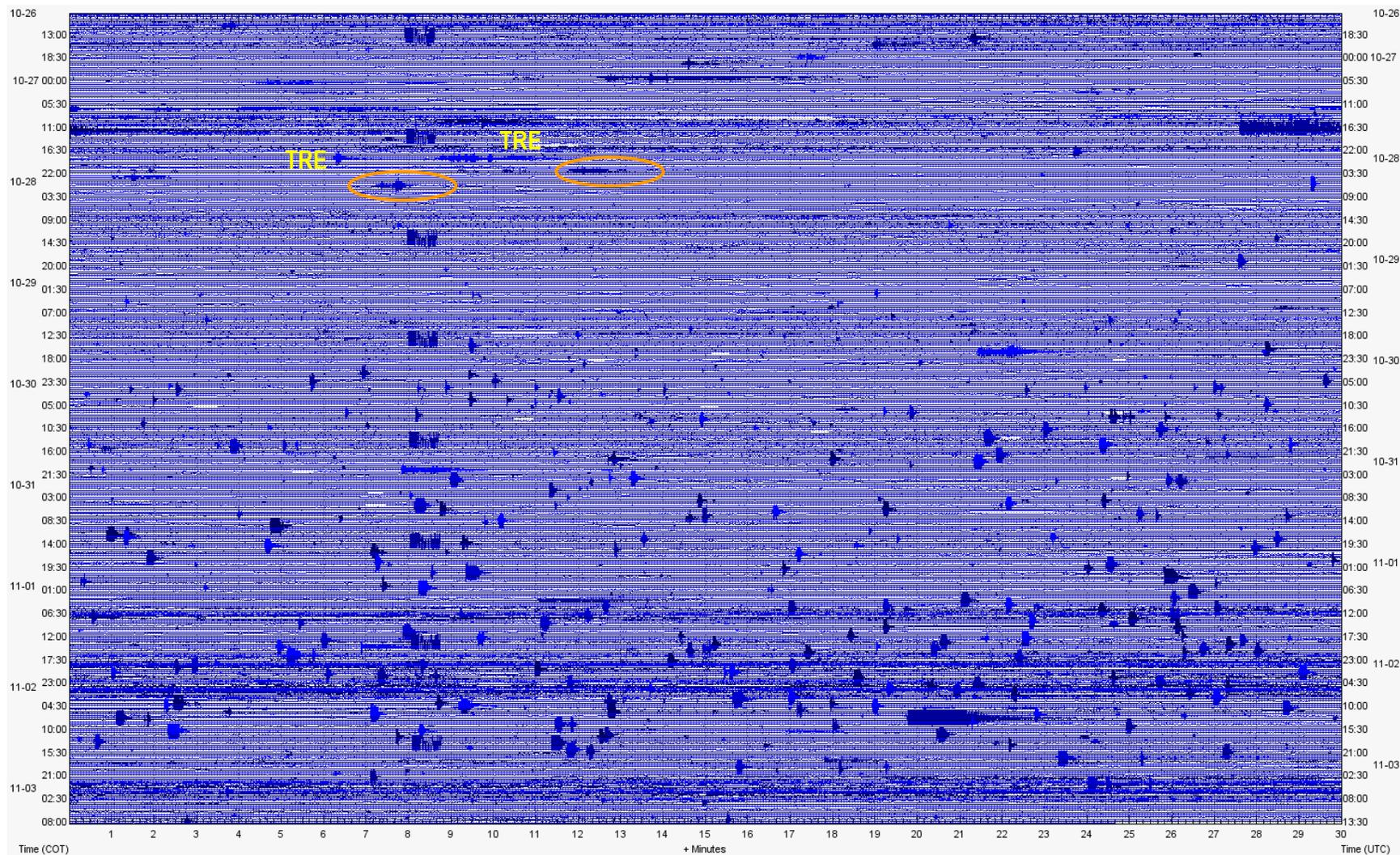


Figura 2.1.42. Sismograma del 26 de octubre al 3 de noviembre del 2009, se observa la ausencia de eventos tipo TRE a partir de la madrugada del 28 de octubre y el incremento en el nivel energético de los eventos LP, HYB y VT a partir del medio día del 29 de octubre.

Para el período evaluado, se resalta que en las características espectrales de los eventos Tornillo y pseudo-Tornillos no se observó un espectro muy limpio como los de los Tornillos que se han registrado en Galeras en eventos anteriores, donde se presenta un solo pulso de frecuencia dominante; los eventos de este período se han caracterizado por mostrar varios pulsos de frecuencias (Figuras 2.1.43, 2.1.44 y 2.1.45), que se han podido identificar tanto en la estación base de clasificación Anganoy, como en otras de la red de vigilancia sísmica de Galeras. Además, se observa que no se mantuvo un solo pulso como dominante, por el contrario, la máxima amplitud espectral fue variando entre los pulsos más característicos de los registros espectrales. Sin embargo, haciendo un seguimiento a estos pulsos se pudo identificar que todos ellos mostraron un ligero incremento en la duración (Figura 2.1.46) y tendencia de disminución en las frecuencias más resaltables (Figura 2.1.47).

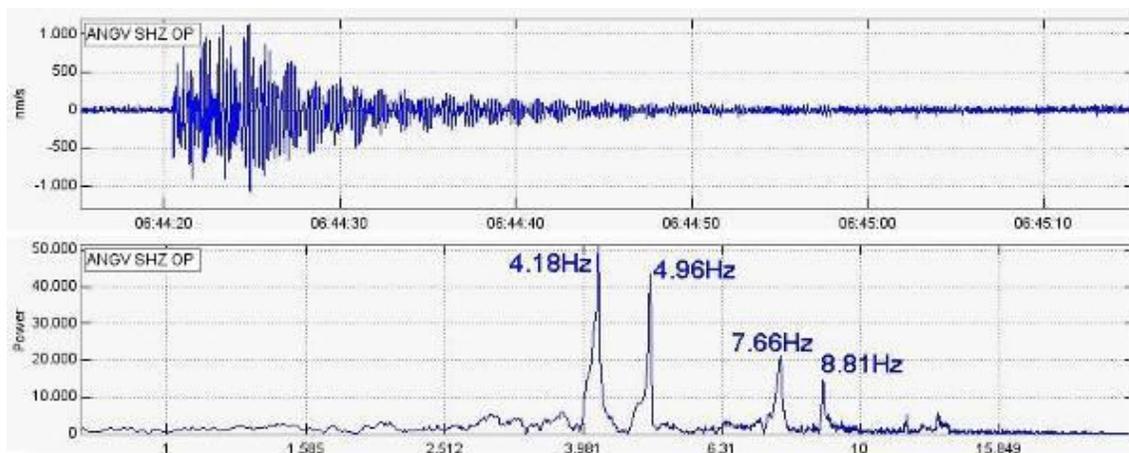


Figura 2.1.43. Señal sísmica y espectro de Fourier del evento pseudo-Tornillo de noviembre 5 (1:44 am).

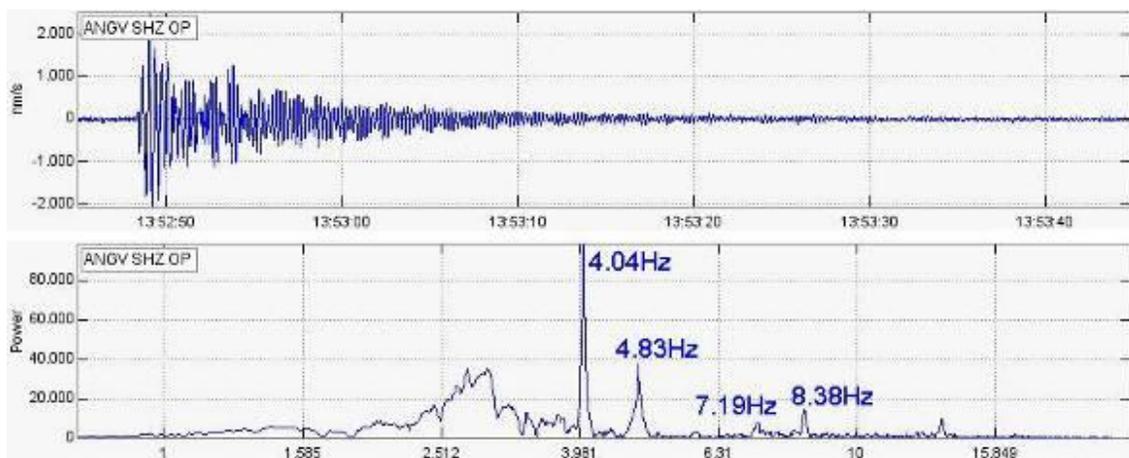


Figura 2.1.44. Señal sísmica y espectro de Fourier del evento tornillo de noviembre 6 (8:52 am).

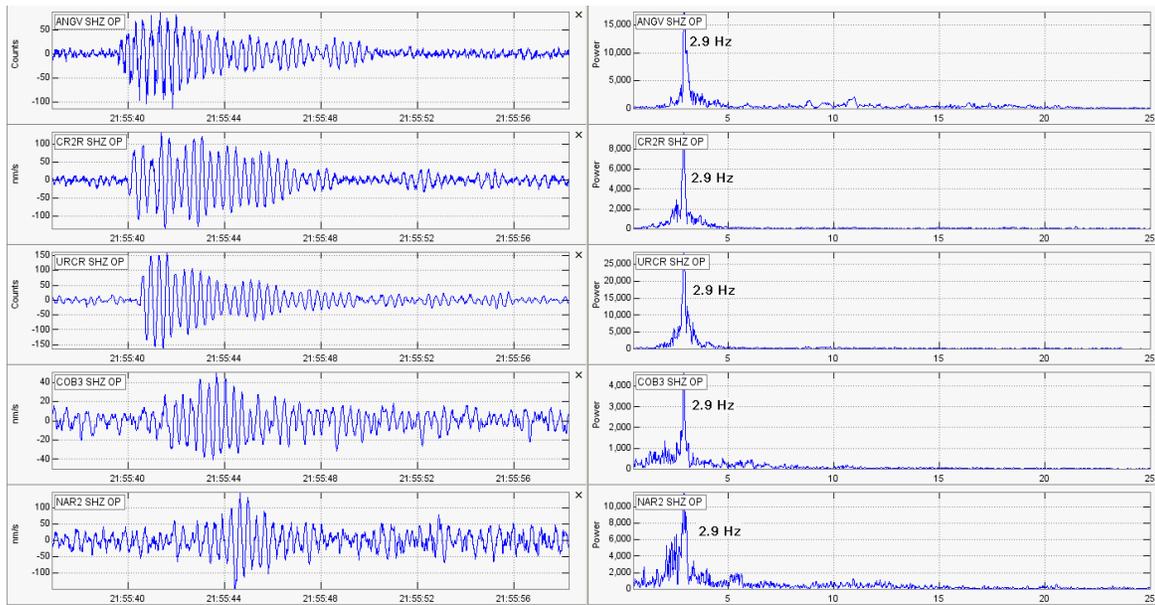


Figura 2.1.45. Sismogramas (izquierda) y espectros (derecha), para las estaciones: Anganoy, Cráter-2, Urcunina, Cobanegra-3 y Nariño-2, del evento pseudo-tornillo registrado el 11 de noviembre a la 4:55 p.m.

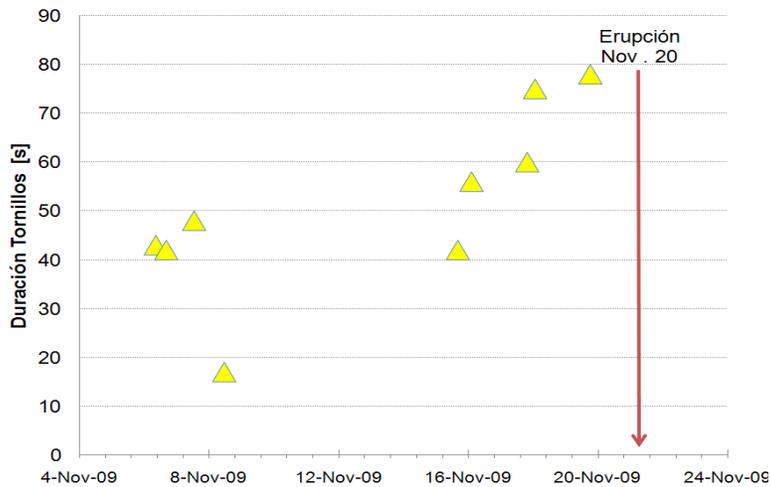


Figura 2.1.46. Evolución temporal de la duración de los eventos tipo Tornillo, registrados entre el 5 y el 19 de noviembre de 2009 por la estación Anganoy.

De la sismicidad asociada con los procesos de fractura (VT e HYB), registrada entre el 1 y el 19 de noviembre fue posible localizar alrededor de 257 eventos, la mayoría de los cuales se ubicaron a niveles superficiales, en profundidades menores de 2 Km, con respecto de la cima volcánica y epicentralmente hacia el sector del cono volcánico, en una alineación sureste–noroccidente, a distancias de hasta 2 Km del cono volcánico. Estos eventos tuvieron magnitudes de coda entre – 0,5 y 2,4 grados en la escala de Richter.

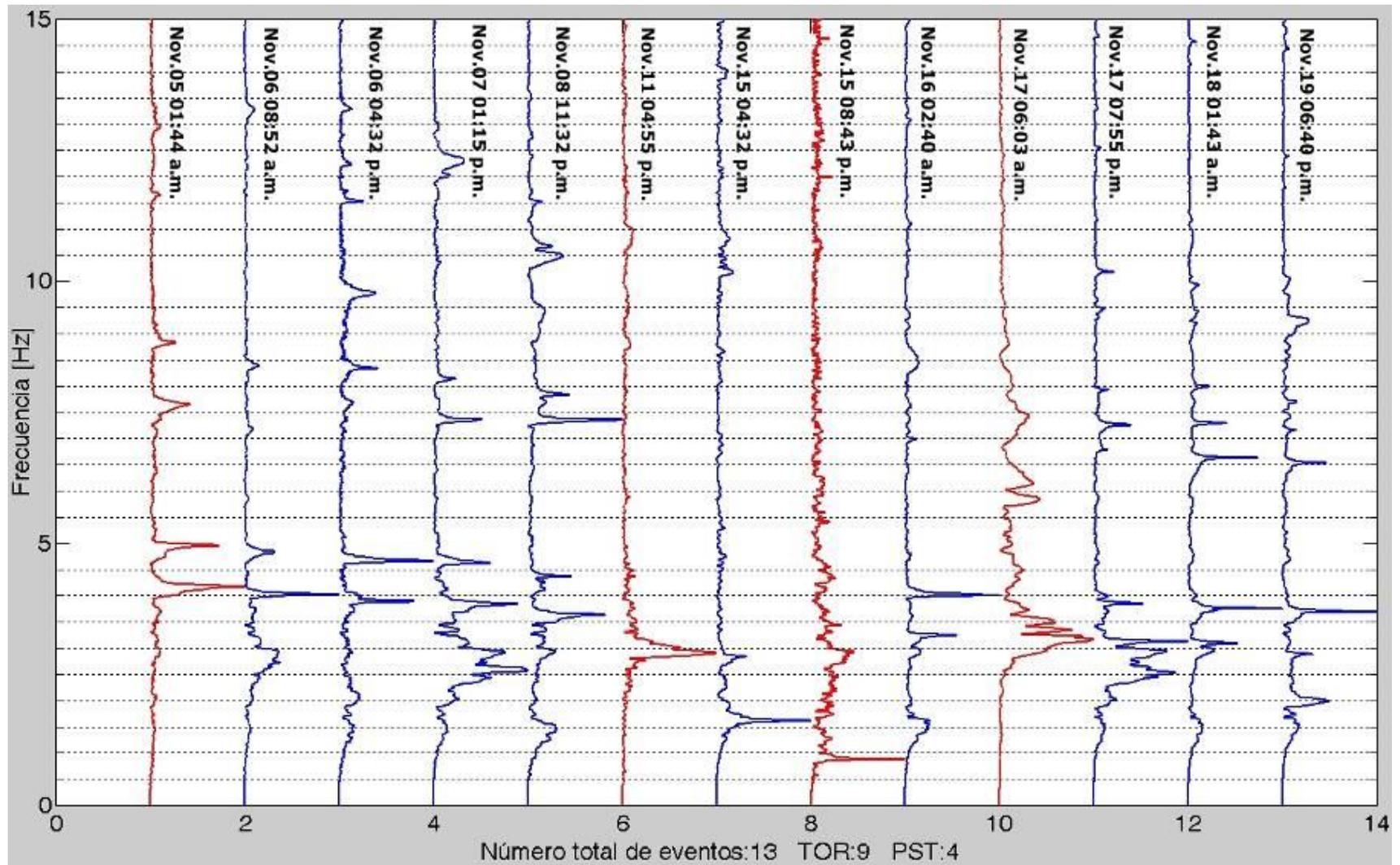


Figura 2.1.47. Evolución temporal de los espectros en frecuencia (entre 0 y 15 Hz) de los eventos tipo tornillo (azul) y pseudo-tornillo (rojo), registrados entre el 5 y el 19 de noviembre de 2009 por la estación Anganoy.

2.1.2.1.2 Episodio eruptivo del 20 de noviembre

Luego del proceso de aporte de material, de sellamiento y presurización del sistema, evidenciado por la ocurrencia de los llamados eventos tipo Tornillo (que caracterizan a un sistema con un alto contraste de impedancia entre el medió sólido y el sistema fluido), ocurrió el evento eruptivo explosivo, el 20 de noviembre a las 08:37 p.m., momento en el cual se emitió comunicado anunciando que la actividad volcánica había cambiado a **Nivel Rojo I ▲** “Erupción inminente o en curso”.

En términos comparativos, la energía de este episodio eruptivo fue menor que la de otras erupciones registradas en 2009 y tomando el periodo de los eventos eruptivos desde el 2004, superó solamente a la del 24 de noviembre de 2005 (Figura 2.1.48).

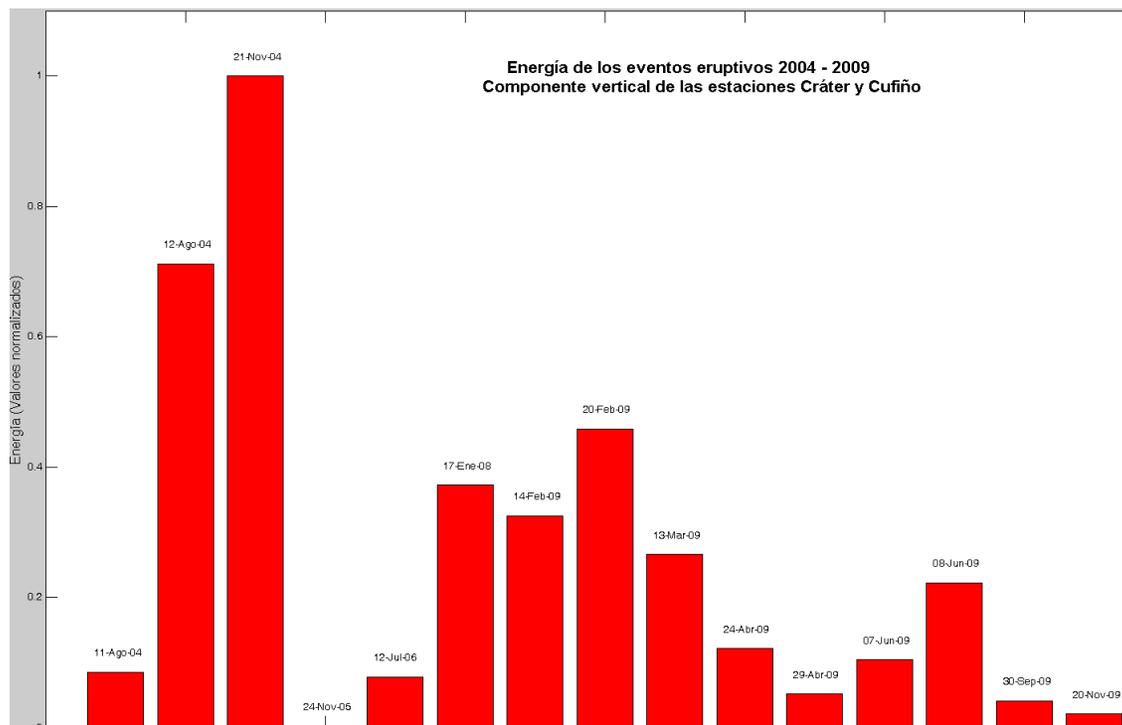


Figura 2.1.48. Comparación de los niveles energéticos de las señales sísmicas asociadas con las erupciones de Galeras registradas entre el 2004 y el 2009.

La señal sísmica de la erupción, registrada en la estación Cráter-2 (1,5 Km al sur del cráter principal), tuvo una duración aproximada de 28 minutos (Figura 2.1.49), liberó una energía de ondas de cuerpo (E_{oc}) de $4,75 \times 10^{13}$ ergios y generó un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo (DR_{oc}) de $540,9 \text{ cm}^2$.

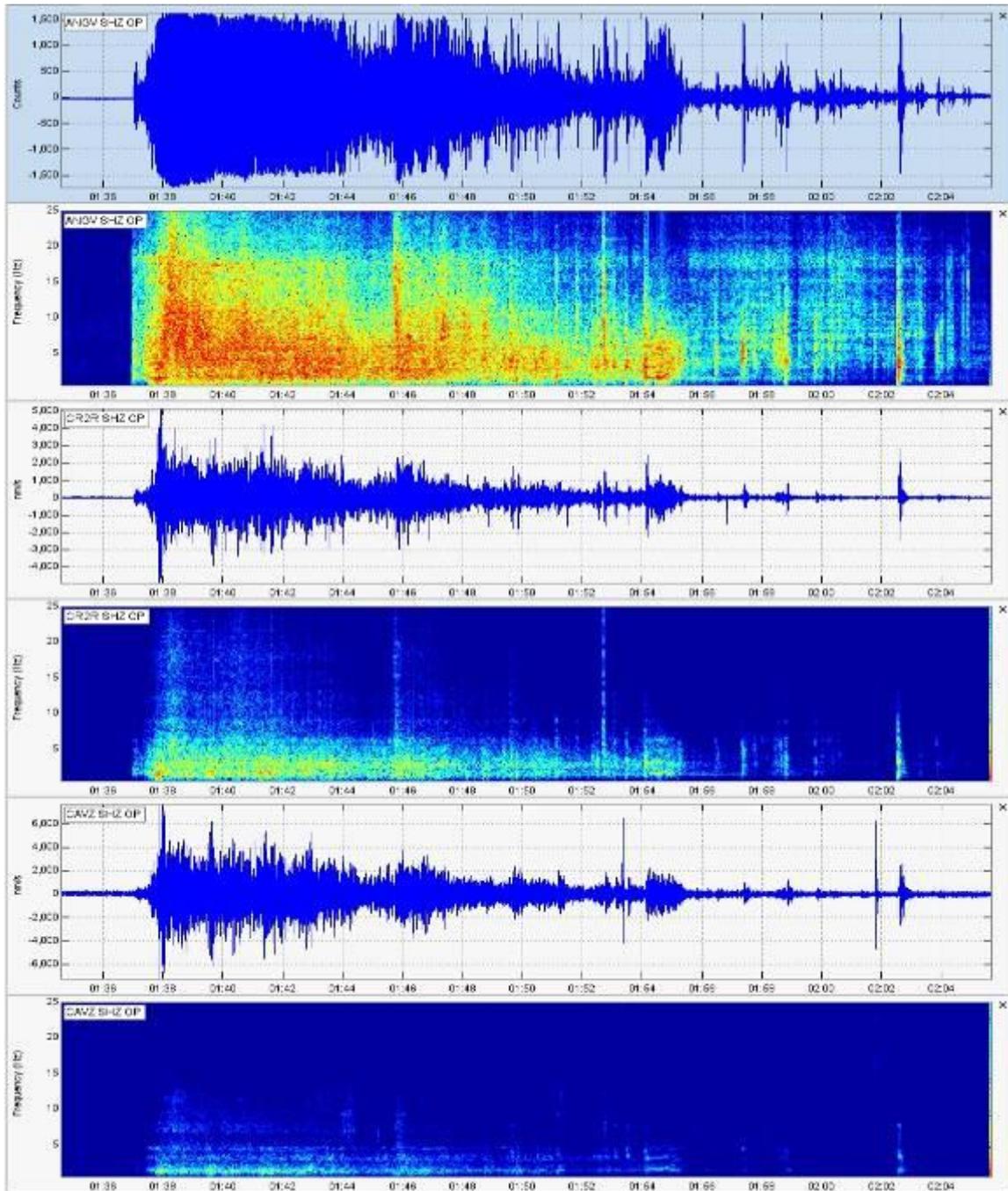


Figura 2.149. Sismogramas y espectrogramas para las estaciones Anganoy, Cráter-2 y Calabozo, del evento eruptivo de Galeras registrado el 20 de noviembre de 2009 a las 8:37 p.m. El alto nivel energético de la señal sísmica superó el rango de detección de la instrumentación de la estación Anganoy, generando saturación en la amplitud.

La fase explosiva de la erupción generó una onda de choque que se registró en los dos sensores acústicos instalados en la estación Calabozo (6,8 Km al oeste-suroeste del cráter principal). Para el sensor acústico *ISLA14* (desarrollado por la Universidad de Hawái), que viene funcionando en Galeras desde mayo de 2006, de acuerdo con su respuesta instrumental, registró una amplitud máxima de 0,095 pascales, un 40% menor a la amplitud máxima registrada para la erupción del 30

de septiembre de 2009. La figura 2.1.50 muestra los registros de los dos sensores acústicos, comparados con la señal sísmica registrada en Calabozo. Estos registros acústicos concuerdan con los reportes recibidos desde varios sectores del área de influencia de Galeras, como el corregimiento San Cayetano del municipio de Pasto, donde sus pobladores escucharon cinco explosiones.

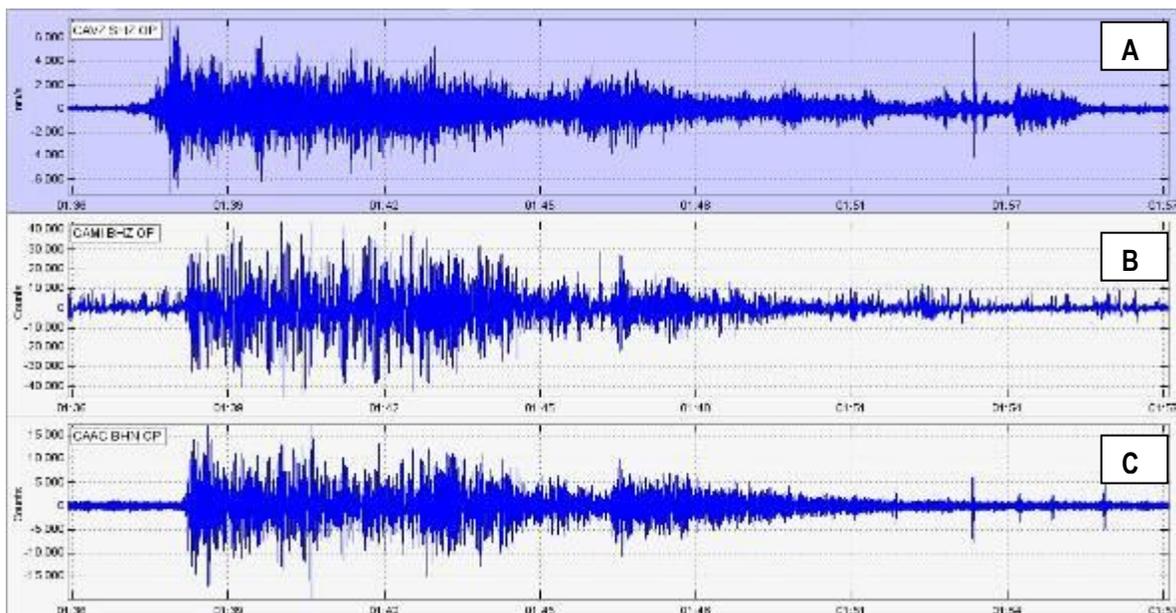


Figura 2.1.50. Registros del evento eruptivo del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. para los sensores en la estación sísmica Calabozo de componente vertical (A), acústico ISLA14 (B) y acústico EENTEC SA-4 (C).

El evento eruptivo fue captado por la cámara web instalada en la sede del OVSP (ubicada a 11,5 Km al oriente del cráter principal), observándose incandescencia posiblemente asociada con la salida de material magmático (bloques eyectados balísticamente y cenizas) a altas temperaturas. Este fenómeno también fue reportado desde diferentes zonas del área de influencia de Galeras, junto con percepción de olores a gases azufrados. La cámara web en el OVSP, que posee un sensor infrarrojo de baja sensibilidad, captó incandescencia por espacio de aproximadamente 15 minutos, desde el momento de la erupción hasta aproximadamente las 8:52 p.m. La figura 2.1.51 muestra algunas imágenes instantáneas de este registro y el video puede descargarse del sitio web del OVSP en el siguiente enlace:

http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto/Imagen:Erupcion_Galeras_noviembre_20_2009_desde_OVSP.mpg

Posterior al evento eruptivo se presentó un notable incremento en la energía sísmica liberada, con la ocurrencia de un enjambre de eventos asociados con diferentes procesos (tránsito de fluidos, fractura de material sólido, eventos que involucran ambos fenómenos) (Figura 2.1.52). Este enjambre de eventos, en el caso de los relacionados con fluidos, se asociaron a un proceso de apertura parcial del sistema, originado por la ruptura del sello o tapón causante de las sobrepresiones que al superar la resistencia del material del sello, dieron lugar a la erupción explosiva; y en el caso de los eventos relacionados con fracturas, pudieron originarse por procesos de acomodamiento de material al interior del volcán. No obstante, debido a las condiciones de inestabilidad del sistema, luego de un evento eruptivo, no se descartó la ocurrencia de otros episodios eruptivos.



Figura 2.1.51. Imágenes captadas por la cámara web ubicada en la sede del OVSP de las manifestaciones en superficie del evento eruptivo registrado el 20 de noviembre a las 8:37 p.m.

Entre los días 22 y 23 de noviembre, se registraron 11 eventos de tremor espasmódico con bandas espectrales amplias (entre 1 y 20 Hz), duraciones pequeñas (entre 38 segundos y 2 minutos, 22 segundos) y bajo nivel energético (entre $5,0 \times 10^9$ y $5,7 \times 10^{10}$ erg). Esta sismicidad se asoció con emisiones de gases volcánicos, en ocasiones, acompañados de cenizas, que estarían evidenciando que la actividad volcánica se encontraba en un periodo de transición hacia un estado que permitiría liberación paulatina de presiones, para llegar a un estado de estabilización del sistema; no obstante, se estimó prudente mantener el **Nivel Rojo I** ▲ “Erupción inminente o en curso” por aproximadamente 24 horas y posteriormente se bajó a **Nivel Naranja II** ◆ “Erupción probable en término de días o semanas”

EL 27 de noviembre, luego de evaluar diferentes parámetros de la actividad volcánica, se retomó el **Nivel Amarillo III** ■ “Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica”, ya que, como se dijo anteriormente, la actividad predominante estuvo relacionada con procesos asociados con movimiento de fluidos de carácter persistente en el tiempo, episodios de tremor, cuyas características generales indicaban su relación con emisión de gases hacia la atmósfera, lo que implica que el sistema continuó en una fase de liberación de presiones.

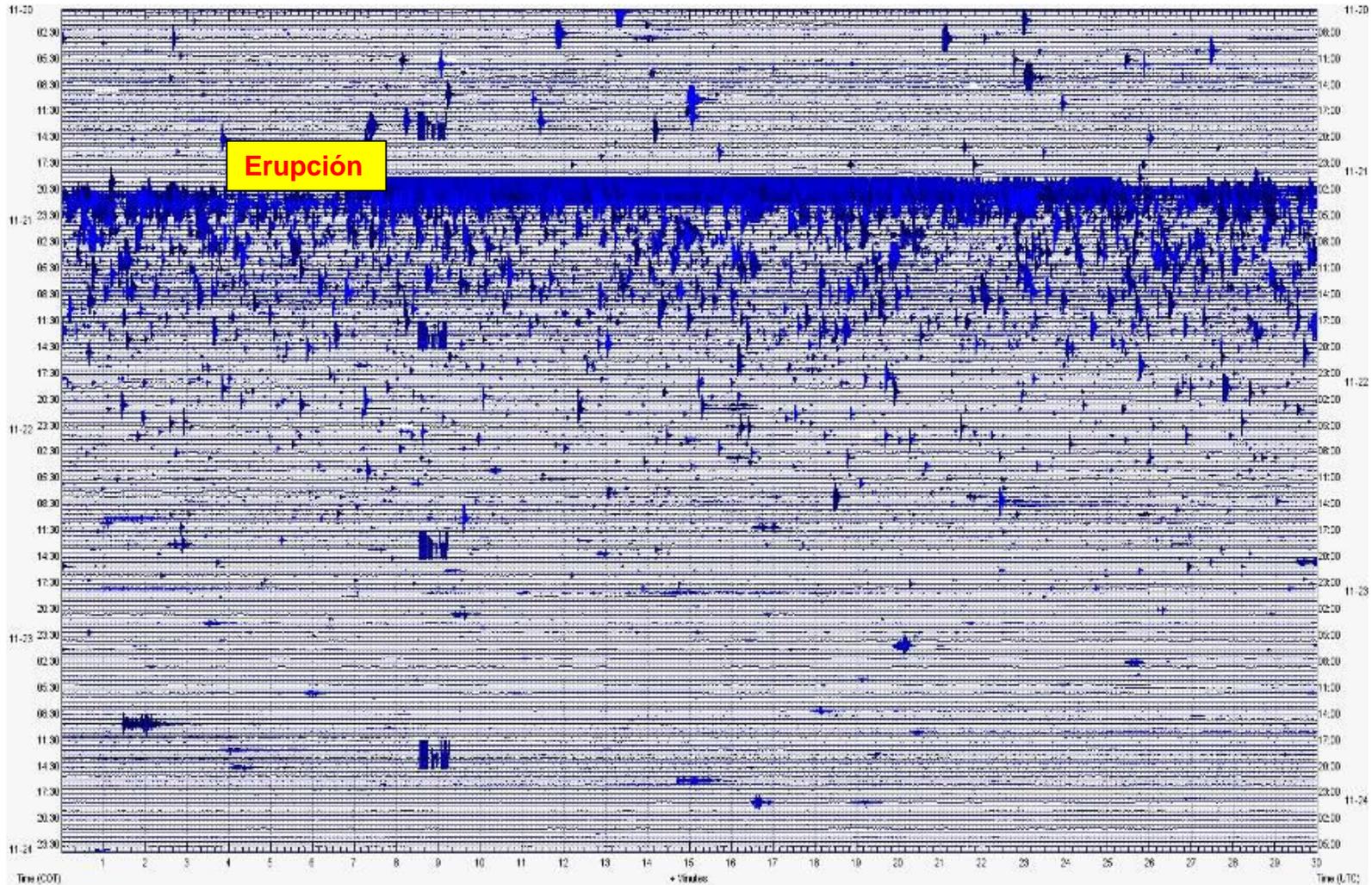


Figura 2.1.52. Sismograma de la estación Anganoy entre el 20 y 23 de noviembre de 2009. Luego de la erupción explosiva del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. (cuyo inicio se resalta con el cuadro amarillo), se presentó un enjambre de sismos volcánicos que de manera gradual fueron disminuyendo en número y en nivel energético.

La mayoría de la sismicidad de fractura, posterior al evento eruptivo se restringió a la zona próxima al cráter volcánico, a distancias menores de 1,5 Km de éste y en niveles superficiales, menores de 3 Km, con respecto a la cima de Galeras; las magnitudes oscilaron entre 0,2 y 2,8 grados en la escala de Richter. Sólo tres eventos de este periodo se registraron más distantes, aproximadamente entre 7 y 10 Km del cráter, uno hacia el suroccidente y dos hacia el suroriente del cráter, en profundidades entre 7,2 y 7,8 Km y magnitudes entre 1,1 y 1,7 grados en la escala de Richter.

Durante el mes de diciembre de 2009 la sismicidad de Galeras fue dominada por los eventos tipo LP y en menor cuantía por eventos de tipo HYB. En diciembre se registraron en total 2.234 sismos volcánicos, de los cuales el 72% correspondió a eventos LP, el 24% a eventos de tipo HYB y un 2% correspondió tanto a los episodios de Tremor, como a los eventos Volcano Tectónicos.

En diciembre hubo un aumento de 93% en la ocurrencia de los eventos de tipo LP y de un 60% en los eventos no clasificables, con respecto a lo registrado en el mes de noviembre. Los demás tipos de sismos volcánicos disminuyeron en número y en general la ocurrencia sísmica del mes de diciembre disminuyó un 11% con respecto a la registrada en noviembre. La ocurrencia de eventos de tipo HYB alcanzó sólo el 38% de la registrada en el mes pasado, los eventos VT alcanzaron un 23% y los episodios de Tremor un 52%. Los episodios de tremor solamente se registraron en la primera semana del mes.

En cuanto a la energía sísmica liberada, se notó un marcado aumento en los valores de la energía de los eventos LP y VT registrándose el doble y el cuádruple respectivamente, en comparación con el mes de noviembre. En cambio se notó un descenso en los valores de la energía de los eventos HYB y de los episodios de Tremor, registrándose apenas el 50% y el 0,03% de lo que se tuvo en noviembre. La energía total de la sismicidad de diciembre, se incrementó en un 36% con relación a la registrada en el mes anterior.

Teniendo en cuenta la totalidad de los sismos volcánicos, el 70% de la energía sísmica total de diciembre provino de los eventos LP, el 22% correspondió a la energía de los eventos VT, el 7% a la energía de los eventos de tipo HYB y finalmente el 1% correspondió a los episodios de Tremor.

Como ya se dijo, los episodios de Tremor se presentaron básicamente en la primera semana de diciembre, resaltándose que algunos de ellos estuvieron precedidos por pequeños enjambres de sismos de baja energía y otros mostraron características armónicas además de espasmódicas. Por su nivel energético que alcanzó un valor de $8,94 \times 10^{11}$ erg, se destaca el episodio de tremor ocurrido el 2 de diciembre a las 5:04 a.m., al cual se le calculó un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de 39 cm² y su espectro de Fourier mostró una banda de frecuencias entre 1 Hz y 9 Hz, con un pico dominante de 5,1 Hz, en la estación Anganoy (Figura 2.1.53).

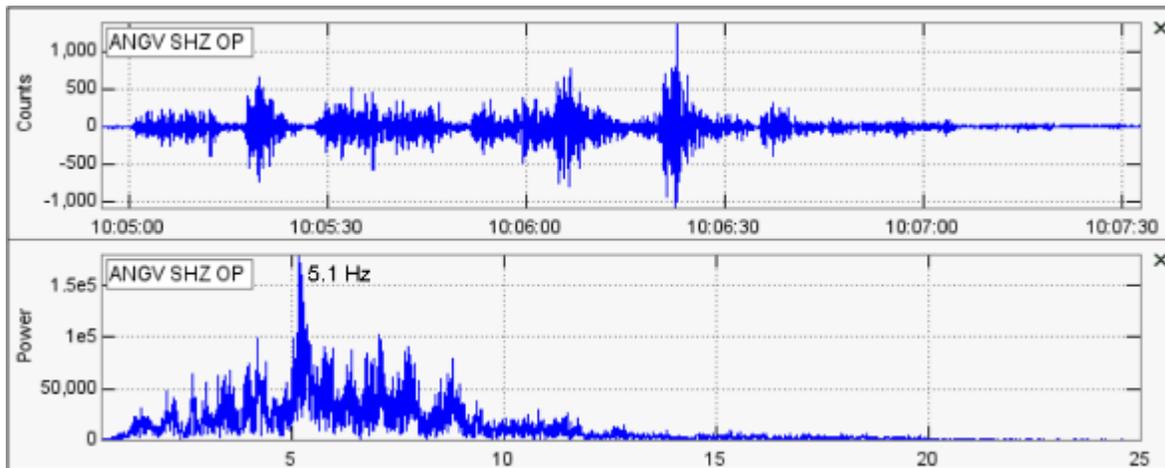


Figura 2.1.53. Sismograma y espectro de Fourier del episodio de temblor espasmódico de diciembre 2 de 2009 a las 5:04 a.m.

Los eventos que muestran en su señal características tanto de movimiento de fluidos como de fractura de material cortical, mostraron mayor ocurrencia en las dos primeras semanas del mes. Por su nivel energético se destaca el evento de tipo HYB registrado en diciembre 10 a las 3:38 a.m., con una energía de $5,67 \times 10^{12}$ erg y un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de $92,3 \text{ cm}^2$. Este sismo mostró un espectro de Fourier con una banda de frecuencias entre 1 Hz y 18 Hz y un pico dominante de 3,8 Hz (Figura 2.1.54). Este sismo se ubicó a 700 metros al WSW del cono activo a una profundidad de 2 km con respecto a la cima de Galeras y con magnitud ML de 2,2 grados en la escala de Richter.

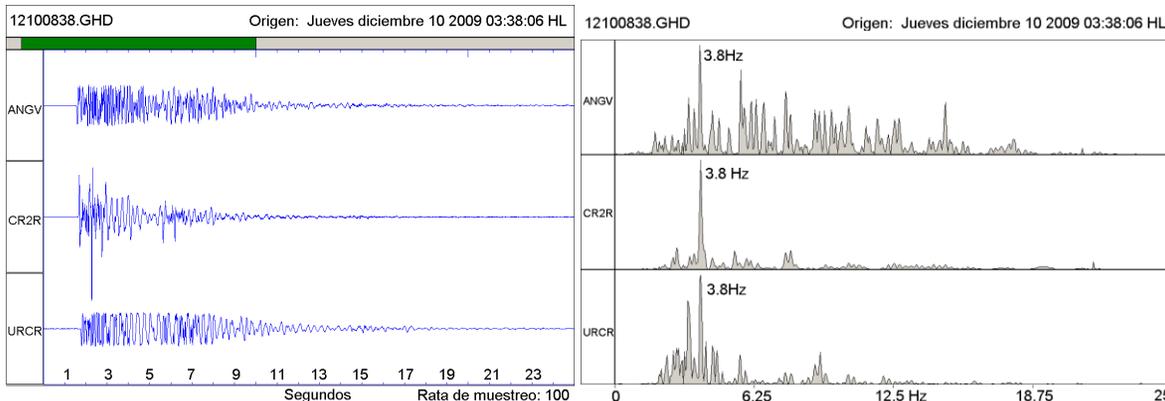


Figura 2.1.54. Sismograma y espectro de Fourier del sismo híbrido de diciembre 10 a las 3:38 a.m.

Los sismos de largo periodo, fueron los de mayor ocurrencia y aporte energético del mes, con un número promedio diario de 52 sismos. A partir del día 12 de diciembre, el número diario de eventos LP aumentó y se mantuvo hasta finalizar el mes. En la primera semana se tuvo un promedio diario de ocurrencia de 7 sismos LP y entre el 12 y el 31 de diciembre se tuvo un promedio diario de 77 sismos. Los dos picos de ocurrencia de LP se registraron en diciembre 18 y diciembre 16 con 125 y 123 sismos LP respectivamente, en estos días se tuvieron valores diarios de energía de $7,82 \times 10^{12}$

erg y $9,12 \times 10^{12}$ erg respectivamente. El pico energético diario se registró en diciembre 20 con $1,4 \times 10^{13}$ erg, debido a 77 sismos LP.

Algunos sismos LP mostraron características armónicas en su parte final y algunos presentaron espectros de Fourier con frecuencias muy limpias y picos frecuenciales muy definidos, también se registraron varios sismos de tipo Tornillo y pseudotornillo. Por su nivel energético se destaca el sismo LP de diciembre 21 a las 2:45 p.m. cuyo espectro de Fourier registrado en las estaciones Anganoy, Cráter y Urcunina, mostró una banda frecuencial entre 1 Hz y 19 Hz, pero con predominio de bajas frecuencias, entre 1 Hz y 7 Hz (Figura 2.1.55). La energía liberada por este sismo fue de $3,2 \times 10^{12}$ erg y se le calculó un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de $55,8 \text{ cm}^2$.

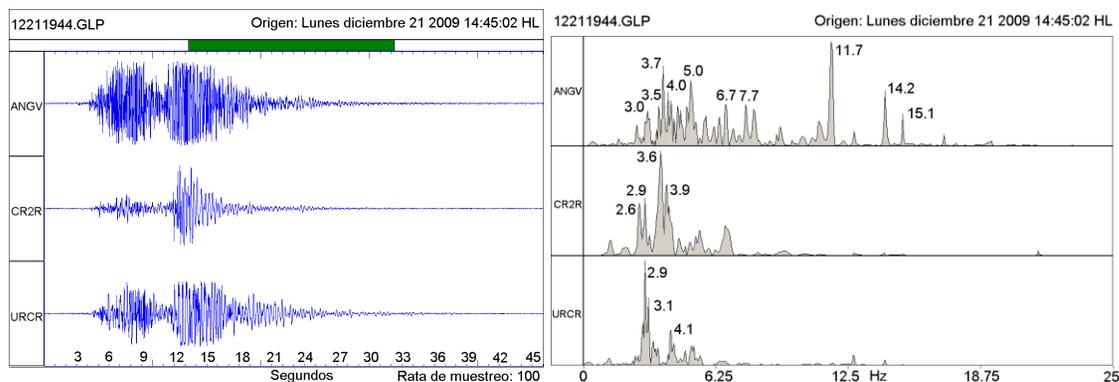


Figura 2.1.55. Sismograma y espectro de Fourier del sismo LP de diciembre 21 a las 2:45 p.m.

A manera de ejemplo de los eventos LP que mostraron espectros muy limpios con picos frecuenciales muy definidos, se muestra en la figura 2.1.56 la señal y el espectro del sismo LP registrado en diciembre 26 a las 2:08 a.m., el cual presentó un pico de frecuencia dominante en 14,8 Hz. Este sismo liberó una energía de $1,3 \times 10^{10}$ erg y tuvo un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de $3,4 \text{ cm}^2$.

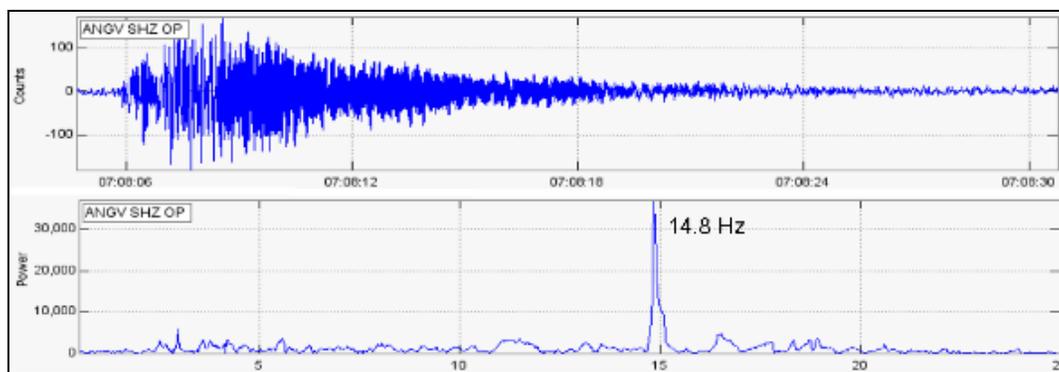


Figura 2.1.56. Sismograma y espectro de Fourier del sismo LP de diciembre 26 a las 2:08 a.m.

Por su importancia, ya que son considerados precursores de erupciones y se han presentado en Galeras antes de las erupciones de los periodos de actividad ocurridos de 1990 a 1993 y de 2004 a la fecha, se destaca el registro de 9 Tornillos y 5 pseudotornillos. En la figura 2.1.57 se muestra la señal y el espectro de Fourier del Tornillo más energético del mes, registrado en diciembre 23 a las

9:30 a.m.; este evento liberó una energía de $2,5 \times 10^{12}$ erg y tuvo un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de $121,9 \text{ cm}^2$. El pico frecuencial dominante del Tornillo fue de 1,46 Hz.

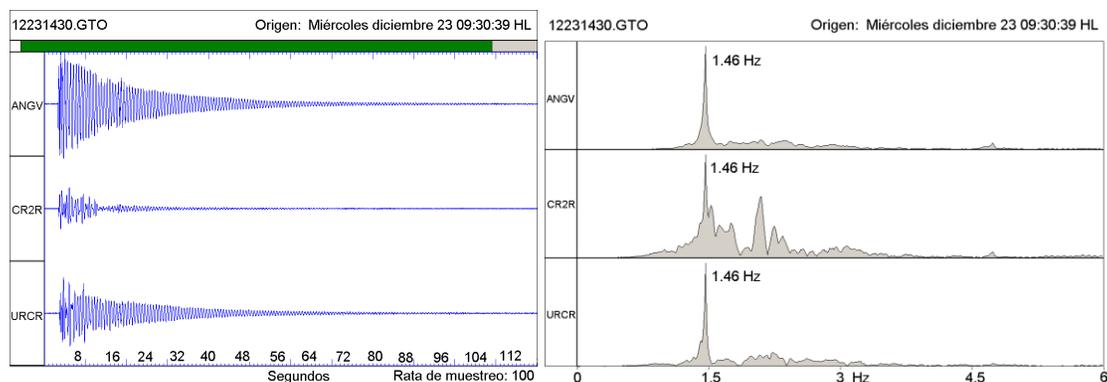


Figura 2.1.57. Sismograma y espectro de Fourier del evento Tornillo de diciembre 23 a las 9:30 a.m.

En la tabla 2.1.7 se puede apreciar las características de los eventos tipo Tornillo y pseudotornillo de diciembre de 2009, procesadas para la estación Anganoy. Nótese que en general la duración de los Tornillos ha ido en aumento y la frecuencia dominante ha ido disminuyendo, en cambio no hay una clara tendencia para los datos de la amplitud de la onda (Figura 2.1.58). Este comportamiento en la duración y la frecuencia se ha visto en el registro de Tornillos precursores de erupciones en Galeras.

Tabla 2.1.7. Características de los eventos Tornillo y pseudotornillo de diciembre de 2009, en la estación Anganoy.

Tipo	Fecha	Hora Local	Duración (s)	Amplitud (μm)	Energía (erg)	Frec. Dom. (Hz)	Frec. Subd. (Hz)
ST	9-dic-09	14:33	13	1,29	$1,83 \times 10^{09}$	3,49	2,93
T	9-dic-09	15:27	30	15,47	$7,86 \times 10^{10}$	5,19	2,18
T	10-dic-09	12:22	31	6,45	$1,51 \times 10^{10}$	5,18	2,18
ST	12-dic-09	15:52	32	3,61	$5,05 \times 10^{09}$	1,93	5,27
ST	14-dic-09	11:02	21	7,74	$2,34 \times 10^{10}$	4,35	3,11
ST	17-dic-09	15:46	30	19,99	$1,74 \times 10^{11}$	1,60	2,36
T	18-dic-09	17:07	35	12,25	$1,25 \times 10^{11}$	1,61	2,36
ST	19-dic-09	20:11	35	23,86	$1,32 \times 10^{11}$	4,79	9,92
T	21-dic-09	15:53	60	26,43	$7,60 \times 10^{11}$	1,49	
T	23-dic-09	9:30	95	32,88	$2,50 \times 10^{12}$	1,46	
T	26-dic-09	13:33	43	30,30	$4,34 \times 10^{11}$	1,37	8,12
T	28-dic-09	6:00	20	2,64	$2,09 \times 10^{10}$	1,41	
T	28-dic-09	20:07	110	14,83	$1,67 \times 10^{11}$	4,47	1,29
T	29-dic-09	23:45	105	0,64	$2,03 \times 10^{09}$	1,40	4,16

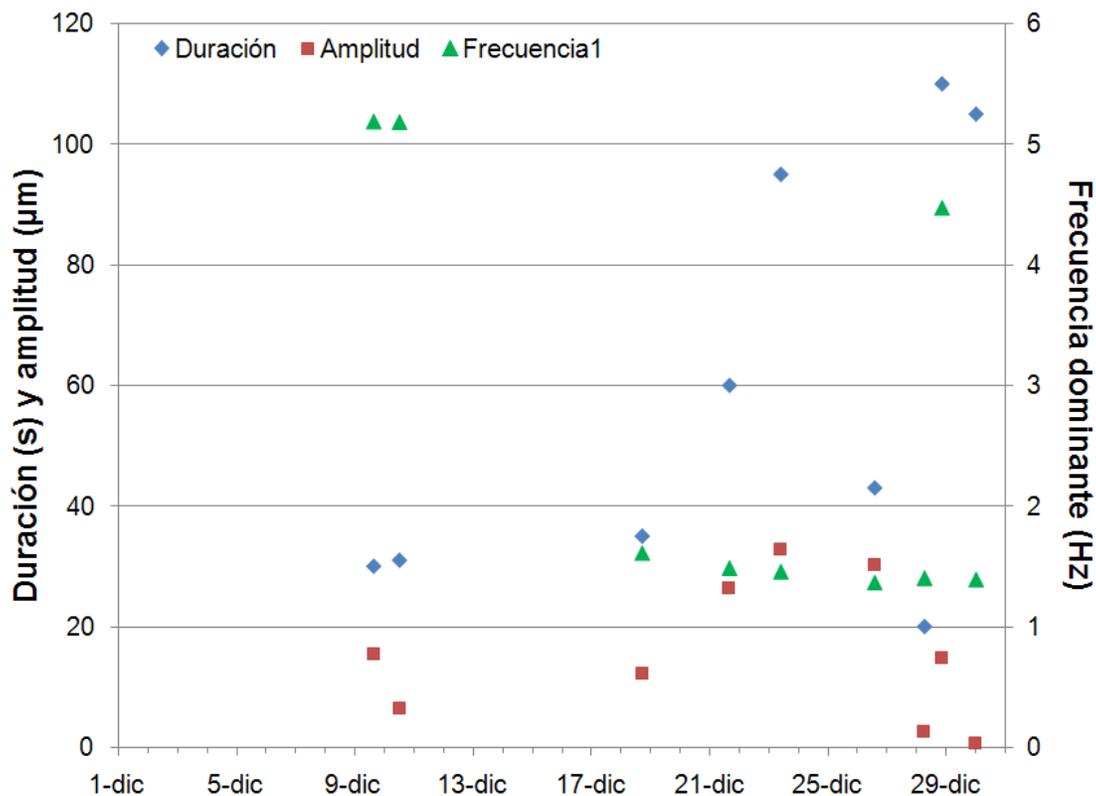


Figura 2.1.58. Comportamiento de la duración, amplitud y frecuencia dominante de los Tornillos de diciembre de 2009

Durante diciembre de 2009 fue posible localizar 185 sismos, de los cuales 139 fueron de tipo HYB y 46 eventos fueron de tipo VT. La mayoría de focos sísmicos se ubicaron en cercanías del cráter activo a distancias entre 0,1 y 2 Km.

El evento VT más energético de diciembre se registró el día 27 a las 4:26 p.m., localizado a 11,5 Km al suroccidente de Galeras, a una profundidad aproximada de 7 km con respecto a altura de la cima volcánica y con magnitud local ML de 2,9 grados en la escala de Richter. La energía liberada por éste sismo fue de $4,8 \times 10^{13}$ erg. y se reportó sentido en algunos sectores de la ciudad de Pasto y en el municipio de Yacuanquer.

Se destaca también otro evento VT que se reportó sentido en varios sectores de la ciudad de Pasto, en diciembre 19 a las 9:39 a.m. Este sismo liberó una energía de $2,5 \times 10^{12}$ erg, fue localizado a 6,5 Km al noreste del cono activo, a una profundidad de 8 Km con respecto a la cima de Galeras y con una magnitud local ML de 2 grados en la escala de Richter.

2.1.3 DEFORMACION

La red de deformación para la mayor parte del segundo semestre del 2009, estuvo conformada por cuatro inclinómetros: Cráter (0,9 km al este del cráter), Peladitos (1,4 km al sur-este del cráter), Calabozo (a 7 Km al oeste del cráter principal) y Huairatola (1,7 km al norte, 3745 m sobre el nivel del mar). El 20 de octubre de 2009, se instaló el nuevo inclinómetro Cobanegra (3,9 Km al sur-sur-este del cráter, 3625 m sobre el nivel del mar).

El inclinómetro Cráter, a partir de abril hasta más de la mitad del mes de octubre de 2009, mostró un comportamiento estable en sus dos componentes. Solo hacia finales de octubre comienza una tendencia ascendente en sus dos componentes que pudo estar relacionada con el comportamiento de la temperatura del instrumento en esta fecha. Se resalta que hacia finales de septiembre no se observó cambio alguno relacionado con el proceso eruptivo del 30 de este mes; de igual manera no se presentó variaciones relacionadas con la erupción del 20 de noviembre, ya que, aun cuando se dieron los proceso eruptivos, la tendencia ascendente se mantuvo tanto en las dos componentes como en los valores de temperatura del inclinómetro. (Figura 2.1.59).

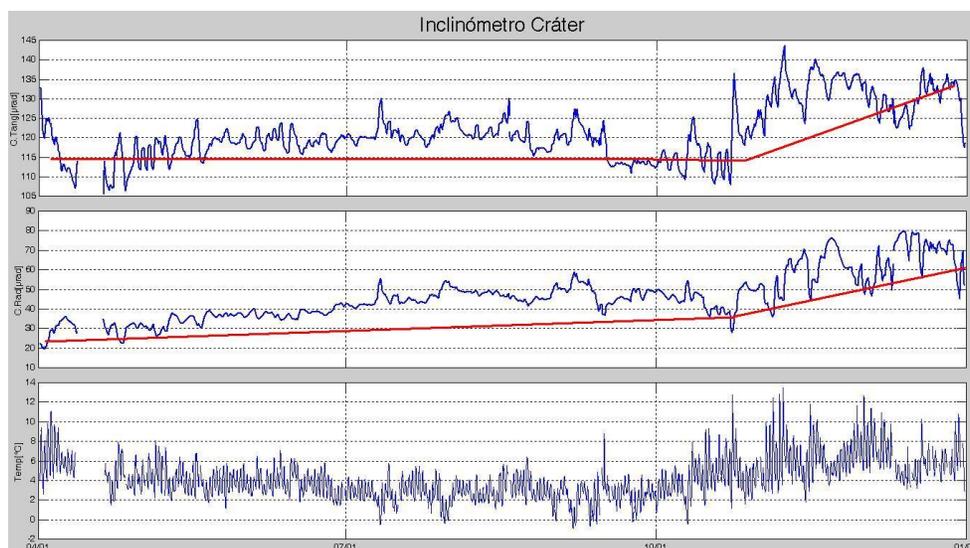


Figura 2.1.59. Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Cráter, entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.

Para el inclinómetro Peladitos, a partir de abril y hasta mediados de octubre, se observó en la componente tangencial un comportamiento descendente de unos 50 μ radianes y para la radial una mínima tendencia ascendente que solo alcanzó unos pocos μ radianes. Posteriormente y hasta finales del 2009, las dos componentes cambiaron de tendencia, la tangencial comenzó a mostrar una tendencia descendente, acumulando unos 50 μ radianes, y la radial de unos 8 μ radianes. Sin embargo es importante resaltar que la temperatura sigue una tendencia similar a la componente tangencial e inversa a la radial. Estos comportamientos se han observado en años anteriores sin que esté presente una actividad volcánica importante, sin embargo bajo el contexto actual, no se puede descartar que este comportamiento además de estar influenciado por la temperatura tenga que ver con la actividad volcánica (Figura 2.1.60).

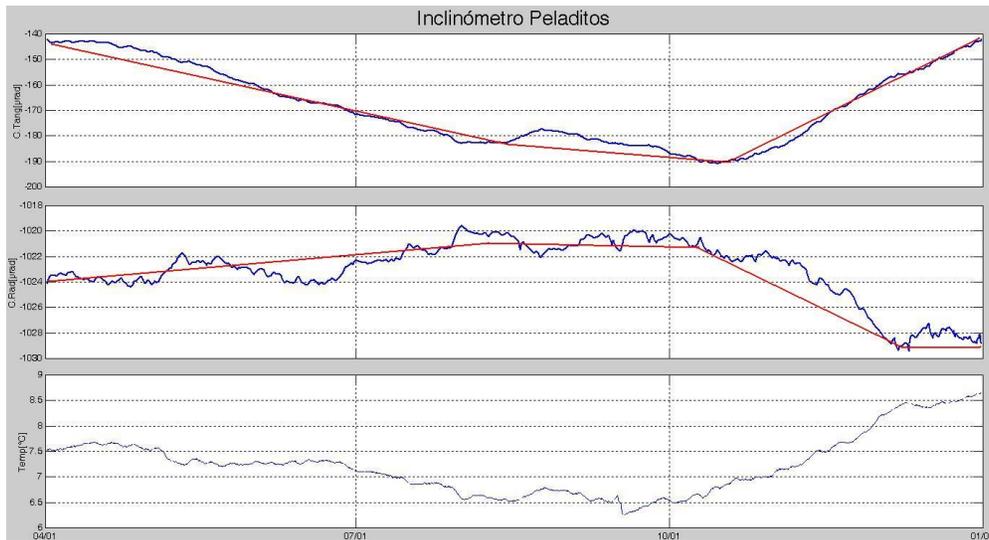


Figura 2.1.60 Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Peladitos entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.

El inclinómetro Calabozo mantuvo un comportamiento casi estable en sus componentes, entre el mes de abril y junio, posteriormente se identificó una tendencia descendente que se prolongó hasta aproximadamente mediados de octubre de 2009, cuando se presentó un cambio en la tendencia, tomando valores ascendentes muy acentuada y hasta finales del 2009. Este inclinómetro mostró las mayores variaciones de la red de inclinómetros instalados en Galeras (Figura 2.1.61).

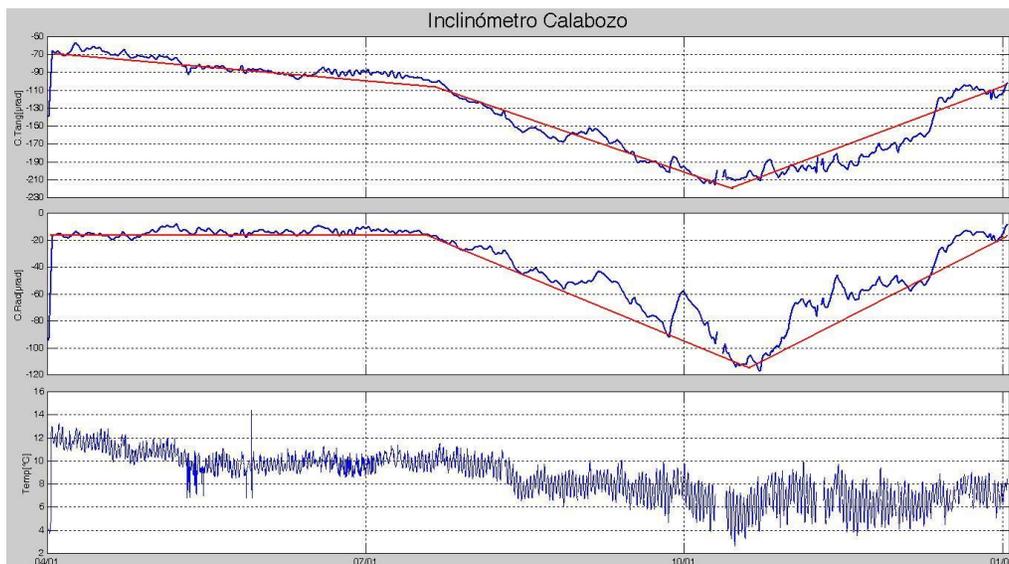


Figura 2.1.61. Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Calabozo entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.

El inclinómetro Huairatola, prácticamente en todo el 2009, el comportamiento de sus componentes fue estable, 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 2.1.62).

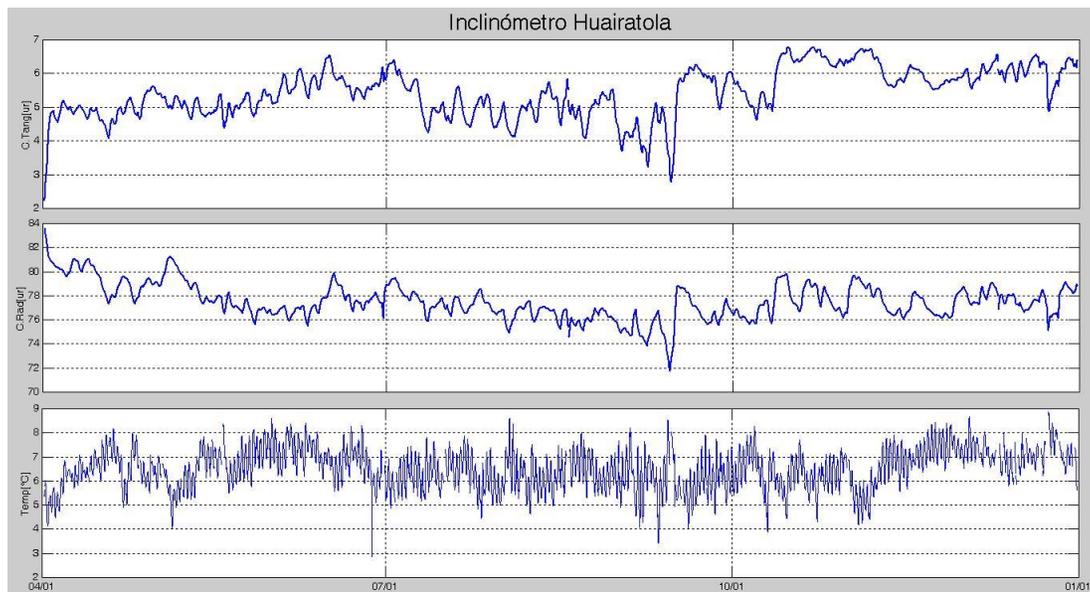


Figura 2.1.62. Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Huairatola entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.

El inclinómetro electrónico de Cobanegra, desde su instalación (finales de octubre de 2009), hasta diciembre de 2009, ha mostrado un comportamiento estable en sus dos componentes (Figura 2.1.63).

Teniendo en cuenta la variación de los inclinómetros, Cráter, Peladitos y Calabozo, se definieron tres periodos en los cuales coinciden los principales cambios de los inclinómetros, definidos así: primer periodo, entre el 3 de abril y 15 de julio de 2009, segundo periodo, 16 de julio a 14 de octubre de 2009; tercer periodo, 17 de octubre a 31 de diciembre de 2009 (Figura 2.1.64). Para estos periodos se calculó los vectores resultantes. Se resalta que el segundo periodo e inicios del tercer periodo, puede estar asociado con la mayor actividad de fluidos registrada en el 2008 y 2009; adicionalmente se nota que la dirección de los vectores coincide con la localización de eventos de fractura registrados en noviembre de 2009. Hay que remitirse a las graficas de conteo que se encuentran en la sección 2.1.2 (Figura 2.1.6 y Figura 2.1.16).

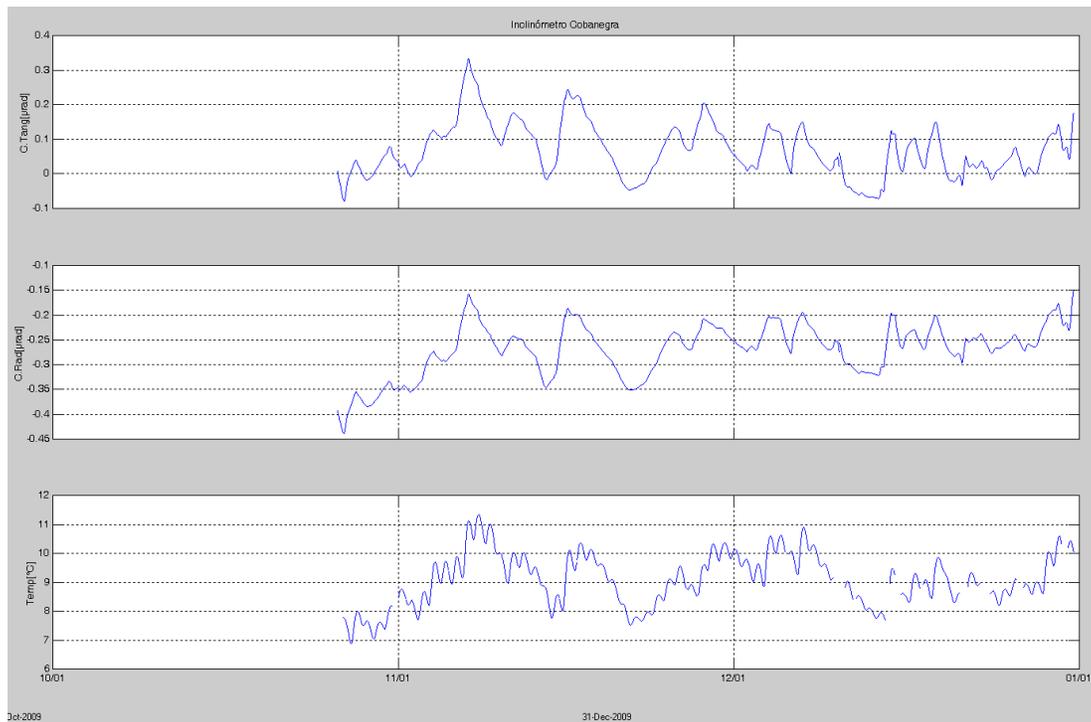


Figura 2.1.63. Comportamiento de la componente tangencial, radial y del sensor de temperatura del inclinómetro Cobanegra entre el 1 de abril y el 31 de diciembre de 2009.

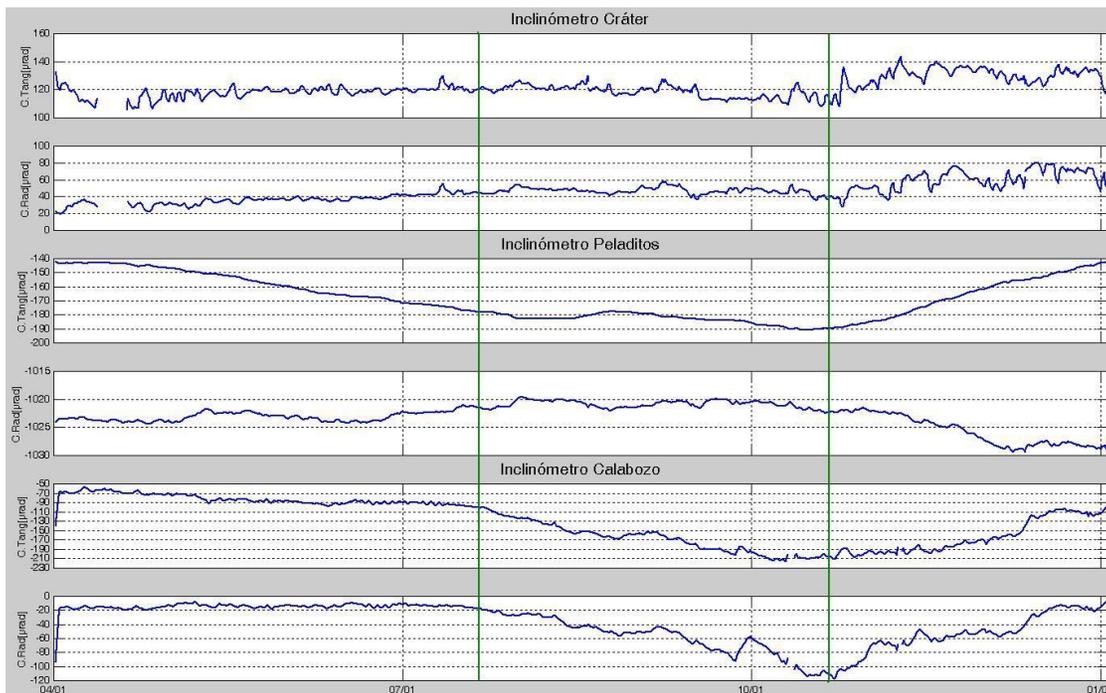


Figura 2.1.64. Comportamiento de la componente tangencial y radial de los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo. Las líneas verdes identifican los tres periodos: Primer periodo, entre el 3 de abril y 15 de julio de 2009, segundo periodo, 16 de julio a 14 de octubre de 2009; tercer periodo, 17 de octubre a 31 de diciembre de 2009

Para el primer periodo, los tres vectores mostraron comportamientos similares tendientes a la estabilidad; la mayor deformación la mostró la componente tangencial del inclinómetro Peladitos con 40 μ radianes. Utilizando estos valores y el modelo de Mogi, se obtuvo que posiblemente la deformación se originó a una profundidad entre cercana a los 9 Km (Figura 2.1.65).

En el segundo periodo, Calabozo mostró la mayor deformación, con 153 μ radianes; esto puede indicar que la fuente que provocó este cambio es más profunda, mientras que los otros inclinómetros mostraron estabilidad (Figura 2.1.65 y 2.1.66). Con la información de los inclinómetros no fue posible establecer una relación aplicando el modelo de Mogi.

En el tercer periodo, utilizando la información suministrada por los inclinómetros y aplicando Mogi, se observa que la fuente que debió actuar en ese momento y provocó la deformación se profundizó con respecto al primer periodo (Figura 2.1.67).

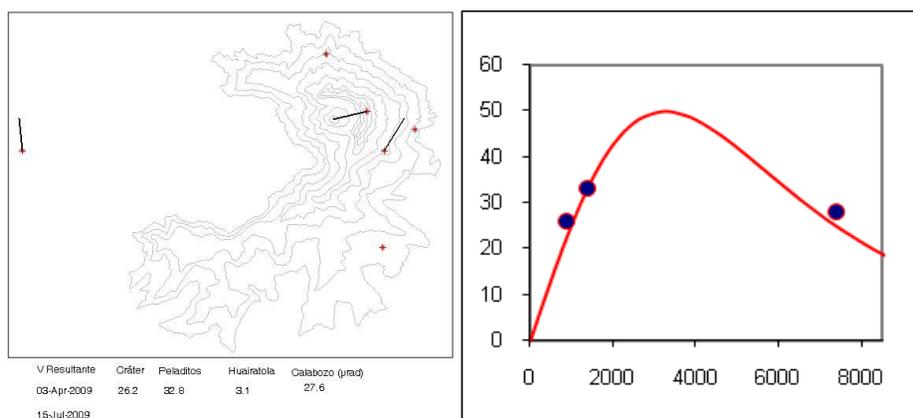


Figura 2.1.65. Izquierda, vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos, Huairatola y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 3 de abril y el 16 de julio de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación. Derecha, Curva que se ajusta a los vectores resultantes obtenidos, utilizando el modelo de Mogi.

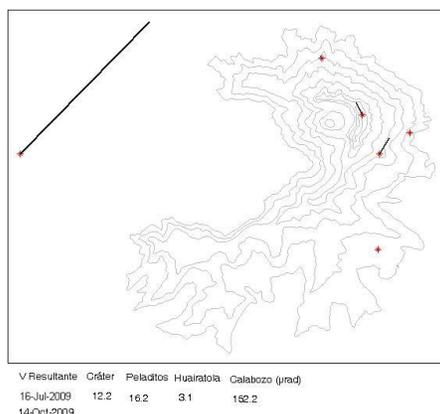


Figura 2.1.66. Vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 16 de julio y el 14 de octubre de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación.

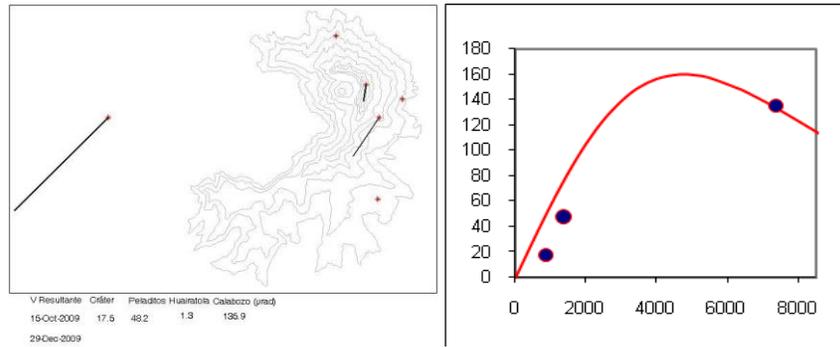


Figura 2.1.67. Vectores resultantes para los inclinómetros Cráter, Peladitos y Calabozo, para el periodo comprendido entre el 15 de octubre y el 31 de diciembre de 2009. El asterisco indica el lugar donde se encuentra la estación. Derecha, Curva que se ajusta a los vectores resultantes obtenidos, utilizando el modelo de Mogi.

2.1.4 FISICOQUIMICA

En el área de fisicoquímica, durante el segundo semestre de 2009 se midió el flujo de Dióxido de Azufre (SO_2) emitido por el volcán Galeras a la atmósfera. Para medir el SO_2 se utilizó las estaciones telemétricas permanentes tipo escan-DOAS¹ y el instrumento móvilDOAS del Proyecto NOVAC² de la Unión Europea del cual INGEOMINAS es partícipe. Las estaciones están ubicadas en el cuadrante noroccidental de Galeras (Figura 2.1.68) debido a que en la mayor parte del año, el viento se dirige hacia ese sector. Los datos de dirección y velocidad del viento para calcular el flujo de SO_2 se obtuvieron de la estación climática localizada en el sector sur del borde de la caldera y por un daño en la misma, a partir de septiembre se obtuvieron del IDEAM³. El móvilDOAS se usa para hacer medidas móviles en la carretera Circunvalar a Galeras. Además se utilizó la información de las imágenes satelitales OMI⁴ que monitorea la presencia de algunos gases en la atmósfera, entre ellos el SO_2 .

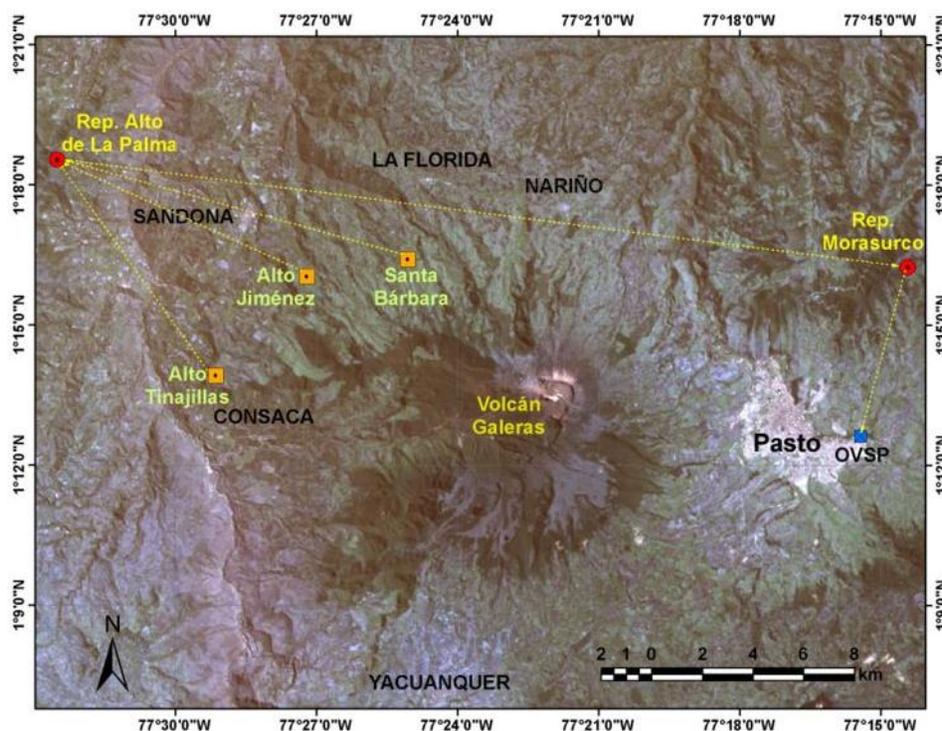


Figura 2.1.68. Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS.

Entre julio y diciembre de 2009, lo más destacable del monitoreo del flujo de SO_2 fue la ocurrencia de 2 episodios eruptivos del volcán Galeras, en los que se observó días antes de las erupciones, procesos de descenso en los valores de flujo y luego ausencia del mismo por varios días (Figura 2.1.69) y también se observó un elevado valor de flujo después de la erupción de septiembre 30 que ocurrió a las 9:14 a.m.; en cambio con la erupción de noviembre 20 esto no fue posible, ya que

¹ DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy – Espectroscopía Diferencial de Absorción Óptica

² Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change; <http://www.novac-project.eu>

³ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia; <http://www.ideam.gov.co>

⁴ OMI (Ozono Monitoring Instrument); <http://so2.umbc.edu/omi>



ocurrió a las 8:37 p.m. y al hacer la medida al día siguiente, los valores obtenidos fueron bajos (Figura 2.1.69).

Durante el segundo semestre de 2009 el flujo de SO₂ fluctuó en un rango de valores entre 30 y 9300 toneladas diarias, valores considerados cualitativamente como muy bajo y muy alto para Galeras. El máximo valor fue medido en septiembre 30 después de la erupción a las 9:39 a.m. en la estación permanente de Alto Jiménez, con velocidad del viento de 7,7 m/s y dirección hacia el occidente de Galeras. A principios de septiembre los valores de flujo eran altos y luego comenzaron a disminuir hasta que en los 10 días que precedieron a la erupción, no se tuvo medidas ni con las estaciones permanentes ni con el móvilDOAS (Figura 2.1.69), lo cual fue un claro indicio de que el sistema se fue sellando paulatinamente y en el periodo previo a la erupción no dejó escapar SO₂ hasta el momento de la explosión.

Para la segunda erupción del semestre, se midieron valores entre moderados y bajos y de la misma forma en los días previos a la erupción, no se pudo detectar SO₂ ni con las estaciones permanentes ni con el móvilDOAS, y el periodo de ausencia del gas fue mayor, con 25 días sin detección de SO₂, exceptuándose el 8 de noviembre con un valor de flujo de aproximadamente 90 toneladas diarias, medido en Santa Bárbara (Figura 2.1.69); como la erupción ocurrió en las horas de la noche, no fue posible establecer el flujo de SO₂ que siguió a la explosión.

En la gráfica se puede notar que los mayores valores se registraron en la primera mitad del semestre, posiblemente porque después de la erupción del 30 de septiembre hubo una gran liberación de gas haciendo luego que los valores de flujo descendieran y al final del semestre se fue marcando la ausencia del SO₂, con pocos datos, cuyas medidas fueron hechas principalmente con móvilDOAS (Figura 2.1.69).

El 76% de las 104 medidas obtenidas en el segundo semestre de 2009, se hizo en las estaciones escanDOAS y el 24% se hizo con el móvilDOAS. En cuanto a los escanDOAS, el 29% de los valores máximos del flujo de SO₂ fueron medidos en la estación de Alto Jiménez, un 33% en la estación de Alto Tinajillas y el 38% fueron leídas en Santa Bárbara.

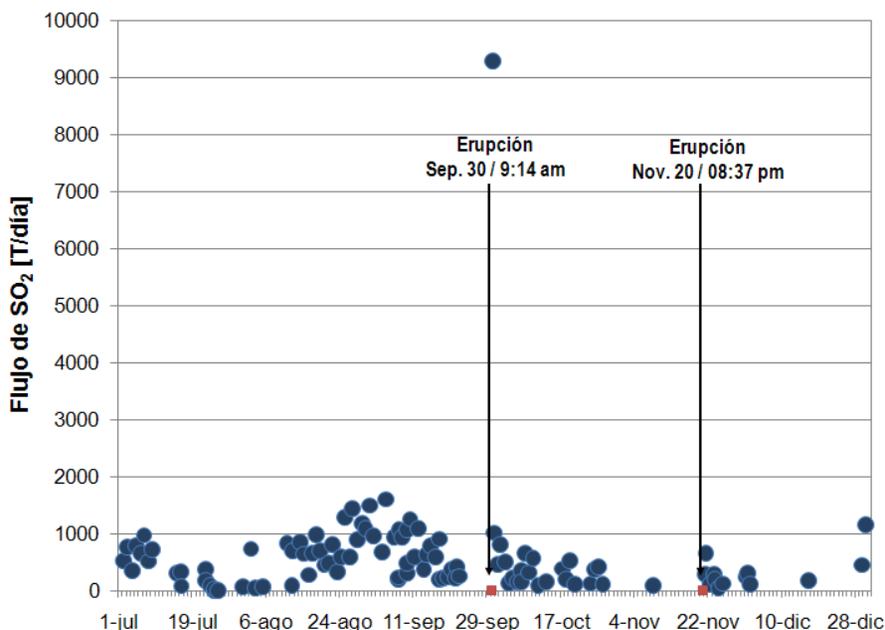


Figura 2.1.69. Flujo de SO₂ de Galeras, medido con instrumentos Scan-DOAS y móvilDOAS. Julio a diciembre de 2009.

El máximo valor de flujo de SO₂ medido con el móvilDOAS fue de 1160 T/día, con un viento de 6,1 m/s en un trayecto de medición realizado entre Santa Bárbara y Consacá, recorriendo el cuadrante noroccidente de la zona de influencia de Galeras por la carretera Circunvalar, el día 30 de diciembre a las 12 del día, la columna se detectó entre Santa Bárbara y Sandoná. En la Figura 2.1.70 se puede apreciar la imagen de la medición de diciembre 30 y su recorrido.

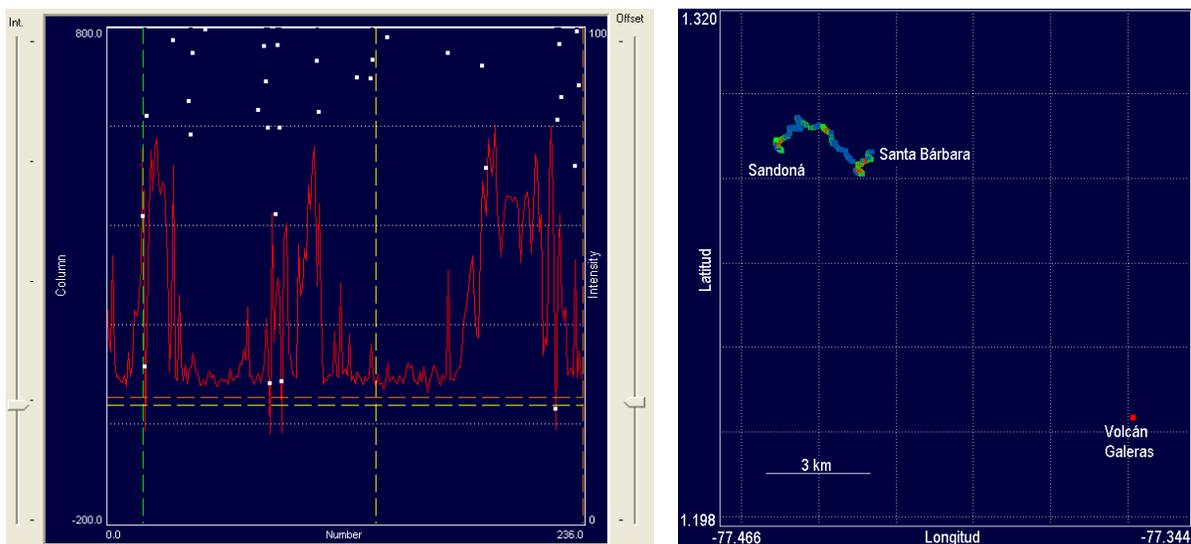


Figura 2.1.70. Columna de SO₂ y recorrido de medida con móvilDOAS entre Santa Bárbara y Sandoná. Diciembre 30 de 2009.

Durante el segundo semestre de 2009, se contó con los datos de sensor OMI acoplado al satélite Aura⁵ (NASA⁶), los cuales mostraron valores de concentración en la atmósfera entre 5,7 y 57 mg/m² obtenidos de imágenes tomadas después del medio día a una altura de 5.000 metros sobre el nivel del mar (Figura 2.1.71). Solamente hubo 27 días con dato, en los demás días no se observó nube de concentración proveniente de Galeras (Figura 2.1.71). El máximo valor se registró en los días 7 de octubre a la 1:08 p.m. y 28 de octubre a la 1:27 p.m. (Figura 2.1.71). Se destacan dos valores importantes que son concordantes con las medidas de los instrumentos en tierra, como son el del 30 de septiembre y el del 30 de diciembre, el primero se tomó después de la erupción de septiembre y alcanzó un valor de concentración de SO₂ de 51,3 mg/m², obtenido a las 2:39 p.m., más de 6 horas después de ocurrida la explosión (Figura 2.1.72). El otro dato destacable se tomó en diciembre 30, con un valor de concentración de SO₂ de 39,9 mg/m², obtenido a las 2:21 p.m. Generalmente los datos de OMI y NOVAC no son concordantes ya que OMI mide concentración de SO₂ en la atmósfera a una altura de 5.000 m sobre el nivel del mar y los instrumentos en tierra miden flujo de SO₂, además las horas de medición son diferentes. En la Figura 2.1.72 se puede apreciar la imagen OMI tomada después de la erupción explosiva de septiembre 30 de 2009, con una nube de concentración dirigida hacia el norte y noroccidente por acción de los vientos.

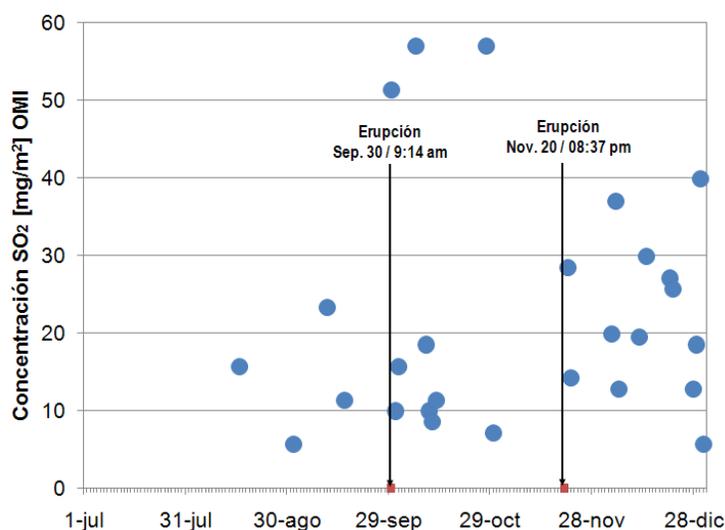


Figura 2.1.71. Concentración de SO₂ en la atmósfera a una altura de 5.000 m sobre el nivel del mar. Datos OMI, julio a diciembre de 2009

⁵ Aura es el tercer satélite del Sistema de Observación Terrestre (Earth Observing System) de la NASA

⁶ NASA (National Aeronautics and Space Administration); <http://aura.gsfc.nasa.gov/index.html>

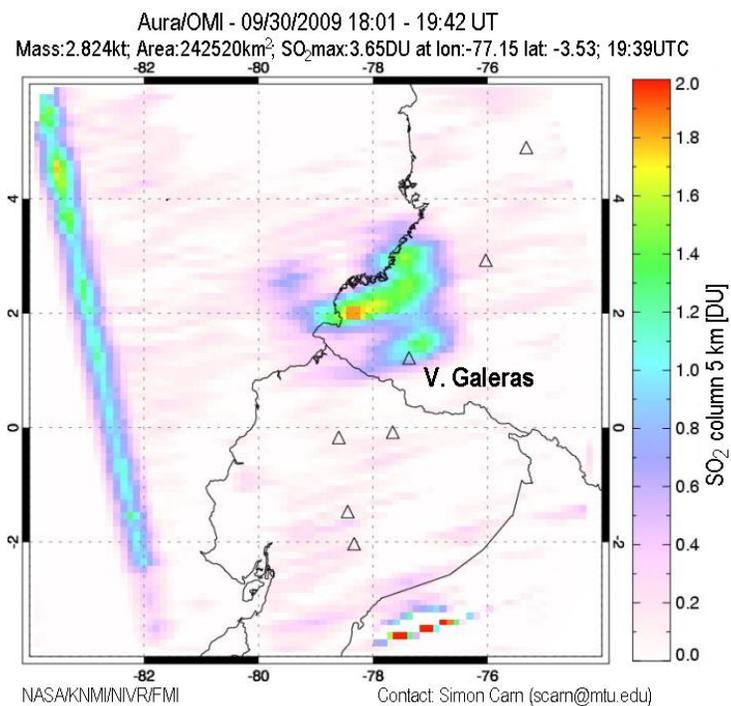


Figura 2.1.72. Imagen satelital OMI de concentración de SO₂ en la atmósfera a una altura de 5.000 m sobre el nivel del mar. Septiembre 30 de 2009, 2:39 p.m.

2.1.5 GEOLOGIA

En el segundo semestre de 2009 se registraron dos eventos eruptivos que en total acumularon un volumen mínimo de material depositado de 2'467.000 m³, siendo la erupción del 30 de septiembre la de mayor volumen, calculado en 2'014.000 m³, y la erupción del 20 de noviembre la de menor volumen calculado en 453.000 m³ (tabla 2.1.8, Figura 2.1.73).

Tabla 2.1.8. Eventos eruptivos de Galeras registrados entre julio y diciembre de 2009, con sus correspondientes volúmenes mínimos de material depositado en la zona de influencia del volcán.

Fecha	Volumen calculado [m ³]
30-Sep-09	2'014.000
20-Nov-09	453.000
Total volumen emitido erupciones Semestre II de 2009	2'467.000

En la tabla 2.1.9 y la Figura 2.1.73 se resume el total del volumen emitido por cada una de las erupciones que tuvieron lugar en el transcurso del año 2009

Tabla 2.1.9. Eventos eruptivos de Galeras registrados entre febrero y diciembre de 2009, con sus correspondientes volúmenes mínimos de material depositado en la zona de influencia del volcán.

Erupciones explosivas Volcán Galeras 2009		
Fecha (dd-mmm-aa)	Hora local (hh:mm)	Volumen mínimo calculado [m ³]
14-Feb-09	07:10 p.m.	285.000
20-Feb-09	07:04 a.m.	1'431.000
13-Mar-09	03:55 p.m.	852.000
24-Apr-09 (*)	07:32 p.m. / 08:09 p.m.	1'000.000
29-Apr-09	10:15 a.m.	63.000
7-Jun-09	07:18 a.m.	35.000
8-Jun-09	06:38 a.m.	2'214.000
30-Sep-09	09:14 a.m.	2'014.000
20-Nov-2009	08:37 p.m.	453.000
	Total volumen mínimo emitido por erupciones 2009	8'347.000

(*) En esta fecha se presentaron dos episodios eruptivos

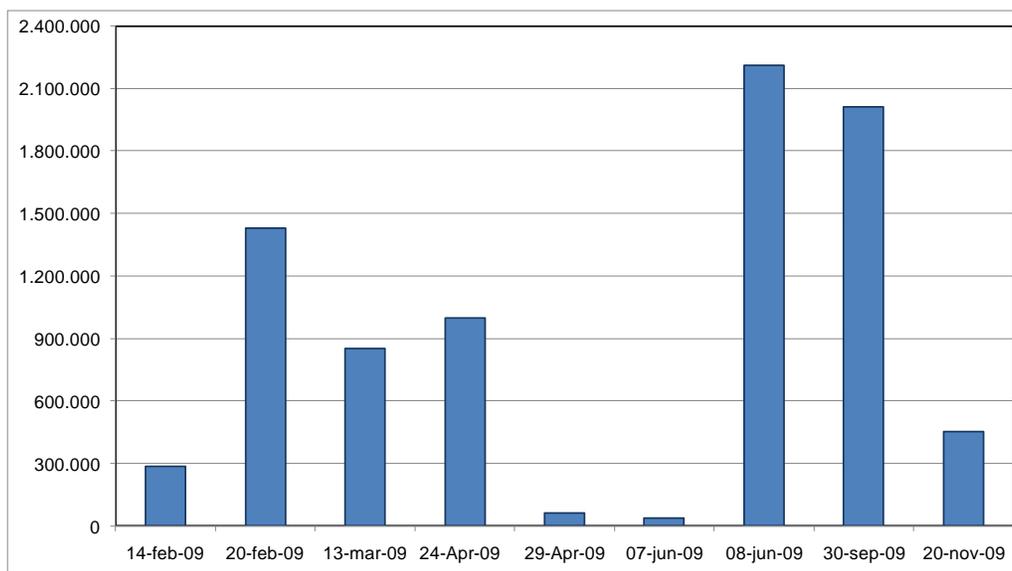


Figura 2.1.73. Volumen mínimo emitido por los eventos eruptivos registrados en el 2009, el 24 de abril se registraron 2 eventos eruptivos.

2.1.5.1 Evento eruptivo del 30 de septiembre de 2009

Con relación a la erupción registrada el 30 de septiembre a las 9:14 a.m., debido a las condiciones climáticas, la columna eruptiva apenas pudo apreciarse desde la ciudad de San Juan de Pasto; sin embargo, la columna si se pudo observar desde otros sectores alrededor del edificio volcánico, principalmente hacia el norte, a distancias de hasta 40 km del cráter principal. La ceniza emitida por esta erupción fue distribuida preferencialmente en dirección noroeste, a una distancia que alcanzó los 153 km a partir del cráter activo

El VAAC (*Volcano Ash Advisory Center*: Centro de Información sobre Ceniza Volcánica de los Estados Unidos, <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/>) estimó, para su primera fase de dispersión hasta las 9:45 a.m., una altitud de hasta 35000 pies, alrededor de 10,7 km sobre la cima volcánica, con dirección principalmente noroeste (Figura 2.1.74). Luego, hasta las 10:45 a.m., se observa una segunda fase de dispersión en la que la porción inicial de la columna eruptiva alcanza una altitud de hasta 37000 pies (11,3 Km sobre la cima) y se observa otra parte tendida desde el noroeste hasta el norte del cráter principal que alcanza los 60000 pies de altitud, 18,3 km sobre la cima (Figura 2.1.75). Una tercera fase de dispersión se observa hasta las 4:45 p.m., en donde la columna eruptiva ya no es registrada por los sensores satelitales en cercanías al edificio volcánico, sino que se observa una masa de material emitido llegando al litoral pacífico de los departamentos del Valle del Cauca y Chocó (Figura 2.1.76).

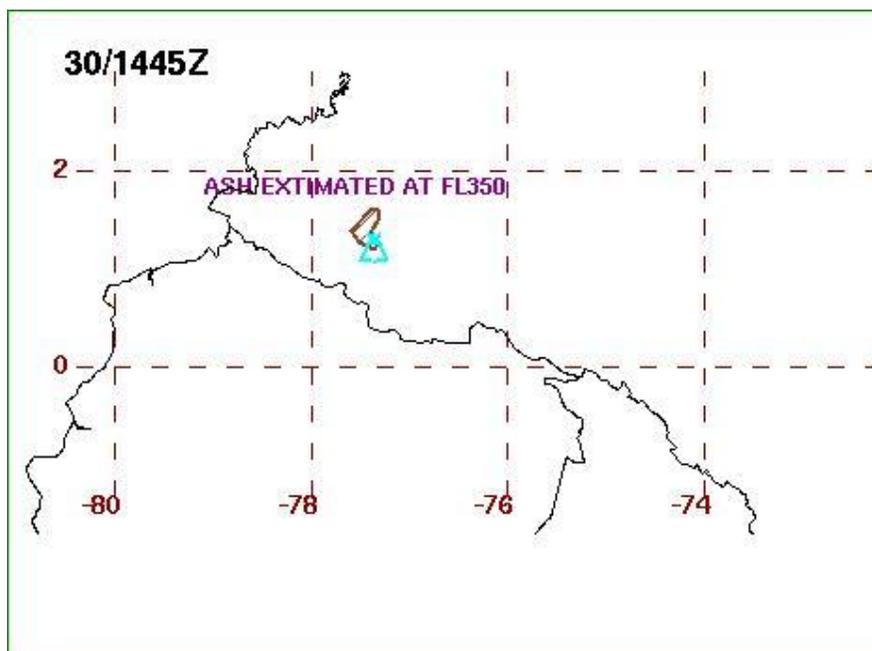


Figura 2.1.74. Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL350 (35000 pies, alrededor de 10,7 km sobre la cima volcánica) para una primera fase de dispersión, hasta las 9:45 a.m.

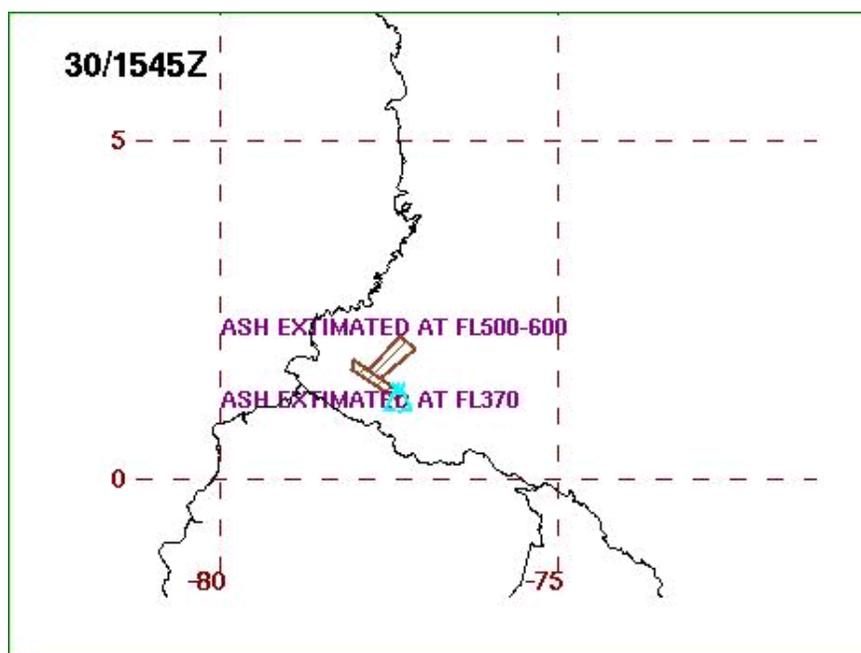


Figura 2.1.75. Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL600 (60000 pies, alrededor de 18,3 km sobre la cima volcánica) para una segunda fase de dispersión, hasta las 10:45 a.m.

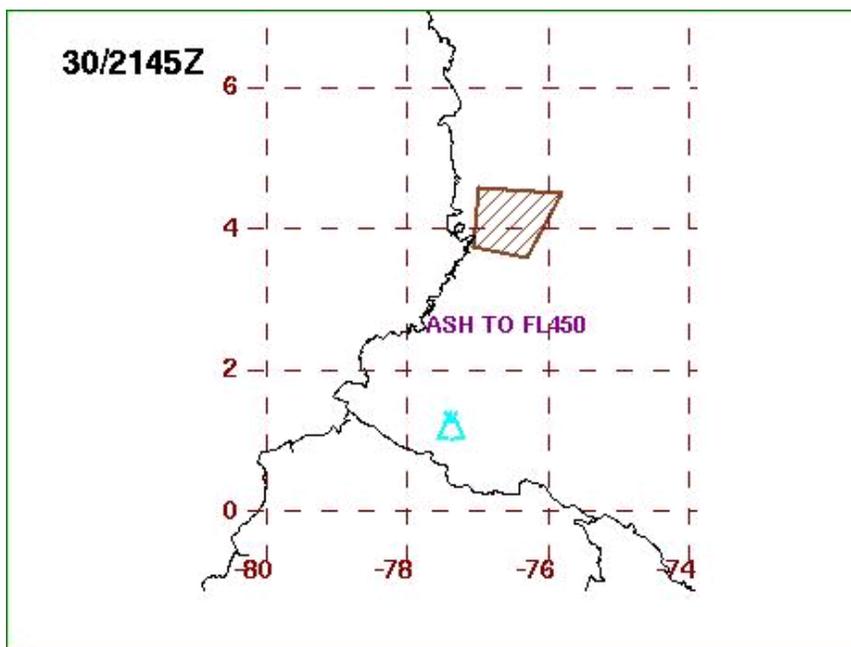


Figura 2.1.76. Imagen de la columna eruptiva captada por el satélite GOES-12 y procesada por el VAAC en Washington, quien estimó una altitud máxima de la columna eruptiva de FL450 (45000 pies, alrededor de 13,7 km sobre la cima volcánica) para una tercera fase de dispersión, hasta las 4:45 p.m.

Para el cálculo del volumen emitido por este episodio eruptivo, se tuvo en cuenta los reportes obtenidos de diferentes municipios al noroeste y norte del departamento de Nariño, junto con las muestras de ceniza recolectadas en campo por personal del OVSP entre el 30 de septiembre y el 1 de octubre de 2009 (Figura 2.1.77). De acuerdo con los reportes recibidos, la ceniza cayó en sitios tan distantes como la cabecera municipal de Francisco Pizarro, unos 153 km al noroeste de Galeras.

Los mapas de distribución de espesores de caída de cenizas transportadas eólicamente (isópacas) y de tamaño máximo de grano del material depositado (isópletas), se pueden apreciar en las figuras 2.1.78 a 2.1.81. El volumen total estimado para este episodio eruptivo fue de aproximadamente 2'014.000 m³, el segundo más grande para las erupciones registradas este año, después de la de junio 8 de 2009.



Figura 2.1.77. Efectos de la caída de ceniza emitida por el evento eruptivo del 30 de septiembre del 2009, en diferentes sectores al noroeste de Galeras: Santa Bárbara (superior izquierda), El Ingenio (superior derecha), Sandoná (inferior izquierda) y vía a La Florida (inferior derecha).

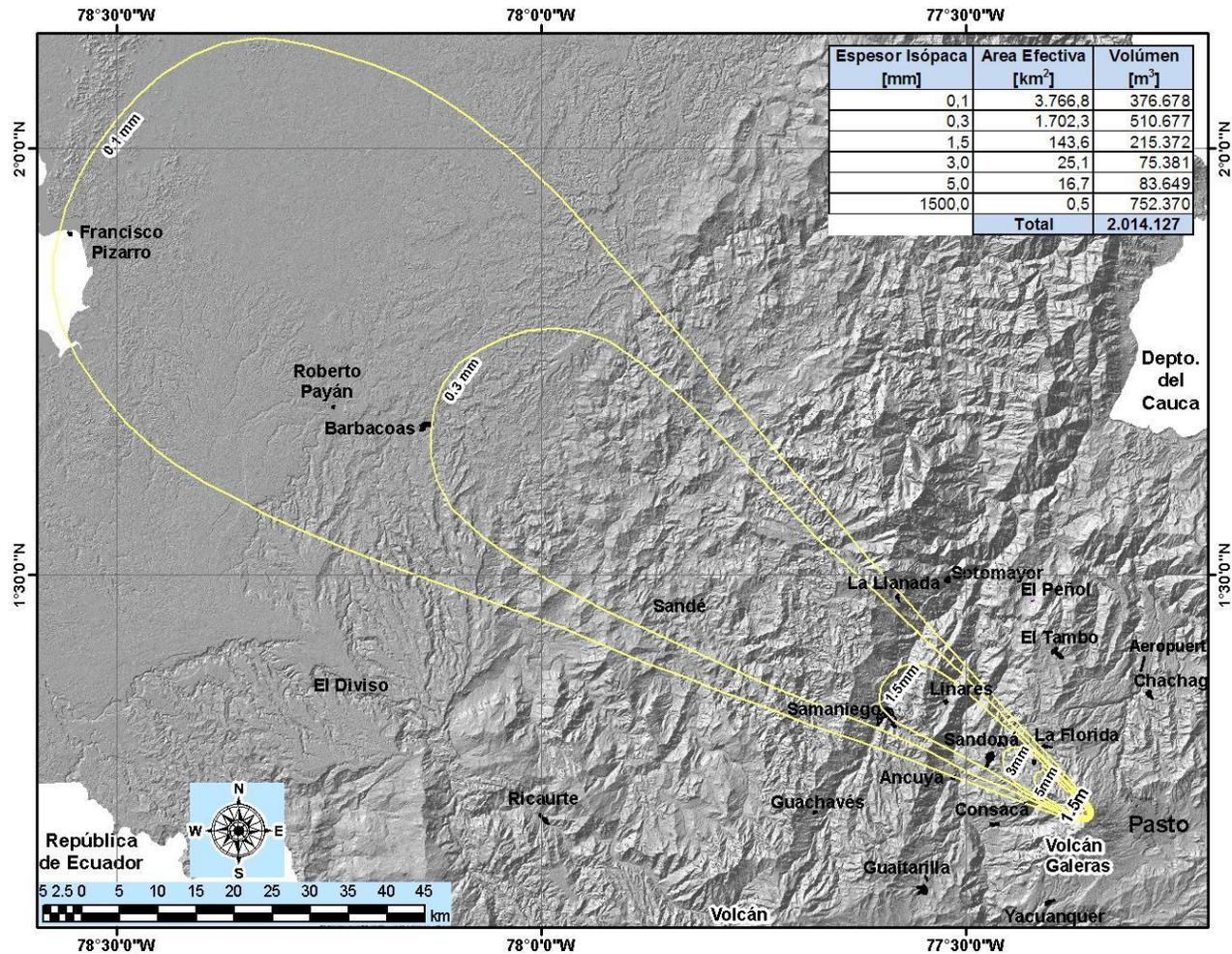


Figura 2.1.78. Mapa de distribución de caída de cenizas (*isópacas*) del evento eruptivo del 30 de septiembre. En la tabla arriba a la derecha, se indican los espesores, las áreas y los volúmenes calculados para cada isópac, junto con el volumen total estimado, cercano a los dos millones de metros cúbicos de material emitido.

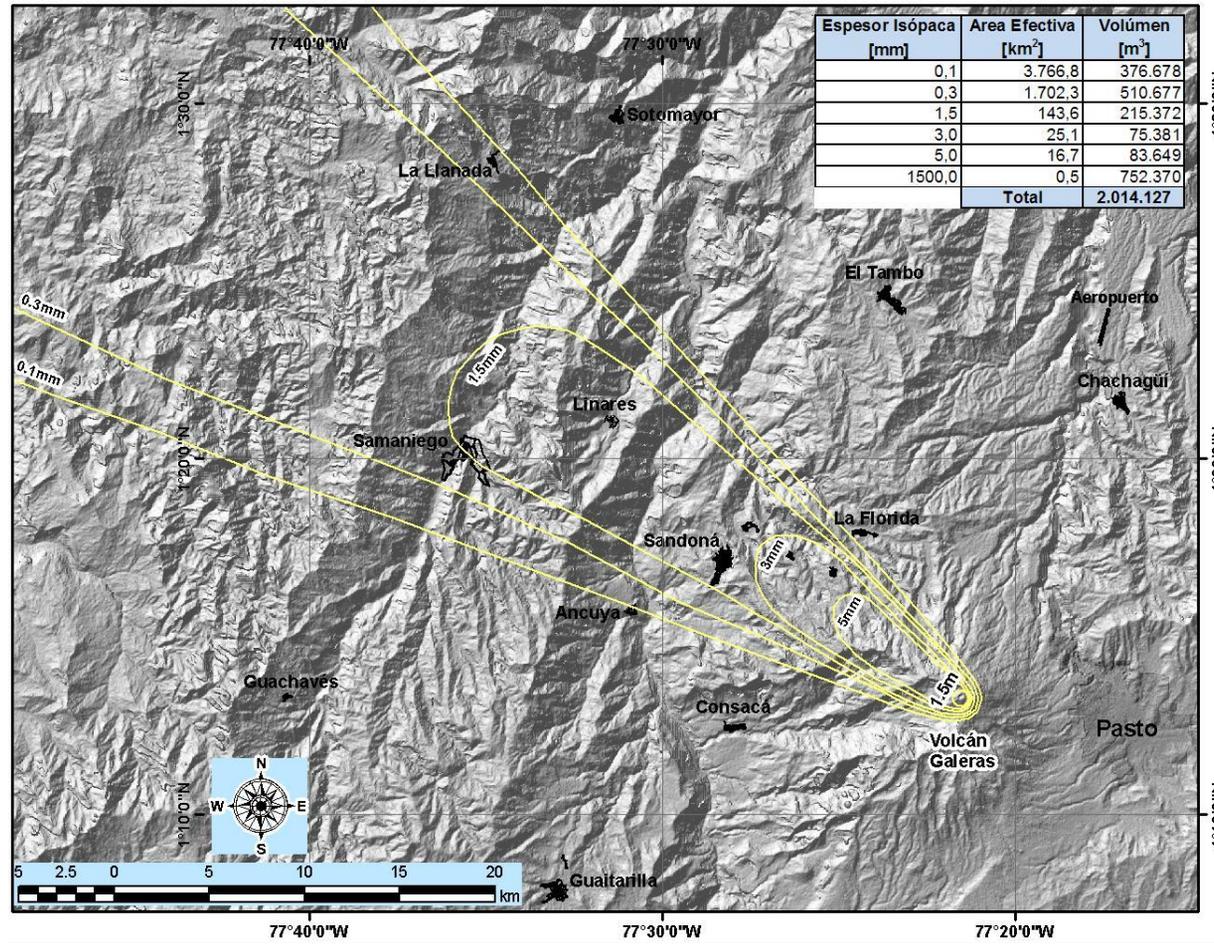


Figura 2.1.79. Detalle del mapa de distribución de caída de cenizas (*isópacas*) del evento eruptivo del 30 de septiembre. En la tabla arriba a la derecha, se indican los espesores, las áreas y los volúmenes calculados para cada isópaca, junto con el volumen total estimado, cercano a los dos millones de metros cúbicos de material emitido.

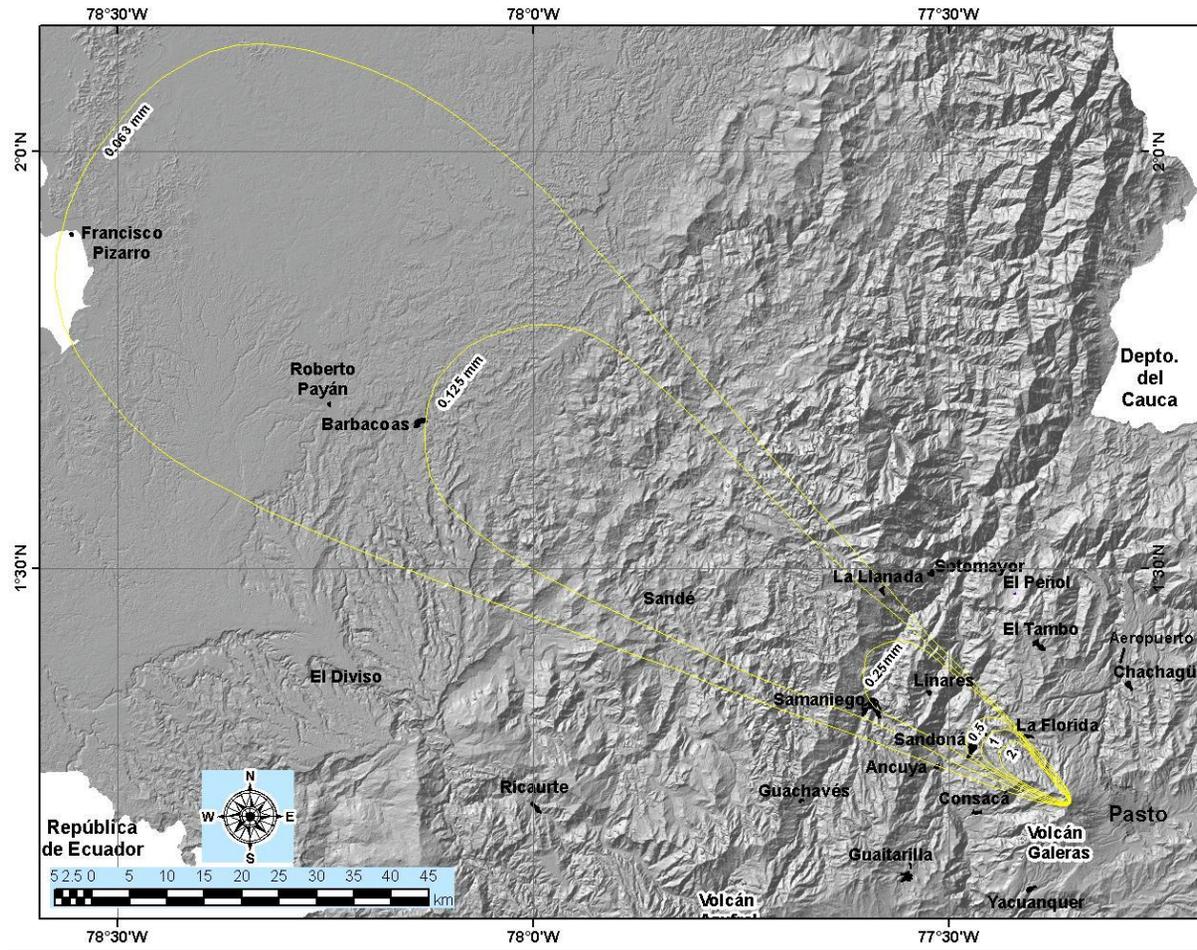


Figura 2.1.80. Mapa de de tamaño máximo de grano del material depositado (*isopletas*) del evento eruptivo del 30 de septiembre.

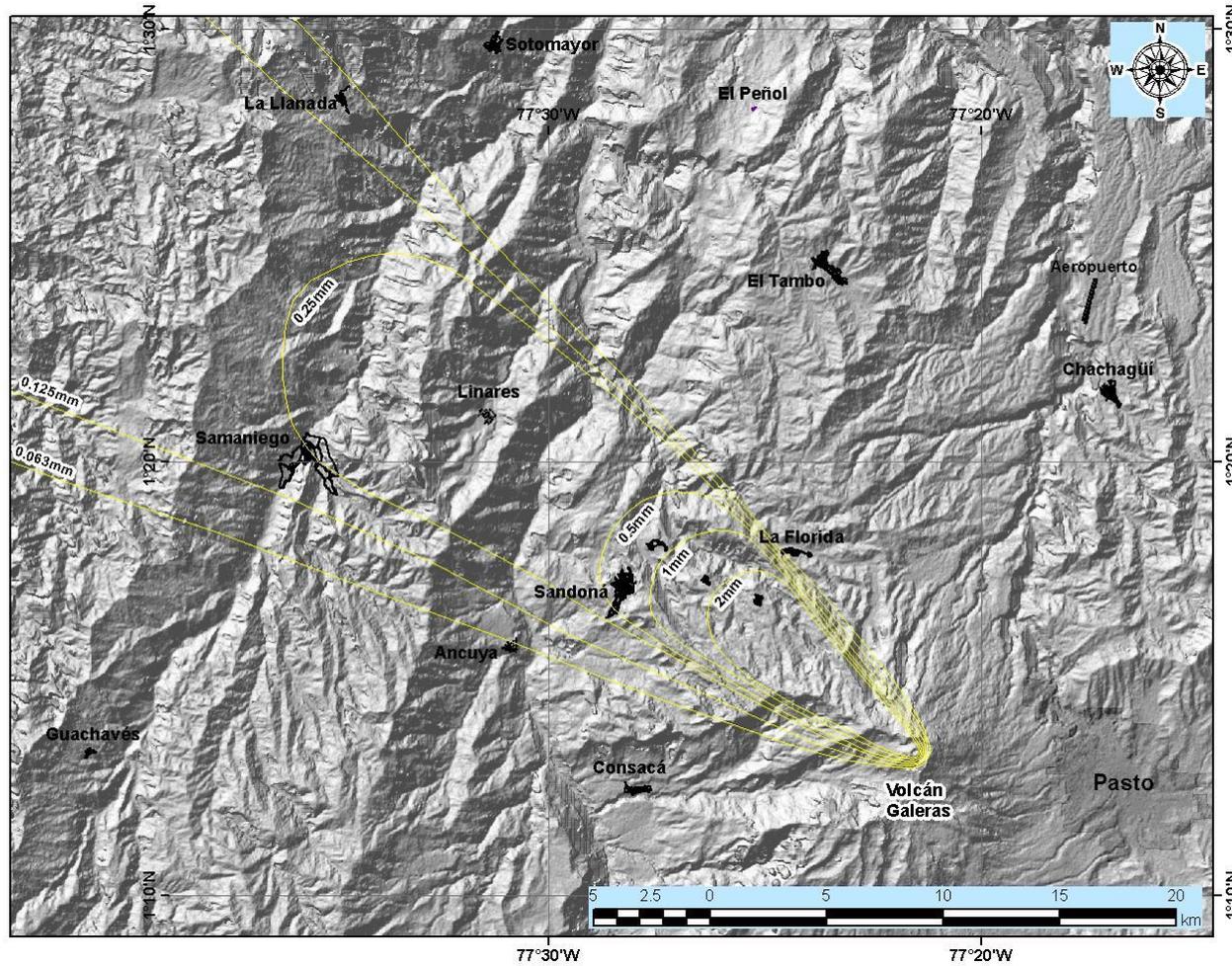


Figura 2.1.81. Detalle del mapa de tamaño máximo de grano del material depositado (*isopletas*) del evento eruptivo del 30 de septiembre.

2.1.5.2 Evento eruptivo del 20 de noviembre.

La erupción registrada el 20 de noviembre a las 8:37 p.m., generó una columna de ceniza que fue distribuida preferencialmente en dirección noroeste a distancias mayores a los 80 km respecto al cráter principal de Galeras.

De la información suministrada por el VAAC, 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 alcanzó entre las 9:15 p.m. y las 9:45 p.m., una altitud máxima aproximada de 9 km sobre la cima, con dispersión principalmente hacia el norte (Figuras 2.1.82 y 2.1.83). Esta información fue coherente con la altura de columna estimada a partir de imágenes térmicas tomadas, desde la sede del OVSP, minutos después de la erupción (Figura 2.1.84), empleando la termo-cámara FLIR ThermoCAM PM595PAL (Convenio INGEOMINAS-BGR de Alemania).

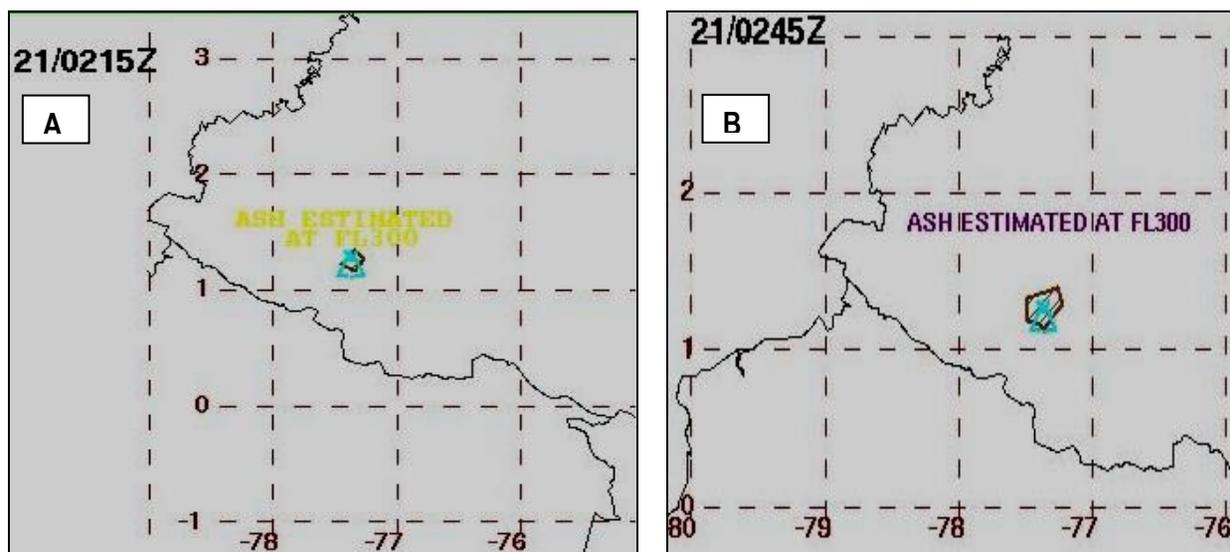


Figura 2.1.82. Mapas de dispersión de cenizas de la erupción de Galeras del 20 de noviembre a las 8:37 p.m., elaborados por VAAC con base en las imágenes del sensor satelital GOES-12. **A)** 9:15 p.m. **B)** 9:45 p.m. Las altitudes máximas de columna se expresan en unidades FL (*Flight Lines*: Líneas 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).

La información satelital se corroboró también con los reportes de caída de ceniza que se recibieron de las cabeceras municipales de Nariño, La Florida, Chachagüí, El Tambo, El Peñol, Sotomayor, Policarpa (El Ejido), y Cumbitara (Pisanda); y de otros sectores de los municipios de Pasto (Genoy, Bellavista), Sandoná (Santa Bárbara, Santa Rosa, El Ingenio) y Taminango (El Tablón) entre otras poblaciones.

Al día siguiente a la erupción, personal del OVSP realizó diversos recorridos para tomar muestras de la ceniza emitida por el volcán, dispersada por el viento y depositadas en zonas al norte del edificio volcánico (Figura 2.1.85).

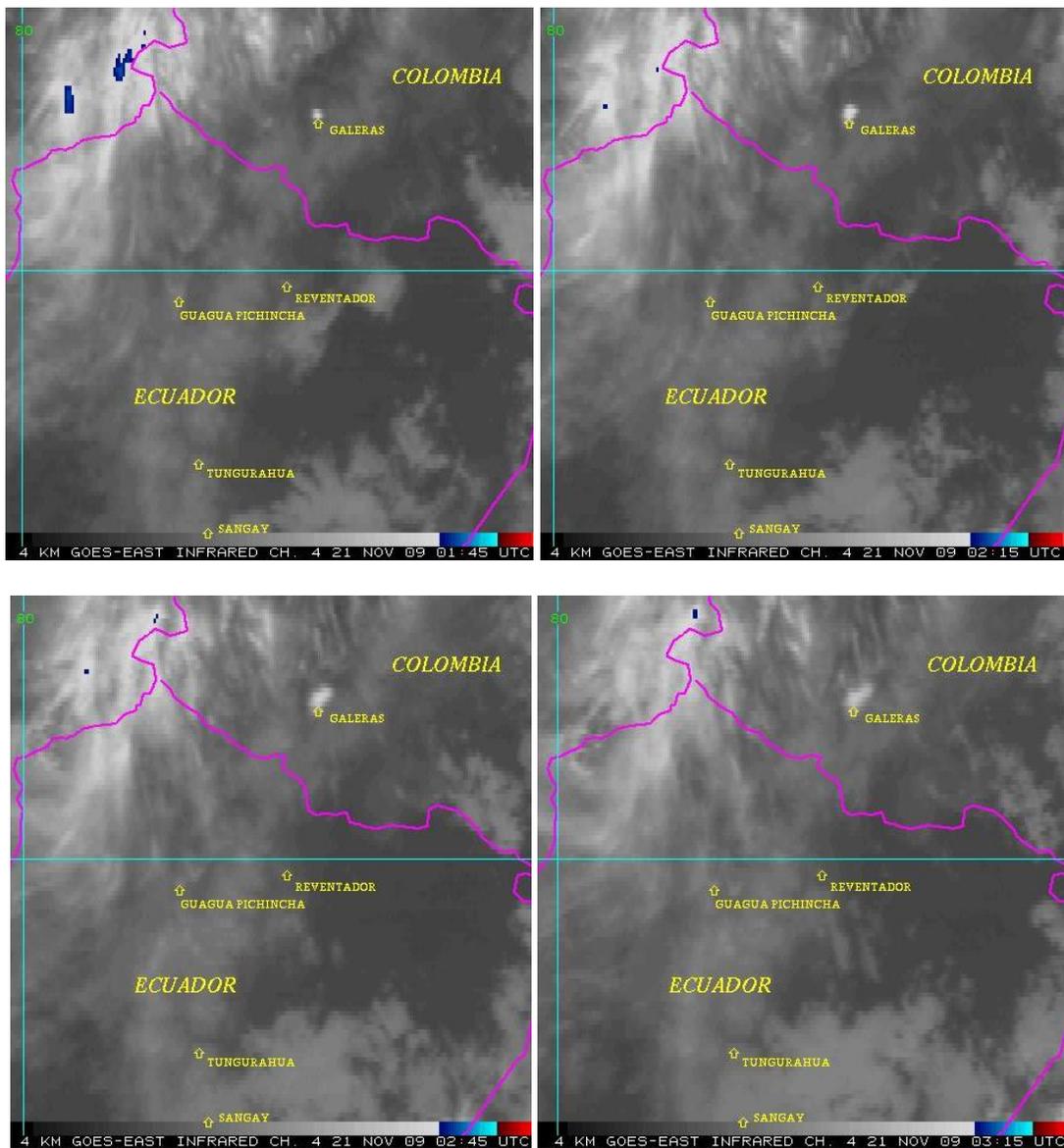


Figura 2.1.83. Secuencia de imágenes del satélite GOES-12 (canal infrarrojo, resolución de 4 km por píxel) en las que se observa la evolución de la columna de gases y cenizas (asociada al episodio eruptivo del volcán Galeras registrado a las 8:37 p.m. del 20 de noviembre de 2009), entre las 8:15 p.m. (previo a la erupción) hasta las 12:15 a.m. del día siguiente.

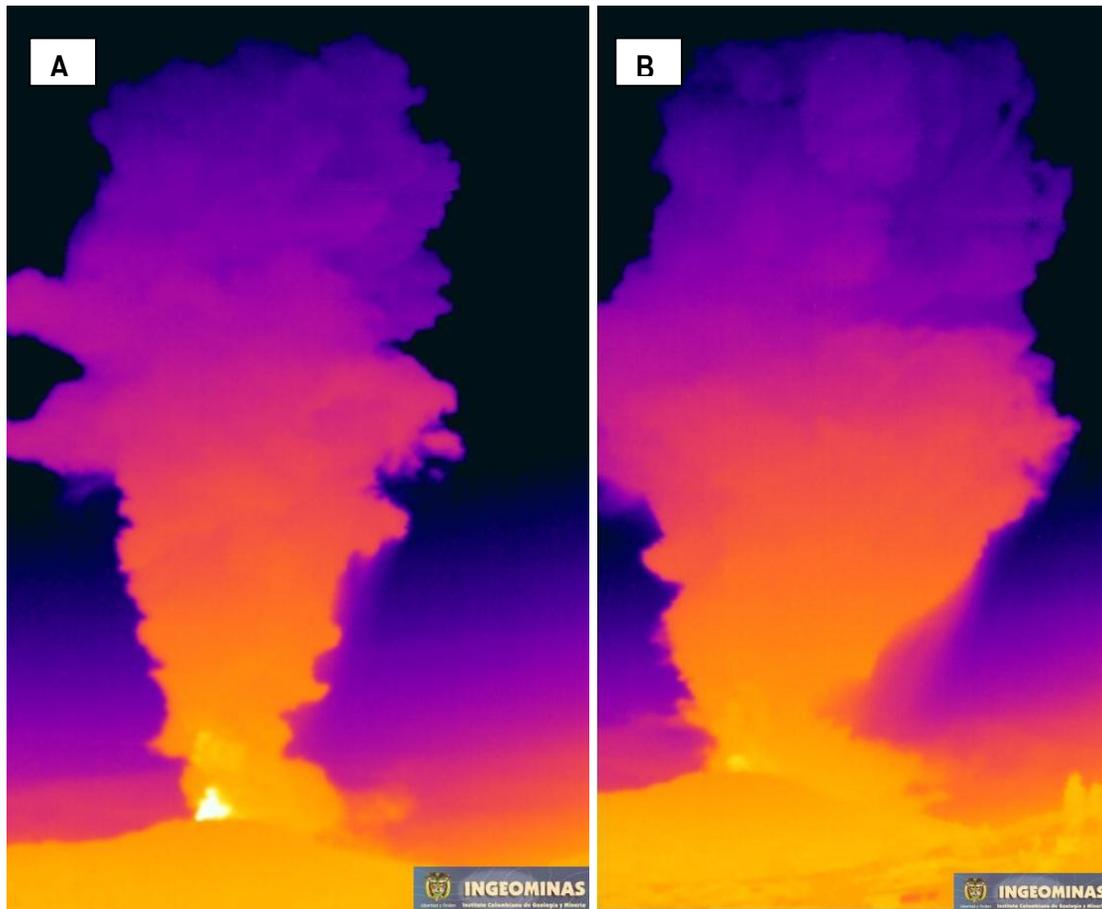


Figura 2.1.84. Imágenes térmicas de la columna eruptiva tomadas, desde la sede del OVSP, aproximadamente a los 10 minutos (A) y 30 minutos (B) después del inicio del evento eruptivo del 20 de noviembre, a las 8:37 p.m.



Figura 2.1.85. Zonas donde se tomaron muestras de la ceniza emitida en la erupción del 20 de noviembre a las 8:37 p.m. **A)** Vía circunvalar al Galeras, cerca de la entrada al sector de Barranco (municipio de La Florida), a unos 7 km al nor-noroeste del cráter principal. **B)** Pista del Aeropuerto Antonio Nariño (municipio de Chachagüí), a 19,8 Km al nor-noroeste del cráter volcánico.

Del análisis preliminar al microscopio de algunas de las muestras colectadas (Figura 2.1.86), se resalta que:

- Se observó que predomina material juvenil: la ceniza recolectada tiene alrededor de 40 % de material vítreo, de 10 a 15% de material lítico y 45% de material cristalino.
- Algunos líticos tienen textura afanítica, se observan fragmentos de material 'amarillento' con evidencias de alteración hidrotermal. Los cristalinos son básicamente cristales de cuarzo y plagioclasa; y en poca cantidad, micas y anfíboles.
- Se puede decir que esta fue una erupción magmática con evidencias de material juvenil emitido (presencia de vidrio). Es probable que se observe mucho cuarzo en virtud a que el material emitido se encontraba constituyendo el sello o tapón.

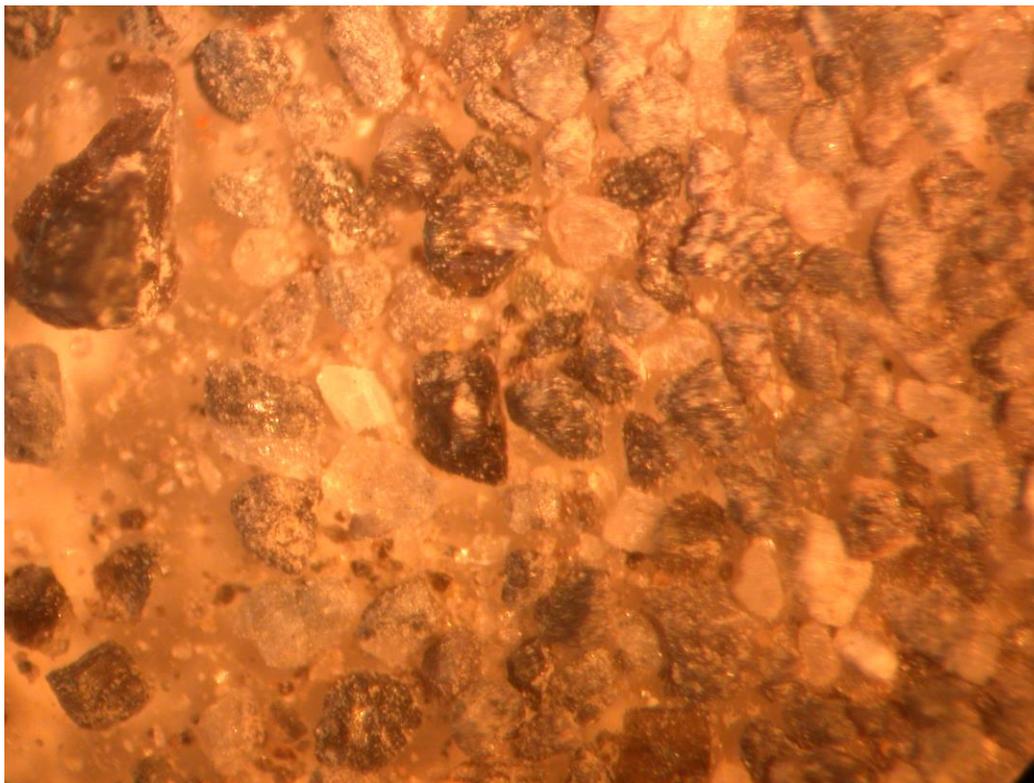


Figura 2.1.86. Vista al microscopio de una de las muestras colectadas de las cenizas emitidas en la erupción de Galeras del 20 de noviembre de 2009. Muestra recogida en la escuela del corregimiento de Santa Rosa (municipio de Sandoná), localizada a 11,5 km al noroeste del cráter principal.

Con base en el muestreo en campo, en los reportes de caída de cenizas recibidos y en las imágenes satelitales analizadas, se elaboró el mapa de distribución de caída piroclástica depositada por transporte eólico (mapa de *isópacas*), que se muestra en la Figura 2.1.87. De manera preliminar se calculó el volumen de material emitido en el episodio eruptivo, con un valor cercano a los 453.000 m³, siendo este volumen el sexto más grande entre las erupciones ocurridas en el año 2009, que sumadas totalizan un material emitido cercano a los 8'347.000 m³ (Tabla 2.1.9)

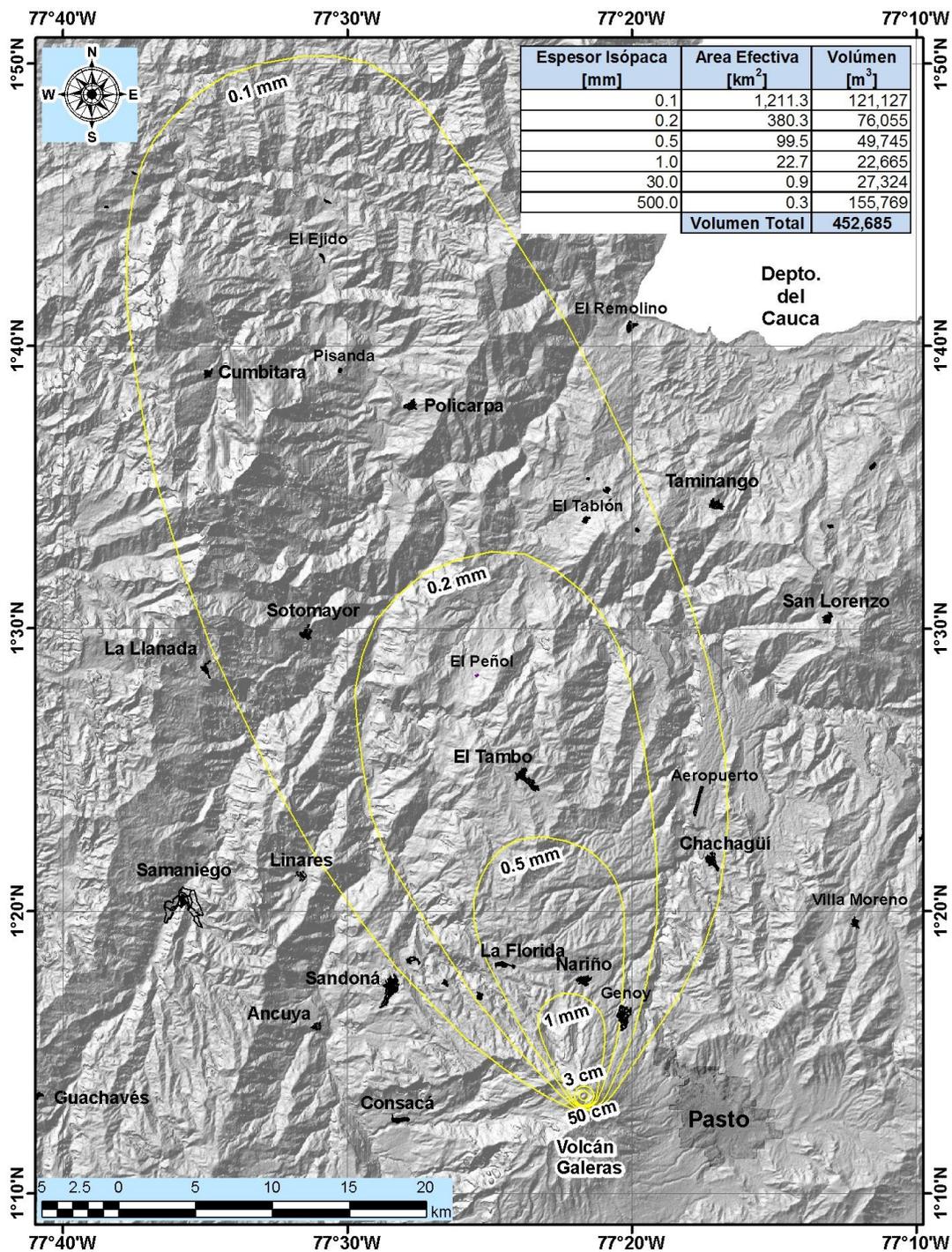


Figura 2.1.87. Mapa de isópacas para la erupción de Galeras del 20 de noviembre de 2009. La tabla arriba a la derecha indica las áreas efectivas, los volúmenes calculados para las isópacas de cada espesor estimado y el volumen total estimado.

2.1.6 ACTIVIDAD SUPERFICIAL Y CAMBIOS MORFOLOGICOS

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 Hughes y Huey de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

El sitio web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto es, URL: <http://intranet.ingominas.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.ingominas.gov.co/pasto/Pasto:T%C3%A9rminos_de_Uso.

Las principales observaciones del segundo semestre de 2009 se relacionaron con las dos erupciones registradas los días 30 de septiembre y 20 de noviembre de 2009. En algunos casos, gran parte de la población de la ciudad de Pasto y de ciertos pueblos que tienen visual hacia Galeras, pudieron percibir el evento eruptivo, las condiciones climáticas durante las dos erupciones no fueron favorables para apreciar en detalle el desarrollo del evento (día nublado y noche).

En el segundo semestre de 2009 se realizaron 12 sobrevuelos, los días 5 y 13 de julio, 23 de agosto, 11 y 14 de septiembre, 7, 16, 24 y 27 de octubre, 14 y 26 de noviembre y el 3 de diciembre; en ocho de ellos (12 de julio, 23 de agosto, 14 de septiembre, 16 y 27 de octubre, 14 y 26 de noviembre y 3 de diciembre) se tomaron 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, y Las Chavas, puntos de emisión como Las Deformes. En algunos casos, la columna de emisión de ceniza fina cayó en sectores altos del edificio volcánico y en poblaciones cercanas, estos eventos ocasionalmente se asociaron con actividad sísmica, registrando señales de Tremor.

Durante la mayor parte del mes de julio, las condiciones climáticas no permitieron realizar observaciones de la cima volcánica desde Pasto ni desde el sector occidental del volcán; y cuando la cima del volcán estuvo despejada, no se detectó columnas de emisión (a excepción de los días 30 y 31 de julio); esto es concordante con la disminución en la sismicidad asociada con movimiento de fluidos ocurrida durante el mes.

Con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), los días 12 y 13 de julio se realizaron sobrevuelos al volcán, obteniendo registros filmicos y fotográficos, se observó poca salida de gases de color blanco (evidenciando un contenido importante de vapor de agua), con baja presión, principalmente de sitios ubicados en la periferia del cráter principal, como son los cráteres secundarios El Paisita (norte) y Chavas (oeste); y desde el campo fumarólico Las Deformes (suroeste). En el fondo del cráter principal se observa una gran concavidad, resultante de los recientes procesos eruptivos (Figuras 2.1.88 y 2.1.89).



Figura 2.1.88. Vista del cono activo de Galeras, observado en el sobrevuelo realizado el 12 de julio de 2009 en horas de la mañana.



Figura 2.1.89. Detalle del cono activo del volcán Galeras, visto en el sobrevuelo del 13 de julio de 2009.

El 30 de julio, funcionarios de la Estación de Policía de Consacá (N) informaron que se observó una pequeña emisión de gases desde el cono activo de Galeras; y el día 31 de julio, una comisión del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto informó que desde la población de Consacá se

apreció emisión de gas de color blanco en poca cantidad, desde algunos sectores del cono activo (Figura 2.1.90).

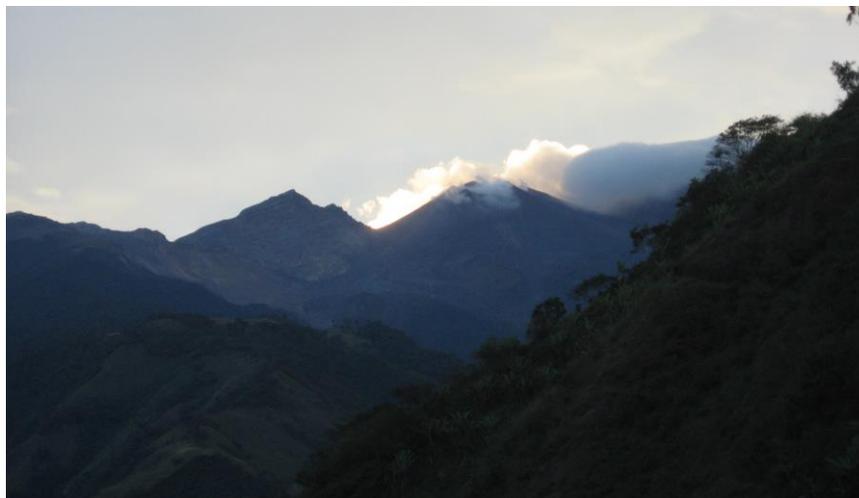


Figura 2.1.90. Emisión de gases, en pequeña cantidad, observada desde la población de Consacá el día 31 de julio.

Respecto a la actividad superficial, durante el mes de agosto, las condiciones climáticas no permitieron realizar observaciones de la cima volcánica desde Pasto ni desde el sector occidental del volcán; y cuando la cima del volcán estuvo despejada, no se detectó columnas de emisión (a excepción del día 11 de agosto). Estas bajas tasas de emisión de gases volcánicos también se presentaron a lo largo del mes de julio.

El día 23 de agosto, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se realizó un sobrevuelo en el cono activo de Galeras, notándose un ligero incremento en la salida de gases en comparación con las observaciones aéreas realizadas el 12 de julio de 2009. Los principales focos de emisión corresponden a la periferia del cráter principal, en los sectores de Chavas (al occidente del mismo), El Paisita (al norte) y La Joya (al suroccidente). Solamente se observó un foco de emisión de gases dentro del cráter principal que para el efecto se lo relaciona como “P1” (Figura 2.1.91). La dispersión del gas estaba hacia el noroccidente, donde se pudieron percibir olores azufrados durante el sobrevuelo.



Figura 2.1.91. Fotografía del cráter principal de Galeras tomada en el sobrevuelo del 23 de agosto a las 7:33 a.m., con el apoyo de la FAC. Se identifican los principales focos de emisión.

Durante septiembre la mayor parte del tiempo no se observaron o recibieron reportes de actividad superficial, en algunos casos las condiciones climáticas en el área de Galeras no permitieron observar la cima del volcán, impidiendo la verificación de presencia de emisiones de gas. Hasta el día 10 de septiembre no se apreciaron ni se obtuvieron reportes de otros municipios de la zona de influencia volcánica, aún en los periodos de tiempo en los cuales la cima estuvo despejada.

Para los días 11,13 y 14 de septiembre fue posible observar pequeñas emisiones pulsátiles de gases con contenido importante de vapor de agua. En la figura 2.1.92 se muestran fotografías del cono activo tomadas el 14 de septiembre en las cuales la baja desgasificación permite ver el fondo del cráter principal; se observan algunas emisiones en pequeño volumen y con bajas presiones de salida, provenientes principalmente de zonas hacia la periferia del cráter principal, como en el caso de los cráteres secundarios Chavas y El Paisita, además del campo fumarólico Las Deformes. Al interior del cráter principal se destacan pequeños focos de emisión al pie de la pared oriental, sobre la pared sur interna y sobre la pared norte interna del cráter principal.

El día 15 de septiembre, después una fuerte lluvia ocurrida hacia el medio día en la zona de influencia del volcán Galeras, se obtuvieron reportes de pobladores de Mapachico y de algunos sectores de Pasto que percibieron fuertes olores a azufre. Adicionalmente, posterior a las lluvias, este mismo día se observó la columna de emisión de gases volcánicos con poca altura y coloración blanca, debido al predominio en el contenido de vapor de agua, dirigiéndose hacia el sector sur del volcán (Figura 2.1.93). Adicionalmente, al día siguiente (16 de septiembre), desde las horas de la mañana, fue posible observar la columna de emisión de gases con una altura máxima de 1 km sobre la cima volcánica (Figura 2.1.94).

Los días 24, 26 y 27 de septiembre de 2009, se recibieron reportes desde el sector occidental de emisiones de gas de coloración blanca en poca cantidad. Finalmente, con el evento eruptivo del 30 de septiembre se observaron y recibieron reportes de actividad superficial desde diferentes sectores.



Figura 2.1.92. Fotografías del cono activo de Galeras tomadas el día 14 de septiembre de 2009. Izquierda: Vista desde el sur oriente. Derecha: Detalle cráter principal.



Figura 2.1.93. Vista del volcán, desde la sede del OVSP, el 15 de septiembre hacia las 4:53 p.m., luego de la fuerte lluvia ocurrida.

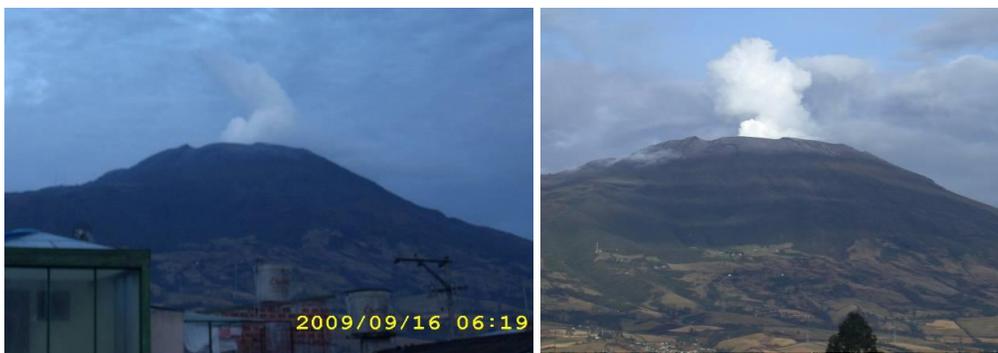


Figura 2.1.94. Vista del volcán, desde la sede del OVSP, el 16 de septiembre a las 6:19 a.m. (izquierda) y a las 6:53 a.m. (derecha).

Con relación a la erupción registrada el 30 de septiembre, debido a las condiciones climáticas, la columna eruptiva apenas pudo apreciarse desde la ciudad de San Juan de Pasto (Figura 2.1.95); sin embargo, la columna si se pudo observar desde otros sectores alrededor del edificio volcánico, principalmente hacia el norte (Figura 2.1.96), a distancias de hasta 40 km del cráter principal, como en el caso del municipio de Berruecos (Figura 2.1.97).

La onda acústica generada por la erupción, a pesar de ser la de menor nivel energético de las registradas durante el año, pudo ser percibida desde varios sectores como La Florida, Sandoná y Consacá.



Figura 2.1.95. Fotografía de una parte de la columna de emisión (resaltada por la línea inferida) asociada a la erupción del 30 de septiembre; tomada a las 9:15 a.m., desde la sede del OVSP, ubicado a 11,8 km al sureste del cráter principal del volcán Galeras.



Figura 2.1.96. Columna eruptiva asociada a la erupción de Galeras del 30 de septiembre de 2009, a las 9:14 a.m., como fue vista desde poblaciones del norte del área de influencia volcánica. Imágenes capturadas del video publicado por el usuario de YouTube *Alcaldía de Pasto*.



Figura 2.1.97. Columna de gases y cenizas asociada al episodio eruptivo del 30 de septiembre de 2009 (9:14 a.m.), como fue vista desde Berruecos, cabecera municipal de Arboleda (Nariño), ubicada a 39 km al nororiente de la cima volcánica. Fotografía tomada por el Señor Fabio Martínez.

En general, durante el mes de octubre, las condiciones climáticas de abundante nubosidad cubriendo la cima volcánica de Galeras, impidieron la observación de actividad superficial. Durante el transcurso del día 12 de octubre, principalmente en horas de la tarde, se observaron varias emisiones de gases volcánicos, de coloración blanquecina a grisácea (evidenciando un contenido importante de vapor de agua), formando columnas que fueron tendidas, principalmente, hacia el costado norte del edificio volcánico por acción de los vientos y que alcanzaron alturas de hasta 700 metros sobre la cima (Figura 2.1.98).

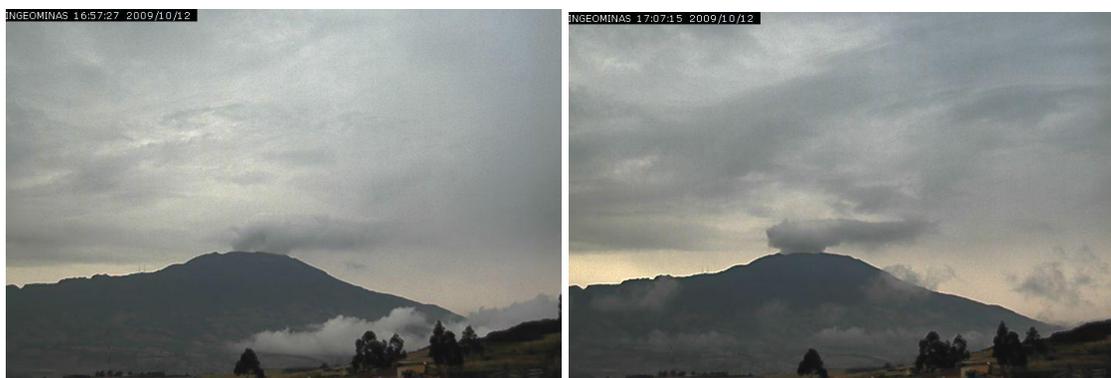


Figura 2.1.98. Emisiones de gases volcánicos, como fueron registradas por la cámara web instalada en la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (ubicada a unos 11 km al Este del cráter principal). Izquierda: Emisión de gases volcánicos registrada el día 12 de octubre a las 4:57 p.m., la columna alcanza una altura aproximada de 650 m y se dirige hacia el norte. Derecha: Emisión de gases volcánicos registrada el día 12 de octubre a las 5:07 p.m., la columna alcanza una altura aproximada de 650 m y se dirige hacia el norte

Durante el transcurso del día 16, se observaron varias emisiones de gases de coloración blanquecina (evidenciando un contenido importante de vapor de agua), formando columnas que estuvieron tendidas por acción de los vientos principalmente hacia el costado norte del edificio volcánico y que alcanzaron alturas de hasta 450 metros sobre la cima (Figura 2.1.99).

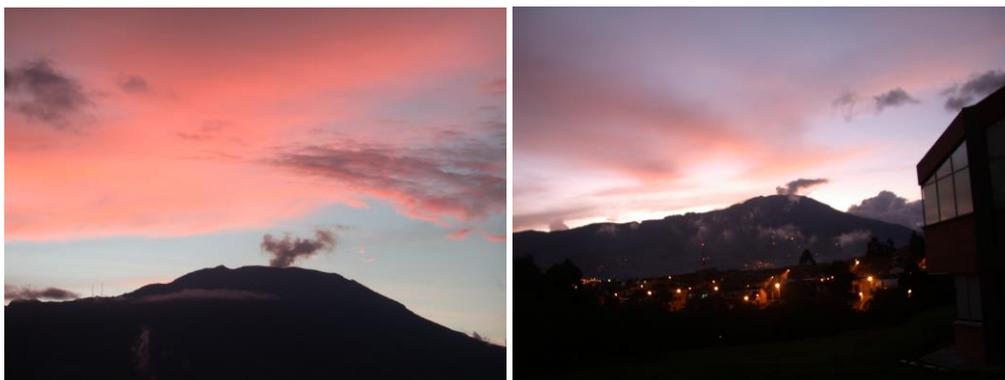


Figura 2.1.99. Vista del volcán desde la sede del OVSP el 16 de octubre de 2009. Izquierda: Emisión de gases volcánicos, 16 de octubre 6:06 p.m. Derecha: Emisión de gases volcánicos, 16 de octubre 6:16 p.m.

Entre el 20 y el 23 de octubre se observaron emisiones de gases desde la sede del OVSP; las columnas evidenciaron altas cantidades de vapor de agua por su coloración blanquecina y no sobrepasaron los 500 m de altura sobre la cima (Figura 2.1.100). El 22 de octubre se recibieron reportes de olores a gases azufrados desde los sectores de Tamasagra, Parque Infantil y la Avenida Boyacá en la Ciudad de San Juan de Pasto.



Figura 2.1.100. Vista del volcán desde la sede del OVSP, las condiciones climáticas favorecieron la observación de la cima los días 20 (izquierda) y 23 (derecha) de octubre de 2009. Izquierda: Imagen del día 20 de octubre a las 7:13 a.m. Derecha: Imagen del día 23 de octubre a las 10:46 a.m.

De la misma manera fue posible observar emisiones de gas de color blanco el 28 de octubre, con una altura máxima de columna de 500 m (Figura 2.1.101).

Con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), fue posible la realización de sobrevuelos de reconocimiento a la cima volcánica los días 7, 15, 16, 24 y 27 de octubre.

Para el día 7 las condiciones meteorológicas impidieron un mayor acercamiento al cono activo; no obstante, fue posible la observación de espesores importantes de ceniza acumulada, producto de la erupción del 30 de septiembre de 2009; estos espesores, en algunas zonas, se estiman mayores a un metro. También se observaron emisiones de gases volcánicos de coloración blanquecina, provenientes de varias zonas, tanto de la periferia como del interior del cráter principal (Figura 2.1.102).

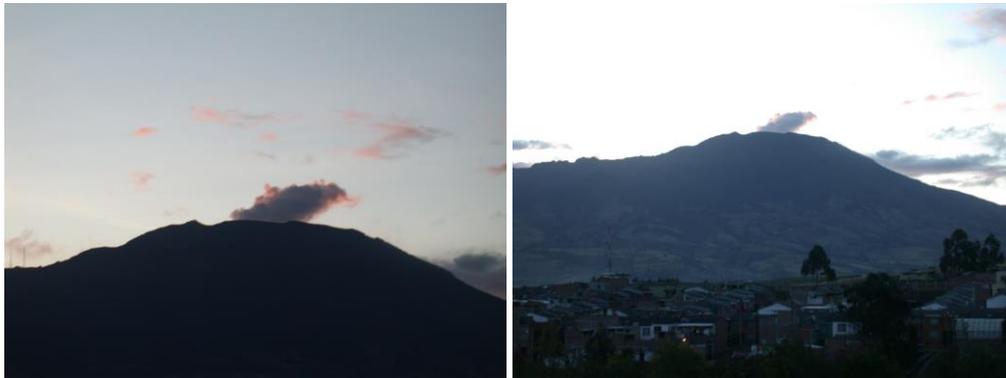


Figura 2.1.101. Fotografías de emisiones observadas el 28 de octubre a las 5:47 p.m. (Izquierda) y 5:55 p.m. (derecha) desde la sede del OVSP ubicado al este-sureste del cráter principal de Galeras.

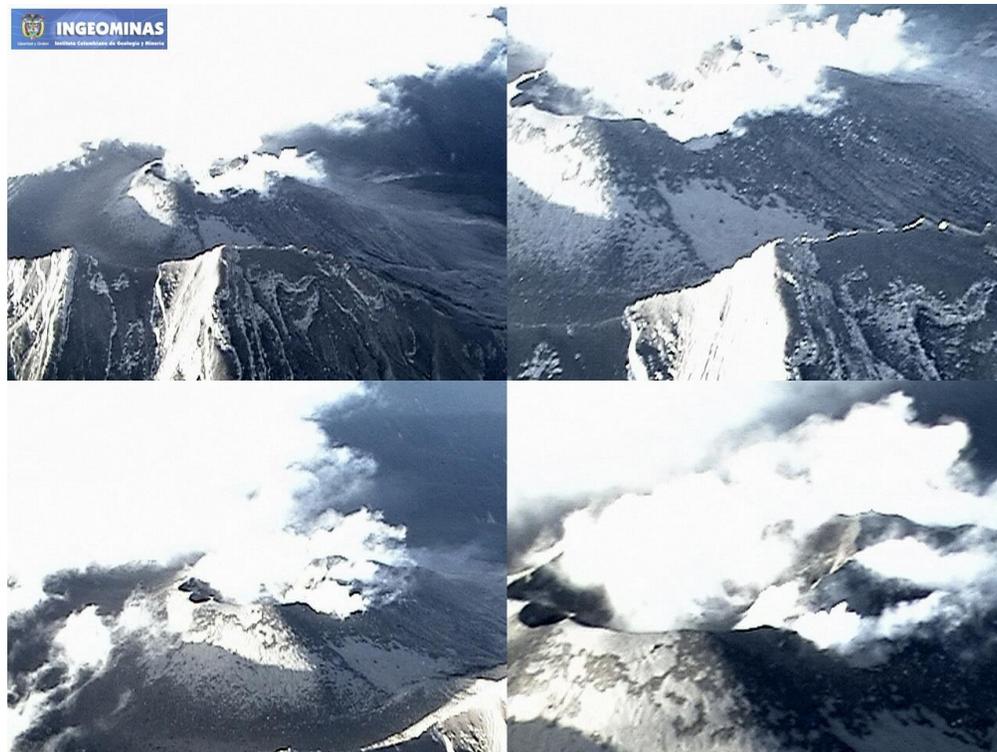


Figura 2.1.102. La cima de Galeras y detalles de la región del cono activo, vistos sobrevolando al norte del edificio volcánico, el 7 de octubre de 2009 en horas de la mañana..

En los sobrevuelos de reconocimiento a la cima volcánica los días 15 y 16 de octubre se observaron pequeñas emisiones de gases volcánicos de coloración blanquecina, provenientes de varias zonas, tanto de la periferia como del interior del cráter principal (Figura 2.1.103).



Figura 2.1.103. Vista del volcán durante sobrevuelo del 16 de octubre a las 6:55 a.m.

También fue posible la realización de un sobrevuelo de reconocimiento a la cima volcánica el día 24 y 27 de octubre. Se observaron emisiones de gases volcánicos de coloración blanquecina, desde varias zonas, tanto de la periferia como del interior del cráter principal (Figura 2.1.104).



Figura 2.1.104. Imágenes tomadas durante el sobrevuelo realizado el día 24 de octubre en horas de la mañana.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, lo que sobresale en la actividad superficial de Galeras, para el mes de noviembre de 2009, es el evento eruptivo registrado el 20 de noviembre a las 8:37 p.m. Este evento fue un espectáculo visual, ya que por presentarse en horas de la noche y con las condiciones climáticas favorables, fue posible observar el evento en todo su esplendor, con el material incandescente brotando de las entrañas del volcán, ascendiendo hasta una altura permitida por su peso y su posterior caída sobre las laderas del volcán que hicieron ver su majestuosidad en pleno (Figura 2.1.105).



Figura 2.1.105. Imagen de la manifestación en superficie del evento eruptivo registrado el 20 de noviembre, captado por la cámara web ubicada en la sede del OVSP.

Posterior al evento eruptivo, debido a las malas condiciones del clima en la zona del volcán Galeras, solo hasta el 26 de noviembre, fue posible contar con información filmica, fotográfica y de imágenes térmicas, del sector de la cima del volcán, para conocer las condiciones en las cuales se encontraba tanto el sector del cráter volcánico como el área circundante, afectada por el evento eruptivo. Este trabajo pudo llevarse a cabo, gracias a la colaboración obtenida por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), en la realización del sobrevuelo que utilizó el helicóptero Hughes 4301, la tripulación de la FAC y funcionarios del INGEOMINAS - Pasto.

La información colectada mostró emisiones de gases volcánicos de coloración blanquecina, desde varias zonas periféricas al cráter principal y desde el interior de este. El día 25 de noviembre, personal del Ejército Nacional subió a la cima de Galeras y registró imágenes fotográficas del cono activo en las que también es posible apreciar emisiones de gases (figura 2.1.106).



Figura 2.1.106. Imágenes tomadas durante reconocimiento por parte del personal del Ejército Nacional el día 25 de Noviembre (izquierda) y durante sobrevuelo realizado el día 26 de noviembre en horas de la mañana (derecha).

Comparando estas imágenes con las obtenidas en el sobrevuelo del día 14 de noviembre, vemos que las condiciones de flujo de gases, en estas últimas fueron muy bajas (Figura 2.1.107) y anomalías térmicas en el interior del cráter principal con valores de hasta 120°C, que se verifican

son menores a las observadas posterior a la erupción del 20 de noviembre. El incremento tanto en la máxima temperatura registrada en la roca en superficie, con la termocámara, así como también del área de anomalía térmica en el cráter volcánico, procesos observados posterior al evento eruptivo, dan clara evidencia que el evento eruptivo destruyó el sello que estaba formado en la parte más superficial, el cual estaba conformado por material a menor temperatura y que en el momento de la erupción dejó en descubierto el material más interno que presenta mayores temperaturas.

Por otra parte, excluyendo el evento eruptivo, se identificaron algunos días del mes de noviembre de 2009 que por las condiciones climáticas favorables, permitieron observar la cima de Galeras despejada y con evidencias de actividad superficial (Figura 2.1.108). En la mayoría de los casos esta columna de gases se caracterizó por su coloración blanca, lo que permitió inferir que su principal componente era vapor de agua; además se vió poco densa y de poca altura, lo cual es concordante con los reportes de emisiones de SO_2 , que para este mes fueron muy bajos e incluso nulos en algunos días.



Figura 2.1.107. Vista del cráter de Galeras desde el occidente. Se aprecia que no hay salida de gases desde el interior del cráter principal.



Figura 2.1.108. Vista del cráter de Galeras desde la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto, al sector oriental de la ciudad. Imagen corresponde al día 8 de noviembre, a las 5:01 p.m.

El día 26 de noviembre de 2009, luego de realizar los trabajos de reconocimiento aéreo de la parte alta de Galeras y llegando al lugar de estacionamiento del helicóptero Hughes (Base militar Chapalito), este fue alcanzado por una ráfaga de fuertes vientos que lo desestabilizaron y cayó precipitadamente a tierra. Gracias a la pericia en las acciones tomadas ante esta situación, por parte del piloto, Teniente Cataño, tanto él como los dos funcionarios del OVSP - INGEOMINAS, Pasto, salieron sin ninguna complicación de este accidente. Infortunadamente, en este hecho perdió la vida el técnico Miguel Martínez (Figura 2.1.109).



Figura 2.1.109. Vista del helicóptero Hughes de la Fuerza Aérea Colombiana, en el sector de Chapalito donde cayó, luego de ser azotado por una ráfaga de viento, en el momento en que se disponía a aterrizar, luego del sobrevuelo de reconocimiento realizado en el área del volcán Galeras.

Durante el mes de diciembre, la actividad superficial se documentó a partir de observaciones directas hacia la cima desde la sede del OVSP, por reportes de las comisiones de personal en campo, por reportes de la comunidad o las autoridades, por videos de la cámara Web instalada en el OVSP y sobrevuelos realizados con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). A continuación se presentan algunas de las observaciones de mayor relevancia durante el mes de diciembre y algunas imágenes relacionadas.

El día 1 de diciembre, funcionarios de la Estación de Policía de Consacá (N) en horas de la mañana, reportaron una pequeña columna de emisión de color blanco, no visible desde la ciudad de Pasto. Durante el mes de diciembre y con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se realizaron dos sobrevuelos sobre el volcán Galeras los días 3 y 17. El día 3 de diciembre, durante el sobrevuelo se observó poca emisión de gases desde campos fumarólicos aledaños al cráter principal y especialmente desde el fondo del mismo (Figura 2.1.110).



Figura 2.1.110. Emisión de gases, diciembre 3 de 2009, 6:45 a.m.

Se observó emisiones de color gris claro, que alcanzaron una altura máxima de 450 m sobre la cima del volcán, por acción de los vientos, estas columnas se dispersaron hacia el sector suroeste del volcán (Figura 2.1.111).



Figura 2.1.111. Emisión de gases vista desde el OVSP, diciembre 9 de 2009, 3:47 p.m.

Con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), el día 17 de diciembre se realizó un sobrevuelo a la cima del volcán Galeras en el que se observó salida de gases de color blanco, desde el fondo del cráter principal y desde puntos periféricos como la zona fumarólica de Las Deformes y los cráteres secundarios Las Chavas y el Paisita (Figura 2.1.112).



Figura 2.1.112. Emisión de gases en el cono activo de Galeras, diciembre 17 de 2009, 6:43 a.m.

El día 30 de diciembre desde las 5:30 am. hasta las 8:30 a.m., se observó una emisión de gases de color blanco, tendida hacia el sur, con una altura de 550 m sobre la cima (Figura 2.1.113).



Figura 2.1.113. Emisión de gases vista desde el OVSP, diciembre 30 de 2009, 6:20 a.m.

2.1.7 IMÁGENES TÉRMICAS

En los sobrevuelos realizados los días 12 de julio, 23 de agosto, 14 de septiembre, 16 y 27 de octubre, 14 y 26 de noviembre y 3 de diciembre de 2009, en los cuales participó personal de INGEOMINAS-OVSP con la colaboración la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en un helicóptero Hughes y Huey, 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, lo que permitió establecer un aumento paulatino de la temperatura durante el segundo semestre de 2009, alcanzando temperaturas mayores a 180 °C. Las imágenes también se encuentran disponibles en la página web del observatorio, en la URL: <http://intranet.ingehominas.gov.co/pasto>.

En la Tabla 2.1.10 se listan las temperaturas máximas registradas con la cámara FLIR en diferentes puntos del cono activo del volcán Galeras, durante sobrevuelos realizados entre julio y diciembre de 2009. 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 2.1.10. Fechas de sobrevuelos realizados con las temperaturas máximas obtenidas en ellos, en el primer semestre de 2009.

Sobrevuelo	Temperatura máxima
12 de julio	100 °C
23 de agosto	180 °C
14 de septiembre	> 180 °C (saturado)
16 de octubre	207 °C
24 de octubre	> 180 °C (saturado)
14 de noviembre	120 °C
26 de noviembre	195 °C

El día 12 de julio se realizó sobrevuelo con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana – FAC se tomaron imágenes térmicas en las que se observaron anomalías en algunas zonas en el interior del cráter principal, con temperaturas de hasta 100°C en una pequeña zona y un promedio de 12°C para el fondo del cráter principal (Figuras 2.1.114 y 2.1.115); estos valores muestran un importante descenso respecto a lo registrado en el sobrevuelo del 23 de junio de 2009, en el que se observó una temperatura máxima de 220°C.

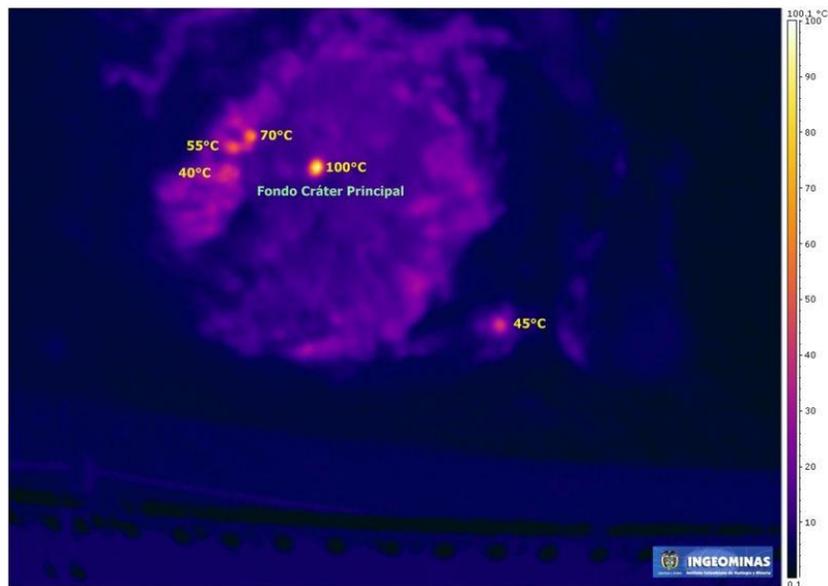


Figura 2.1.114. Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 15300 pies sobre el nivel del mar, empleando la termocámara FLIR.

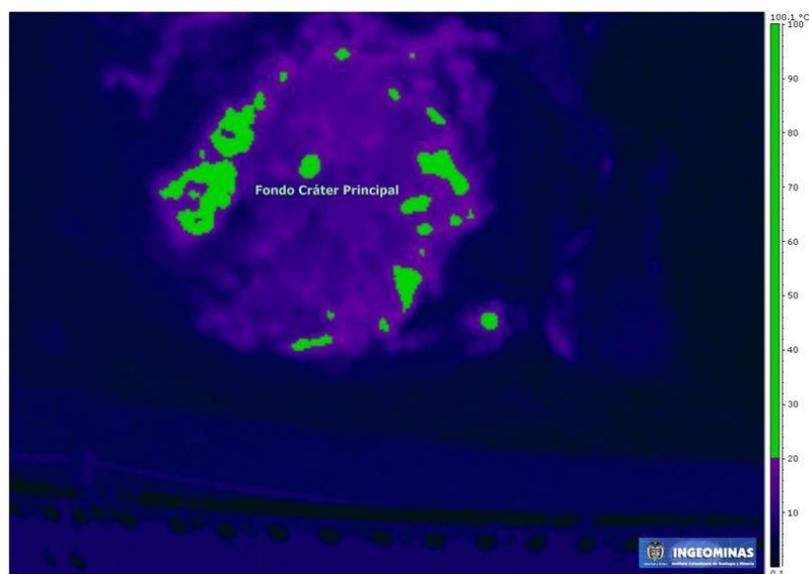


Figura 2.1.115. Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 15300 pies sobre el nivel del mar (a unos 600 metros sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. En esta imagen, las zonas en color verde indican temperaturas mayores a 20°C (isoterma).

El día 23 de agosto, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se realizó un sobrevuelo en el cono activo de Galeras, en general, en comparación con el sobrevuelo del 12 de julio, se nota un aumento en las temperaturas de las anomalías térmicas pasando de tener entre 40 y 100°C, a estar entre 50 a 180°C. Las figuras 2.1.116 a 2.1.118 muestran otros detalles de estas imágenes.

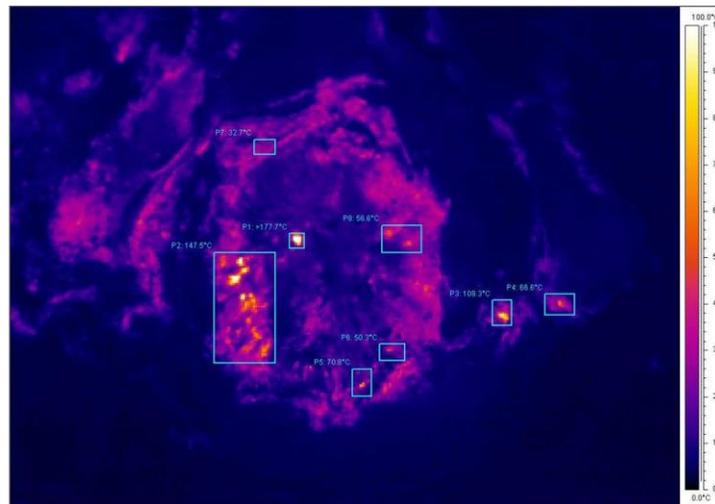


Figura 2.1.116. Imagen térmica del cráter principal de Galeras, tomada en el sobrevuelo del 23 de agosto en horas de la mañana, identificando algunas anomalías; la mayor de ellas con una temperatura cercana a los 180 °C.

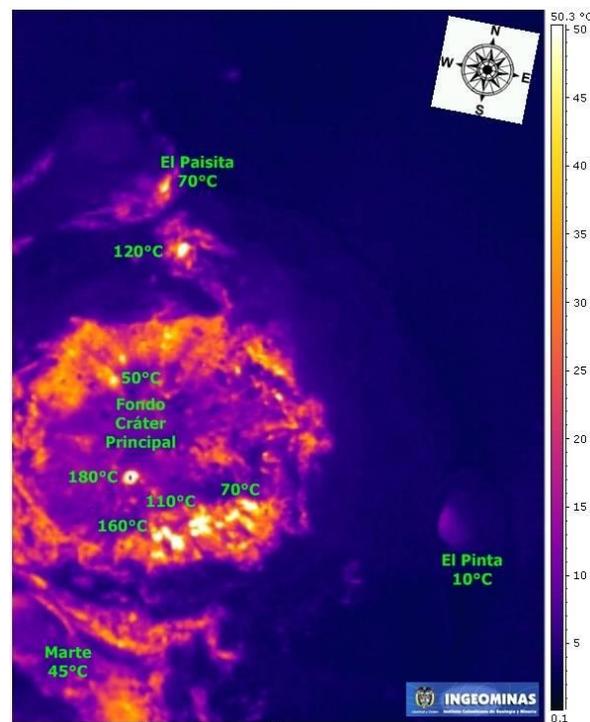


Figura 2.1.117. Imagen térmica de la zona centro-oriente del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar, empleando la termocámara. En esta imagen, los colores más claros indican temperaturas más altas, de acuerdo con la escala cromática de la derecha. La temperatura más alta fue de 180°C, en una pequeña zona al fondo del cráter principal.

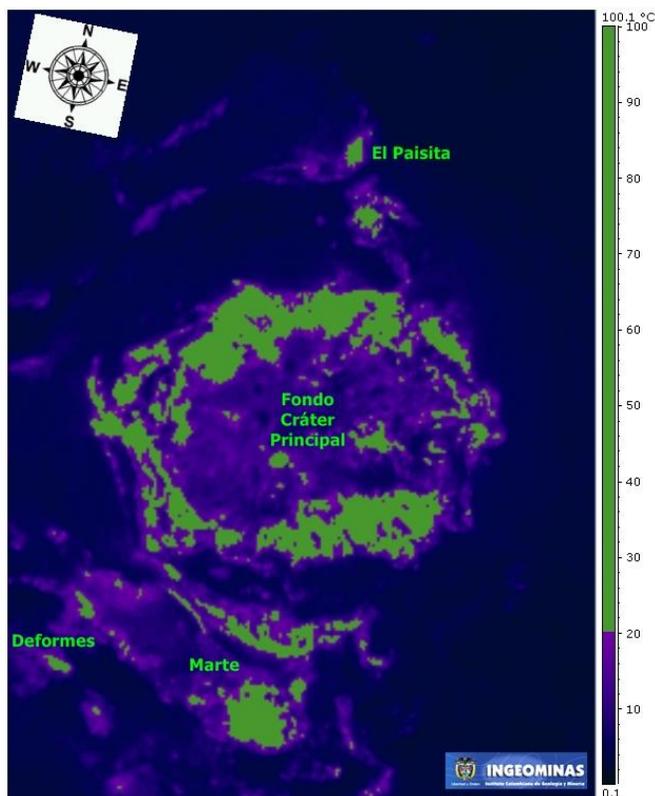


Figura 2.1.118. Imagen térmica del interior del cono activo de Galeras, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar (a unos 430 m sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. En esta imagen, los colores más claros indican temperaturas más altas, entre 0 y 100°C (de acuerdo con la escala cromática de la derecha), mientras que las zonas en color verde indican temperaturas mayores a 20°C (*isoterma*).

El día 14 de septiembre se realizó sobrevuelo con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana – FAC, la figura 2.1.119 corresponde a una imagen térmica, en las cuales se puede observar una anomalía térmica con una temperatura máxima mayor a 190° en el fondo del cráter principal. Las imágenes fueron tomadas durante las primeras horas de la mañana, sobrevolando a una altura de 16000 pies sobre el nivel del mar (830 metros sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. De acuerdo con la escala cromática de la derecha (ajustada para efectos de visualización entre -0.7 y 50°C), las temperaturas más altas se registraron al fondo del cráter principal, con valores que saturaron el rango bajo de operación de la termocámara.

En la figura 2.1.120, los colores más claros indican temperaturas más altas, entre aproximadamente 0 y 100°C (de acuerdo con la escala cromática de la derecha), mientras que las zonas en color verde indican temperaturas mayores a 20°C (*isoterma*).

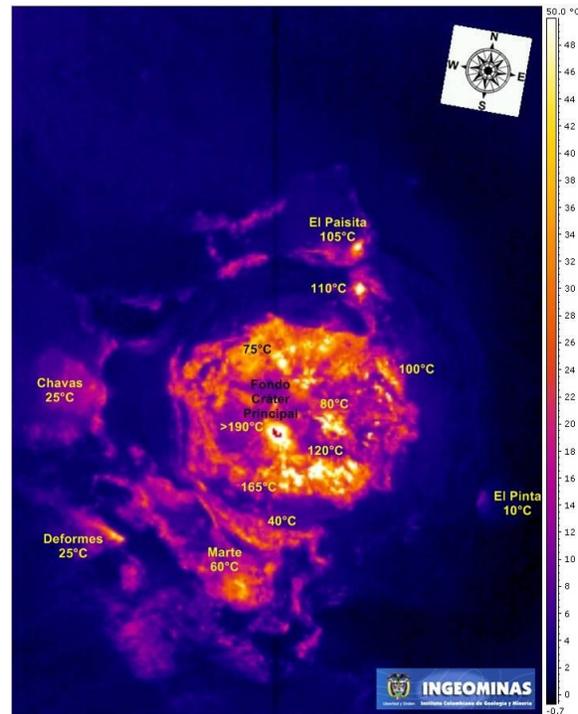


Figura 2.1.119. Imagen térmica del cono activo de Galeras.

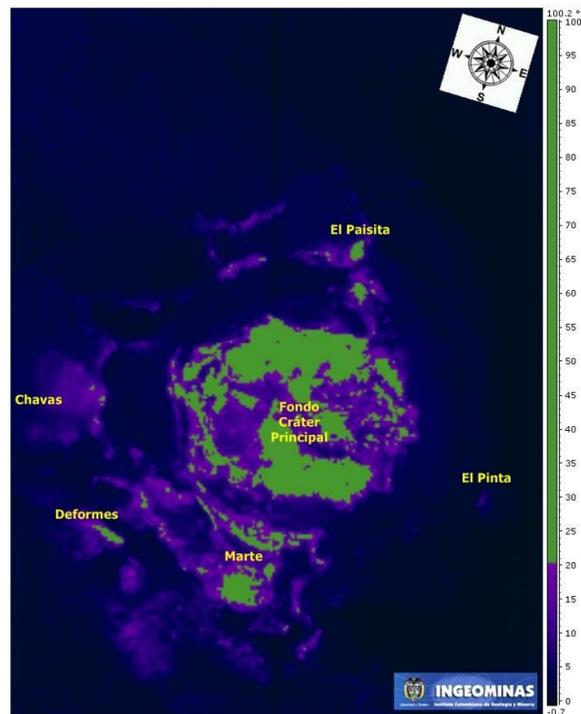


Figura 2.1.120. Imagen isoterma del interior del cono activo de Galeras

Adicionalmente para el 7 de octubre se tomaron algunas imágenes térmicas, empleando la termocámara FLIR. Debido a la distancia entre el helicóptero y el cono activo, el ángulo de toma y la

interferencia de los rayos solares al momento del sobrevuelo, no fue posible estimar temperaturas absolutas; no obstante, se observa claramente en las imágenes captadas, diferencias relativas que definen regiones de anomalías térmicas, principalmente, hacia la región interior del cráter principal, las zonas más altas de su borde oriental y en surcos a manera de canales en su ladera externa occidental, por donde posiblemente flujo y/o se acumulo material (principalmente ceniza) producto de la erupción del 30 de octubre (Figura 2.1.121).

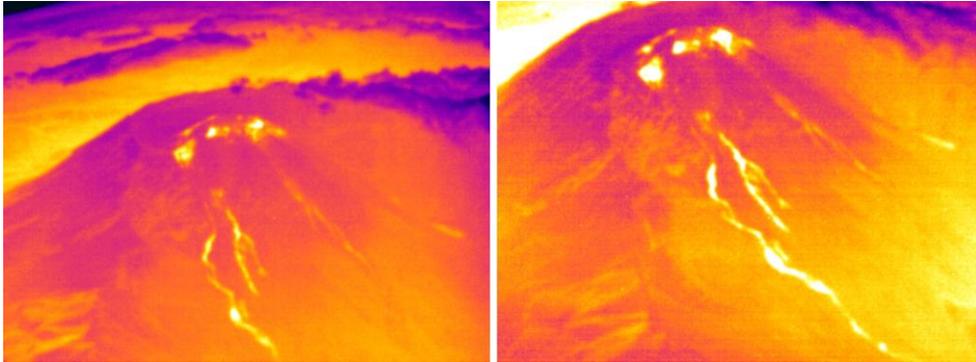


Figura 2.1.121. Imágenes térmicas tomadas sobrevolando el costado occidental del edificio volcánico, a una altitud de 15500 pies (aproximadamente, 675 m sobre el nivel de la cima volcánica).

En la Figura 2.1.122 se muestra una imagen térmica del cono activo de Galeras, tomada el día 16 de octubre sobrevolando a una altura de 16700 pies sobre el nivel del mar (1040 m sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. De acuerdo con la escala cromática de la derecha (ajustada para efectos de visualización entre 4,1 y 50°C), las temperaturas más altas se registraron al fondo del cráter principal, exhibiendo un valor máximo de 207°C.

En el sobrevuelo mencionado se obtuvo el registro de imágenes sobre las que se puede inferir el valor de temperatura de la zona en estudio. En las imágenes térmicas se observó una anomalía sobre el sector occidental del interior del cráter principal, cuyo valor fue cercano a los 200 °C, valor similar se obtuvo en una zona muy localizada en cercanías del cráter secundario El Paisita (Figura 2.1.123).

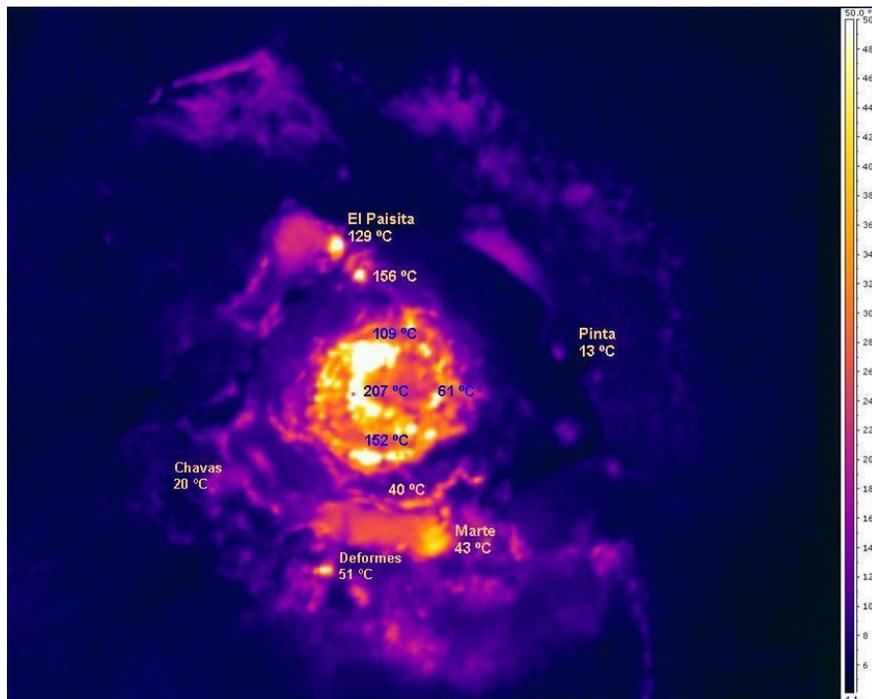


Figura 2.1.122. Imagen térmica volcán Galeras, vista del fondo del cráter principal. Los valores en grados centígrados indican la temperatura de las zonas señaladas.

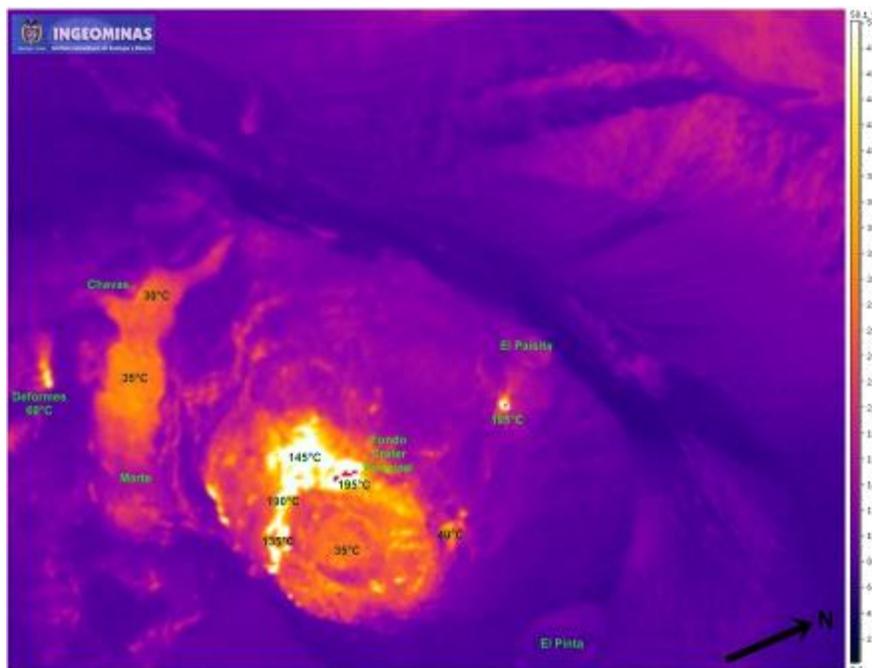


Figura 2.1.123. Imagen térmica del cráter de Galeras, tomada en el sobrevuelo del 26 de noviembre. Las zonas con colores más claros representan mayores valores de temperatura de acuerdo a la escala cromática ubicada a la derecha de la imagen. Una zona puntual cercana al cráter el Paisita alcanzó un valor de temperatura de 195° C, valores similares se encontraron hacia el fondo del cráter.

El día 3 de diciembre, durante sobrevuelo realizado con el apoyo de la Fuerza Aérea (FAC) se obtuvo el registro de imágenes térmicas, en las que se observó una máxima temperatura de 155°C en el cráter principal, 40°C en el campo fumarólico Las Deformes y 70°C en el Paisita (Figura 2.1.124).

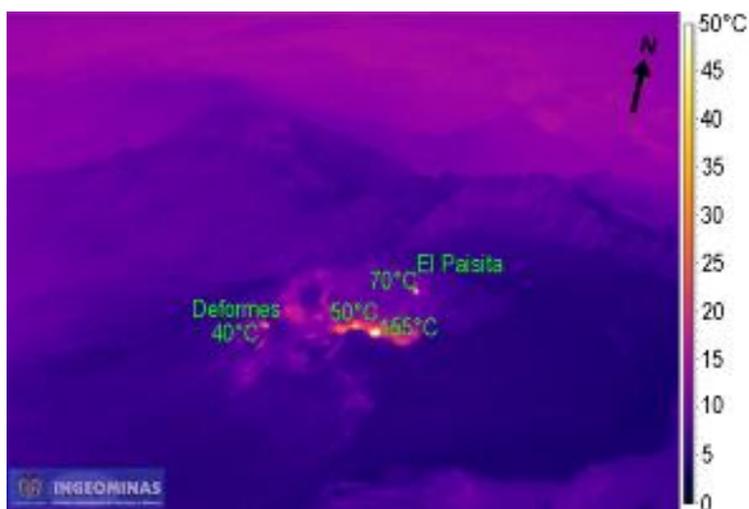


Figura 2.1.124. Imagen térmica del cono activo de Galeras, diciembre 3 de 2009, 6:45 a.m.

2.1.8 CONCLUSIONES

- La evolución general de los procesos eruptivos explosivos registrados en el segundo semestre de 2009 se ajusta a un modelo, que refleja un sistema capaz de generar sobrepresiones como consecuencia de material magmático localizado a niveles superficiales, con ciertas propiedades físico-químicas que pueden impedir o reducir significativamente la liberación de fluidos hacia la atmósfera. Este modelo se basa principalmente en los tipos de sismos registrados (eventos tipo Tornillo con ciertas características especiales, los cuales han estado presentes en etapas previas a varios de los episodios eruptivos entre 1992 y 2009 en Galeras, fracturas y microfracturas que se registran a niveles superficiales), el comportamiento del Dióxido de Azufre (fluctuante y con tendencia al descenso) y la observación de las manifestaciones de la actividad superficial (emisiones de gases y cenizas), en el contexto de domos emplazados en el fondo del cráter principal y con la visión de parámetros que se analizan de manera integral. En las diez erupciones registradas en 2009 (8 en el primer semestre y dos en el segundo semestre), los procesos pre-eruptivos, han presentado similitudes en los cambios de la sismicidad y particularmente, en la relativa rapidez con la que evoluciona el sistema (días a horas).
- De acuerdo con los valores de deformación en los inclinómetros electrónicos de Cráter, Peladitos y Calabozo, en el segundo semestre de 2009 se pueden destacar tres periodos de coincidencia en el cambio de tendencia de los inclinómetros. Se podría enfatizar en el hecho que aun cuando se vieron cambios, no se puede correlacionar fácilmente con los procesos eruptivos del segundo semestre (30 de septiembre y 20 de noviembre de 2009), teniendo en cuenta que no hay un patrón claro antes o después de cada erupción y por el contrario se observa que las tendencias registradas en estas fechas por los inclinómetros se mantienen, aun cuando se presentaron procesos tan relevantes como las erupciones mencionadas. La continuidad en la tendencia registrada por los inclinómetros, se puede explicar debido a que muy probablemente los procesos eruptivos han estado caracterizados por sismicidad a niveles superficiales y que de igual forma, los procesos de realimentación se han generado a niveles intermedios y no a niveles más profundos. Sin embargo, para el primer periodo y aplicando el modelo de Mogi se puede decir que la deformación evidente en Calabozo indicaría que está originada por una fuente profunda de más de 9 Km, mientras que para el tercer periodo, aplicando el modelo de Mogi, se observa que la fuente que debió actuar en ese momento y provocó la deformación se profundizó con respecto al primer periodo.
- En el área de fisicoquímica, al igual que en ocasiones anteriores, se destaca el descenso abrupto del flujo de SO₂ y luego la ausencia del mismo antes de las erupciones, evidenciándose el sello que impide la salida de gases y presuriza el sistema interno del volcán. Adicionalmente, después de la erupción explosiva del 30 de septiembre de 2009 hubo una gran degasificación, obviamente porque el sistema abierto; incidiendo en el descenso de los valores de flujo de SO₂ que se midieron en octubre.
- Del análisis preliminar de algunas muestras de ceniza colectadas en campo, permiten afirmar que la erupción registrada el 20 de noviembre de 2009, fue una erupción magmática con evidencias de material juvenil emitido. Es probable que una parte importante del material emitido se encontrara constituyendo el sello o tapón.



- A finales del segundo semestre de 2009, comenzaron a registrarse nuevamente eventos tipo Tornillo, cuyo comportamiento mostró aumento de su duración y disminución de su frecuencia dominante, lo cual se ha visto en los Tornillos que antecedieron las erupciones de los episodios de actividad de 1992 a 1993 y de 2004 a 2009; además, no se registraron emisiones de SO_2 , lo cual fue concordante con la ausencia de eventos de emisión de gases. Por todo lo anterior, el 9 de diciembre de 2009 INGEOMINAS toma la decisión de cambiar el nivel de actividad a Naranja  [II- “Erupción probable en término de días o semanas”], permaneciendo así hasta la fecha de cierre de este informe

2.2 VOLCAN 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).



Figura 2.2.1. Imagen de la cima del volcán Doña Juana.

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 segundo semestre de 2009, 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 2.2.2). 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 2.2.3). 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 2.2.2). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño.

Las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Doña Juana tuvieron un funcionamiento total del 87% (Figura 2.2.4). No se tuvo un 100% de funcionamiento, debido principalmente a los problemas presentados en las estaciones de inclinometría electrónica de Páramo y Lavas. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- La estación de corto período Lavas, la mayor parte del tiempo, envió la información en forma permanente; sin embargo, su porcentaje de operación llegó al 75% 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 88%; las horas que no funcionó fue debido a descarga de la batería del sistema de alimentación y a interferencias que afectaron la calidad de la señal.
- La estación sismológica de banda ancha Páramo tuvo un porcentaje de funcionamiento del 98%.
- El porcentaje de funcionamiento de los inclinómetros electrónicos Páramo y Florida fue del 74% y 100% respectivamente. Por problemas de radio-enlace y descarga de las baterías, algunas horas no se tuvo información.

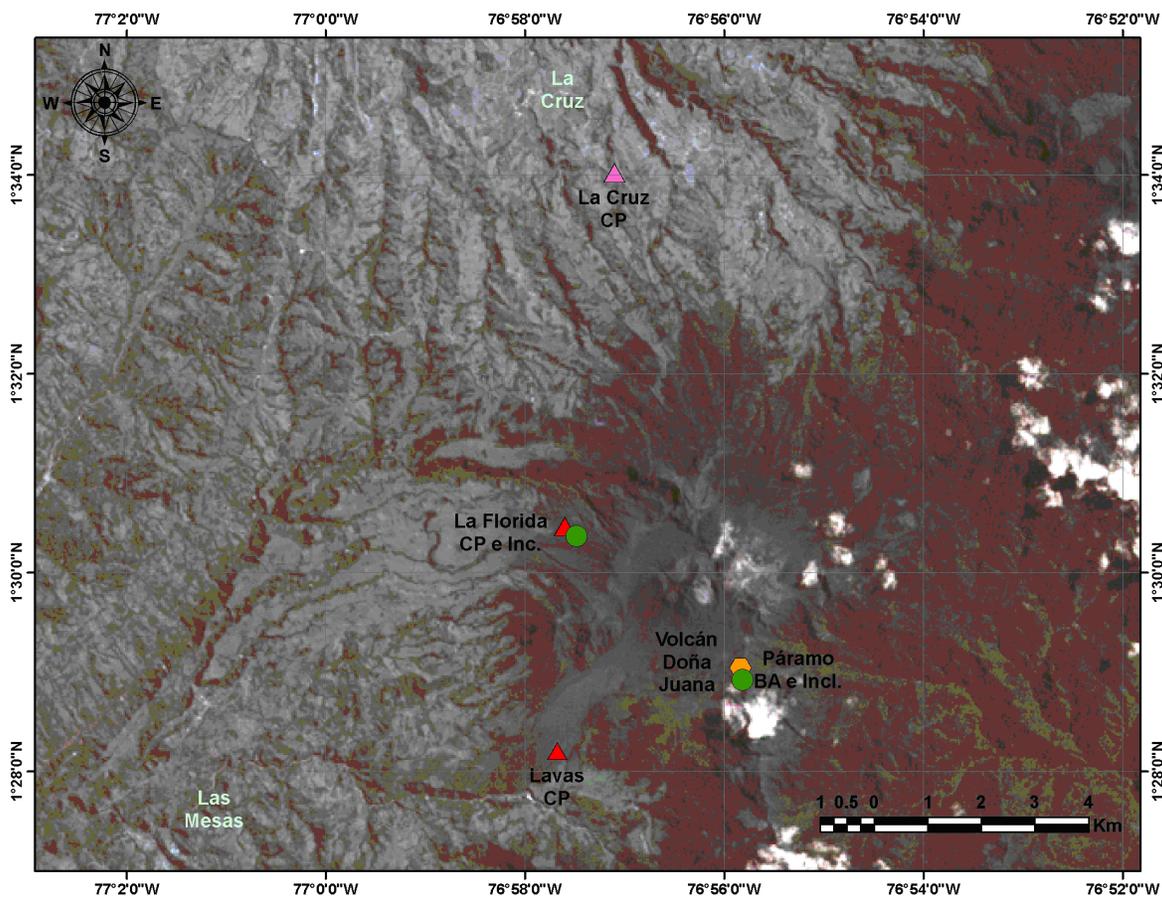


Figura 2.2.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2009.

Tabla 2.2.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2009.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia a los domos (km)	Dirección respecto al cráter	Altitud (msnm)
Lavas	Análogica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	4.10	SW	2954
Páramo	Digital	Sismómetro Banda Ancha	Triaxial	2.10	SE	3533
Florida	Análogica	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

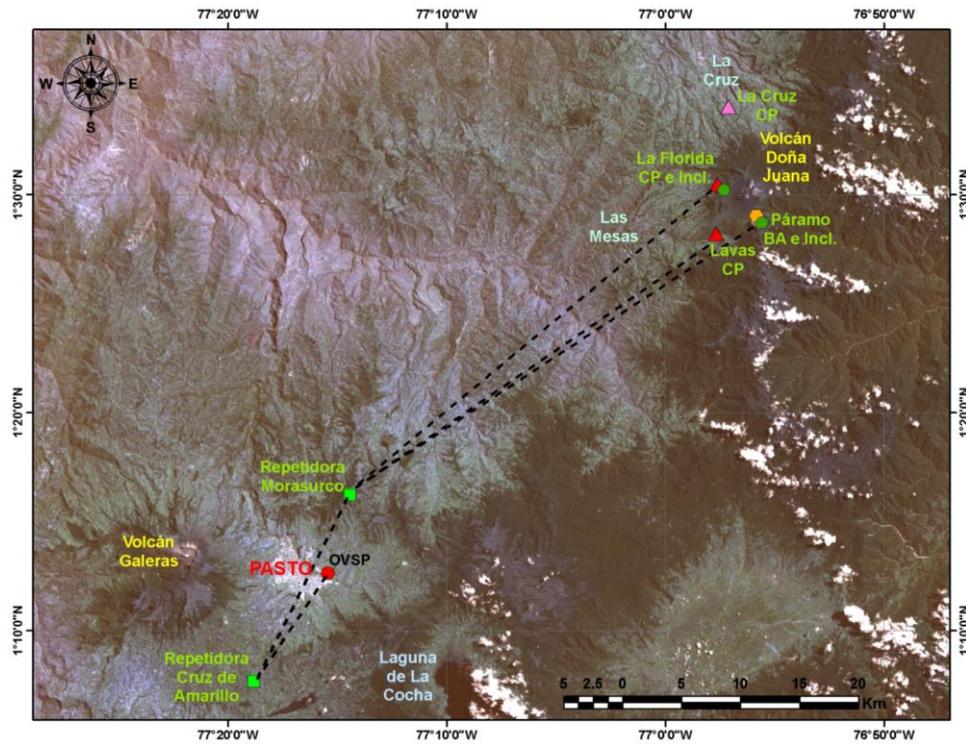


Figura 2.2.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2009. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos. Los triángulos rojos representan estaciones 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.

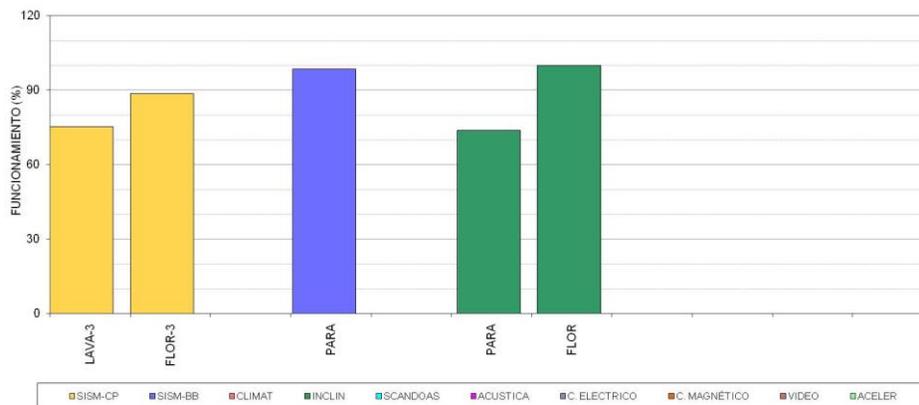


Figura 2.2.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana.

2.2.2 SISMOLOGÍA

Durante el segundo semestre de 2009 la instrumentación del volcán Doña Juana permitió el registro de sismicidad volcánica asociada a fracturamiento de material cortical, y otro tipo de sismicidad que por sus características tanto en forma de onda como en el contenido frecuencial podría asociarse a dinámica de fluido de fuente transitoria al interior del sistema volcánico, sin embargo la instrumentación del volcán Doña Juana es reciente haciéndose necesario la recopilación de una mayor cantidad de información con el fin de determinar el tipo de fuente que origina los eventos.

En la figura 2.2.5 se muestra el histograma de ocurrencia de los diferentes tipos de eventos volcánicos registrados en el volcán Doña Juana.

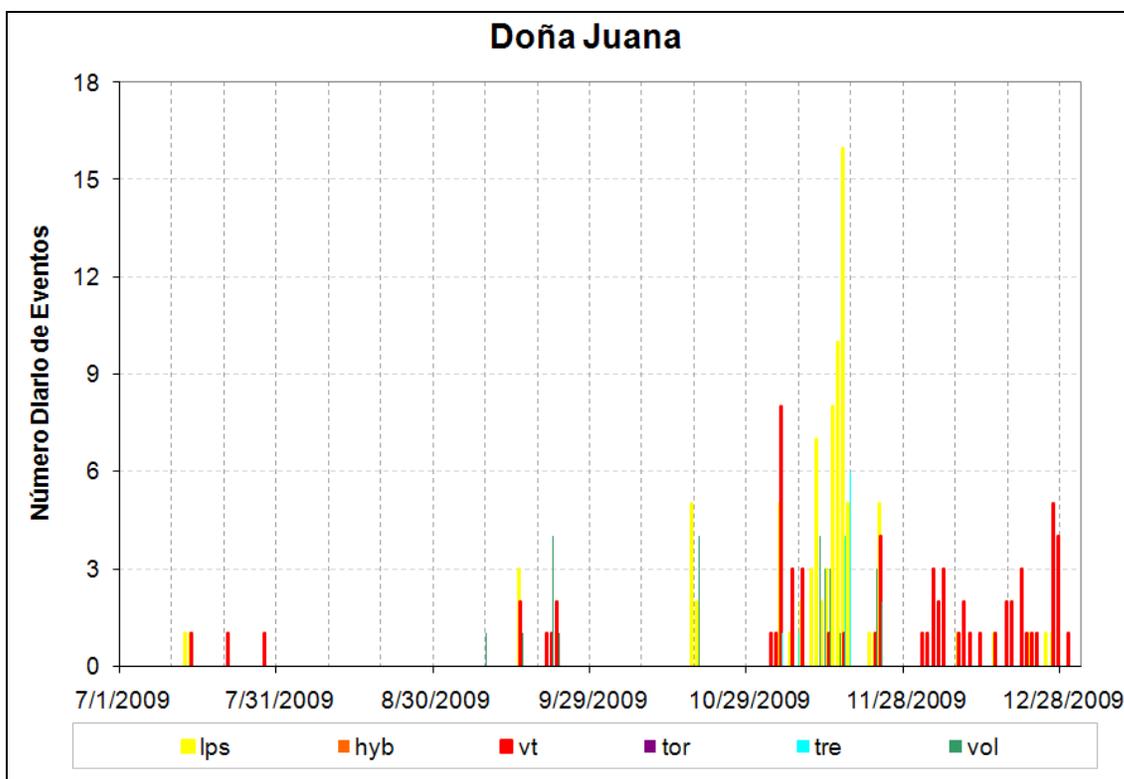


Figura 2.2.5. Histograma de ocurrencia de los diferentes tipos de sismicidad volcánica, para el período comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.

En la figura 2.2.6 se muestra un sismograma y en la figura 2.2.7 el espectro de un evento que puede asociarse a dinámica de fluidos registrado el 18 de octubre a las 9:13 p.m. En la figura 2.2.8 se muestra un evento asociado a fracturamiento de material cortical.

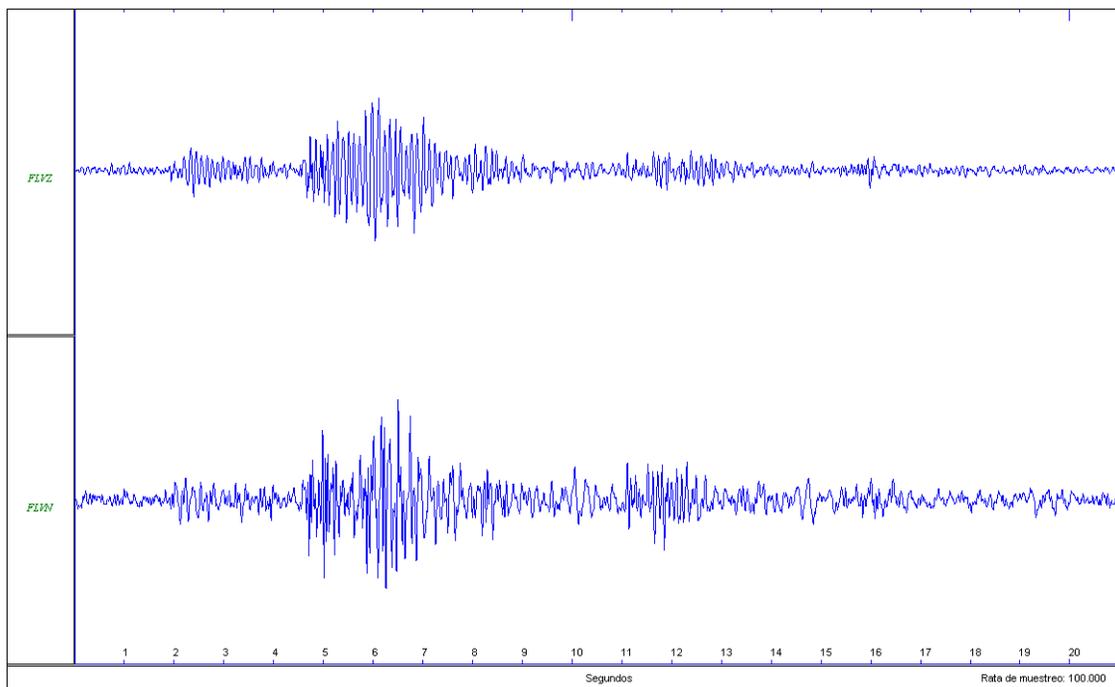


Figura 2.2.6. Sismogramas registrados por la componentes vertical (arriba) y norte-sur (abajo) de la estación Florida, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido, ocurrido el 18 de octubre a las 9:13 p.m.

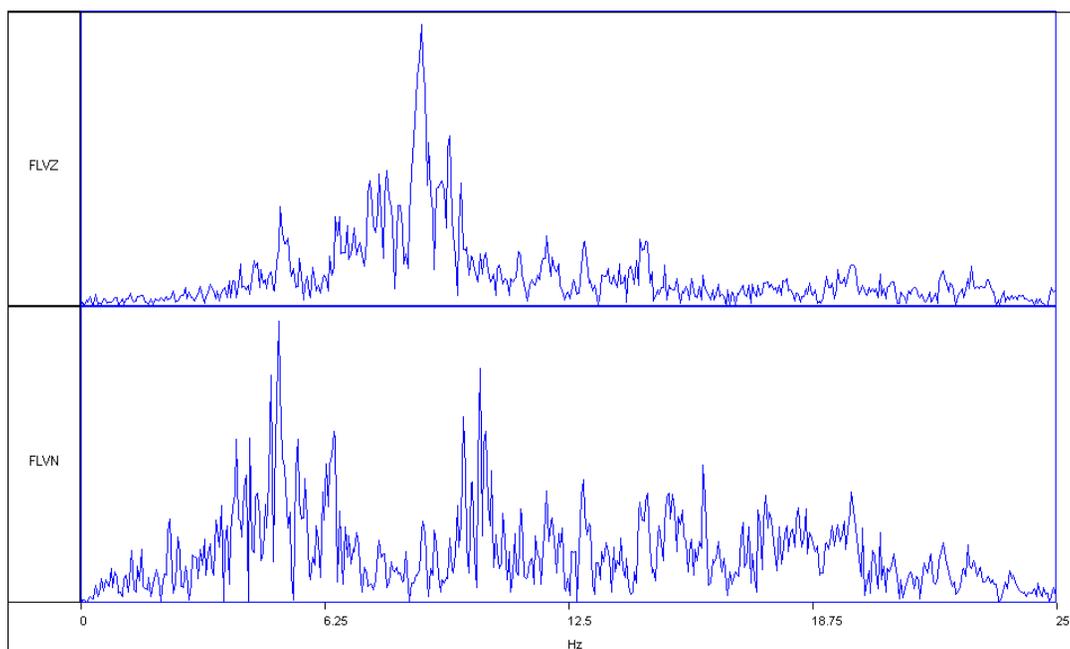


Figura 2.2.7. Espectros de la componentes vertical (arriba) y norte-sur (abajo) de la estación Florida, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido, ocurrido el 18 de octubre a las 9:13 p.m.

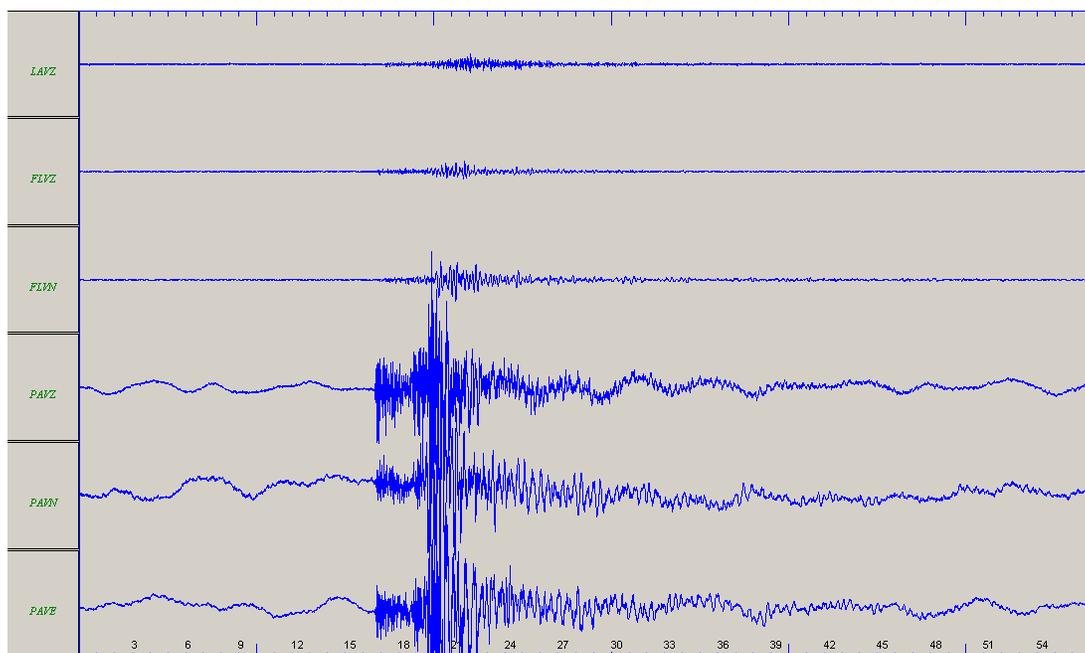


Figura 2.2.8. Sismogramas de evento asociado a fracturamiento de material cortical registrado el 15 de septiembre a las 8:15 p.m. por las estaciones Florida y Lavas.

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 m Sobe el nivel del mar), para este periodo, mostró en su componente Radial un comportamiento relativamente estable, con pequeñas fluctuaciones, a manera de oscilaciones, variaciones que se encuentran entre los 7 y 8 μrad , las cuales tienden a estabilizarse a mediados de octubre (Figura 2.2.9). Para la componente Tangencial se observa un comportamiento descendente desde el 12 de octubre el cual hasta la fecha de cierre de este informe tuvo una variación aproximada de 59 μrad .

El inclinómetro Páramo (ubicado a 2,1 km., al sur-este de los domos, 3533 msnm) registró un leve descenso en la componente Y (radial) el cual desde el 11 de octubre, hasta la fecha de cierre de este informe presentó una variación de 12 μrad y en su componente X (tangencial), desde el 1 de julio hasta el 5 de octubre se observó un comportamiento ascendente, el cual registró 15 μrad , luego desde el 5 de octubre hasta la fecha de cierre de este informe presentó un comportamiento descendente que alcanzó una variación de 25 μrad . Adicionalmente, se resalta que algunos de los cambios se han asociado con variaciones en el sensor de temperatura del instrumento (Figura 2.2.10).

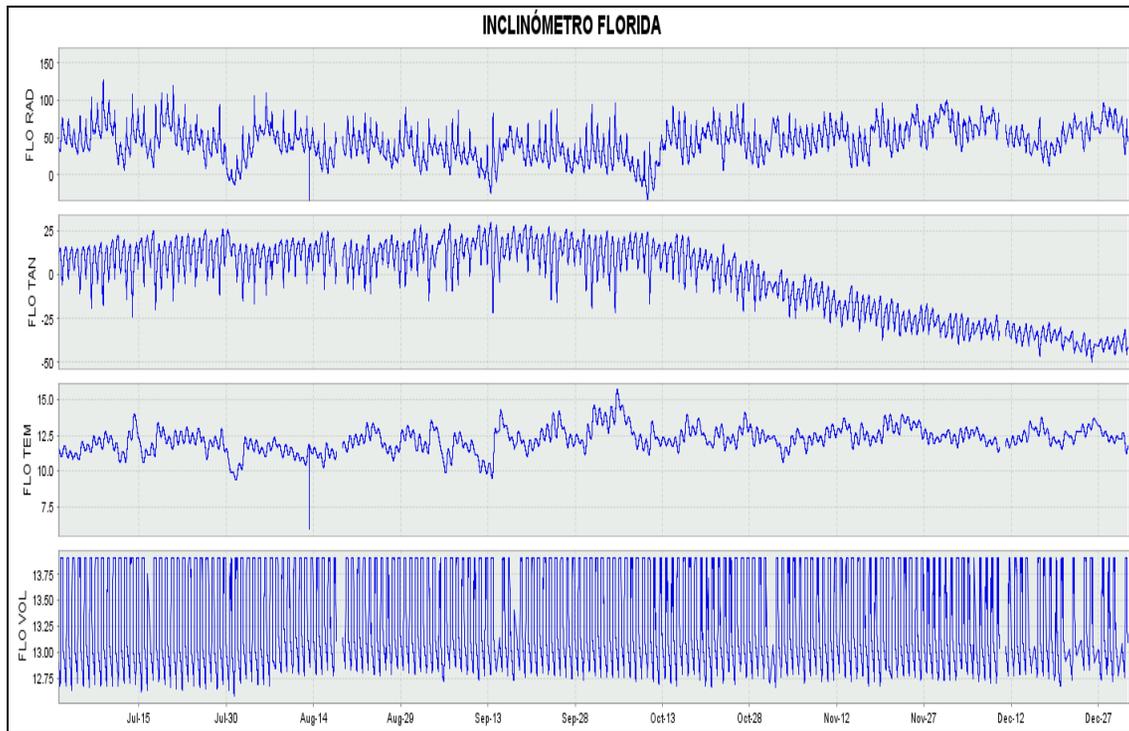


Figura 2.2.9. Componentes de inclinación radial (X) y tangencial (Y), junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.

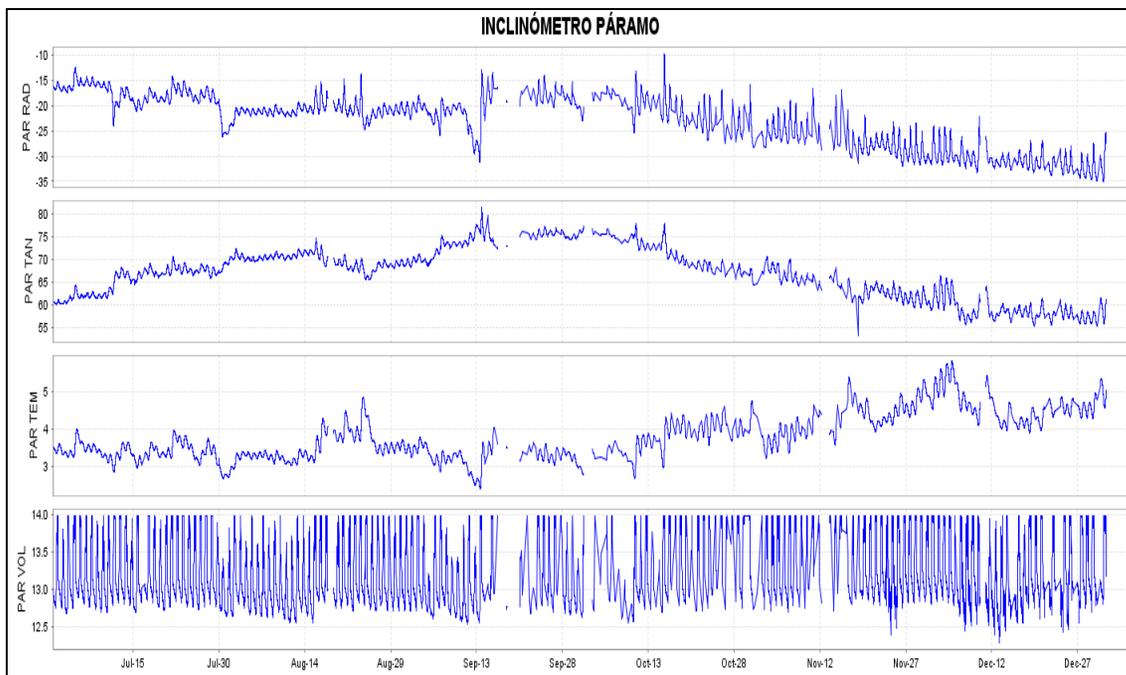


Figura 2.2.10. Componentes de inclinación radial (Y) y tangencial (X), junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.



2.2.4 ACTIVIDAD SUPERFICIAL

Durante el segundo semestre de 2009 no se tuvieron reportes relacionados con actividad superficial en el volcán Doña Juana.

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 movimiento de fluidos. Se resalta la ocurrencia de eventos asociados con fracturamiento de material cortical.
- La evaluación de los parámetros monitoreados durante el segundo semestre de 2009, han mostrado que existe actividad volcánica con un comportamiento relativamente estable, lo que permite establecer el **NIVEL (IV) VERDE ●** : “**Volcán activo y comportamiento estable**”.

2.3 VOLCAN AZUFRAL

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 2.3.2), 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.

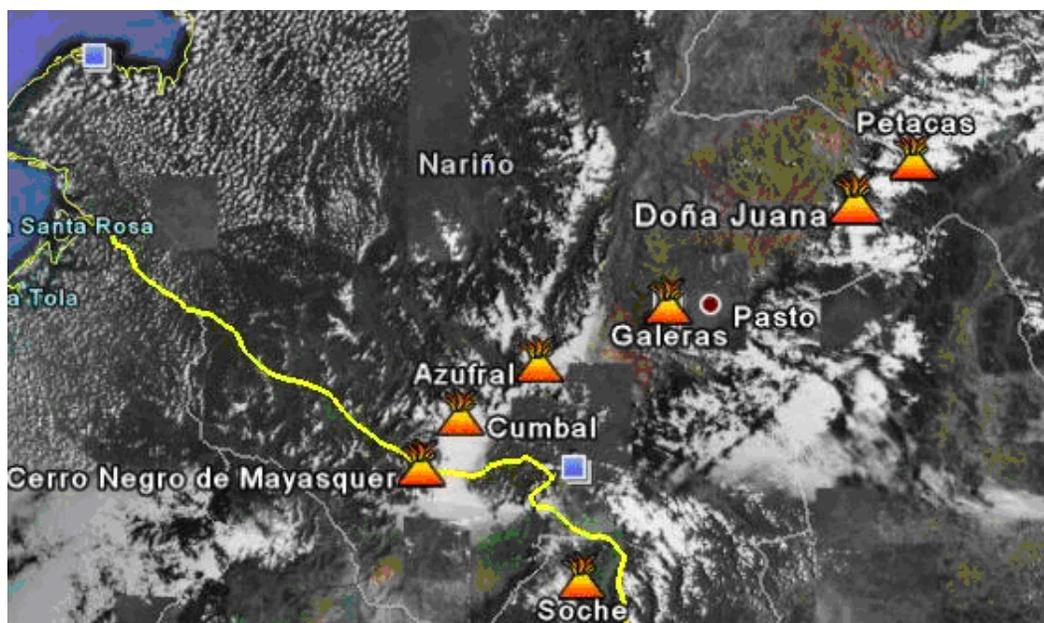


Figura 2.3.2. Imagen tomada de Google Earth en donde se observan algunos volcanes del sur de Colombia y del norte del Ecuador, entre ellos están Doña Juana, Galeras, Azufral y Cumbal, monitoreados por el OVSP - INGEOMINAS.

2.3.1 RED DE VIGILANCIA

Durante el segundo semestre de 2009, 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 2.3.3). 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 2.3.4). 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 electrónico telemétrico (Tabla 2.3.1, Figura 2.3.3). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño.

Durante el segundo semestre de 2009, las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Azufral tuvieron un funcionamiento total del 83% (Figura 2.3.5). 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 91%, 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 52%. Esta estación no tuvo un porcentaje de funcionamiento del 100% debido principalmente a problemas de radio-enlace.
- La estación sismológica de La Roca fue instalada en el mes de noviembre y presentó problemas en el radioenlace.
- El inclinómetro electrónico de la Roca desde su instalación funciona correctamente y su funcionamiento es del 100%

Tabla 2.3.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2009.

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	Analógica	Sismómetro de Banda Ancha	Triaxial			4025
Chaitán	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	4.3	ENE	3730
La Roca	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial			4025

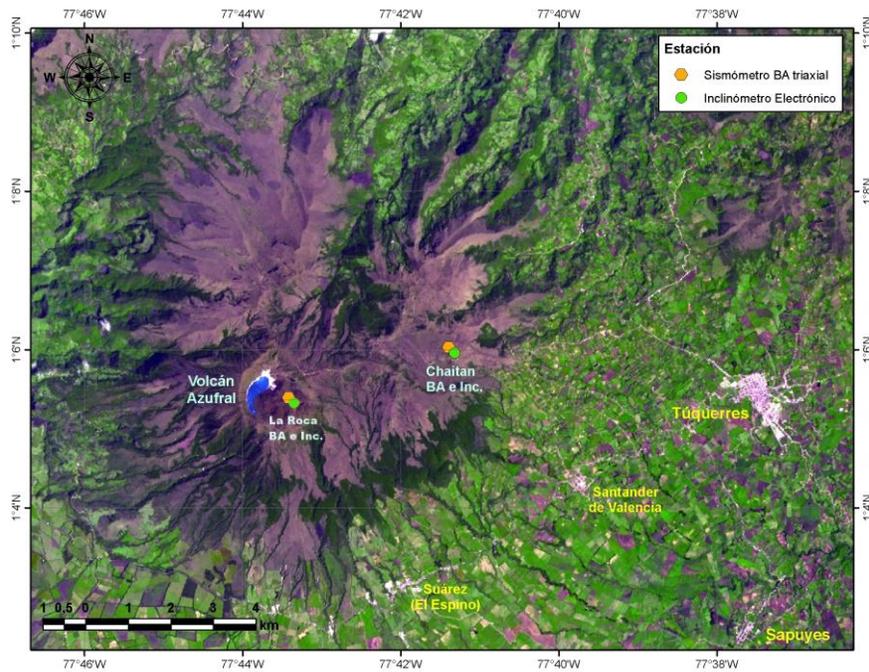


Figura 2.3.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2009.

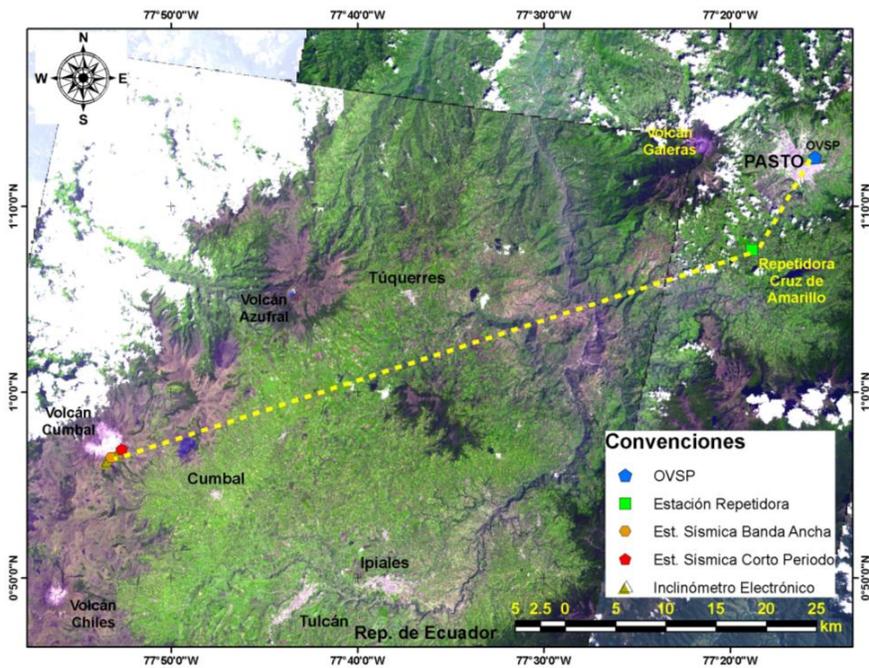


Figura 2.3.4. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2009. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

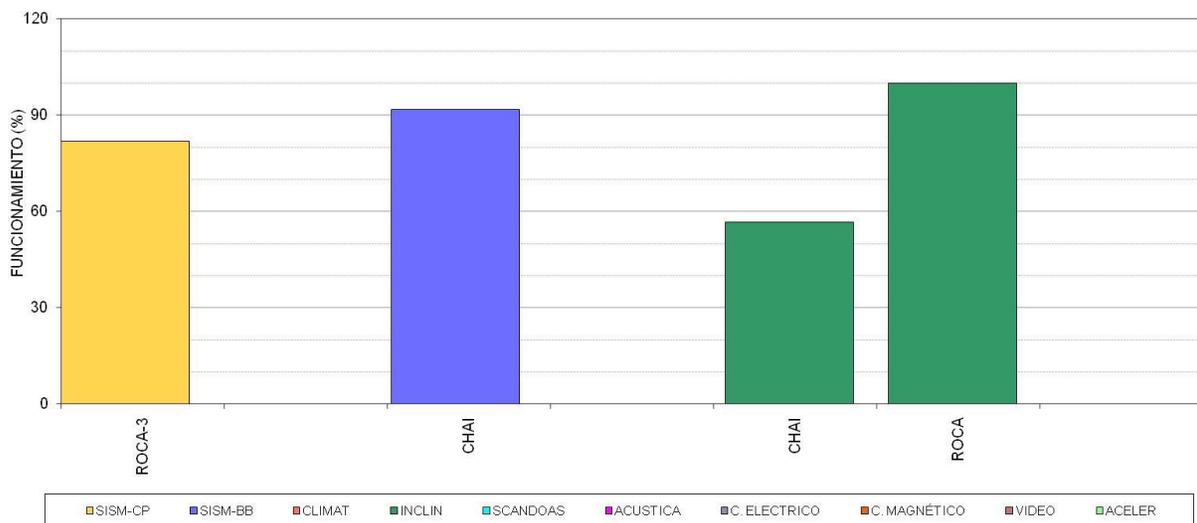


Figura 2.3.5. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral.

2.3.2 SISMOLOGÍA

La red de monitoreo sísmico que tiene el OVSP en la región del volcán Azufral, permitió registrar alguna sismicidad de origen volcánico en su área de influencia. Aunque son pocos los sismos registrados, algunos de estos estuvieron asociados con procesos de fracturamiento de material cortical, denominados como Volcano-Tectónicos (VT) (Figura 2.3.6), sin embargo al contar con pocas fases no fue posible realizar la localización de este tipo de eventos, además se registraron otros sismos que por sus características podrían estar asociados a movimiento de fluido al interior del sistema volcánico.

En la figura 2.3.7 se muestra el sismograma y el espectro de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido al interior del sistema volcánico.

En la figura 2.3.8 se muestra el sismograma y en la figura 2.3.9 el espectro de un evento que podría asociarse a dinámica de fluido al interior del sistema volcánico.

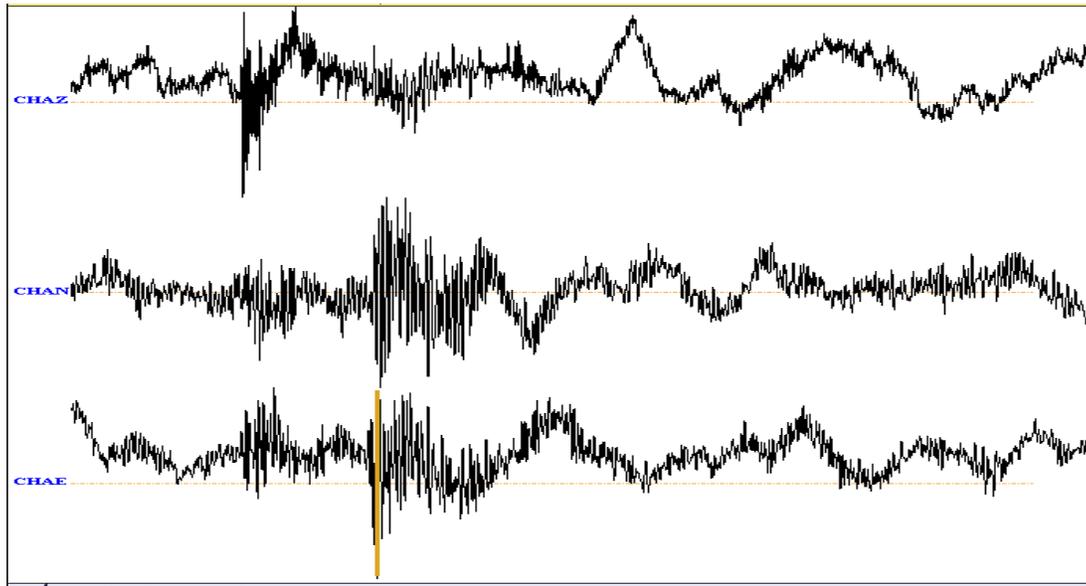


Figura 2.3.6. Sismogramas de las tres componentes en la estación Chaitán, del evento tipo VT ocurrido el 20 de julio de 2009 a las 6:36 p.m.

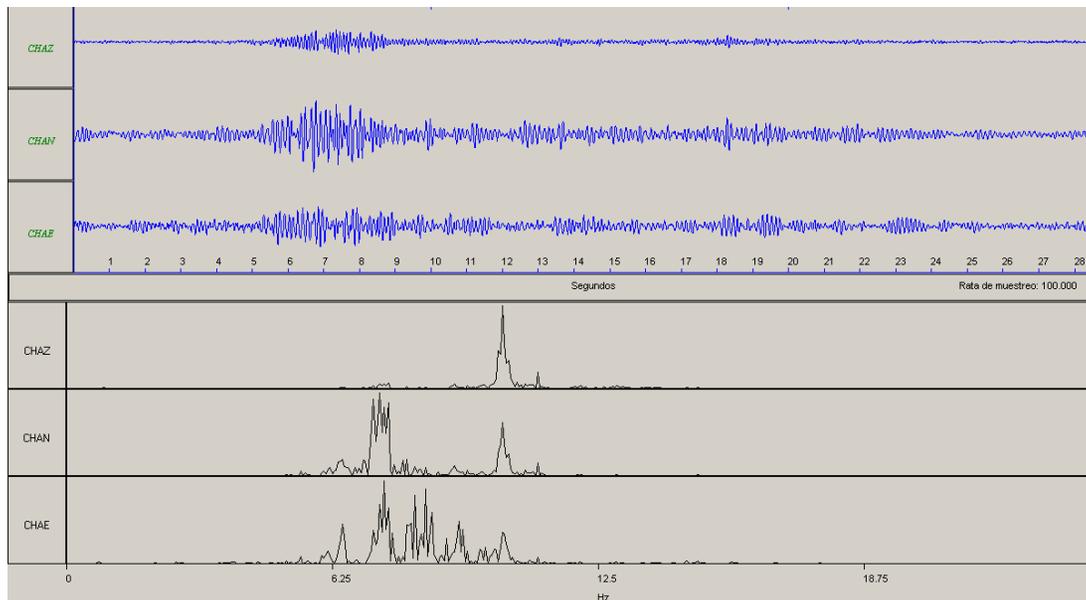


Figura 2.3.7. Sismogramas y espectros de las tres componentes en la estación Chaitán, de un evento que podría asociarse a dinámica de fluidos al interior del sistema volcánico, ocurrido el 11 de julio de 2009 a la 1:38 a.m.

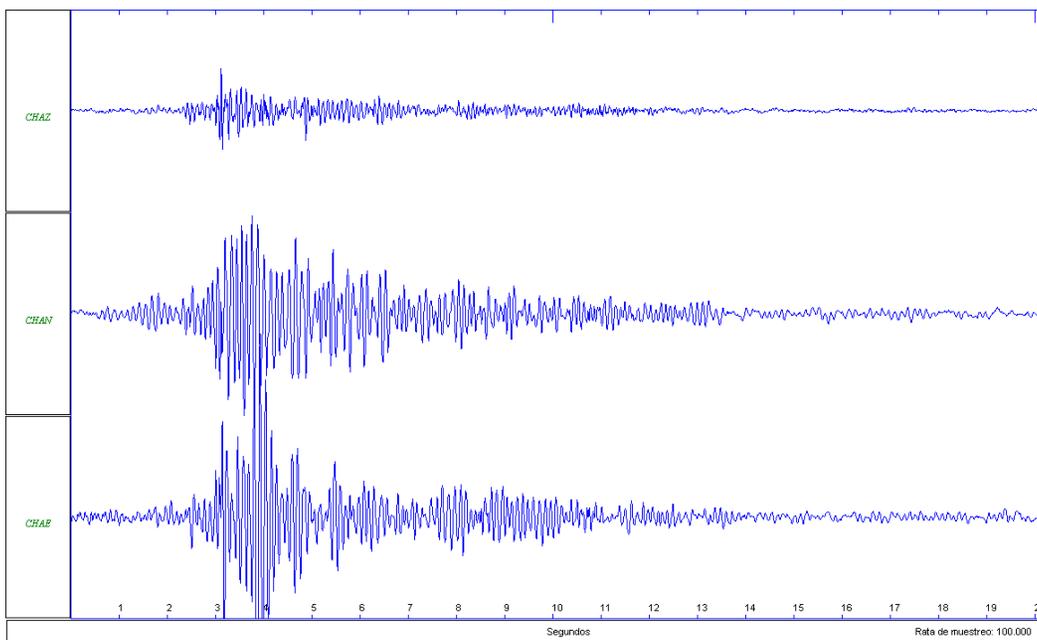


Figura 2.3.8. Sismogramas de las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Chaitán, del registro de un evento que podría relacionarse a dinámica de fluido al interior del sistema volcánico ocurrido el día 19 de octubre de 2009 a las 12:50 p.m.

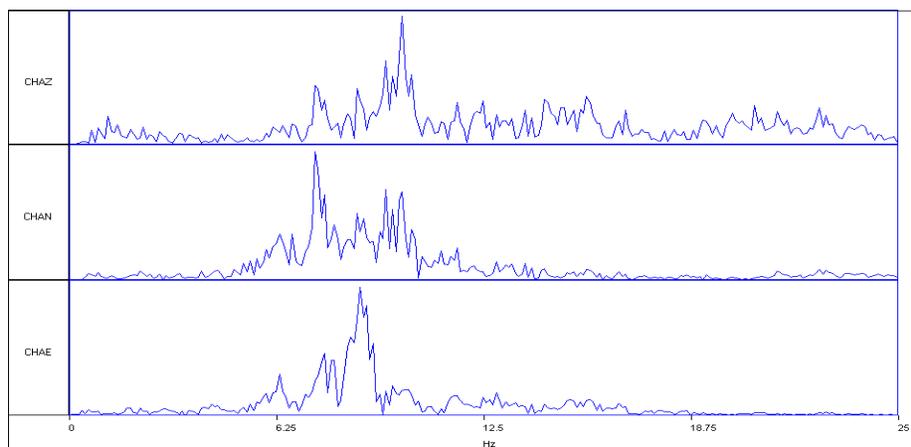


Figura 2.3.9. Espectros de las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Chaitán, del registro del evento que podría relacionarse a dinámica de fluido al interior del sistema volcánico ocurrido el día 19 de octubre de 2009 a las 12:50 p.m.

En los meses de julio y septiembre se registraron incrementos en la amplitud de la señal a manera de temblor, sin embargo al contar con solo una estación de clasificación no fue posible determinar el tipo de fuente que los originó, en las figuras 2.3.10 y 2.3.11 se muestran este tipo de señales, en la figura 2.3.12 se muestra el espectro de uno de los pulsos observados en la figura 2.3.11.

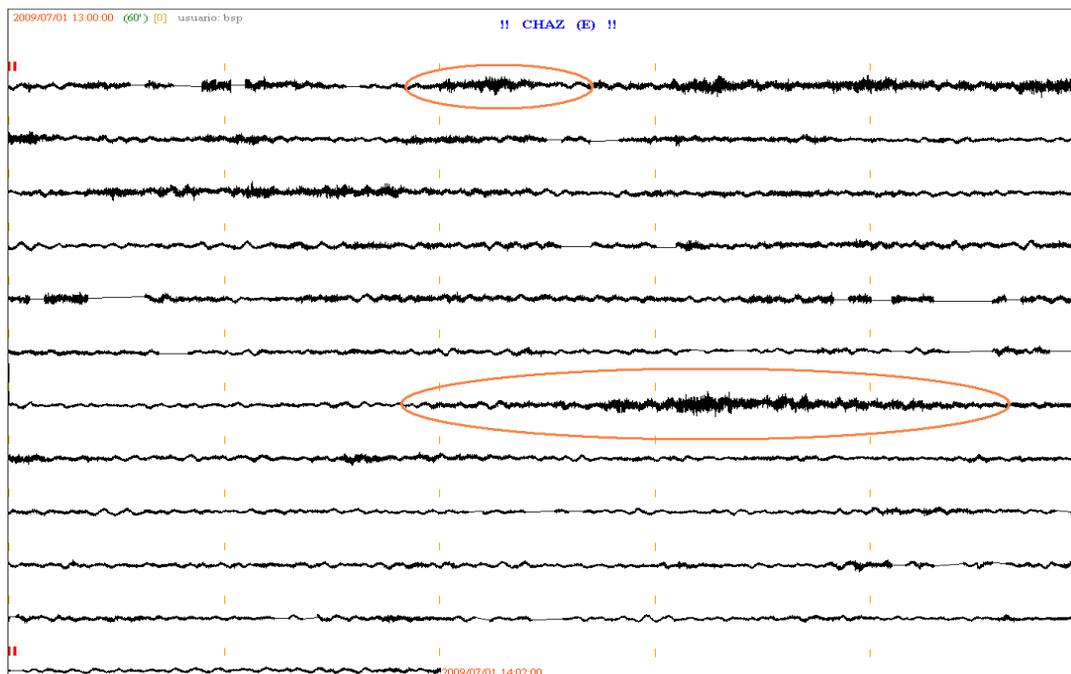


Figura 2.3.10. Sismograma de la componente vertical de la estación Chaitán, registrado el 1 de julio de 2009 entre las 8:00 a.m. y las 9:00 a.m. Con el óvalo de color naranja se resaltan los incrementos en el nivel de ruido o tremor de fondo del registro.

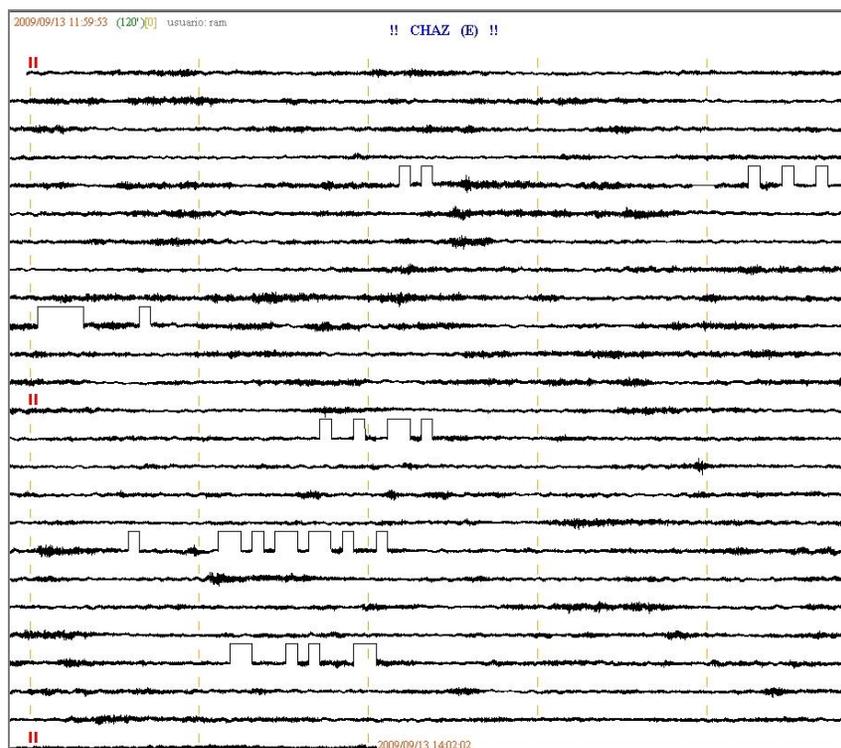


Figura 2.3.11. Sismograma de la estación Chaitán del 13 de septiembre entre las 6:59 a.m. y las 9:02 a.m. en el cual se observan señales que podrían asociarse a movimiento de fluido de fuente persistente.

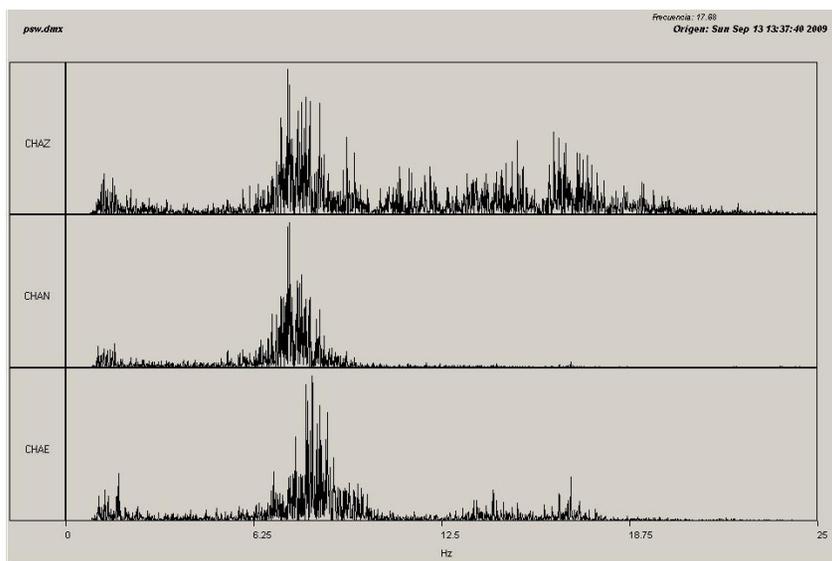


Figura 2.3.12. Espectro estación Chaitán de uno de los pulsos observados en la figura 19, en el espectro se puede observar el dominio de las frecuencias bajas, característica de los eventos asociados a movimiento de fluidos.

2.3.2.1 Episodios eruptivos del segundo semestre de 2009

2.3.2.1.1 Episodio eruptivo en julio de 2009

En éste boletín se presenta un resumen, pero la información detallada se puede encontrar en el informe de la visita técnica a la zona (Gómez y Ponce 2009), el cual se encuentra publicado en la página de internet del Instituto en el Link:

http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto/images/e/e8/Informe_visita_azufraal_ago_2009.pdf

En julio 19 de 2009, el OVSP recibió un correo electrónico por parte del Sr. Oliver Fernando Oviedo de la Fundación Ambiental Andes, en el que se comentaba sobre la ocurrencia de un fenómeno a nivel superficial en un sector de la laguna verde del volcán Azufraal. En julio 29 de 2009, en otro correo el Sr. Oviedo, envió una serie de fotografías tomadas según él en julio 18, en las que evidentemente se podía observar actividad fumarólica, presencia de lodos y algunos cambios morfológicos en un sector del costado noroccidental de la laguna, en una zona que se caracteriza por presentar alteración hidrotermal y que normalmente se conoce como la playa.

A partir de esta situación el OVSP optó por presentar un informe verbal a la Geóloga Lina Dorado, Coordinadora del Comité Regional de Prevención y Atención de Desastres (CREPAD) de Nariño, para que se tomaran algunas medidas básicas preventivas en la región, debido a la constante presencia de turistas que suelen subir a la cima del volcán, hasta tener un mejor panorama sobre la situación en el Azufraal.

Una comisión técnica de INGEOMINAS visitó la zona entre el 18 y el 20 de agosto, y en el sitio denominado comúnmente como la playa, (zona con alteración hidrotermal en el sector noroccidental del interior del cráter del volcán) observó el colapso de una parte de la pendiente, por la salida de un flujo caliente que dejó un depósito que se adentró unos 8 - 10 metros en la Laguna Verde. En las fotografías del señor Oliver Fernando Oviedo se observa el depósito del flujo aún caliente, emanando vapor y la presencia de algunos visitantes en la zona aledaña (Figura 2.3.13).

Al verificar los registros sísmicos de la estación Chaitán entre el 13 y el 18 de julio de 2009, no se detecta ninguna señal especial que pueda relacionarse con el fenómeno mencionado, posiblemente debido a la superficialidad y energía del evento eruptivo, que no alcanzó a registrarse a los 4 Km de distancia, donde se ubica la estación.

En las fotografías de julio 18 de 2009 se puede apreciar que el vapor sale tanto del depósito formado por el flujo, como también de agrietamientos formados en el sitio colapsado que quedó sobre la pendiente de la playa (Figura 2.3.14).

En julio 12 los geólogos Hugo Murcia y Sofía Navarro del Observatorio Vulcanológico de Manizales, hicieron una visita a la Laguna Verde con el fin de tomar muestras de agua y no observaron nada relacionado, como se muestra en la figura 2.3.15. Adicionalmente, en la mañana de julio 13 se hizo un sobrevuelo al volcán Azufra, en colaboración con la Fuerza Aérea Colombiana, en el cual tampoco se observó nada anormal en dicho sector (Figura 2.3.16).



Figura 2.3.13. Imagen de la zona de alteración hidrotermal (playa) en donde se aprecia el depósito, los gases emitidos y los visitantes (cortesía Sr. Oliver Oviedo).



Figura 2.3.14. Imagen de detalle del sitio colapsado, emanando gases (cortesía Sr. Oliver Oviedo).



Figura 2.3.15. Imagen de la Laguna Verde, los domos con actividad y la “playa”, tomada en julio 12 de 2009 (cortesía Geo. Hugo Murcia).



Figura 2.3.16. Imagen aérea de la playa, la laguna y el domo activo (sector norte de la laguna), tomada en julio 13 de 2009, durante sobrevuelo efectuado por personal del OVSP con apoyo de la FAC. Con el círculo rojo se resalta la zona donde unos días después, se presentó el fenómeno eruptivo.

Con base en el reporte y fotografías del Sr. Oviedo y las visitas de campo realizadas por INGEOMINAS, se presume que el fenómeno mencionado se pudo presentar en cualquier momento entre el 13 (después de las 7:30 a.m.) y el 18 de julio de 2009.

Por otra parte, el señor Roberto Flórez, habitante de la vereda San Roque Alto, que acompañó al personal del OVSP a la visita de reconocimiento, reportó que en horas de la mañana del lunes 3 de agosto de 2009, cuando iba de camino a La Palma, vio un “incendio” en la zona de la playa donde quedó el depósito y el colapsamiento, con llamas de pequeña altura, de colores azul y rojo (predominando el azul), que producían un humo de color gris a gris oscuro y que durante el trayecto de ascenso se sentía un fuerte olor a azufre. En principio el Sr. Flórez pensó que se trataba de un incendio provocado por turistas, por eso no lo informó oportunamente.

Se tomaron imágenes térmicas desde el sector próximo a la zona de erupción hacia el sitio y hacia la Laguna Verde:

- En la zona de contacto entre el material del flujo de julio de 2009 y las aguas de la Laguna Verde, se presenta una anomalía continua con valores aproximados entre 37 y 58 °C. El material solidificado del flujo, presenta temperaturas entre 22 y 33 °C, este último valor en pequeños sectores de colapso de ese material (Figuras 2.3.17 y 2.3.18).
- La zona correspondiente al colapso que se produjo en julio de 2009, presenta algunos sectores puntuales con anomalías térmicas que resaltan, con temperaturas entre 27 y 40 °C (Figura 2.3.18).

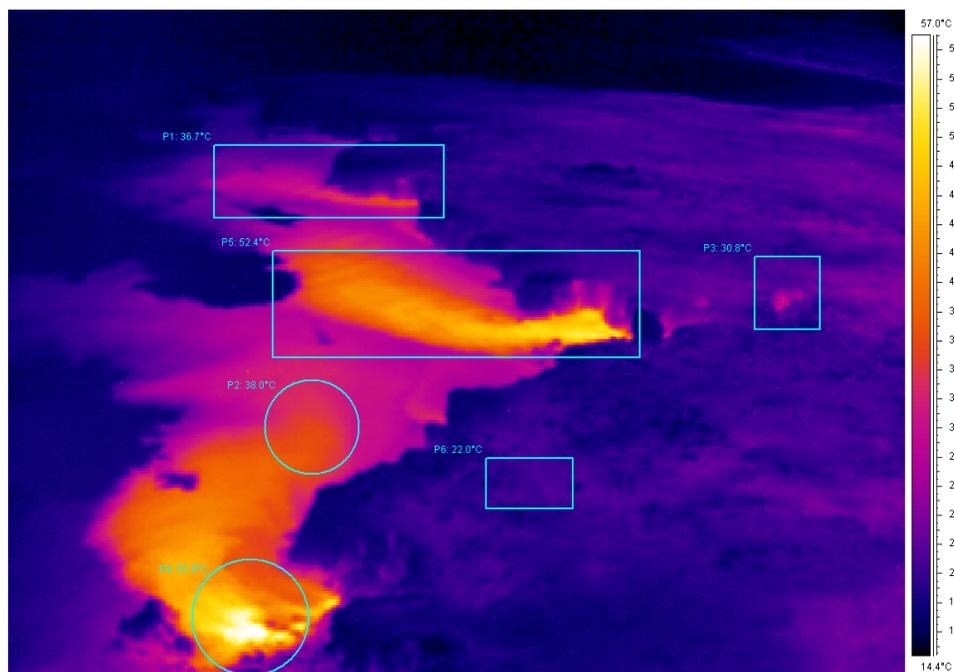


Figura 2.3.17. Imagen térmica infrarroja de detalle del sector norte del contacto entre el material de depósito de la erupción hidrotermal de julio de 2009 y las aguas de la Laguna Verde. Los puntos P1, P2, P4 y P5 están sobre las aguas de la laguna y los puntos P3 y P6 sobre la parte solidificada del depósito.

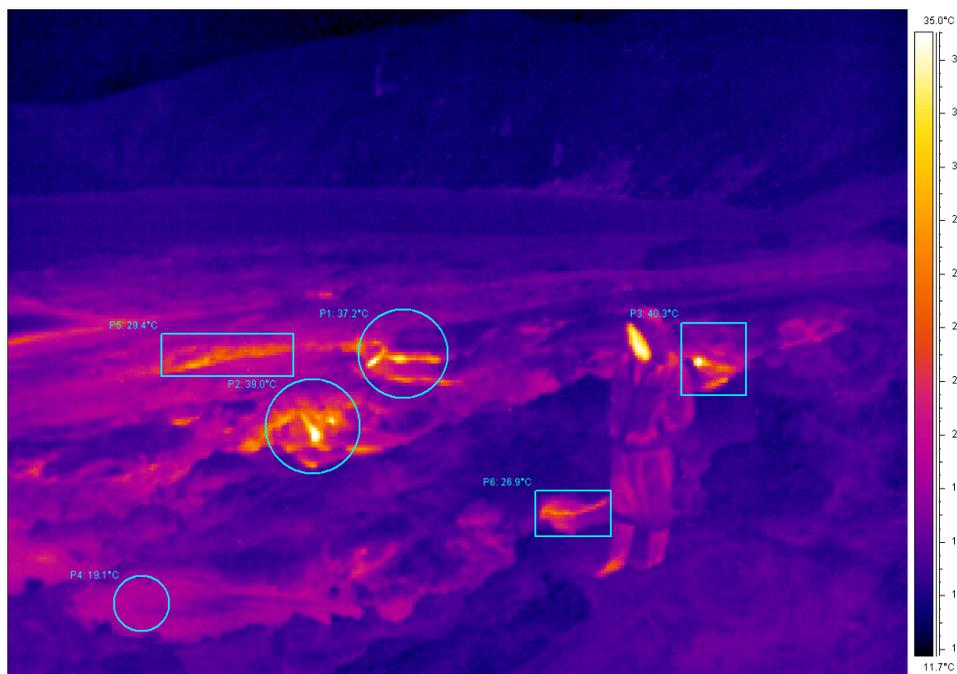


Figura 2.3.18. Imagen térmica infrarroja de detalle del sector de colapso y agrietamientos por donde se originó el proceso eruptivo de julio de 2009. Las temperaturas promedio máximas de las anomalías están entre 29 y 40 °C. Varios sectores presentan anomalías con temperaturas cercanas a los 19°C. En la parte inferior derecha de la imagen aparece una persona de pie como referente.

Otra imagen se tomó desde el sitio de erupción hacia el domo activo:

- Se detecta la zona de anomalía térmica más extensa del cráter del Azufral, correspondiente al flanco sur de los domos con actividad hidrotermal. En este sector, las temperaturas máximas promedio de las anomalías detectadas, están entre 32 y 35°C aproximadamente (Figura 2.3.19).
- Se observa igualmente una zona alargada de anomalía térmica, correspondiente al contacto entre la base del domo y la Laguna Verde. En esta región, la temperatura máxima promedio de la anomalía, es de aproximadamente 29°C.

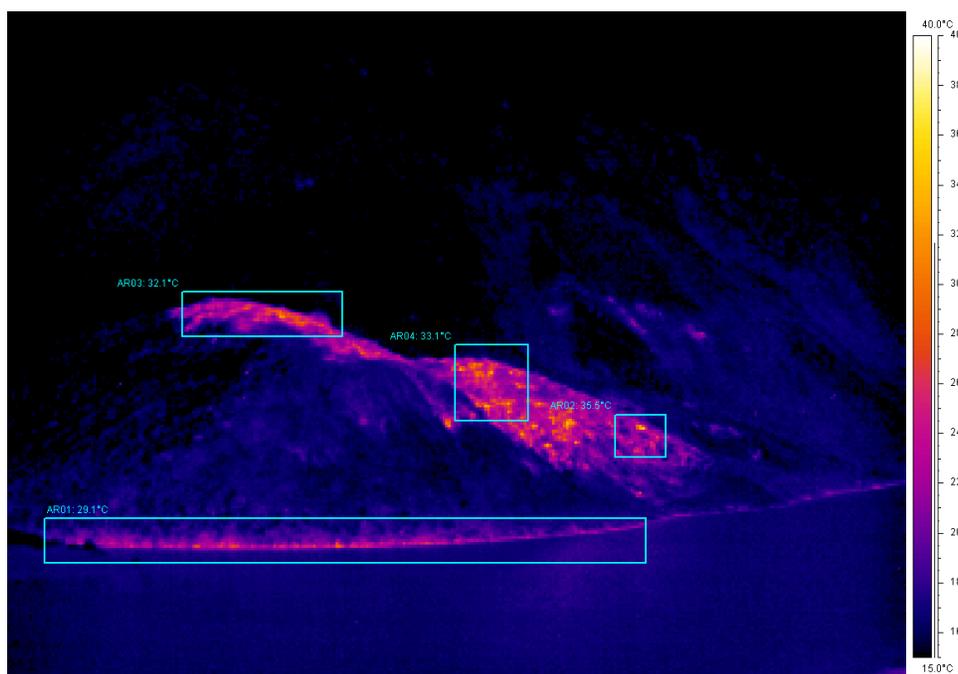


Figura 2.3.19. Imagen térmica infrarroja de los domos con actividad fumarólica e hidrotermal vistos desde el suroccidente. El punto AR01 corresponde al valor máximo promedio de la zona de contacto de los domos con la laguna verde y los puntos AR02, AR03 y AR04, a valores sobre las anomalías medidas sobre la superficie de los domos.

A lo largo de la playa, se hizo el desplazamiento desde el costado sur occidental de esa playa hacia el norte de la misma, efectuando medidas de temperatura con la termocupla tipo K aproximadamente cada 5 m, en el agua de la Laguna Verde y en algunas ocasiones en sitios en los que se presentaban como orificios de burbujeo o pequeñas grietas por donde salía gas. En general, las mediciones efectuadas muestran que la temperatura del agua de la laguna se encuentra entre 9 y 13 °C. En sectores donde se presenta burbujeo del agua, las temperaturas están entre 16 – 17°C y en los sectores de contacto del depósito del flujo de julio con el agua de la Laguna, se obtuvieron los valores máximos, cercanos a 60°C.

Para medir emisiones de Radón²²² se ubicó una cámara L con un electrodo de corto término (ST), en una especie de caverna conformada en la zona del colapsamiento de la erupción de julio de 2009. Este electrodo se dejó por un tiempo de 18 horas y 31 minutos, con un potencial inicial de 668 V y

con potencial final de 563 V al momento de retirarlo. En el mismo sitio se midió temperatura de 83,6°C con la termocupla y una concentración de CO₂ de 3.500 ppm.

El otro electreto, también de corto término, se dejó en una cámara tipo S para agua, ubicada en el contacto del depósito con la laguna, cerca del sitio donde salía gas y en el que se midió una temperatura de 30,9°C y una concentración de CO₂ de 1.820 ppm. Este electreto se dejó por un tiempo de 18 horas y 23 minutos con un potencial inicial de 635 V y un potencial final de 347 V al retirarlo.

Los datos obtenidos de 641 pCi/L (zona de colapso) y 311 pCi/L (contacto depósito-laguna) para un periodo de menos de un día de exposición, se consideran valores importantes de concentración de Rn₂₂₂ en la zona.

El SO₂ fue medido utilizando un instrumento MovilDOAS y efectuando un recorrido por la playa, desde el sector suroccidental, hasta llegar cerca del domo activo.

Se usó las coordenadas del domo activo (1,09N 77,73W Altitud 3800 m sobre el nivel del mar) como fuente de SO₂ para el programa; el viento apuntaba hacia el norte, de acuerdo con lo observado por el movimiento de las nubes y se asumió una velocidad del viento de 2,5 m/s debido a que no se tienen datos particulares para esta zona y teniendo en cuenta, el comportamiento de viento en la región de Galeras.

El cálculo final arrojó un valor de 0,5 Toneladas por día, considerado como muy bajo (Figura 2.3.20).

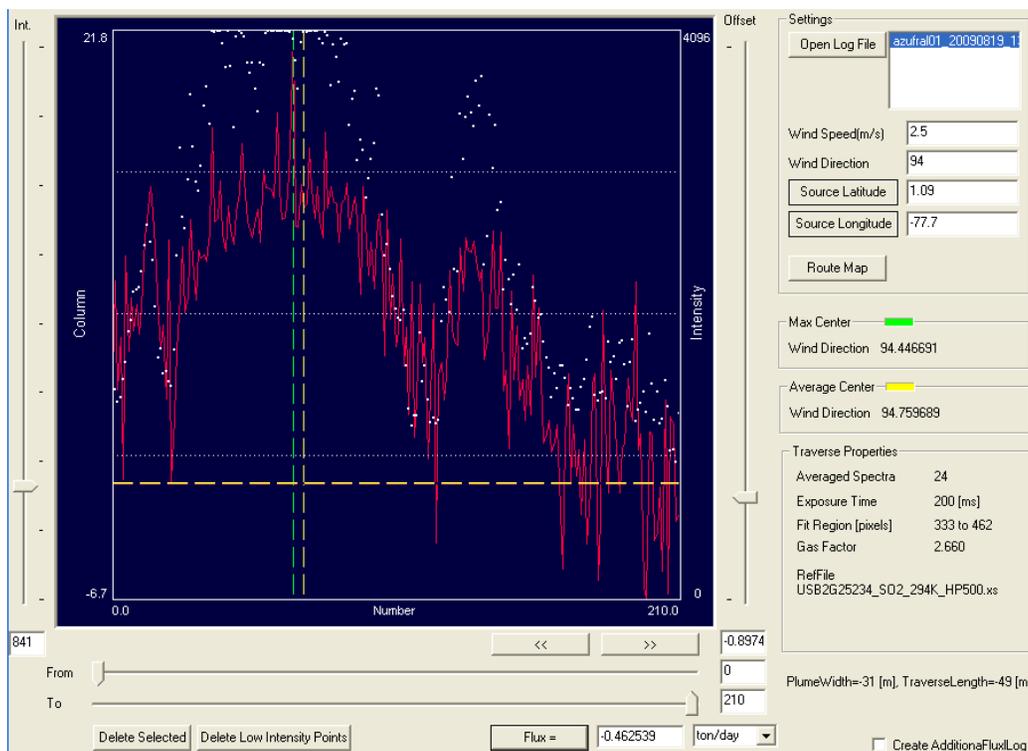


Figura 2.3.20. Columna de SO₂, medida con MovilDOAS en la playa de la Laguna Verde

Durante el proceso eruptivo de julio de 2009, y de acuerdo con diferentes consultas preliminares realizadas a personal experto del INGEOMINAS de la regional de Cali, Sede Central, Observatorio de Popayán, aparentemente se generó la emisión de material caliente, transportado a manera de lechada, posiblemente rico en sílice, además de otros minerales de alteración, que fue emitido a través de una zona de agrietamiento que se registró en una región del costado nor-occidental del cráter del volcán Azufreal la cual como se ha mencionado, ha presentado evidencias de alteración hidrotermal desde mucho tiempo atrás. Una vez este material caliente fluyó, entró en contacto con las aguas ácidas de la laguna verde, generando reacciones que dieron pie a la formación de una especie de “lagrimas” entrelazadas en el interior del depósito y la parte superior (sílice amorfa) se solidificó formando una costra de algunos centímetros de espesor.

La Figura 2.3.21, muestra algunos ejemplos del material que fluyó y entró en contacto con el agua de la Laguna Verde donde finalmente se depositó.



Figura 2.3.21. Detalles del material emitido durante el evento eruptivo hidrotermal de julio de 2009, que fluyó desde una zona de agrietamientos y colapso en la playa del sector noroccidental del cráter del volcán Azufreal y entró en contacto con las aguas de la Laguna Verde.

Adicionalmente a los aspectos y mediciones hasta ahora reportadas, se resalta:

- Llama la atención el incremento en el nivel del agua de la Laguna Verde, especialmente en el sector de la playa ubicada al norte, lo cual es más notorio al comparar imágenes aéreas tomadas en 2006 y 2009 (Figura 2.3.22). En este sentido también, aparentemente las aguas de la Laguna La Barrosa (laguna pequeña contigua a los dos activos, flanco norte) se observan en la actualidad, con una coloración más verdosa que lo detectado en visitas efectuadas en años anteriores.

- Particularmente, en el sector norte de la Laguna Verde, se presentan en la actualidad, sectores con incremento en la cantidad y número de zonas con burbujeos en el agua si se compara con visitas a la zona efectuadas a mediados del 2008.
- Los olores a gases azufrados se intensifican por momentos, como si se tratara de emisiones pulsátiles de estos gases.
- Durante la visita de campo, la actividad de emisión de gases desde la zona de colapsamiento y agrietamientos (del fenómeno eruptivo de julio de 2009) era prácticamente nula.
- La zona donde se originó el fenómeno eruptivo de julio de 2009, presenta en la actualidad una forma circular, cuyo diámetro mayor tiene entre 17 a 20 m, sobre la cual se presenta una serie de colapsos y agrietamientos por donde se presentó la emisión de material fluido. De acuerdo al recorrido y verificación realizados, esa zona no presenta aparentemente oquedades o zonas profundas (Figura 2.3.23).



Figura 2.3.22. Panorámicas aéreas del cráter del volcán Azufral desde el noroccidente, tomadas en diciembre 5 de 2006 (superior) y agosto 23 de 2009 (inferior) con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana en las que se puede observar las variaciones en los niveles de las aguas de la laguna, particularmente al costado norte.



Figura 2.3.23. Imagen de la zona de agrietamientos y colapsos en la playa del sector noroccidental del cráter del volcán Azufral por donde se originó el fenómeno eruptivo de julio de 2009.

La geóloga María Luisa Monsalve sugirió el pasado 30 de agosto de 2009, que se hiciera un experimento con las muestras de material recolectado, consistente en aproximar a un fragmento de ellas, un fósforo encendido para ver la reacción. Esto se hizo, y de manera sorprendente se encontraron las siguientes manifestaciones:

- Se presenta casi que inmediatamente una reacción entre la fuente de calor y el material mineral calentado, consistente en el derretimiento de ese material con la consecuente liberación de olor a gases azufrados.
- El material genera una llama de coloración azul intensa, lo que indicaría altas temperaturas.
- Los gases azufrados que se liberan son fuertes y producen ardor a nivel de la vista y fosas nasales.
- Al cabo de algunos segundos después de que el material derretido ha caído sobre una superficie, se enfría y solidifica.
- Este material mantiene y transmite de manera muy eficiente calor. Por ejemplo, al poner el material que se está derritiendo en contacto con otros fragmentos de roca de Galeras, al tacto se nota el efecto de calentamiento que se le está transmitiendo a esos fragmentos.

Este pequeño experimento podría entonces explicar el fenómeno que reportó el Sr. Roberto Flórez el 3 de agosto sobre las llamas que observó en la zona del flujo. No se podría por ahora precisar que ocasionó el fuego, pero sí dar una idea de la alta eficiencia que tendría este depósito de arder y generar calor.

2.3.3 DEFORMACION

Los registros del inclinómetro electrónico de Chaitán (ubicado a 4,3 km., al este-noreste de la laguna del cráter a 3730 m sobre el nivel del mar), permitieron observar que en el transcurso de este periodo, no es posible identificar una tendencia o definir un comportamiento de las componentes tanto X (radial a la laguna cratérica), como Y (tangencial a la laguna cratérica), puesto que registran comportamiento a manera de ondulaciones, donde se presentan eventualmente variaciones bruscas (Figura 2.3.24). Cuya variación desde el 1 de julio hasta la fecha de cierre de este informe, para la componente radial fue de 13 μ rad y para la componente tangencial de 62 μ rad. Nuevamente se hace énfasis en que los cambios en la temperatura ambiente pueden afectar el comportamiento de los sensores del inclinómetro.

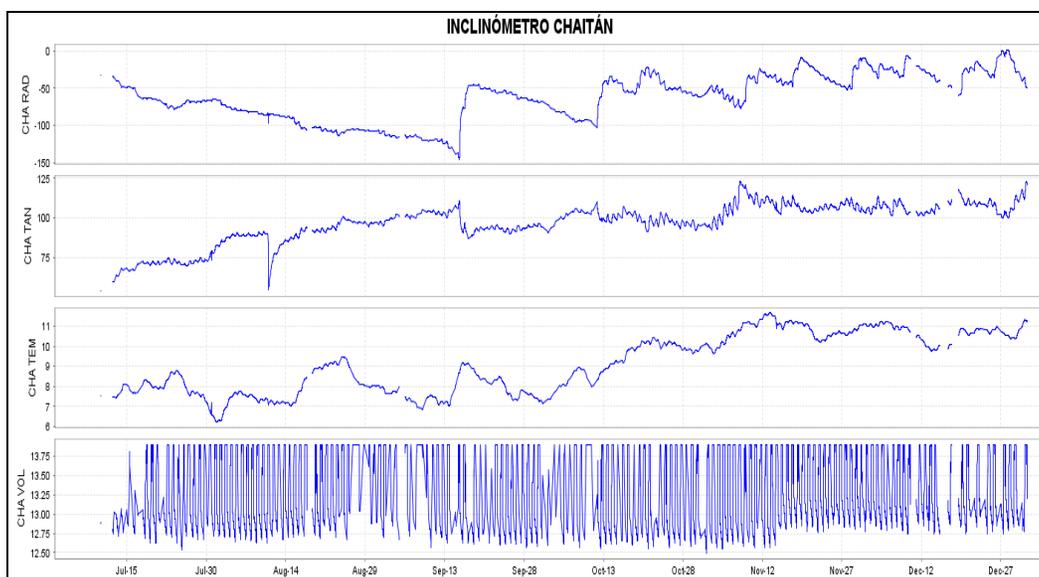


Figura 2.3.24. Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Chaitán, instalado en el volcán Azufral, para el periodo comprendido entre el 12 de julio y el 31 de diciembre de 2009.

2.3.4 FISICOQUIMICA

Durante una comisión al volcán Azufral realizada de diciembre 7 al 11, se pudo observar emisión de gases desde las fumarolas del domo pequeño situado al lado de la laguna (Figura 2.3.25), la temperatura de las mismas fue de 85°C y al medir el CO₂, el equipo se saturó, lo cual significa que en las fumarolas hay una concentración de CO₂ mayor a 10.000 ppm. La temperatura del agua de la laguna en promedio fue de 10°C, pero en algunos sitios del depósito formado en julio de 2009, se midió entre 44°C y 61°C (Figura 2.3.25).

En el sector del depósito formado en julio de 2009, se midió la temperatura con termocupla a dos orificios por donde salía gas, en los cuales se obtuvo 65°C y 84°C. En general el promedio de CO₂ en la zona fue medido en 3.200 ppm.

Se observó que la laguna barrosa, cuyas aguas eran claras, está tomando una tonalidad verde (Figura 2.3.25).



Figura 2.3.25. Laguna Verde y Laguna Barrosa del volcán Azufral. Diciembre 9 de 2009 10:00 a.m.

2.3.5. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

Durante el mes de septiembre con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se realizaron sobrevuelos sobre el volcán Azufral los días 11 y 19 con el fin de realizar un seguimiento de su actividad superficial (Figura 2.3.26). En el sobrevuelo del 19 de septiembre se realizó la toma de imágenes térmicas en las cuales se registró una temperatura entre 25°C y 30° en el sector norte de la laguna cratérica (Figura 2.3.27).



Figura 2.3.26. El cráter del volcán Azufral, visto sobrevolando su zona norte. Se alcanza a observar parcialmente, la ladera nororiental del cráter, donde se aprecian signos de alteración hidrotermal (coloración blanquecina).

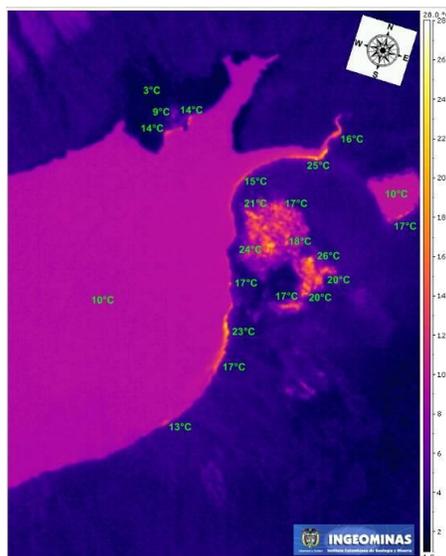


Figura 2.3.27. Imagen térmica del sector norte de la laguna cratérica, tomada sobrevolando a una altura de 14700 pies sobre el nivel del mar (680 m sobre el cráter principal), empleando la termocámara FLIR. De acuerdo con la escala cromática de la derecha (ajustada para efectos de visualización entre 1 y 28°C), las temperaturas más altas se registraron en esta zona, con valores entre 25 y 30 °C).

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. Hay que tener presente adicionalmente, el fenómeno de combustión, derretimiento, liberación de gases y generación de calor que se pudo experimentar con un pequeño trozo de muestra del material del flujo.
- Las diferentes mediciones efectuadas durante la visita 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.
- La evaluación de los parámetros monitoreados durante el segundo semestre de 2009, 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 VOLCAN 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 segundo semestre de 2009, la red de vigilancia del volcán Cumbal estuvo conformada por:

- Dos estaciones sísmicas telemétricas: una triaxial de Banda Ancha y una de corto período de componente vertical (Tabla 2.4.1, Figura 2.4.2). La estación La Mesa presentó problemas en el radio desde el mes de mayo y hasta noviembre se pudo instalar el equipo. 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 una repetidora instalada en el cerro Cruz de Amarillo (Figura 2.4.3). La información de la estación de Banda Ancha Limones se concentra en la Repetidora Cruz de amarillo mediante una unidad DCM (*Güralp Systems Ltd.*), la cual optimiza el uso de equipo de telemetría.

- Dos inclinómetros electrónicos telemétricos (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 80% (Figura 2.4.4). No se tuvo un porcentaje de funcionamiento del 100% debido básicamente a problemas en la estación La Mesa, la cual se reinstaló solo hasta noviembre por falta de radios para la telemetría. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- La estación Limones estuvo conformada por un sismómetro de banda ancha. Esta estación dejó de enviar información en el mes de diciembre en donde se constató que fue hurtada. Durante el tiempo que permaneció, presentó un funcionamiento efectivo, su porcentaje del 94%, se debe a los días del mes de diciembre en los que no hay equipo disponible para su reemplazo.
- La estación de corto período La Mesa, no estuvo funcionando desde el mes de mayo del semestre anterior debido a daño presentado en el radio y no se contó con la pareja de radios para reinstalar la estación hasta el mes de noviembre, pero no se logra señal en la repetidora de cruz de amarillo, debido a problemas de radio enlace.
- El porcentaje de funcionamiento de los inclinómetros electrónicos Limones y La Mesa fue del 99 y 100% respectivamente, el inclinómetro electrónico de Limones también fue hurtado.

Tabla 2.4.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2009.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia al cráter Mundo Nuevo (km)	Ubicación respecto al cráter mundo nuevo	Altitud (msnm)
La Mesa	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	2.50	ESE	4270
La Mesa	Analógica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	2.50	ESE	4270
Limones	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	2.00	SE	4232
Limones	Digital	Sismómetro Banda Ancha	Triaxial	2.00	SE	4232

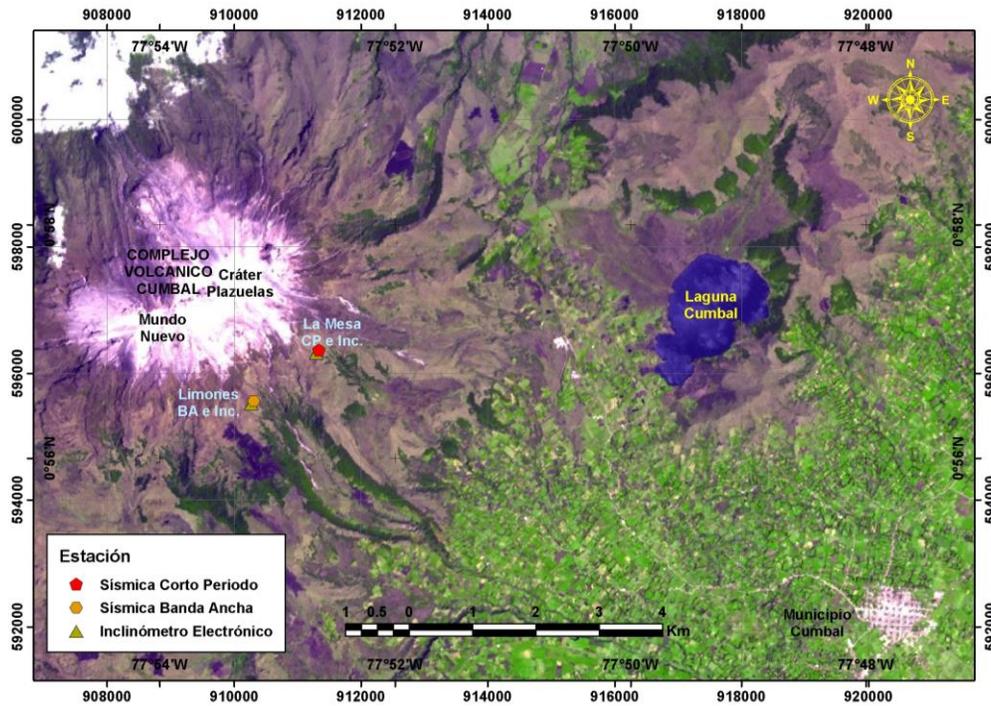


Figura 2.4.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2009.

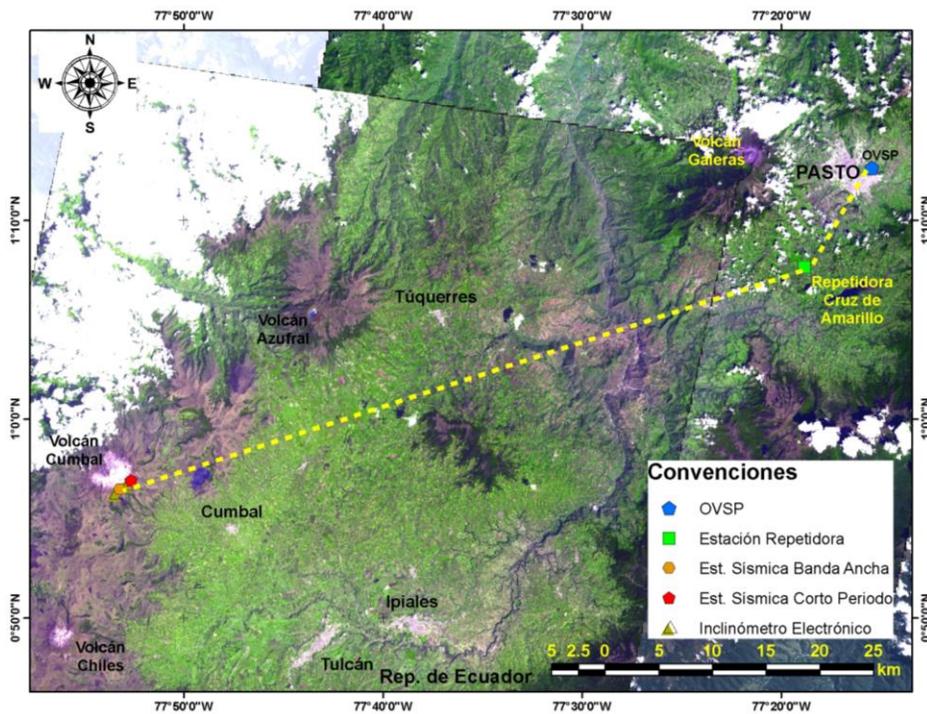


Figura 2.4.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2009. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

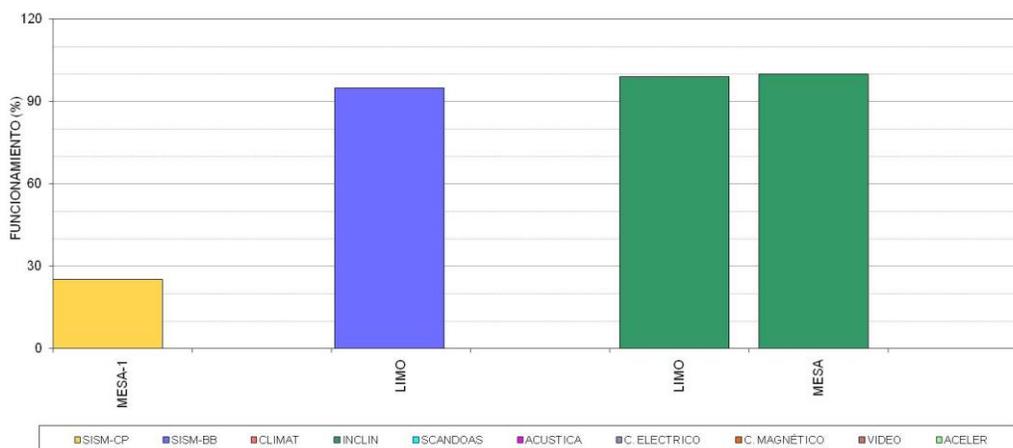


Figura 2.4.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el segundo semestre de 2009, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal.

2.4.2 SISMOLOGIA

En Cumbal, la instrumentación instalada ha permitido registrar diferentes tipos de eventos volcánicos, los cuales se han asociado tanto a la dinámica de fluidos al interior del sistema volcánico como al fracturamiento de material cortical, no obstante existen registros para los cuales no es posible precisar el tipo de fuente asociada (Figura 2.4.5). Se tiene registro instrumental de eventos sísmicos del volcán Cumbal hasta el 13 de diciembre (día en el cual la estación fue saqueada). Durante el segundo semestre de 2009 se registró un dominio en de la sismicidad asociada a la dinámica de fluido con un 64% del total de eventos registrados (Figura 2.4.6).

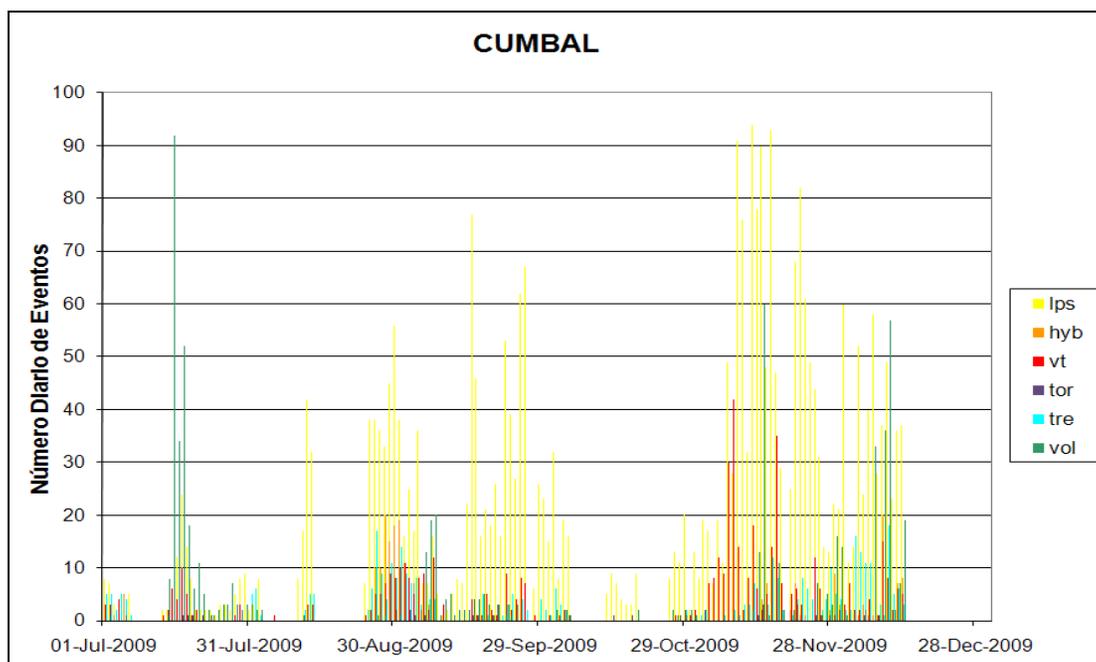


Figura 2.4.5. Histograma de ocurrencia de los diferentes tipos de sismicidad volcánica, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.

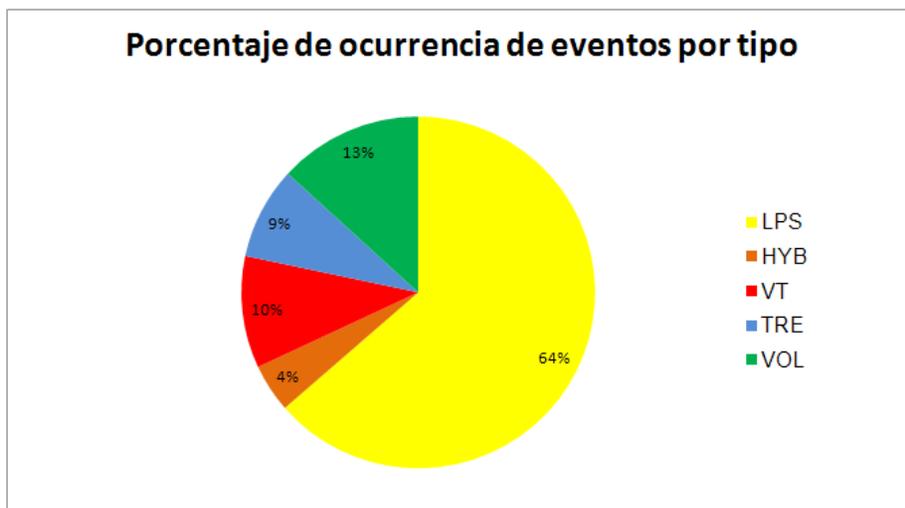


Figura 2.4.6. Porcentajes de ocurrencia sísmica por tipo de evento, para el segundo semestre de 2009.

De la sismicidad registrada durante el segundo semestre de 2009 se resaltan los eventos tipo tornillo, cabe anotar que a pesar de que los eventos tipo tornillo se han observado previo a la mayoría de erupciones con registro instrumental del volcán Galeras, en Cumbal no se han considerado como precursores de erupciones debido a que se trata de un sistema volcánico diferente. En las figuras 2.4.7, 2.4.8, 2.4.9, 2.4.10, 2.4.11, 2.4.12 y 2.4.13 se muestran los sismogramas y espectrogramas de algunos de los eventos tipo tornillo registrados.

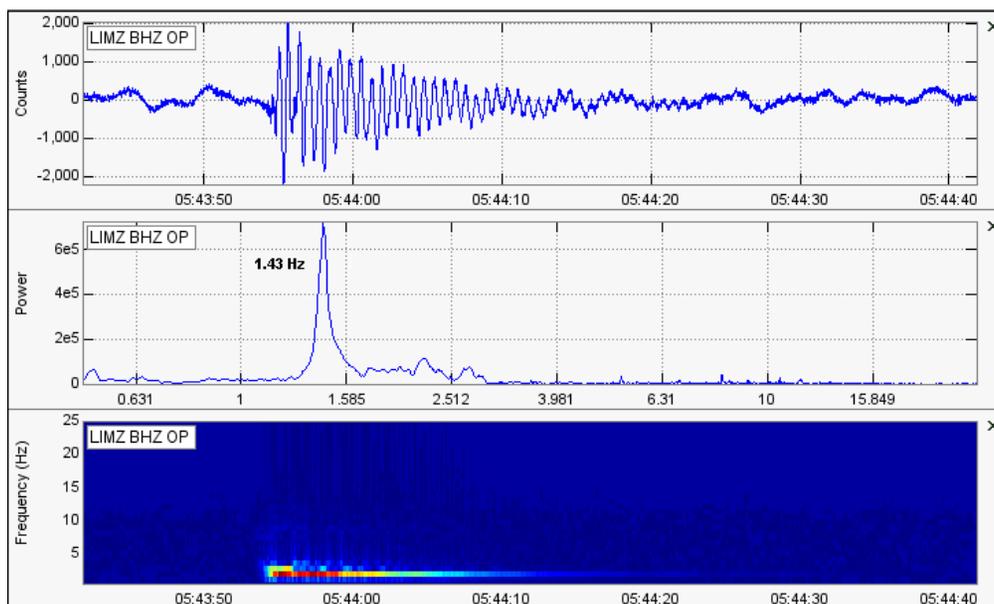


Figura 2.4.7. Sismograma, espectro y espectrograma en la componente vertical de la estación Limones, del evento tipo Tornillo ocurrido el 2 de julio de 2009 a las 12:43 a.m. En el espectro se resalta la frecuencia dominante de 1,43 Hz.

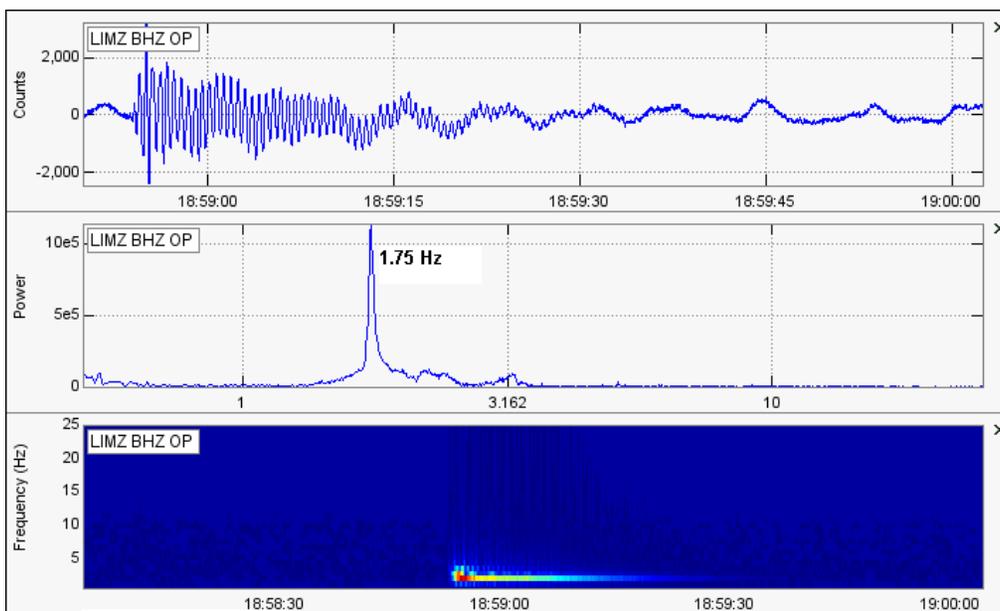


Figura 2.4.8. Sismograma, espectro y espectrograma en la componente vertical de la estación Limones, del evento tipo Tornillo ocurrido el 7 de julio de 2009, a la 1:59 p.m. En el espectro se resalta la frecuencia dominante de 1,75 Hz.

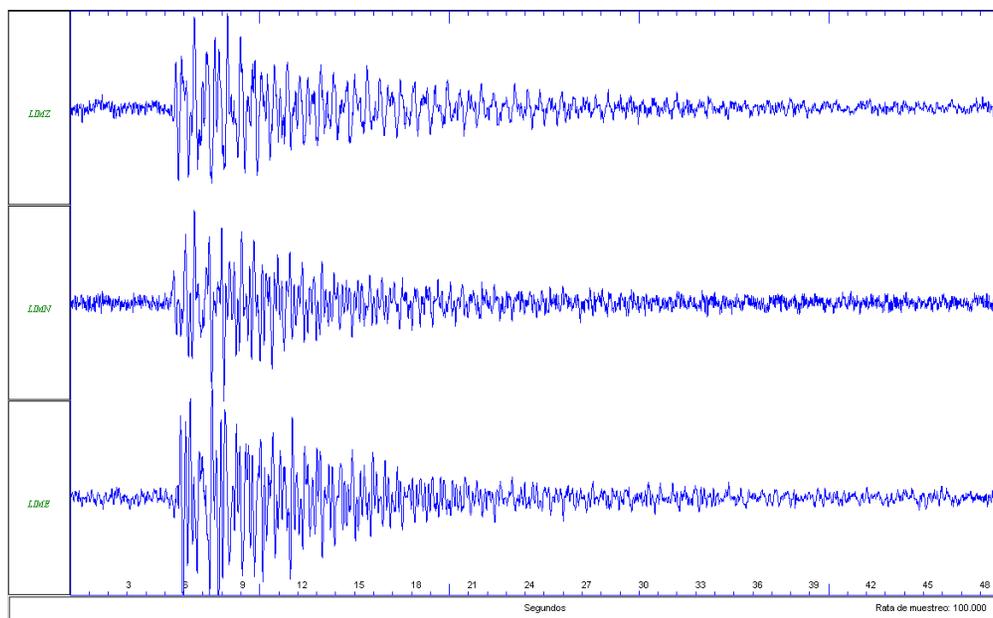


Figura 2.4.9. Sismogramas registrados por las componentes: vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Limones, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 01 de agosto de 2009 a las 02:03 p.m.

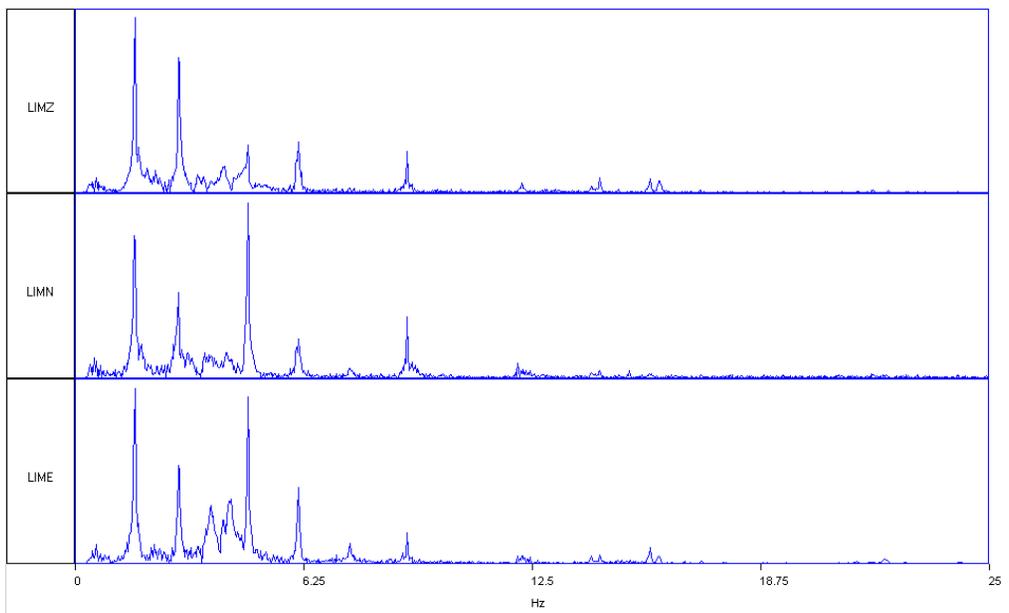


Figura 2.4.10. Espectros calculados para las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Limones, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 01 de agosto de 2009 a las 02:03 p.m.

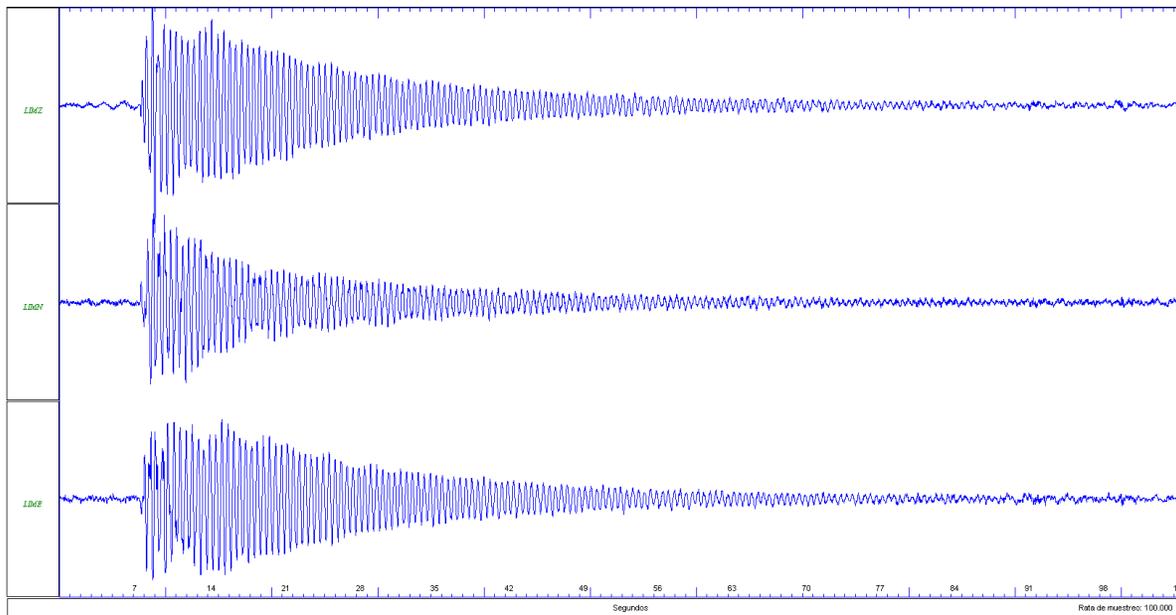


Figura 2.4.11. Sismogramas registrados por las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Lavas, del evento tipo Tornillo ocurrido el 02 de octubre de 2009 a las 05:27 a.m.

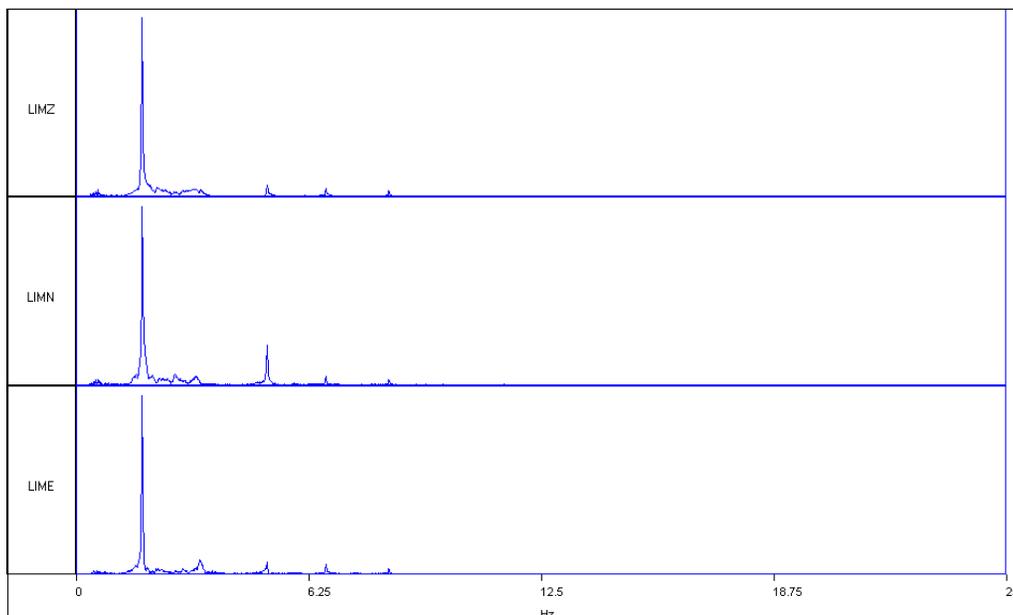


Figura 2.4.12. Espectros calculados para las componentes vertical (arriba), norte-sur (centro) y este-oeste (abajo) de la estación Lavas, de un evento tipo Tornillo ocurrido el 02 de octubre de 2009 a las 05:27 a.m.

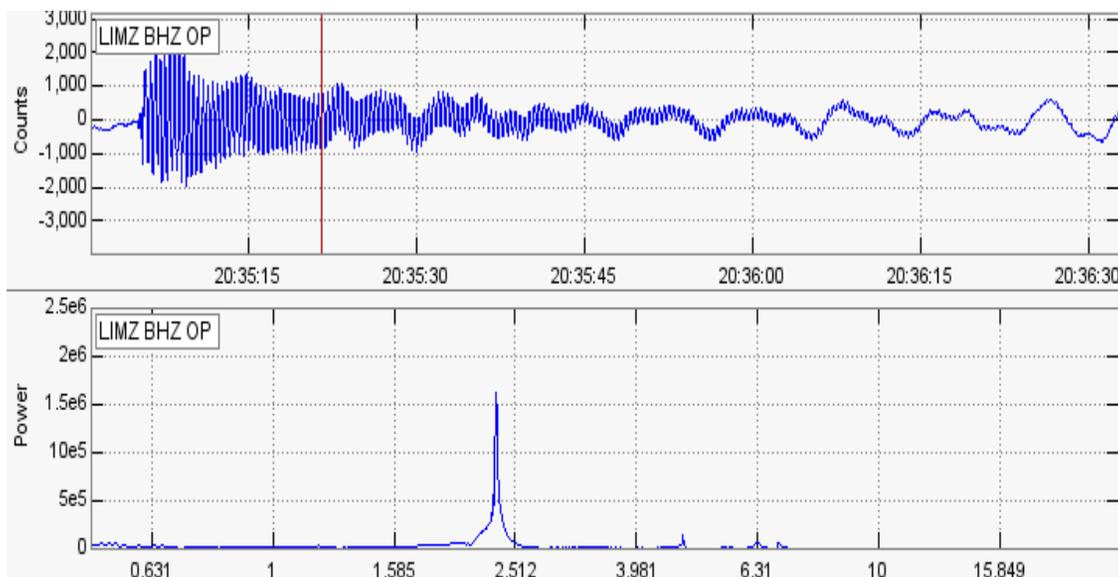


Figura 2.4.13. Registro de la estación sísmológica Limones de Banda Anchas componentes vertical (arriba), y espectro de esta señal, con un pulso de frecuencia alrededor de los 2,4 Hz, del evento Tornillo ocurrido el 12 de noviembre de 2009 a las 3:35 p.m.

2.4.3 DEFORMACION

En cuanto a la información suministrada por los inclinómetros electrónicos, que conforman la red de monitoreo del complejo volcánico Cumbal, se destaca lo siguiente:

El inclinómetro Limones (ubicado a 2,0 km al sureste del cráter Mundo Nuevo, 4232 m sobre el nivel del mar), hasta el último día de su funcionamiento, el 13 de diciembre, registró tanto para la componente X (tangencial a Mundo Nuevo y a Plazuelas), como, para la componente Y (tangencial a Mundo Nuevo, radial a Plazuelas) cambios mínimos en su comportamientos, es así que para la componente Radial registró desde el 1 de julio hasta la fecha, un ascenso que presentó 9 μrad y para la componente Tangencial de 16 μrad . Adicionalmente, se resalta que algunos de los cambios en las componentes ortogonales se han asociado con variaciones en la temperatura del instrumento (Figura 2.4.14).

El inclinómetro La Mesa (ubicado a 2,5 km al este-sureste del cráter Mundo Nuevo, 4270 m sobre el nivel del mar) presentó pequeñas oscilaciones del orden de 5 μrad en la componente X (radial al cráter Mundo Nuevo) y de 2 μrad en la componente Y (tangencial al cráter Mundo Nuevo). Sin embargo, los cambios registrados en este periodo de tiempo, coinciden con el comportamiento registrado por el sensor de temperatura, el cual ha sido un factor que posiblemente ha afectado el comportamiento de los sensores del inclinómetro. Las variaciones totales durante el segundo semestre de 2009 estuvieron en un rango de 15 μrad para la componente Radial y de 5 μrad en la componente Tangencial (Figura 2.4.15).

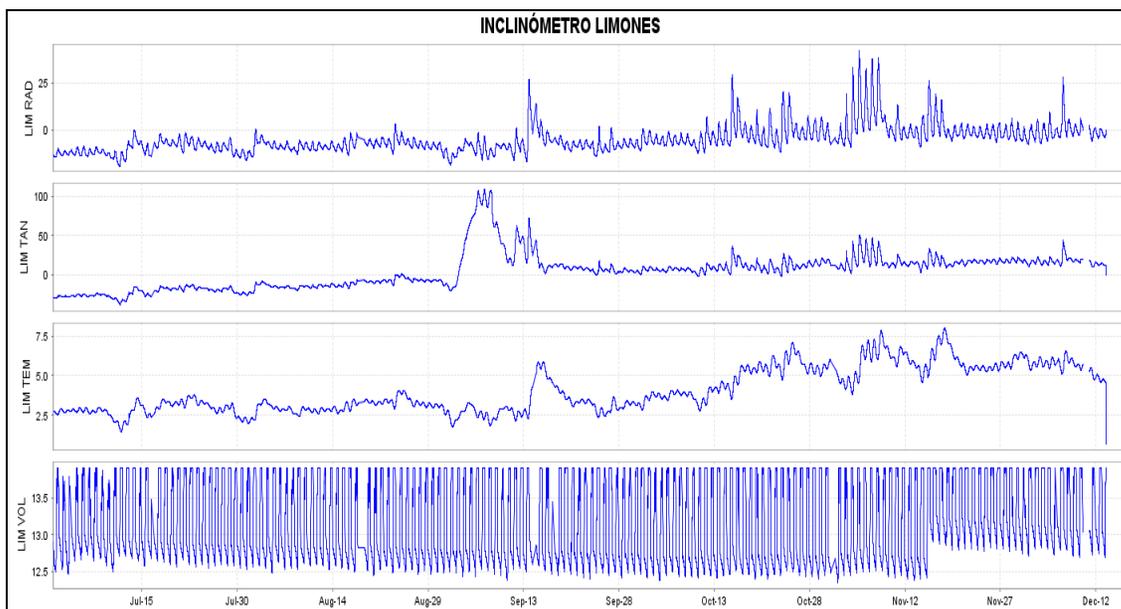


Figura 2.4.14. Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Limones, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 13 de diciembre de 2009.

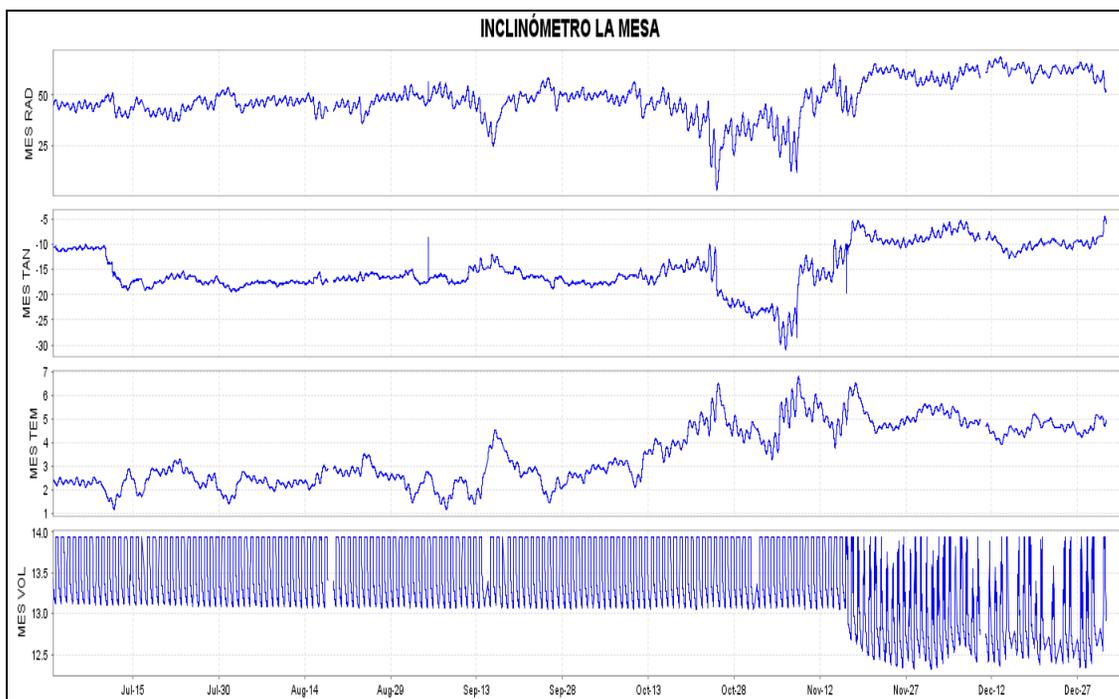


Figura 2.4.15. Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro Limones, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio y el 31 de diciembre de 2009.

2.4.4 ACTIVIDAD SUPERFICIAL

Durante el segundo semestre de 2009 no se tuvieron reportes relacionados con actividad superficial en el volcán Cumbal.

2.4.5. CONCLUSIONES

- Las estaciones instaladas en el volcán Cumbal, permiten obtener el registro de señales que se pueden catalogar como volcánicas. La sismicidad del complejo volcánico indica que su actividad, en su gran mayoría, se debe a la dinámica de fluidos en el sistema, que cuenta con fuentes cuya excitación es principalmente de carácter transitoria en el tiempo. Además, existen condiciones de conductos o cavidades que junto a la forma de excitación de la fuente y el material involucrado, generan eventos tipo Tornillo. La acumulación de esfuerzos, que probablemente se debe a la dinámica interna del volcán, es tal que genera fracturamiento de material cortical con la consecuente propagación de ondas sísmicas que en el sismograma se clasifican como eventos volcano-tectónicos (VT). Es importante mencionar que de acuerdo con las investigaciones relacionadas, los eventos tipo Tornillo han ocurrido en volcanes de tipo andesítico y en diferentes fases de la actividad, que pueden ser pre-eruptivos, post-eruptivos o en condiciones de actividad normal.
- La sismicidad del volcán ha presentado fluctuaciones, resaltándose en los meses de septiembre y noviembre hasta mediados de diciembre incremento en la ocurrencia de eventos relacionados con dinámica de fluidos.



La evaluación de los parámetros monitoreados durante el segundo semestre de 2009, han mostrado que existe actividad volcánica con un comportamiento relativamente estable, lo que permite establecer el **NIVEL (IV) VERDE ●**: “**Volcán activo y comportamiento estable**”.

2.5 BIBLIOGRAFÍA

Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Reportes Mensuales de Actividad del Volcán Galeras. Meses de enero a diciembre de 2009. Varios autores. Informes inéditos. Pasto. 2009.

INFORME DE VISITA TECNICA AL VOLCAN AZUFRAL – LAGUNA VERDE DEPARTAMENTO DE NARIÑO. Gómez y Ponce, 2008. Ingeominas. Informe interno. Pasto, 38 p.

Información complementaria puede ser consultada en la página web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto en: <http://intranet.ingeminas.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 del Volcán Galeras en el segundo semestre del 2009.

Personal INGEOMINAS Observatorio Vulcanológico 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
Lourdes Narváez Medina		Grupo de Estudiantes monitores de la Universidad de Nariño en el OVSP
Carlos Andrés Laverde Castaño		