



| NOMBRE | <i>DESCRIPCION</i> | <i>DOMINIO</i> |
|--------------------------------|--|--|
| IDENTIFICACIÓN | | |
| Información de la citación | | |
| CITACIÓN | | |
| Nombre del responsable | Nombre de la organización | Servicio Geológico Colombiano |
| 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 | | GRUPO TECNICO OVSPASTO |
| Fecha | De publicación/disposición tres primeras letras del mes/año | Feb/2012 |
| Título | | Boletín Semestral de Actividad de Volcanes de Nariño. Julio a diciembre de 2010. |
| Edición | Primera versión.- Actualización conjunto de datos la numeración va del 0.1 al 0.9 | 0.1 |
| Serie | | No aplica |
| Identificador | En proceso de definición | |
| 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 los volcanes Galeras, Azufral, Cumbal y Doña Juana, 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 / 2010 a Diciembre /2010 |
| Dominio Espacial | | |
| | Descripción del área geográfica. Incluir el nombre del territorio que cubre el producto. Incluir área geográfica dada en km ² . | Zona de influencia – Volcanes de Nariño. |



| NOMBRE | DESCRIPCION | DOMINIO |
|----------------------------|--|--|
| Coordenadas /límites | | |
| Oeste | | No aplica. |
| Este | | No aplica. |
| Norte | | No aplica. |
| Sur | | No aplica. |
| Nivel de resolución | Escala | No aplica. |
| 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\2010\bol_II_10 |
| 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 |



**SERVICIO GEOLOGICO
COLOMBIANO**
República de Colombia

| NOMBRE | DESCRIPCION | DOMINIO |
|---------------------------------|--|---|
| | imagen satelital, informe técnico | |
| Proceso estándar 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://www.ingegominas.gov.co/Pasto/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Semestral.aspx |
| Medio digital/Ubicación | Opciones del medio digital en el cual puede ser entregado en archivo digital, en el servidor de archivos. | Corpasto, Chapacual |
| Contacto | | |
| Organización | Nombre de la organización | Instituto Geológico Colombiano. . |
| 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@ingegominas.gov.co |
| | | |



**SERVICIO
GEOLOGICO COLOMBIANO**
República de Colombia



**BOLETÍN SEMESTRAL DE ACTIVIDAD DE VOLCANES DE NARIÑO
JULIO A DICIEMBRE DE 2010**

Edición:

GRUPO TECNICO OBSERVATORIO VULCANOLOGICO Y SISMOLOGICO PASTO

San Juan de Pasto, febrero de 2012

República de Colombia

INSTITUTO GEOLOGICO COLOMBIANO



**SERVICIO GEOLOGICO
COLOMBIANO**
República de Colombia

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO**

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

Edición:

GRUPO TECNICO OBERVATORIO VULCANOLOGICO Y SISMOLOGICO PASTO

San Juan de Pasto, febrero de 2012



CONTENIDO

| | | Pág. |
|----------|---|------|
| | INTRODUCCIÓN | 1 |
| | RESUMEN | 2 |
| 2. | VOLCANES DE NARIÑO | 3 |
| 2.1. | VOLCÁN GALERAS | 4 |
| 2.1.1. | Red de vigilancia | 4 |
| 2.1.2. | Sismología | 10 |
| 2.1.2.1. | Evento eruptivo del 25 de agosto de 2010 | 28 |
| 2.1.3. | Deformación | 51 |
| 2.1.3.1. | Inclinometría Electrónica | 51 |
| 2.1.3.2. | Medición Electrónica de Distancias E.D.M. | 56 |
| 2.1.4. | Fisicoquímica | 57 |
| 2.1.4.1. | Mediciones de Dióxido de Azufre SO ₂ | 57 |
| 2.1.4.2. | Muestreo de aguas termales | 65 |
| 2.1.5. | Geología | 68 |
| 2.1.5.1. | Depósitos de ceniza de la erupción del volcán galeras el 25 de agosto de 2010 | 69 |
| 2.1.5.2. | Espesor de los depósitos de ceniza | 70 |
| 2.1.5.3. | Descripción de componentes de la ceniza | 72 |
| 2.1.5.4. | Características de los tamaños de material emitido por la erupción | 74 |
| 2.1.6. | Actividad superficial y cambios geomorfológicos | 75 |
| 2.1.7. | Electromagnetismo | 84 |
| 2.1.8. | Imágenes térmicas | 87 |
| 2.1.9. | Conclusiones | 91 |
| 2.2. | VOLCÁN DOÑA JUANA | 93 |
| 2.2.1 | Red de vigilancia | 94 |
| 2.2.2. | Sismología | 97 |
| 2.2.3. | Deformación | 99 |
| 2.2.3.1. | Inclinometría Electrónica | 99 |
| 2.2.4. | Actividad superficial | 100 |
| 2.2.5. | Conclusiones | 101 |
| 2.3. | VOLCÁN AZUFRAL | 102 |
| 2.3.1. | Red de vigilancia | 102 |
| 2.3.2. | Sismología | 105 |
| 2.3.3. | Deformación | 107 |
| 2.3.3.1. | Inclinometría Electrónica | 107 |
| 2.3.3.2. | Medición Electrónica de Distancias – E.D.M. | 108 |
| 2.3.4. | Fisicoquímica | 110 |
| 2.3.5. | Conclusiones | 126 |
| 2.4. | VOLCÁN CUMBAL | 127 |
| 2.4.1. | Red de vigilancia | 127 |
| 2.4.2. | Sismología | 129 |
| 2.4.3. | Deformación | 132 |
| 2.4.3.1. | Inclinometría Electrónica | 132 |
| 2.4.4. | Fisicoquímica | 133 |
| 2.4.4.1. | Muestreo de aguas termales | 133 |
| 2.4.4.2. | Análisis de Cloruros, Sulfatos y Bicarbonatos de las fuentes termales | 134 |
| 2.4.4.3. | Muestreo de Gases Fumarólicos. | 135 |
| 2.4.5. | Actividad superficial | 137 |
| 2.4.6. | Conclusiones | 140 |
| 2.5. | BIBLIOGRAFÍA | 141 |
| 2.6. | PERSONAL PARTICIPANTE | 141 |



TABLAS

| | | |
|---------------|--|-----|
| 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 2010. | 5 |
| Tabla 2.1.2. | Inclinómetros electrónicos telemétricos que conformaron la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras durante el segundo semestre de 2010. | 6 |
| 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 2010. | 8 |
| Tabla 2.1.4. | Características de la estación EM-Frailejón que monitorea las variaciones del campo eléctrico y del campo magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras, en el segundo semestre de 2010. | 8 |
| Tabla 2.1.5. | Principales aspectos relacionados con el funcionamiento y cambio de equipos en la red de Galeras, durante el segundo semestre de 2010. | 10 |
| Tabla 2.1.6. | Número de sismos volcánicos por tipo, registrados en los periodos indicados | 12 |
| Tabla 2.1.7. | Energía sísmica liberada para cada tipo de evento, en los periodos indicados. | 13 |
| Tabla 2.1.8. | Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del volcán Galeras, abril, septiembre y noviembre de 2010. | 65 |
| Tabla 2.1.9. | Concentraciones de aniones presentes en las fuentes termales de Galeras, en los periodos indicados. | 67 |
| Tabla 2.1.10. | Clasificación de las fuentes termales del Volcán Galeras. | 68 |
| Tabla 2.1.11. | Sobrevuelos realizados con las temperaturas máximas obtenidas en el segundo semestre de 2011 | 88 |
| 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 2010. | 96 |
| Tabla 2.3.1. | Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Azufraal durante el segundo semestre de 2010. | 104 |
| Tabla 2.3.2. | Coordenadas WGS84 de los puntos materializados sobre la superficie del volcán Azufraal, donde se ubican reflectores EDM y las Bases de medición. | 108 |
| Tabla 2.3.3. | Coordenadas WGS84 de los puntos donde se realizó medición de temperatura, en el Volcán Azufraal. | 116 |
| 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 2010. | 128 |
| Tabla 2.4.2. | Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Cumbal en los periodos indicados. | 134 |
| Tabla 2.4.3. | Concentraciones de los aniones presentes en fuentes termales del Volcán Cumbal en los periodos indicados. | 134 |
| Tabla 2.4.4. | Clasificación de las fuentes termales del Volcán Cumbal. | 135 |
| Tabla 2.4.5. | Posición geográfica de las fumarolas muestreadas en el Volcán Cumbal | 136 |
| Tabla 2.4.6. | Concentraciones de los gases, medidos en las fumarolas del Volcán Cumbal. | 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, campo EM y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el segundo semestre de 2010. | 5 |
| 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 2010. | 6 |
| 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 2010. | 7 |
| Figura 2.1.4. | Mapa de localización de las cámaras web que funcionaron durante el segundo semestre de 2010. Estas cámaras se encuentran instaladas una en la sede del OVSP en Pasto y otra en el municipio de Consacá. | 7 |
| Figura 2.1.5. | Mapa de localización de la estación telemétrica EM-Frailejón | 8 |



| | | |
|----------------|---|----|
| Figura 2.1.6. | Mapa de localización de las estaciones MIJIA y MIJIB, encargadas del monitoreo del flujo de lodos, instaladas en la cuenca del río Mijitayo. | 9 |
| Figura 2.1.7. | Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010 (julio a diciembre de 2010), de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo del volcán Galeras. | 9 |
| Figura 2.1.8. | Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe. | 11 |
| Figura 2.1.9. | Histograma de energía liberada diaria, en términos de su raíz cuadrática, de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe. | 11 |
| Figura 2.1.10. | Relaciones porcentuales de la variación de la sismicidad del segundo semestre del 2010 en comparación con el primer semestre de 2010. Izquierda, en cuanto a número de sismos y derecha, energía sísmica liberada. | 12 |
| Figura 2.1.11. | Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el primer semestre de 2010 (izquierda) y el segundo semestre de 2010 (derecha). | 12 |
| Figura 2.1.12. | Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y acumulado de sismos LP (abajo) durante el primero y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 13 |
| Figura 2.1.13. | Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. | 14 |
| Figura 2.1.14. | Histograma de número diario de episodios TRE (arriba) y acumulado de episodios TRE (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 15 |
| Figura 2.1.15. | Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos TRE (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 16 |
| Figura 2.1.16. | Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y acumulado de sismos HYB (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 17 |
| Figura 2.1.17. | Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 18 |
| Figura 2.1.18. | Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y acumulado de sismos VT (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 19 |
| Figura 2.1.19. | Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe. | 20 |
| Figura 2.1.20. | Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el segundo semestre de 2010. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2.5 Km. | 21 |
| Figura 2.1.21. | Relaciones porcentuales por rangos de profundidad (izquierda) y por rangos de magnitud local (derecha) para los sismos VT localizados durante el segundo semestre de 2010. A la derecha de cada diagrama se presentan sus convenciones. | 21 |
| Figura 2.1.22. | Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestres de 2010. En la gráfica superior se muestra las latitudes y en la inferior las longitudes. | 22 |
| Figura 2.1.23. | Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestres de 2010. En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes | 23 |
| Figura 2.1.24. | Sismograma de la estación Anganoy (ANGV-componente Vertical), el recuadro en coloración rojo, muestra el enjambre de eventos ocurrido entre el 14 y 15 de julio de 2010. | 24 |
| Figura 2.1.25. | Sismograma de la estación Anganoy (ANGV-componente Vertical), el recuadro en coloración rojo, muestra el enjambre de eventos ocurrido entre el 30 y 31 de julio de 2010. | 25 |
| Figura 2.1.26. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE ocurrido el 3 de julio a las 7:07 p.m. | 25 |
| Figura 2.1.27. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE ocurrido el 4 de julio a las 8:54 p.m. | 26 |
| Figura 2.1.28. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR ocurrido el 5 de julio a las 00:57 a.m. | 26 |
| Figura 2.1.29. | Sismogramas (componente Vertical) y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 15 de julio a las 11:07 p.m. | 27 |



| | | |
|----------------|---|----|
| Figura 2.1.30. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 22 de julio de 2010 a las 7:25 p.m. | 27 |
| Figura 2.1.31. | Sismogramas y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 25 de julio de 2010 a las 9:59 p.m. El recuadro en rojo resalta el registro de un evento regional el cual coincidió con el registro del temblor. | 28 |
| Figura 2.1.32. | Sismograma de la estación Anganoy, entre el 19 y el 25 de agosto de 2010. | 29 |
| Figura 2.1.33. | Sismograma de la estación sísmica de banda ancha Cufiño (1,8 km ENE del cráter), correspondiente al 25 de agosto de 2010, fecha de la ocurrencia del evento eruptivo. | 30 |
| Figura 2.1.34. | Sismograma de la estación Anganoy, entre las 02:00 a.m., del 25 de agosto y las 4:00 a.m., del 31 de agosto de 2010. | 30 |
| Figura 2.1.35. | Sismograma y espectro de Fourier del comienzo de la erupción del 25 de agosto de 2010, en la estación de corto periodo Anganoy y la componente vertical de la estación de banda ancha Cufiño. | 31 |
| Figura 2.1.36. | Sismograma del comienzo de la erupción del 25 de agosto de 2010 en la componente vertical de la estación Cufiño y señales en los sensores acústicos de Galeras, ubicados en las estaciones Cráter, CRAC y Calabozo CAAC y CAMI. | 31 |
| Figura 2.1.37. | Comparación de la energía sísmica de las erupciones de Galeras entre 2004 y 2010, usando la componente vertical de las estaciones Cráter y Cufiño. | 32 |
| Figura 2.1.38. | Registros espectrales del sistema SSAM, en la estación sísmológica de Anganoy, entre el 1 y 30 de agosto de 2010. Las amplitudes espectrales (medidas en unidades SSAM) son proporcionales a los niveles energéticos. | 33 |
| Figura 2.1.39. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 9 de agosto de 2010 a las 2:08 p.m. | 33 |
| Figura 2.1.40. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 11 de agosto de 2010 a las 5:13 a.m. | 34 |
| Figura 2.1.41. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 16 de agosto de 2010 a las 7:14 a.m. | 34 |
| Figura 2.1.42. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 16 de agosto de 2010 a las 9:59 p.m. | 34 |
| Figura 2.1.43. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 22 de agosto de 2010 a las 5:11 a.m., a este evento se le estimó un desplazamiento reducido para ondas de cuerpo de 200 cm ² . | 35 |
| Figura 2.1.44. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 4 de septiembre a las 7:18 p.m. | 36 |
| Figura 2.1.45. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 13 de septiembre de 2010, a las 6:20 a.m. | 36 |
| Figura 2.1.46. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE armónico registrado el 14 de septiembre de 2010 a las 7:03 p.m. | 37 |
| Figura 2.1.47. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE armónico registrado el 17 de septiembre de 2010 a las 9:05 p.m. | 37 |
| Figura 2.1.48. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 28 de septiembre de 2010, a las 12:43 p.m. | 38 |
| Figura 2.1.49. | Sismograma del evento registrado el 8 de septiembre de 2010, a las 5:10 p.m., e imagen de Galeras, en la fotografía se observa la emisión de gas asociada al evento sísmico. | 38 |
| Figura 2.1.50. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 8 de octubre de 2010 a las 2:35 p.m. | 39 |
| Figura 2.1.51. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 8 de octubre de 2010 a las 7:20 p.m. | 39 |
| Figura 2.1.52. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 12 de octubre de 2010 a las 5:02 p.m. | 40 |
| Figura 2.1.53. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 30 de octubre de 2010 a las 2:08 p.m. | 40 |
| Figura 2.1.54. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 15 de octubre de 2010 a las 2:51 a.m. Los espectros en frecuencia (derecha) corresponden al sector del sismograma (Izquierda) encerrado en el cuadro rojo. | 41 |
| Figura 2.1.55. | Sismograma de la estación Sísmológica Anganoy entre el 14 y 18 de octubre de 2010. El intervalo de tiempo registrado entre barras rojas corresponde al evento tipo TRE registrado el 15 de octubre de 2010, entre barras verdes corresponde a Temblor de fondo y entre barras color magenta corresponde al registro | 41 |



| | | |
|----------------|---|----|
| | del episodio de tremor a partir de las 9:47 a.m. del 17 de octubre de 2010. | |
| Figura 2.1.56. | Sismograma de la estación Sismológica Anganoy entre el 16 y 18 de octubre de 2010. En la figura se aprecia como a partir del 17 de octubre de 2010 la amplitud del tremor presenta variaciones a manera de pulsos. | 42 |
| Figura 2.1.57. | Sismograma de la estación Sismológica Anganoy entre el 15 y 21 de octubre de 2010. En la figura se aprecia como el tremor se registra entre el 17 y 21 de octubre de 2010. | 42 |
| Figura 2.1.58. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 8 de octubre a las 9:08 p.m. | 43 |
| Figura 2.1.59. | Diez horas del sismograma registrado el día 19 de octubre de 2010, en la estación base de clasificación Anganoy, desde las 7:00 am hasta las 4:00 pm, en donde se observan los incrementos del nivel del tremor de fondo (arriba). Detalle de uno de los incrementos del nivel del tremor de fondo (abajo) en donde se observa el sismograma y el espectro. | 43 |
| Figura 2.1.60. | Frecuencia mostrada por los eventos tipo TOR y PST registrados en el mes de noviembre de 2010. | 44 |
| Figura 2.1.61. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudotornillo registrado el 8 de noviembre de 2010, a las 10:54 p.m. | 44 |
| Figura 2.1.62. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Tornillo registrado el 14 de noviembre de 2010, a las 6:02 a.m. En la estación CUVZ se aplicó un filtro pasa alto con frecuencia de corte a 0.5 Hz. | 45 |
| Figura 2.1.63. | Sismograma (izquierda) y espectro (derecha) del evento tipo TOR registrado el 17 de noviembre de 2010, a las 7:26 p.m. con frecuencias dominantes y subdominantes en 18.2, 10.7, 15.0 y 11.3 Hz. | 45 |
| Figura 2.1.64. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 1 de noviembre de 2010, a las 06:04 p.m. | 46 |
| Figura 2.1.65. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP registrado el 12 de noviembre de 2010, a las 7:42 p.m. En la estación CUVZ se aplicó un filtro pasa alto con frecuencia de corte a 0.4 Hz. | 46 |
| Figura 2.1.66. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP no clasificable registrado el 15 de noviembre de 2010, a las 2:24 p.m. | 46 |
| Figura 2.1.67. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado a la 1:32 a.m. | 47 |
| Figura 2.1.68. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 2 de diciembre de 2010 a las 10:05 p.m. | 47 |
| Figura 2.1.69. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 6 de diciembre de 2010 a las 8:48 p.m. | 48 |
| Figura 2.1.70. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP (No Clasificable) registrado el 7 de diciembre de 2010 a la 1:55 a.m. | 48 |
| Figura 2.1.71. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 7 de diciembre de 2010 a las 4:30 a.m. | 48 |
| Figura 2.1.72. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST no clasificable registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 4:07 a.m. | 49 |
| Figura 2.1.73. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 6:43 a.m. | 49 |
| Figura 2.1.74. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 8:57 a.m. | 49 |
| Figura 2.1.75. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 5 de diciembre 2010 a la 1:12 p.m. | 50 |
| Figura 2.1.76. | Sismograma del evento tipo TRE registrado el 17 de diciembre de 2010 a las 7:10 p.m. Este episodio tuvo una duración aproximada de seis horas. | 50 |
| Figura 2.1.77. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Cráter, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 52 |
| Figura 2.1.78. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Peladitos, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 53 |
| Figura 2.1.79. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Huairatola, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 53 |
| Figura 2.1.80. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Cobanegra, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 54 |
| Figura 2.1.81. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Calabozo, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 54 |
| Figura 2.1.82. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial, de los inclinómetros electrónicos Cráter, Peladitos y Cobanegra, instalados en Galeras, para el periodo comprendido entre enero y diciembre de 2010. | 55 |



| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 2.1.83. | Vectores resultantes para los inclinómetros electrónicos Cráter, Peladitos, Huairatola y Cobanegra para el periodo comprendido entre el 9 de septiembre de 2010 y el 31 de diciembre de 2010. El asterisco indica el lugar donde se encuentra cada estación. | 56 |
| Figura 2.1.84. | Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Galeras. Las figuras de color violeta indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color verde (oscuro y claro) indican la ubicación de los prismas reflectores. | 56 |
| Figura 2.1.85. | Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS y de las estaciones isotópicas de Rn ₂₂₂ . | 57 |
| Figura 2.1.86. | Flujo de SO ₂ de Galeras, medido con estaciones Scan-DOAS (NOVAC). Enero a diciembre de 2010. | 58 |
| Figura 2.1.87. | Flujo de SO ₂ de Galeras, medido con estaciones Scan-DOAS (NOVAC). Segundo semestre de 2010. | 59 |
| Figura 2.1.88. | Imagen satelital OMI de concentración de SO ₂ en la atmósfera capturada a una altura de 5.000 m.s.n.m. sobre Galeras. Agosto 25 de 2010 | 59 |
| Figura 2.1.89. | Emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Caldera y Telecom. Abril a diciembre de 2010. | 60 |
| Figura 2.1.90. | Acumulado de las emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Caldera y Telecom. Abril a diciembre de 2010. | 60 |
| Figura 2.1.91. | Emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Peladitos y Cufiño. Abril a diciembre de 2010. | 61 |
| Figura 2.1.92. | Acumulado de las emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Peladitos y Cufiño. Abril a diciembre de 2010. | 62 |
| Figura 2.1.93. | Emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Frailejón y Piedras. Abril a diciembre de 2010. | 62 |
| Figura 2.1.94. | Acumulado de las emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Frailejón y Piedras. Abril a diciembre de 2010. | 63 |
| Figura 2.1.95. | Emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Mirador y Parques. Abril a diciembre de 2010 | 63 |
| Figura 2.1.96. | Acumulado de las emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Mirador y Parques. Abril a diciembre de 2010 | 64 |
| Figura 2.1.97. | Emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Lava1 y Lava2. Abril a diciembre de 2010 | 64 |
| Figura 2.1.98. | Acumulado de las emisiones de Rn ₂₂₂ , en las estaciones Lava1 y Lava2. Abril a diciembre de 2010 | 65 |
| Figura 2.1.99. | Mapa de localización de las fuentes termales presentes en Galeras | 66 |
| Figura 2.1.100. | Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₄ ²⁻ para las fuentes termales del Volcán Galeras. | 68 |
| Figura 2.1.101. | Concentraciones de SO ₂ asociadas a la columna eruptiva del volcán Galeras el 25 de agosto de 2010 (Fuente NOAA). | 69 |
| Figura 2.1.102. | Concentraciones de SO ₂ asociadas a la columna eruptiva del volcán Galeras el 25 de agosto de 2010 (Fuente NOAA). | 70 |
| Figura 2.1.103. | Aspecto de las cenizas depositadas en veredas de los municipios Consacá y Ancuya, zonas afectadas por la caída de ceniza de la erupción del volcán Galeras el 25 de agosto de 2010 | 71 |
| Figura 2.1.104. | Mapa de Isópacas desarrolla a partir de los datos recolectados en campo de caída piroclástica. | 72 |
| Figura 2.1.105. | Variación del tamaño de grano de la ceniza emitida por el volcán Galeras el 25 de agosto de 2010. Izquierda: aspecto de la ceniza; derecha: aspecto de la ceniza bajo lupa binocular | 73 |
| Figura 2.1.106. | El porcentaje de líticos de color rojizo en esta muestra es mucho mayor, aunque no supera el porcentaje de vidrio. | 74 |
| Figura 2.1.107. | Emisión de gases vista desde el municipio de Consacá el 9 de agosto de 2010 a 12:27 p.m. En la gráfica se observa emisión de gases volcánicos de tonalidad blanca, desde el los cráteres secundarios El Paisita (sector Norte de Galeras) y desde el cráter las Chavas (sector occidente-sur-occidente de Galeras). | 76 |
| Figura 2.1.108. | Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana del 13 de septiembre de 2010, 10:56 a.m. (izquierda) y 11:05 a.m. (derecha). Se observa la salida de gas desde el campo fumarólico Las Deformes. | 76 |
| Figura 2.1.109. | Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana del 7 de octubre de 2010, por personal del Ingeominas en la cima volcánica. | 77 |
| Figura 2.1.110. | Imágenes de Galeras, capturadas desde el OVSP, en horas de la mañana del 10 de septiembre de 2010, 9:44 a.m. (izquierda) y 9:49 a.m. (derecha), en las fotografías se observa la salida de gas. | 77 |
| Figura 2.1.111. | Imágenes de Galeras tomadas desde la sede del OVSP el día 29 de septiembre de 2010 en horas de la mañana. | 77 |
| Figura 2.1.112. | Imágenes de Galeras capturadas por las cámaras web del OVSP (instaladas en la población de Consacá – izquierda y en la sede del OVSP – derecha) el día 2 de octubre de 2010 en horas de la mañana. | 78 |
| Figura 2.1.113. | Emisión de gases vista desde la sede del OVSP el día 19 de octubre de 2010 a las 9:27 a.m. En la imagen se observa salida de gases y material particulado (ceniza). | 78 |
| Figura 2.1.114. | Fotografía tomada por el señor Mario Alberto Caicedo, funcionario de RTVC (Radio Televisión Nacional de Colombia), el día 19 de octubre de 2010, en donde se observa columna de emisión de color blanco desde los sectores de la fumarola Deformes, el cráter secundario Las Chavas y la parte interna del cráter principal al nivel del cráter secundario El Paisita; y también se observa emisión de color gris desde el cráter secundario El Paisita, asociada con salida de material particulado (ceniza). | 79 |
| Figura 2.1.115. | Fotografías tomadas por el señor Mario Alberto Caicedo, funcionario de RTVC, en donde se observa la | 79 |



| | | |
|-----------------|---|----|
| | deposición de ceniza en el piso antes de tomar la muestra (izquierda) y la cantidad de ceniza recogida (derecha). | |
| Figura 2.1.116. | Fotografías tomadas en la bocatoma San Felipe, Pasto (izquierda) y en la Florida (derecha) donde se observa poca caída de ceniza en estos sectores. | 80 |
| Figura 2.1.117. | Mapa de isópacas de la ceniza emitida por Galeras durante la erupción del 25 de agosto de 2010. | 80 |
| Figura 2.1.118. | Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Se observa la salida de gas de varios de los cráteres secundarios de Galeras y del cráter principal. | 81 |
| Figura 2.1.119. | Pulso de emisión de cenizas tomado durante un lapso del proceso eruptivo del 25 de agosto de 2010, a las 7:39 a.m. | 81 |
| Figura 2.1.120. | Pulso de emisión tomado durante un lapso del proceso eruptivo del 25 de agosto de 2010, a las 08:09 a.m. | 82 |
| Figura 2.1.121. | Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, el cual se realizó en horas de la mañana del 1 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. En la fotografía se observa salida de gas desde varios puntos del cono activo. | 82 |
| Figura 2.1.122. | Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, el cual se realizó en horas de la mañana del 4 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. En la fotografía se observa salida de gas desde varios puntos del cono activo. | 82 |
| Figura 2.1.123. | Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana en sobrevuelo efectuado el 6 de octubre, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC. | 83 |
| Figura 2.1.124. | Imágenes aéreas del cono activo de Galeras, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 14 de octubre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. | 83 |
| Figura 2.1.125. | Registro Fotográfico de la emisión de gases observada durante el sobrevuelo efectuado el día 27 de diciembre de 2010 en horas de la mañana con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. El óvalo rojo resalta los focos de emisión de gases alineados a manera de una fisura radial en el flanco norte del cono. | 84 |
| Figura 2.1.126. | Evento sísmico del 22 de agosto de 2010, ocurrido a las 08:43 a.m., con su registro en la estación de monitoreo acústico CAMI, en las estaciones sismológicas de Anganoy, Cráter, Cufiño y Urcunina y, en las estaciones de campo eléctrico FREE y FREN. | 85 |
| Figura 2.1.127. | Evento sísmico del 22 de agosto de 2010, ocurrido a las 08:43 a.m., con su registro en estación acústica CAMI, en las estaciones sismológicas de Anganoy, Cráter y Urcunina; en la estación de campo eléctrico FREE, espectro de la componente FREE, componente FREN y espectro de la componente. | 86 |
| Figura 2.1.128. | Registro de las variaciones eléctricas de la estación Cráter, ubicada en la base del cono volcánico de Galeras. La curva superior corresponde a la componente NS y la inferior a la componente EW. El período de tiempo considerado para la grafica está entre el 4 y el 25 de Julio de 2004 | 87 |
| Figura 2.1.129. | Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes. | 88 |
| Figura 2.1.130. | Imágenes de calor, tomadas con la cámara térmica del helicóptero de la FAC. En ellas se observa salida de material desde el cráter secundario El Paisita. | 89 |
| Figura 2.1.131. | Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. | 89 |
| Figura 2.1.132. | Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 4 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. | 90 |
| Figura 2.1.133. | Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 14 de octubre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes. | 90 |
| Figura 2.2.1. | Imagen tomada de Google Earth en donde se observan algunos volcanes del sur de Colombia y del norte del Ecuador, entre ellos están Doña Juana, Galeras, Azufral y Cumbal, monitoreados por el OVSP - INGEOMINAS. | 93 |
| Figura 2.2.2. | Imagen de la cima del volcán Doña Juana | 93 |
| 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 2010. | 95 |
| Figura 2.2.4. | Mapa de indicación de los radioenlaces de la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos | 96 |
| Figura 2.2.5. | Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana. | 97 |



| | | |
|----------------|---|-----|
| Figura 2.2.6. | Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe. | 97 |
| Figura 2.2.7. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, ocurrido el 21 de julio de 2010, a las 3:37 a.m. | 98 |
| Figura 2.2.8. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, ocurrido el 21 de julio de 2010, a las 7:14 a.m. | 98 |
| Figura 2.2.9. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 99 |
| Figura 2.2.10. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 11 de junio de 2009 y el 31 de diciembre de 2010. | 100 |
| Figura 2.2.11. | Imágenes del volcán Doña Juana capturadas el 12 de julio de 2010, desde la estación sísmica Paramo | 100 |
| 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. | 102 |
| Figura 2.3.2. | Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2010. | 103 |
| Figura 2.3.3. | Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos. | 104 |
| Figura 2.3.4. | Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral. | 104 |
| Figura 2.3.5. | Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe. | 105 |
| Figura 2.3.6. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP ocurrido en Azufral, registrado el 7 de julio a las 2:58 a.m. | 105 |
| Figura 2.3.7. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 26 de octubre de 2010 a las 4:16 p.m. por la estación La Chaitán. | 106 |
| Figura 2.3.8. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, ocurrido en Azufral, registrado el 21 de noviembre de 2010, a las 1:58 a.m. | 106 |
| Figura 2.3.9. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento VT ocurrido en Azufral, registrado el 22 de noviembre de 2010, a las 8:19 p.m. | 106 |
| Figura 2.3.10. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 9 de diciembre de 2010 a las 8:16 a.m. por la estación Chaitán. | 107 |
| Figura 2.3.11. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Chaitán, instalado en el volcán Azufral, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010. | 108 |
| Figura 2.3.12. | Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Azufral. Las figuras de color verde indican la ubicación de las Base 1 y 2, los círculos de color amarillo indican la ubicación de los prismas. | 109 |
| Figura 2.3.13. | Comportamiento de los prismas-reflectores EDM, instalados en la superficie del volcán Azufral medidos desde la Base1. En la gráfica se representa la diferencia acumulativa en milímetros de cada prisma. | 109 |
| Figura 2.3.14. | Comportamiento de los prismas-reflectores EDM, instalados en la superficie del volcán Azufral medidos desde la Base2. En la gráfica se representa la diferencia acumulativa en milímetros de cada prisma. | 110 |
| Figura 2.3.15. | Imagen térmica de Azufral, tomada en sobrevuelo de julio 23 de 2010. Las flechas en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes. | 111 |
| Figura 2.3.16. | Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010; C) y D) 24 de julio de 2010. | 112 |
| Figura 2.3.17. | Imágenes de la Laguna La Barrosa del Azufral, capturadas el 24 de julio de 2010. | 112 |
| Figura 2.3.18. | Imagen de la Laguna Verde del Azufral, capturada el 24 de julio de 2010. En el ovalo rojo se resalta el pequeño alineamiento de burbujas sobre la superficie de la Laguna. | 113 |
| Figura 2.3.19. | Imagen de la Laguna Verde del Azufral, capturada el 24 de julio de 2010. En la cual se observa el pequeño alineamiento de burbujas sobre la superficie de la Laguna. | 113 |
| Figura 2.3.20. | Imagen de la Laguna de Azufral, en la cual se aprecia la ubicación de la línea de coloración blanca, A) 14 de mayo de 2010; B) 22 de julio de 2010. | 113 |
| Figura 2.3.21. | Imágenes aéreas del volcán Azufral, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. | 114 |
| Figura 2.3.22. | Imagen térmica de Azufral, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes. | 114 |
| Figura 2.3.23. | Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. (Izquierda) | 115 |



| | | |
|----------------|---|-----|
| | imagen tomada el 24 de julio de 2010 y Derecha) imagen tomada el 5 de agosto de 2010. | |
| Figura 2.3.24. | Imágenes de la Laguna La Barrosa (Izq.) y la Laguna Verde del volcán Azufral (Der.), capturadas el 4 de agosto de 2010. | 115 |
| Figura 2.3.25. | Imágenes del depósito, observado desde varios puntos del volcán Azufral. A) 4 de agosto de 2010; B, C y D) 17 de agosto 2010; E y F) 30 de agosto de 2010. | 115 |
| Figura 2.3.26. | Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 16 de septiembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector. | 117 |
| Figura 2.3.27. | Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 30 de septiembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector | 118 |
| Figura 2.3.28. | Imágenes de la ubicación de las fumarolas nuevas, por las cuales se observó emisión de gases, el 30 de septiembre de 2010, ubicadas hacia el oriente de la Laguna Verde del volcán Azufral. | 118 |
| Figura 2.3.29. | Imágenes del volcán Azufral, izquierda – por la parte norte de la Laguna Verde, derecha – por el sector La Playita, salida de material; en las fotografías capturadas el 30 de septiembre de 2010, se puede observar emisiones de gas. | 119 |
| Figura 2.3.30. | Mapa de localización de los puntos muestreados para toma de temperaturas, en agua y en superficie del volcán Azufral, medida realizada el 30 de septiembre de 2010. | 119 |
| Figura 2.3.31. | Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010; C) 24 de julio de 2010; D) 5 de agosto de 2010; E) 17 de agosto de 2010; F) 30 de agosto de 2010; G) 16 de septiembre de 2010; H) 30 de septiembre de 2010. | 120 |
| Figura 2.3.32. | Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, en las cuales se observa zonas donde se ha presentado e incrementado el burbujeo, la fotografía inferior – derecha corresponde a la laguna La Barrosa. | 121 |
| Figura 2.3.33. | Imágenes de la Laguna Verde, capturadas en el mes de mayo de 2010, en las fotografías se observa el cambio de textura y coloración más oscura en la superficie de la Laguna Verde. | 121 |
| Figura 2.3.34. | Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, en las cuales se observa manchas de color más oscuro, las cuales por momentos se encuentran acompañadas por burbujeo, se propone que la coloración se genera por alineamientos de fuentes burbujeantes en el fondo de la laguna. | 122 |
| Figura 2.3.35. | Reubicación del medidor artesanal de nivel de agua de la Laguna del volcán Azufral (sector norte). Arriba: Imágenes capturadas el 30 de septiembre de 2010. Abajo: Imágenes capturadas el 8 de octubre de 2010. | 123 |
| Figura 2.3.36. | Imágenes del sector conocido como la Playita de la Laguna Verde del volcán Azufral, capturadas el 22 de octubre de 2010 en horas de la mañana. En la última fotografía, la persona se encuentra a una distancia de aproximadamente 11 pasos respecto al lugar donde se encuentra el depósito de salida de material. | 123 |
| Figura 2.3.37. | Imagen de una de las fumarolas del volcán Azufral, la cual registró una temperatura de 188,7 °C. Medida Realizada el 22 de octubre de 2010. | 124 |
| Figura 2.3.38. | Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar en incremento en el nivel del agua de la Laguna. | 124 |
| Figura 2.3.39. | Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales (sector norte). Arriba: Imágenes capturadas el 22 de octubre de 2010. Abajo: Imágenes capturadas el 13 de diciembre de 2010. | 125 |
| Figura 2.3.40. | Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector. | 125 |
| Figura 2.3.41. | Imágenes de la Laguna La Barrosa del volcán Azufral, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar el burbujeo presente en esta laguna, así como también la coloración de la misma, la cual se asemeja a la de la Laguna Verde. | 126 |
| Figura 2.4.1. | Imagen del complejo volcánico Cumbal. | 127 |
| Figura 2.4.2. | Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2010 | 128 |
| Figura 2.4.3. | Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos. | 129 |
| Figura 2.4.4. | Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal. | 129 |
| Figura 2.4.5. | Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde agosto de 2010 a diciembre de 2010 | 130 |
| Figura 2.4.6. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, ocurrido en Cumbal, registrado el 29 de julio | 130 |



| | | |
|----------------|---|-----|
| | a las 9:30 a.m. | |
| Figura 2.4.7. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, ocurrido en Cumbal, registrado el 29 de julio a las 8:45 a.m. | 130 |
| Figura 2.4.8. | Sismograma, espectro y espectrograma en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 20 de agosto de 2010 a las 4:26 p.m. por la componente vertical de la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 5,4 Hz. | 131 |
| Figura 2.4.9. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, ocurrido en Cumbal, registrado el 19 de septiembre a las 2:02 p.m. | 131 |
| Figura 2.4.10. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 2 de octubre de 2010 a las 7:30 p.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 2,16 Hz. | 131 |
| Figura 2.4.11. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 16 de octubre de 2010 a las 8:36 p.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 1,24 Hz. | 131 |
| Figura 2.4.12. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE, registrado el 22 de octubre de 2010 a las 4:58 a.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una duración aproximada de 150 segundos, con frecuencias dominantes en un rango entre 1 y 5 Hz. | 132 |
| Figura 2.4.13. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 1 de diciembre de 2010 a las 12:28 p.m. por la estación La Mesa. La frecuencia dominante de este evento fue de 1,4 Hz. | 132 |
| Figura 2.4.14. | Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 6 de diciembre de 2010 a las 8:35 p.m. por la estación La Mesa. La frecuencia dominante de este evento fue de 1,6 Hz. | 132 |
| Figura 2.4.15. | Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro La Mesa, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 29 de noviembre y el 31 de diciembre de 2010. | 133 |
| Figura 2.4.16. | Mapa de localización de las fuentes termales del volcán Cumbal. | 133 |
| Figura 2.4.17. | Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₂ ²⁻ para las fuentes termales del Volcán Cumbal. | 135 |
| Figura 2.4.18. | Fotografías de las Fumarolas a) El Rastrojo, b) El Verde y c) Desfondada, del Volcán Cumbal | 136 |
| Figura 2.4.19. | Imágenes del cono activo de Cumbal, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Se observa la salida de gases de coloración blanca de los cráteres secundarios Laverde y Desfondada. | 138 |
| Figura 2.4.20. | Imágenes del cono activo de Cumbal, capturada desde El Espino (Nariño) el 18 de agosto de 2010 a las 9:00 a.m. Se observa la salida de gases de coloración blanca. | 138 |
| Figura 2.4.21. | Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas desde El Espino (vía Tumaco), en horas de la mañana del 17 de septiembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca. | 138 |
| Figura 2.4.22. | Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas desde El Espino (vía Tumaco), en horas de la mañana del 1 de octubre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de color blanco. | 139 |
| Figura 2.4.23. | Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas en horas de la mañana del 29 de noviembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca. | 139 |
| Figura 2.4.24. | Imagen del complejo volcánico de Cumbal, capturada en horas de la mañana del 29 de noviembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca. | 139 |



INTRODUCCIÓN

El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto – Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS), en el segundo semestre de 2010, continuó con la tarea institucional de vigilar la actividad del volcán Galeras, monitoreando en forma continua durante las 24 horas del día y en tiempo real, los diferentes parámetros de estudio que permiten la evaluación de la actividad volcánica. De igual manera, el Observatorio, continuó con la vigilancia de los volcanes Doña Juana, Azufral y Cumbal con sensores sísmicos, de deformación cortical y muestreos periódicos de Geoquímica.

Este informe presenta los datos de monitoreo de los volcanes del segmento Sur de Colombia, adquiridos durante el segundo semestre del 2010, incluyendo los datos instrumentales, los periódicos, así como también el procesamiento primario de los mismos, permitiendo finalmente establecer el nivel de actividad de cada uno de los volcanes instrumentados, información que ha sido entregada a la comunidad, a las entidades del Sistema Nacional de Atención y Prevención de Desastres y a las autoridades locales y regionales.

Durante este periodo de evaluación se contó con la valiosa cooperación de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), para realizar los seguimientos de actividad superficial y cambios morfológicos de los volcanes, siendo de gran ayuda tanto para la evaluación previa como posterior a las erupciones.

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



Libertad y Orden

RESUMEN

En general, el segundo semestre de 2010, se caracterizó por bajos niveles de ocurrencia y energía en la sismicidad. Se resalta el incremento de sismicidad registrado entre el 20 y 21 de agosto, a manera de enjambre (gran cantidad de sismos en un periodo corto de tiempo) con eventos asociados a dinámica de fluidos, en su gran mayoría de tipo LP, localizados en inmediaciones del cono activo a niveles superficiales menores a 2 km. Estos eventos se han asociado en periodos anteriores, a procesos de intrusión y emplazamiento de material magmático. Hacia la madrugada del 21 de agosto, el tipo de sismicidad cambio a tipo Volcano Tectónicos (VT, asociados a fracturamiento de material cortical) e Híbridos (HYB, – asociados a fracturamiento de material cortical con posterior evidencia de movimiento de fluidos), varios de los cuales, fueron reportaron como sentidos por habitantes de sectores de la ciudad de Pasto y en los municipios de Nariño, La florida y Chachagüí.

La evaluación de la actividad, hizo que el 23 de agosto se tomara la decisión de cambiar el nivel de actividad de amarillo a Naranja ■ (II Erupción probable en término de días o semanas). Este nivel se mantuvo el 24 y parte del 25 de agosto, hasta las 4:00 am, cuando ocurrió el episodio eruptivo, y por tanto el nivel de actividad cambió a Rojo ■ (I Erupción inminente o en curso). Una vez los diferentes parámetros de la vigilancia volcánica mostraron condiciones relativamente más estables del sistema volcánico, se retornó al nivel de actividad a Naranja ■ (II Erupción probable en término de días o semanas), el cual se mantuvo hasta el 7 de septiembre, cuando nuevamente se decidió cambiar el nivel de actividad a Nivel Amarillo ■ (III) “Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica”, el cual continuo hasta el 31 de diciembre de 2010.

De acuerdo al mapa de Isópacas, el volumen depositado en la erupción del 25 de agosto de 2010, fue de 37.033 m³, sin tener en cuenta el material depositado en la cima.

En cuanto a la actividad del volcán Doña Juana, durante el segundo semestre del 2010, la actividad sísmica estuvo dominada por eventos asociados a fracturamiento de material cortical, cuyas profundidades estuvieron alrededor de los 7 km, respecto a la cima, y en dirección hacia el sector noreste a distancias epicentrales entre 7 y 11 km., respecto a los domos del volcán, con magnitudes menores de 2.7 en la escala de Richter

En relación al volcán Azufral, se observó en sismicidad, un predominio, en este periodo de eventos clasificados como volcánicos, sismos que se registran en la zona de influencia del edificio volcánico, cuya fuente puede estar asociada con procesos volcánicos ó con agentes externos (por ejemplo, lluvia, viento, deslizamientos, etc.), que por sus características no es fácil clasificar. Además se destacaron los cambios observados en relación a la actividad superficial, principalmente salida de gases, descenso en el nivel del agua de la Laguna Verde e incremento de burbujeo.

De acuerdo a la sismicidad registrada por la estación La Mesa, instalada en el complejo volcánico de Cumbal, se observó que la mayor parte de registros son de sismos relacionados con movimiento de fluidos al interior del edificio volcánico.

Con base en el análisis de la información de los volcanes Doña Juana, Azufral y Cumbal, estos se consideran en Nivel Verde ● (IV), “Volcán activo y comportamiento estable”.



2. VOLCANES DE NARIÑO



Libertad y Orden

2.1. VOLCÁN GALERAS

2.1.1. Red de vigilancia

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

- Nueve estaciones sismológicas telemétricas de las cuales siete son de corto periodo (2 triaxiales y 5 de componente vertical) (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.1.) y se tienen dos estaciones sismológicas de banda ancha (Obonuco a partir del mes de Noviembre y Cufiño) (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.1.). Para recibir la información que envían estas estaciones en la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP), se cuenta con una red telemétrica tipo punto a punto, con tres repetidoras instaladas en sitios estratégicos. Las estaciones que usan repetidora para el enlace son: Cóndor (repite por Cruz de Amarillo); Calabozo (repite por Cráter2); y Nariño-2 (repite por Morasurco). En la figura 2.1.1. se muestran los enlaces de radio entre las diferentes estaciones con las tres repetidoras y la sede el OVSP.
- Una estación telemétrica de Campo eléctrico y una estación telemétrica de campo magnético Frailejones (Figura 2.1.5, tabla 2.1.4).
- 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 (SO₂), que se encuentran localizadas en el cuadrante noroccidental del edificio volcánico. Para recibir la información de estas estaciones en el OVSP se cuenta con una red telemétrica punto a punto conmutable (*switchable*), con dos repetidoras en los cerros Alto de la Palma y Morasurco (Figura 2.1.3, Tabla 2.1.3.). Adicionalmente, se dispone de un equipo portátil MiniDOAS para hacer seguimientos de las emisiones de SO₂, a través de mediciones efectuadas recorriendo la vía circunvalar al volcán Galeras.
- 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 2.1.5.)
- Se instala una Cámara de video para observación y seguimiento de la actividad superficial, en el municipio de Consacá el 14 de septiembre. (figura 2.1.4.)

- El 16 de septiembre se instala una estación telemétrica compuesta por un geófono y un pluviómetro para monitoreo constante de flujos de lodos, ubicada en la cuenca del río Mijitayo (Figura 2.1.6.)
- El 23 de diciembre se instala la segunda estación telemétrica compuesta por un geófono y un pluviómetro para monitoreo constante de flujos de lodos, ubicada en la cuenca del río Mijitayo. (Figura 2.1.6.).
- 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).

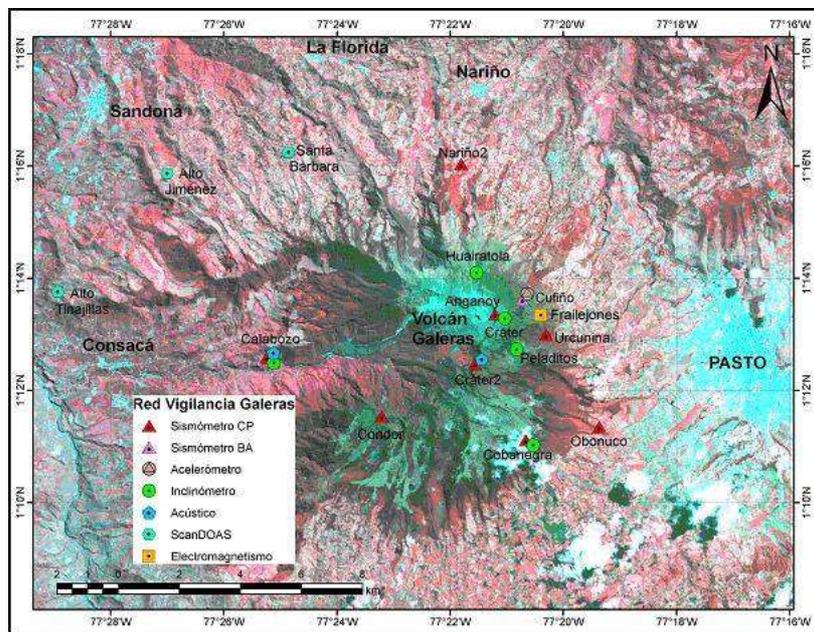


Figura 2.1.1. Mapa de localización de algunas de las estaciones (sismómetros de corto periodo-CP y banda ancha-BA, acelerómetros, acústico, campo EM y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el segundo semestre de 2010.

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 2010.

| Estación | Código | Transmisión de Datos | Tipo de Sensor | Componente | Distancia al Cráter (Km) | Dirección Respecto al Cráter | Altitud (msnm) |
|------------|--------|----------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|------------------------------|----------------|
| Anganoy | ANGV | Análogica | Sismómetro Corto periodo | Vertical | 0.84 | E | 4170 |
| Cráter-2 | CR2R | Digital | Sismómetro Corto periodo | Vertical | 1.48 | S | 4048 |
| Cufiño-BB | CUVZ | Digital | Sismómetro banda Ancha | Triaxial | 1.90 | ENE | 3800 |
| Urcunina | URCR | Análogica | Sismómetro Corto periodo | Triaxial | 2.26 | ESE | 3494 |
| Cobanegra- | COB3 | Análogica | Sismómetro Corto periodo | Vertical | 3.94 | SSE | 3625 |
| Condor | COND | Análogica | Sismómetro Corto periodo | Vertical | 4.86 | SW | 3985 |
| Obonuco | OBVR | Digital | Sismómetro banda Ancha | Triaxial | 4.94 | SE | 3010 |
| Nariño-2 | NAR2 | Análogica | Sismómetro Corto periodo | Vertical | 5.00 | N | 2870 |
| Calabozo | CAVZ | Digital | Sismómetro Corto periodo | Triaxial | 6.83 | W | 2353 |
| Camí | CAMI | Digital | Micrófono | Unidireccional | 6.83 | W | 2353 |
| Caac | CAAC | Digital | Micrófono | Unidireccional | 1.48 | S | 4048 |

En este semestre se realizaron en campo los mantenimientos preventivos y correctivos de las estaciones que conforman las redes de monitoreo volcánico de Galeras; adicionalmente, se hicieron mantenimientos en las repetidoras y equipos de recepción en la sede del Observatorio. La operatividad de la red instrumental de Galeras fue del 85% con un registro de calidad, lo que permitió garantizar una información confiable para la apropiada evaluación de la actividad volcánica. La Figura 2.1.7. muestra el histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron la red de monitoreo sísmico, Campo EM, inclinometría electrónica, mediciones de gas SO₂ de Galeras, acústica, video y térmica, durante el primer semestre de 2010. Hay que resaltar que los porcentajes bajos de funcionamiento de las estaciones de campo EM Frailejón y sismológica de Banda ancha de Cufiño se deben a que fueron instaladas en febrero y mayo respectivamente.

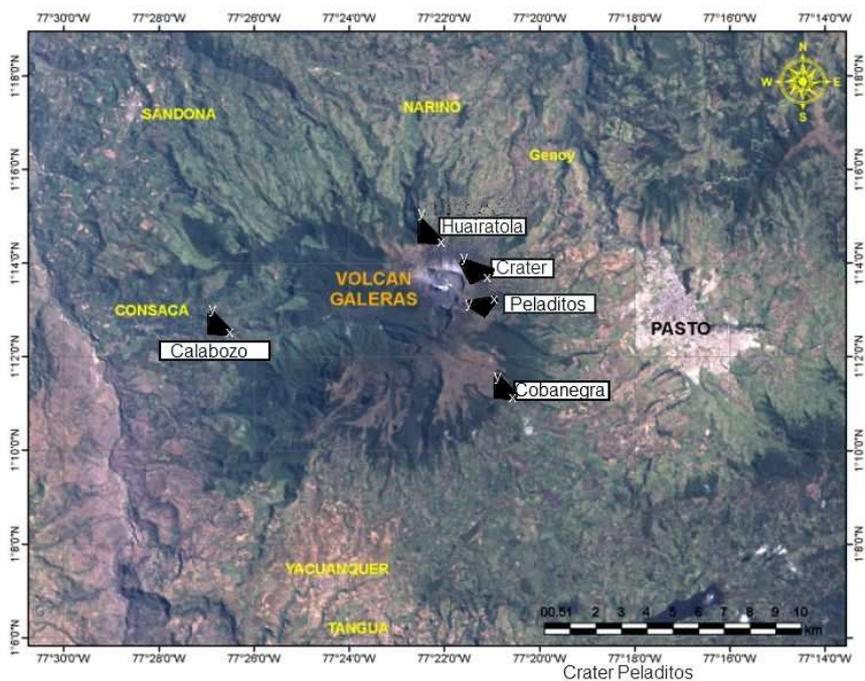


Figura 2.1.2. Red para el monitoreo de la deformación volcánica del Galeras, conformada por cinco inclinómetros electrónicos, que funcionaron en el segundo semestre de 2010.

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

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

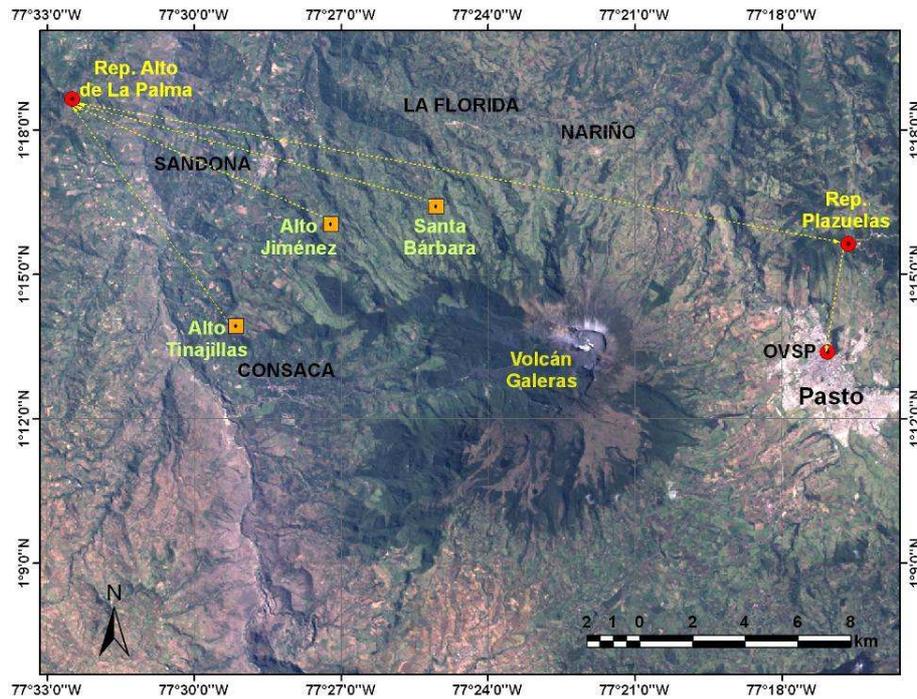


Figura 2.1.3. Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS del proyecto NOVAC para el monitoreo de emisiones de Dióxido de Azufre (SO₂), que funcionaron durante el segundo semestre de 2010.

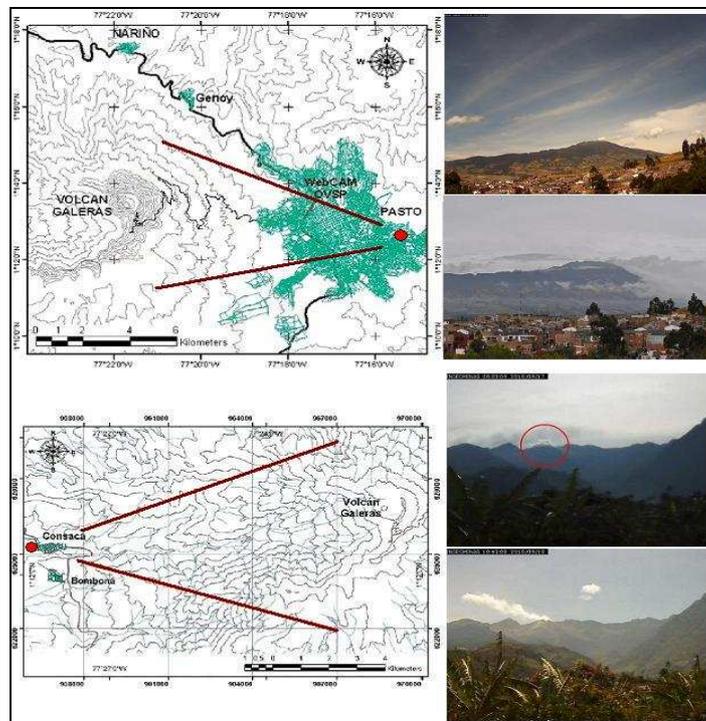


Figura 2.1.4. Mapa de localización de las cámaras web que funcionaron durante el segundo semestre de 2010. Estas cámaras se encuentran instaladas una en la sede del OVSP en Pasto y otra en el municipio de Consacá.

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 2010.

| 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).

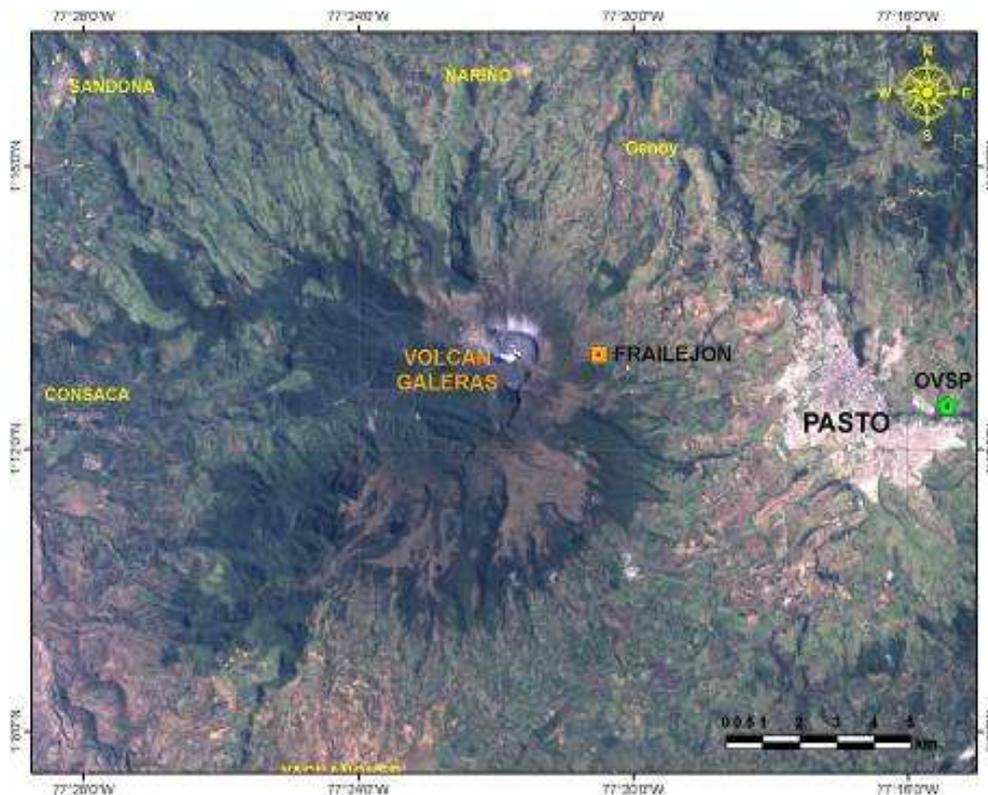


Figura 2.1.5. Mapa de localización de la estación telemétrica EM-Frailejón

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

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

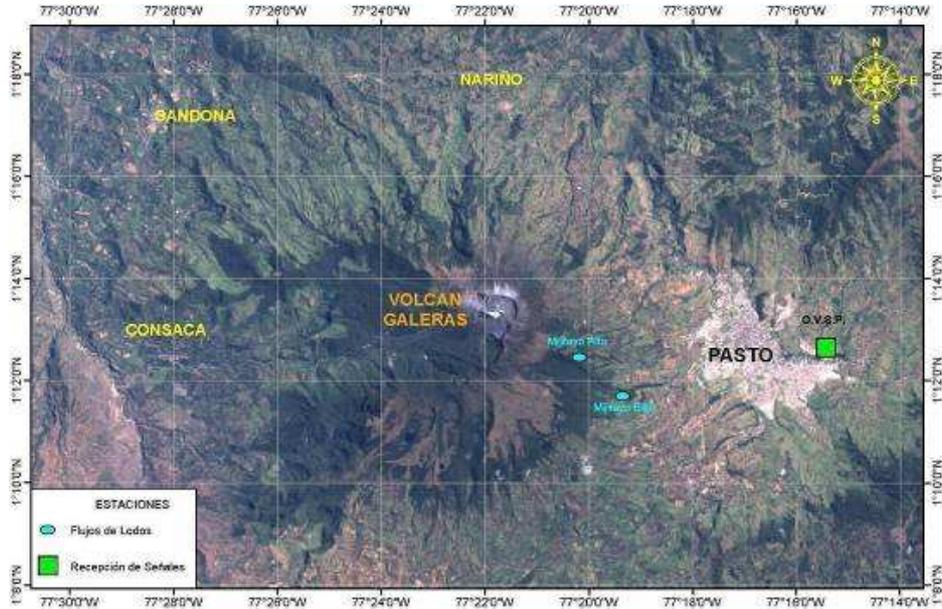


Figura 2.1.6. Mapa de localización de las estaciones MIJIA y MIJIB, encargadas del monitoreo del flujo de lodos, instaladas en la cuenca del río Mijitayo.

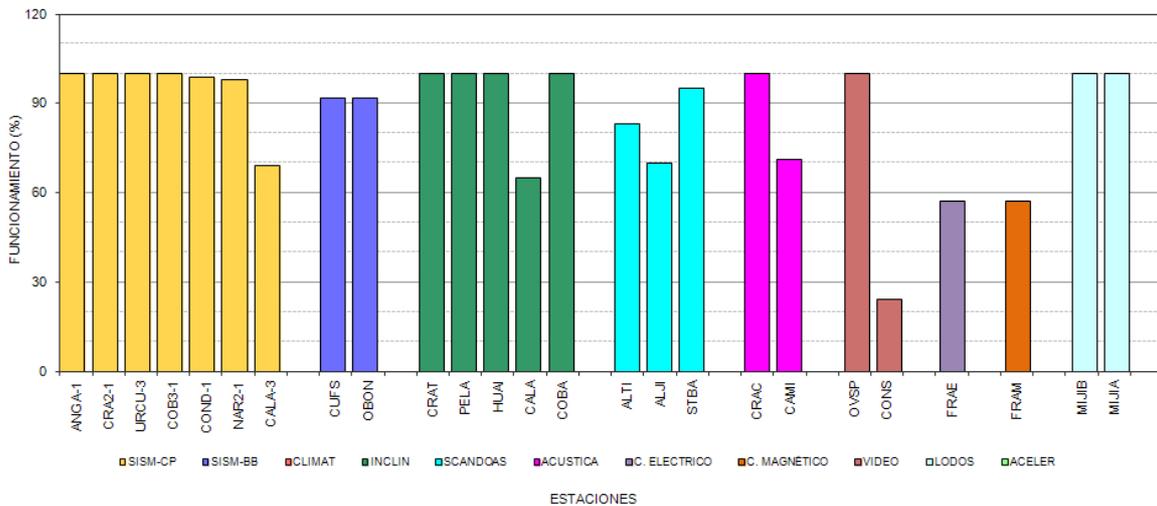


Figura 2.1.7. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010 (julio a diciembre de 2010), de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo del volcán Galeras.

Durante el segundo semestre de 2010, se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos tendientes a mejorar la calidad de la información. Los principales problemas presentados estuvieron relacionados con problemas de telemetría en los radioenlaces tanto en corto periodo como en las estaciones de banda ancha con señal digital. En este periodo se hicieron cambios de equipos, nuevas instalaciones y se hicieron mantenimientos correctivos tendientes a optimizar la red de vigilancia del volcán Galeras, los cuales se relacionan en la tabla 2.1.5.



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

| FECHA | ESTACION | DESCRIPCIÓN |
|------------|---|---|
| Agosto | OBONUCO | Se presentan interferencias y ruido ambiental que afectan la calidad de la señal. |
| Agosto | SCANDOAS ALTO JIMENEZ Y ALTO TINAJILLAS | Presentan problemas en el radioenlace debido a condiciones climáticas. |
| Septiembre | NARIÑO | Se dejan de recibir señal de esta estación el 29 del mes el día 30 se restablece la señal cuando se realiza mantenimiento correctivo en la estación. |
| Septiembre | CAMARA WEB CONSACÁ | Se apoya la instalación de la Cámara Web en el municipio de Sandoná. |
| Septiembre | MIJIB | Se realiza la instalación de estación para el monitoreo de flujos de lodos ubicada en la cuenca del río Mijitayo. |
| Septiembre | SCANDOAS | Se deja de recibir señal de las estaciones de SCANDOAS de Alto Tinajillas, Alto Jiménez y Santa Bárbara. |
| Octubre | SCANDOAS | A partir del 19 de Octubre y después de realizar mantenimientos correctivos en toda la red (Alto Jiménez, Alto Tinajillas y Santa Bárbara) y repetidoras (Alto de La Palma y Morasurco1), se restablece la señal de La red. |
| Noviembre | OBONUCO | Se cambia el sensor sismológico de la estación de Obonuco por un sensor triaxial de banda ancha. |
| Noviembre | FRAILEJON | Se retira Digitalizador de la estación para revisión en sede, la estación queda por fuera. |
| Noviembre | CAMARA WEB CONSACA | Se retira radio y Cámara Web de la estación para revisión en sede, la estación queda por fuera. |
| Diciembre | FRAILEJON | Se reinstala la estación el día 24 de Diciembre y se deja en prueba para evaluar el funcionamiento y la veracidad en las señales recibidas en sede. |
| Diciembre | MIJIA | Se realiza la instalación de la segunda estación para el monitoreo de flujos de lodos ubicada en la cuenca del río Mijitayo. |

2.1.2. Sismología

El evento más relevante durante el segundo semestre de 2010 fue la ocurrencia de una erupción el día 25 de agosto a las 4:00 a.m. Este evento eruptivo no fue de carácter explosivo y se manifestó como un episodio de tremor con la ocurrencia de una emisión de ceniza y gases de origen magmático por un periodo de aproximadamente 11 horas. Más adelante en este informe se describen los detalles de la erupción.

En cuanto a la sismicidad registrada el segundo semestre de 2010 se observa un claro incremento, especialmente de los sismos asociados con la fractura de material cortical (VT) y la combinación de fractura y movimiento de fluidos (HYB), este incremento inicia a partir de mediados del mes de agosto con sus picos más altos entre el 22 y el 25 del mismo mes. Después del episodio eruptivo la sismicidad se reduce dramáticamente y en general continúa en niveles bajos de ocurrencia con excepción de la segunda semana de diciembre en que se registra un pico de casi 100 sismos HYB (Figura 2.1.8, Tabla 2.1.6.).

En la Figura 2.1.9. se observa el histograma de energía diaria liberada, se resalta la energía de los eventos VT ocurridos entre el 22 y el 25 de agosto, asociados al evento eruptivo. También se

observa un pico de energía de un evento VT registrado los primeros días de diciembre. En la Tabla 2.1.7. se presenta una comparación de los totales de energía entre el segundo semestre de 2010 y el primer semestre de 2010, esta tabla contiene información discriminada por tipo de sismo.

En la Figura 2.1.10. se muestra la comparación de ocurrencia y energía liberada por tipo para los dos semestres de 2010, se observa que tanto en ocurrencia como en energía el segundo semestre supera al primer semestre en sus valores, con excepción de los valores de tremor en cuanto a energía liberada. La Figura 2.1.11. muestra las relaciones porcentuales de ocurrencia y energía para cada semestre de 2010, es de notar que la energía de los eventos VT ocupa casi el 100% del diagrama debido a los eventos registrados entre el 22 y 25 de agosto de 2010.

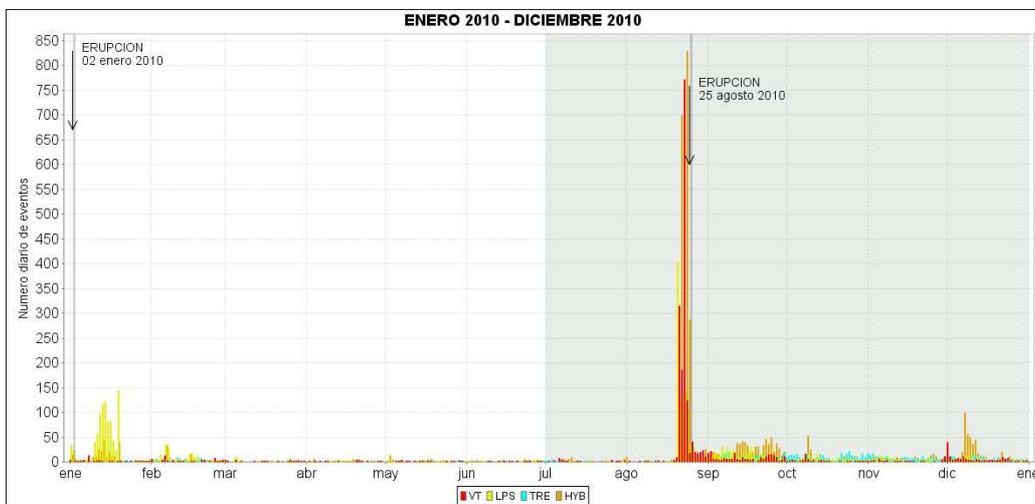


Figura 2.1.8. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.



Figura 2.1.9. Histograma de energía liberada diaria, en términos de su raíz cuadrada, de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

Las figuras desde la 2.1.12. a la 2.1.19. muestran de manera gráfica el comportamiento de la sismicidad en el segundo semestre de 2010 en cuanto a su ocurrencia y energía liberada, comparándolas con lo calculado para el primer semestre de ese año. Se observan cambios importantes para todos los tipos de sismos, especialmente en el post-eruptivo.

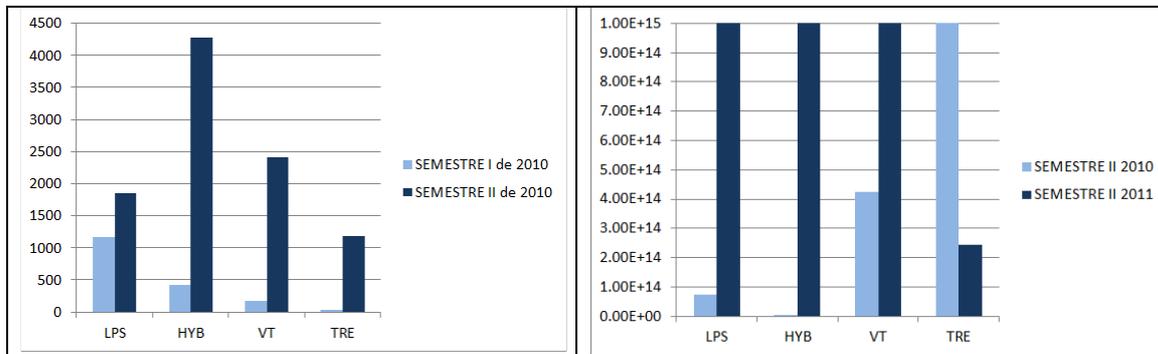


Figura 2.1.10. Relaciones porcentuales de la variación de la sismicidad del segundo semestre del 2010 en comparación con el primer semestre de 2010. Izquierda, en cuanto a número de sismos y derecha, energía sísmica liberada.

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

| TIPO DE SISMO | Semestre II de 2010 | Semestre I de 2010 |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| Largo Periodo (LP) | 1853 | 1167 |
| Híbrido (HYB) | 4268 | 421 |
| Volcano-Tectónico (VT) | 2414 | 170 |
| Tremor (TRE) | 1183 | 35 |
| TOTAL | 9718 | 1793 |

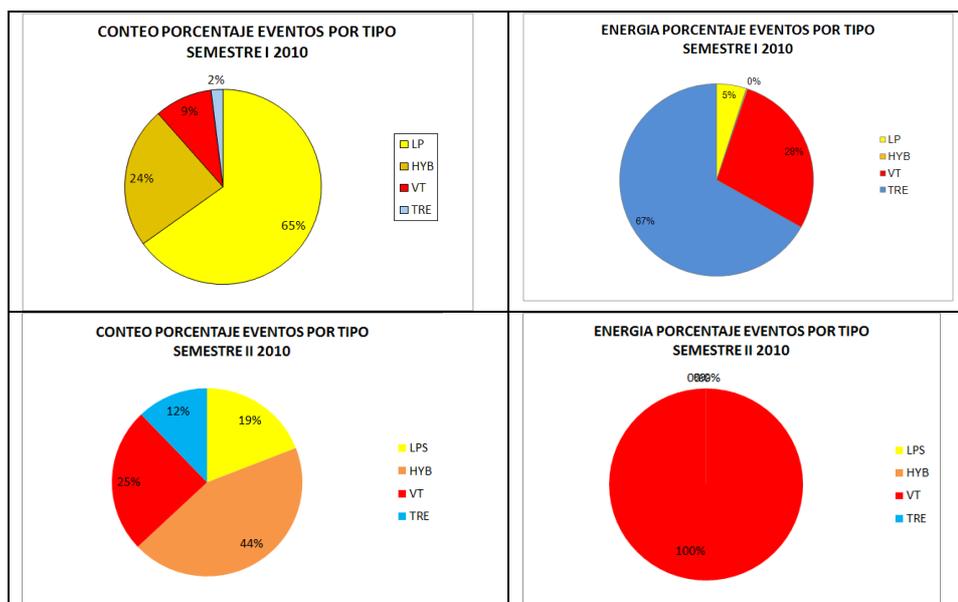


Figura 2.1.11. Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el primer semestre de 2010 (izquierda) y el segundo semestre de 2010 (derecha).

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

| TIPO DE SISMO | Semestre II de 2010 | Semestre I de 2010 |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| Largo periodo (LP) | 1.10E+15 | 7.50E+13 |
| Híbrido (HIB) | 4.06E+15 | 3.05E+12 |
| Volcano-Tectónico (VT) | 3.14E+17 | 4.23E+14 |
| Tremor (TRE) | 2.44E+14 | 1.01E+15 |
| TOTAL | 1.51E+15 | 3.19E+17 |

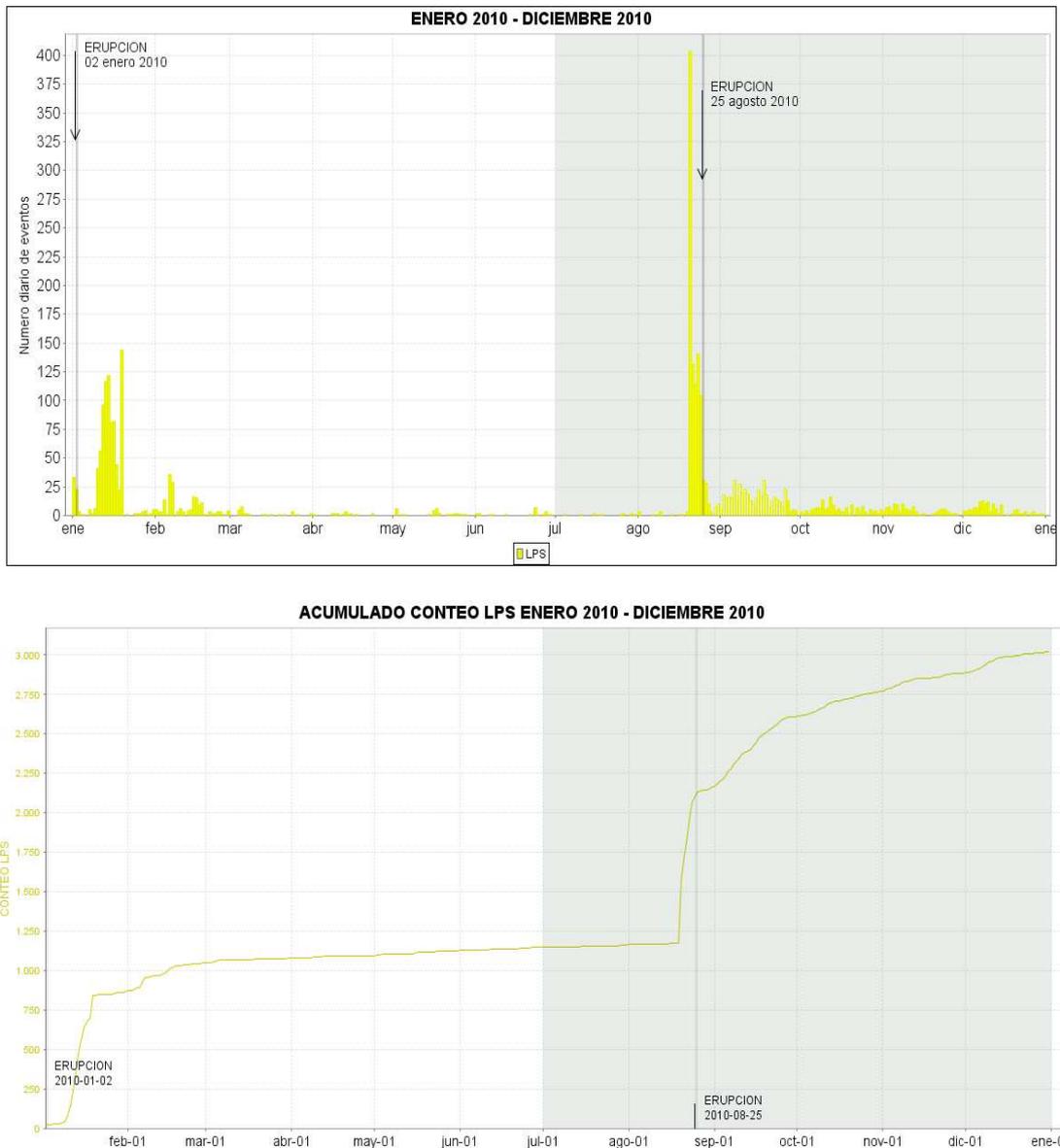


Figura 2.1.12. Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y acumulado de sismos LP (abajo) durante el primero y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

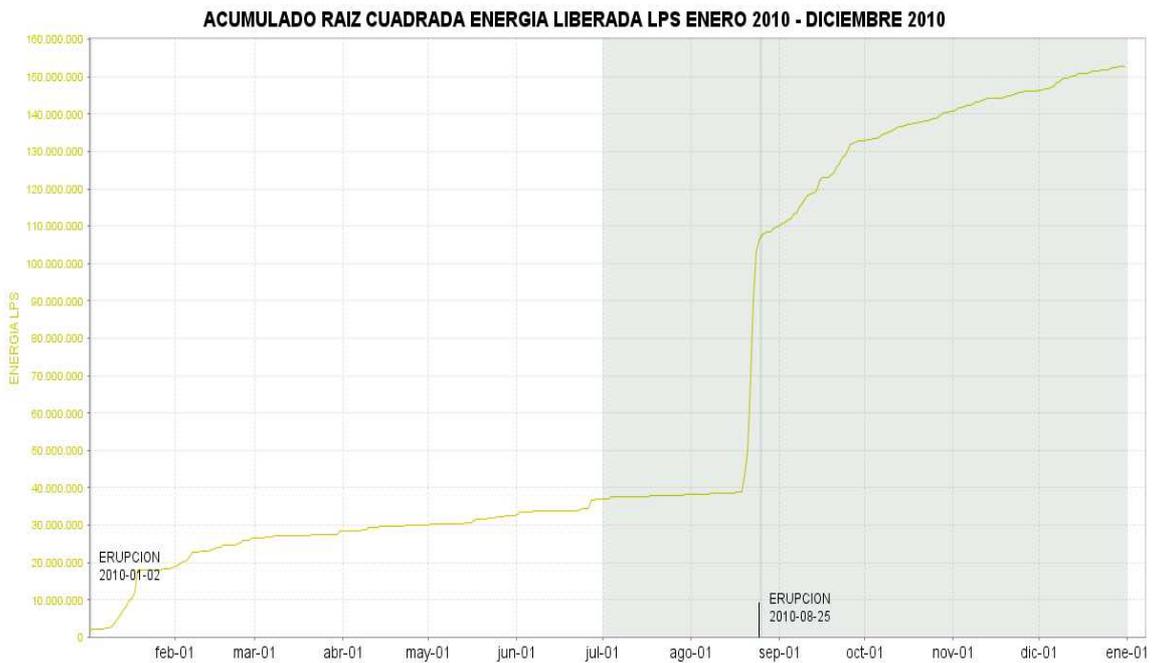


Figura 2.1.13. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

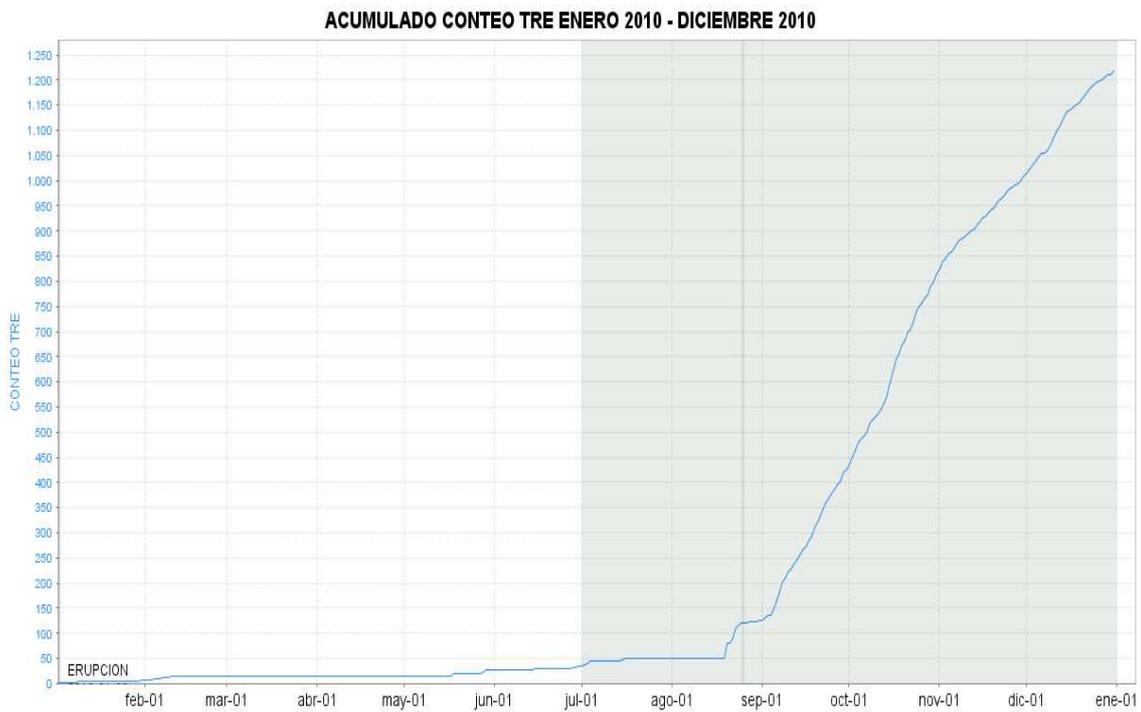
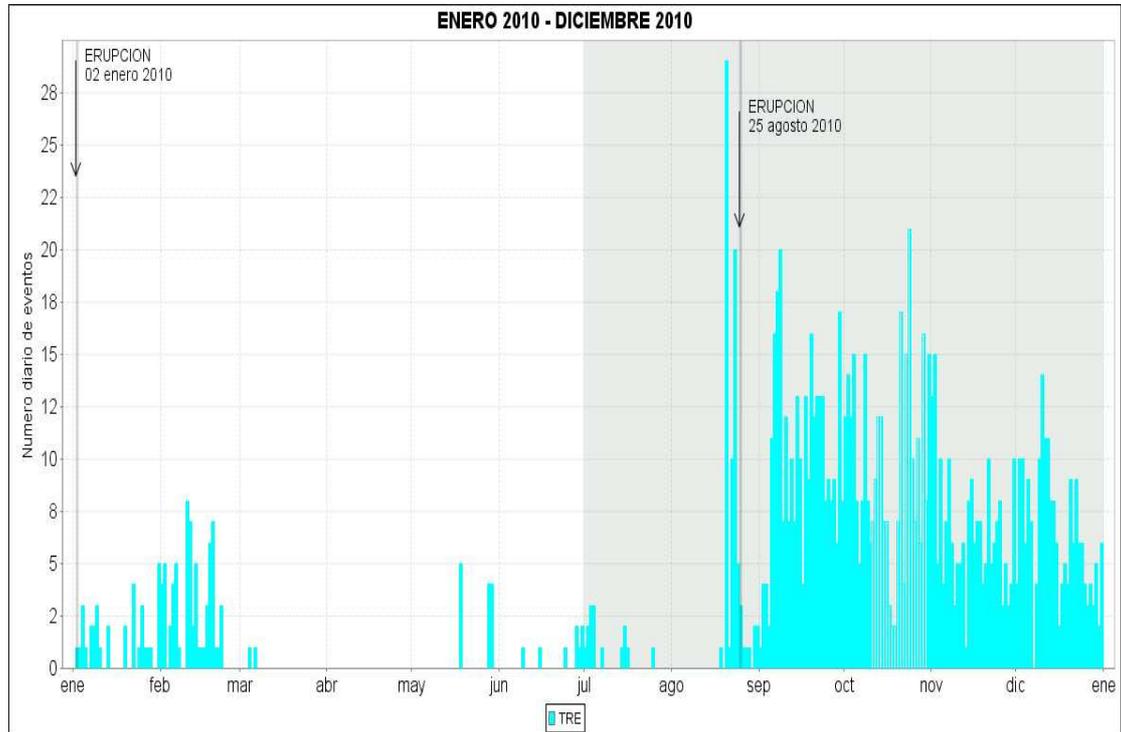


Figura 2.1.14. Histograma de número diario de episodios TRE (arriba) y acumulado de episodios TRE (abajo) durante el primer y segundo semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

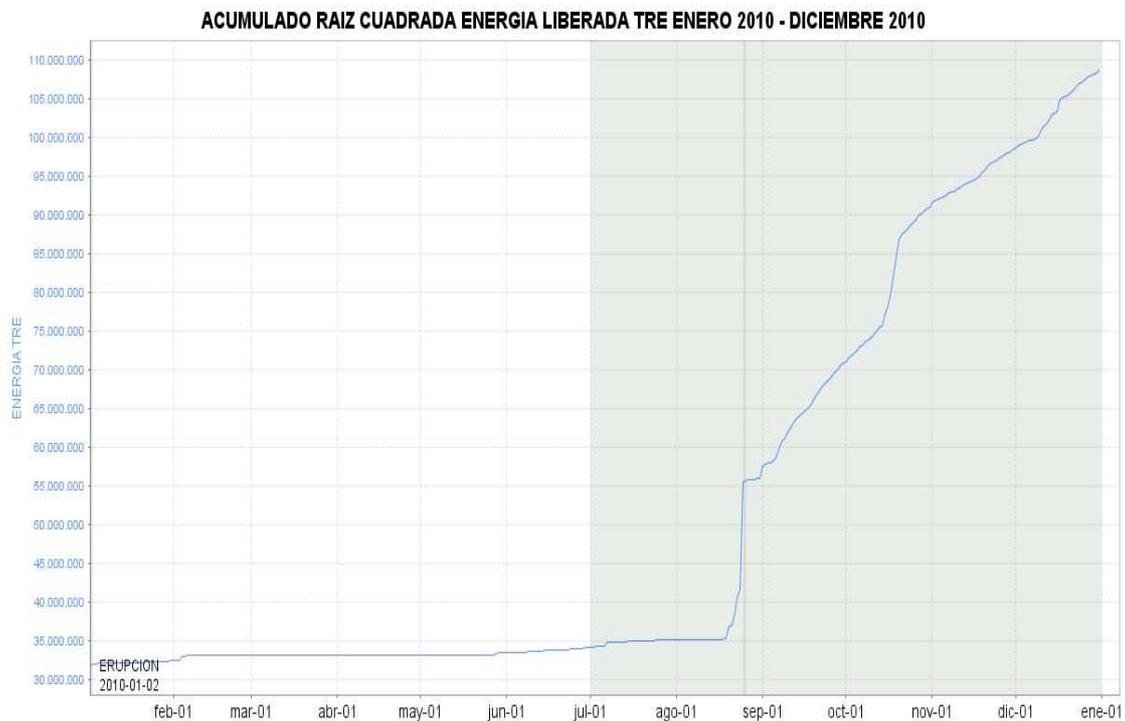
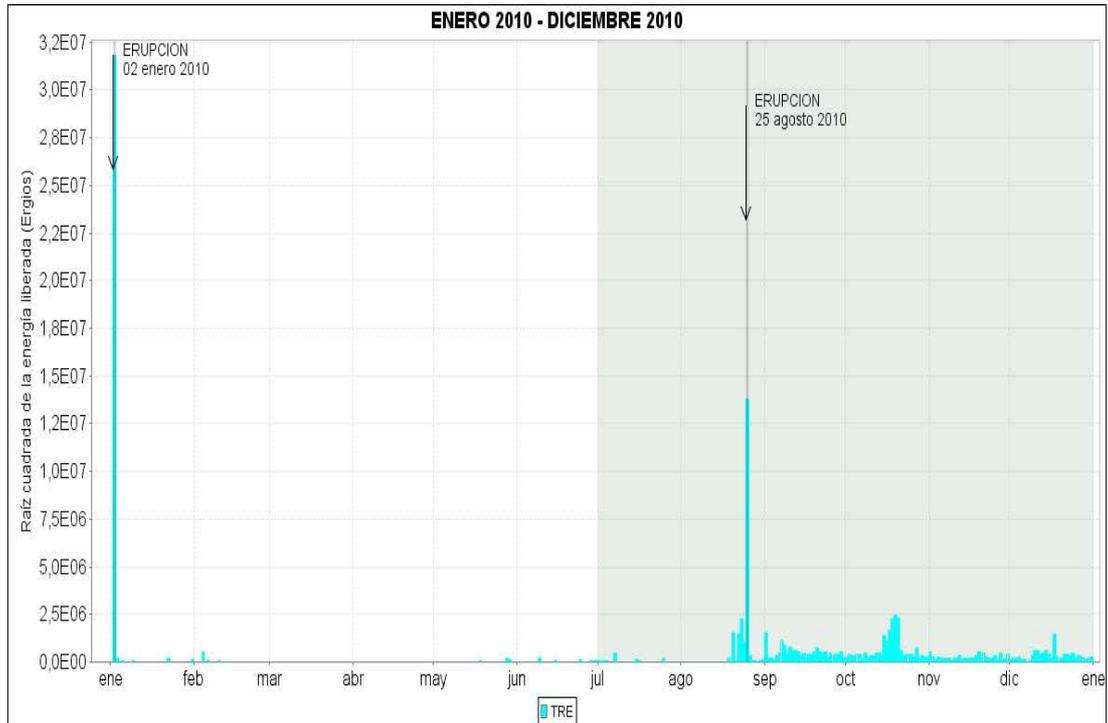


Figura 2.1.15. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos TRE (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

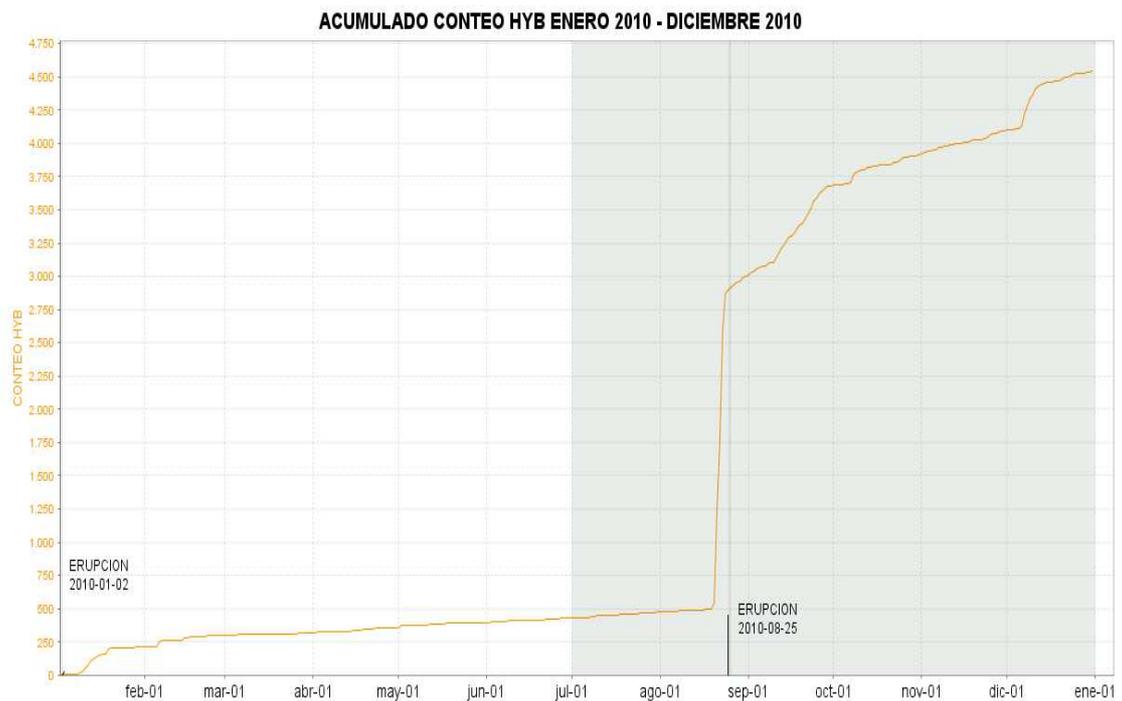
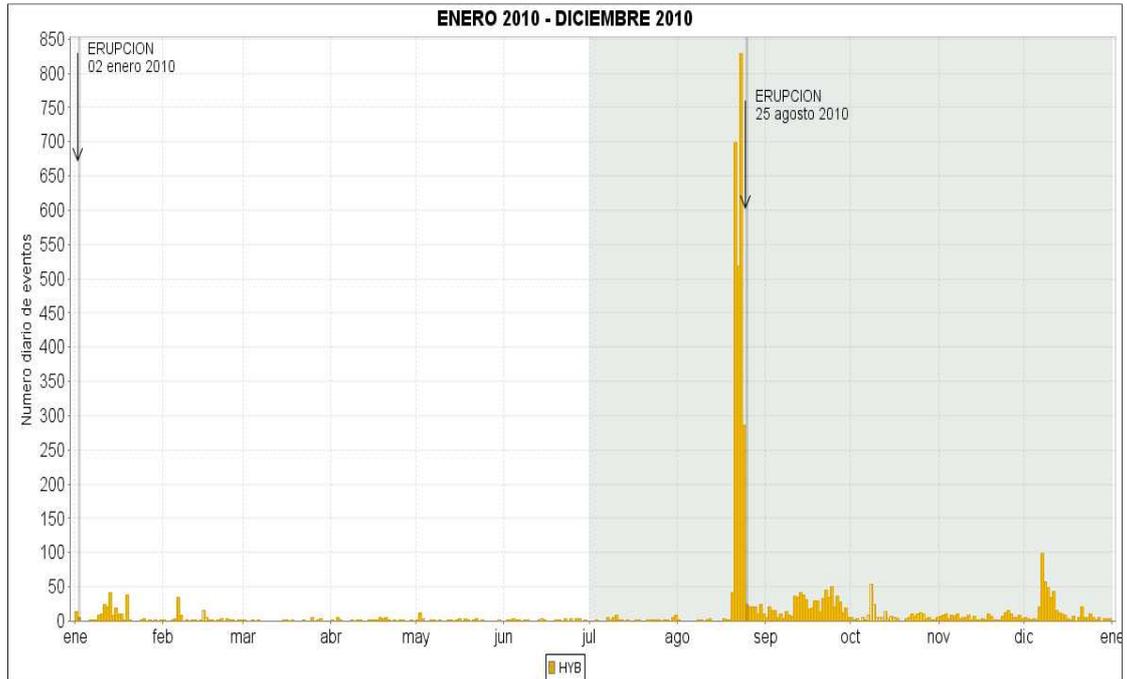


Figura 2.1.16. Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y acumulado de sismos HYB (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

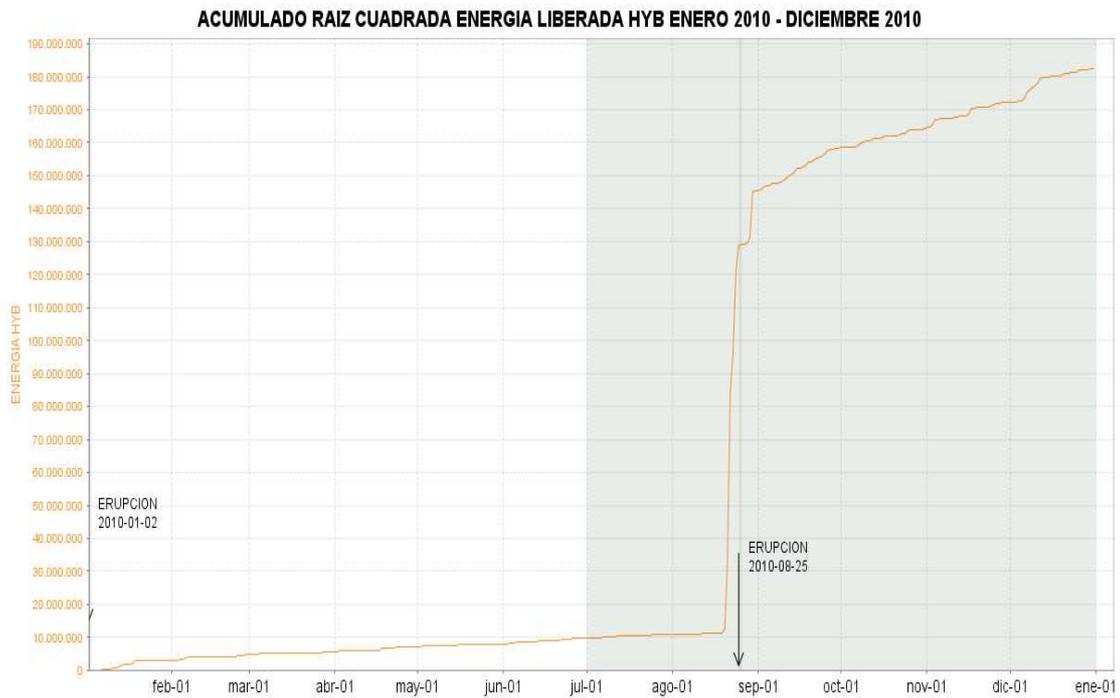
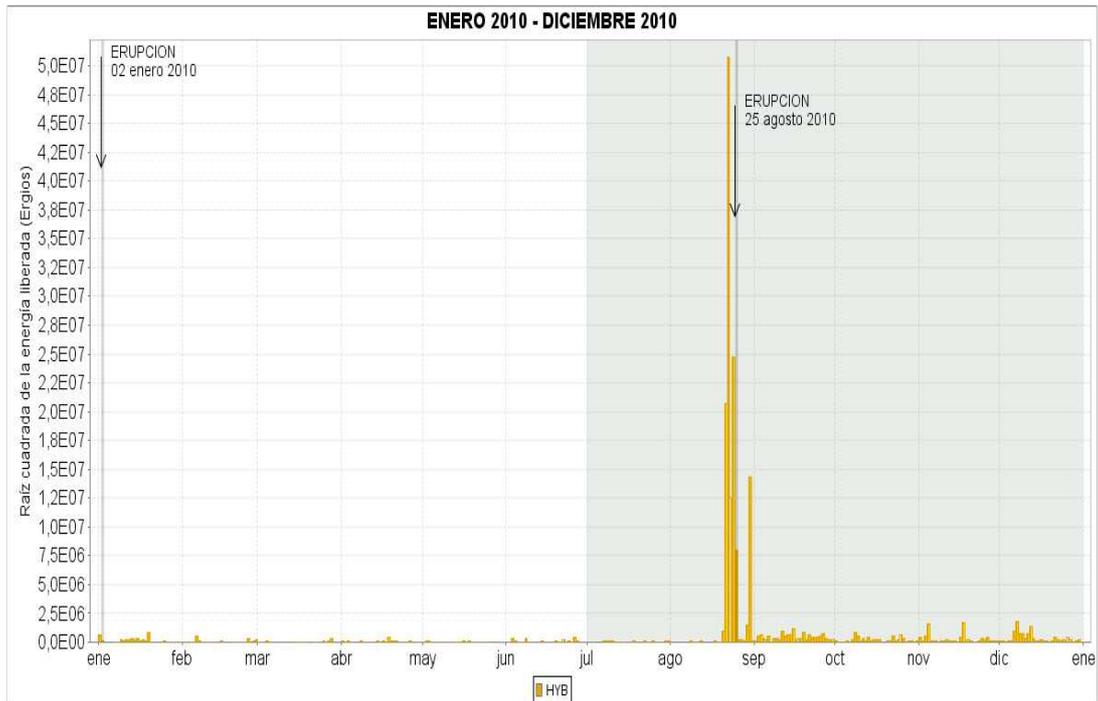


Figura 2.1.17. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

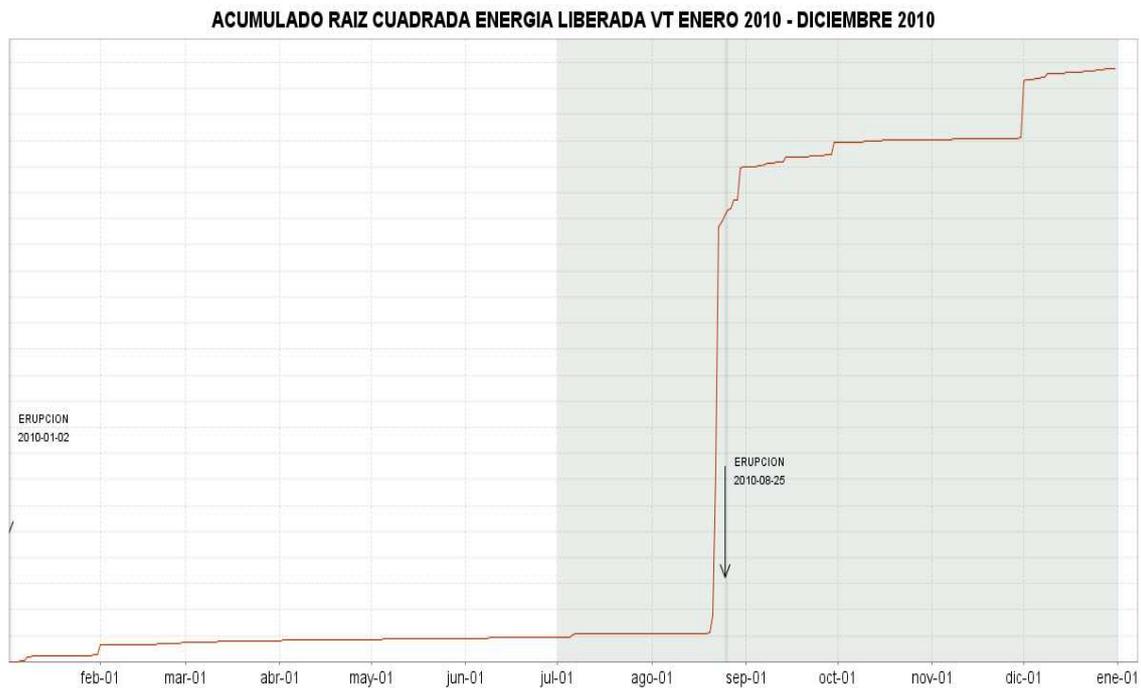
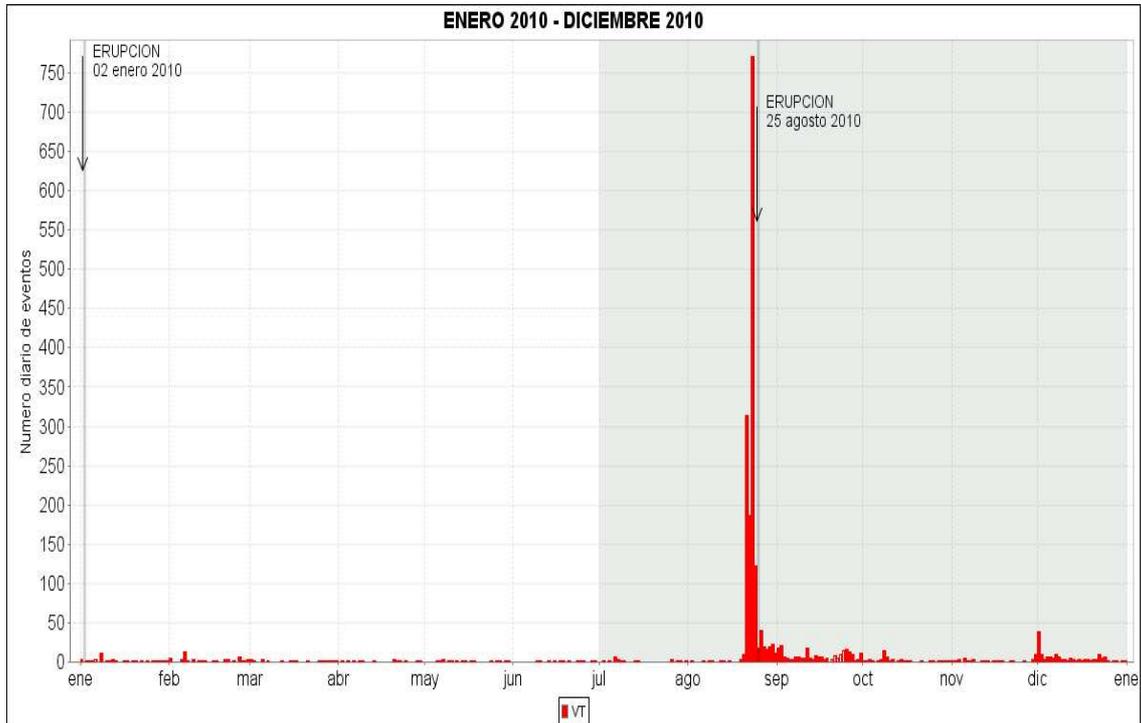


Figura 2.1.18. Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y acumulado de sismos VT (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

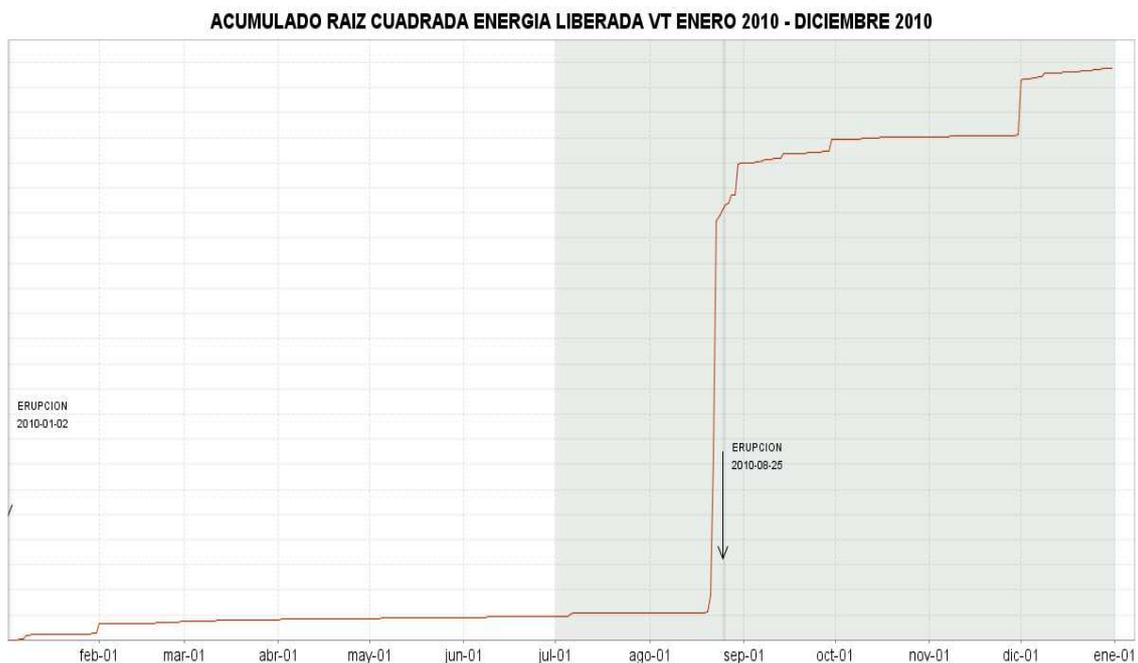
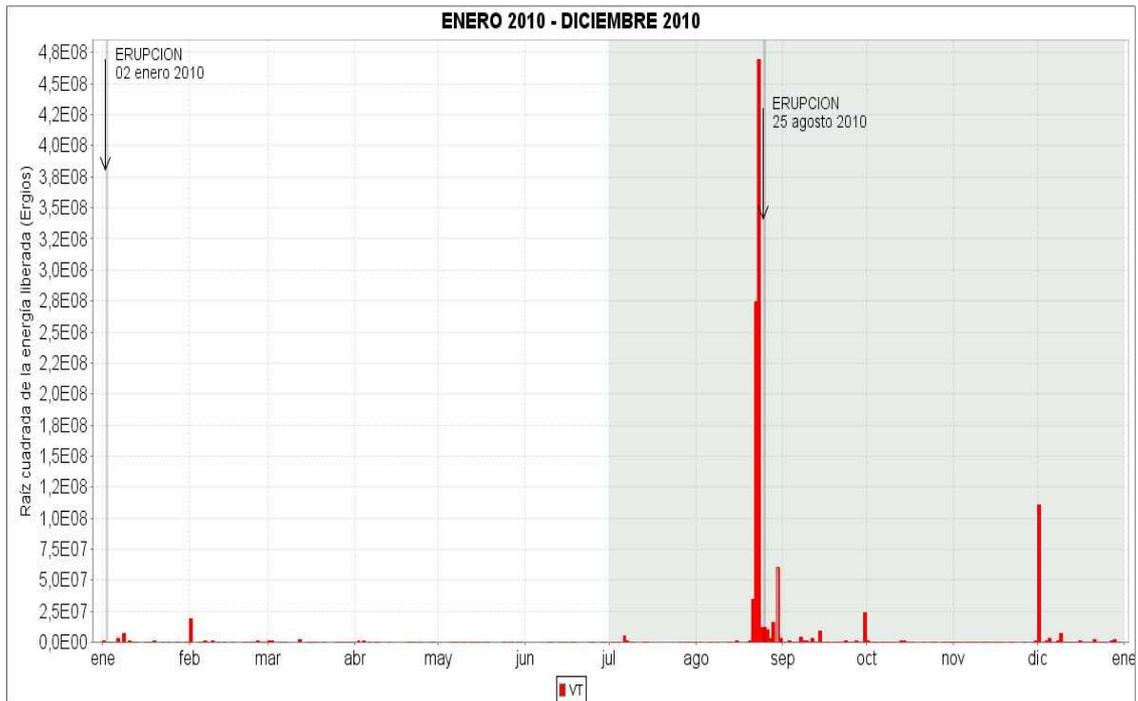


Figura 2.1.19. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el primer y segundo semestres de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

En las Figuras 2.1.20. a 2.1.23. se muestran detalles de parámetros propios de los sismos que involucran únicamente fracturamiento de material cortical y sismos que contienen la mezcla de este fenómeno con movimiento de fluidos. En su gran mayoría los eventos son superficiales (< 2 km de

profundidad) y con magnitudes locales menores que 0.6 en la escala de Richter. Sin embargo varios sismos ocurridos entre el 22 y 25 de agosto registraron magnitudes entre 2.5 y 4.5 grados.

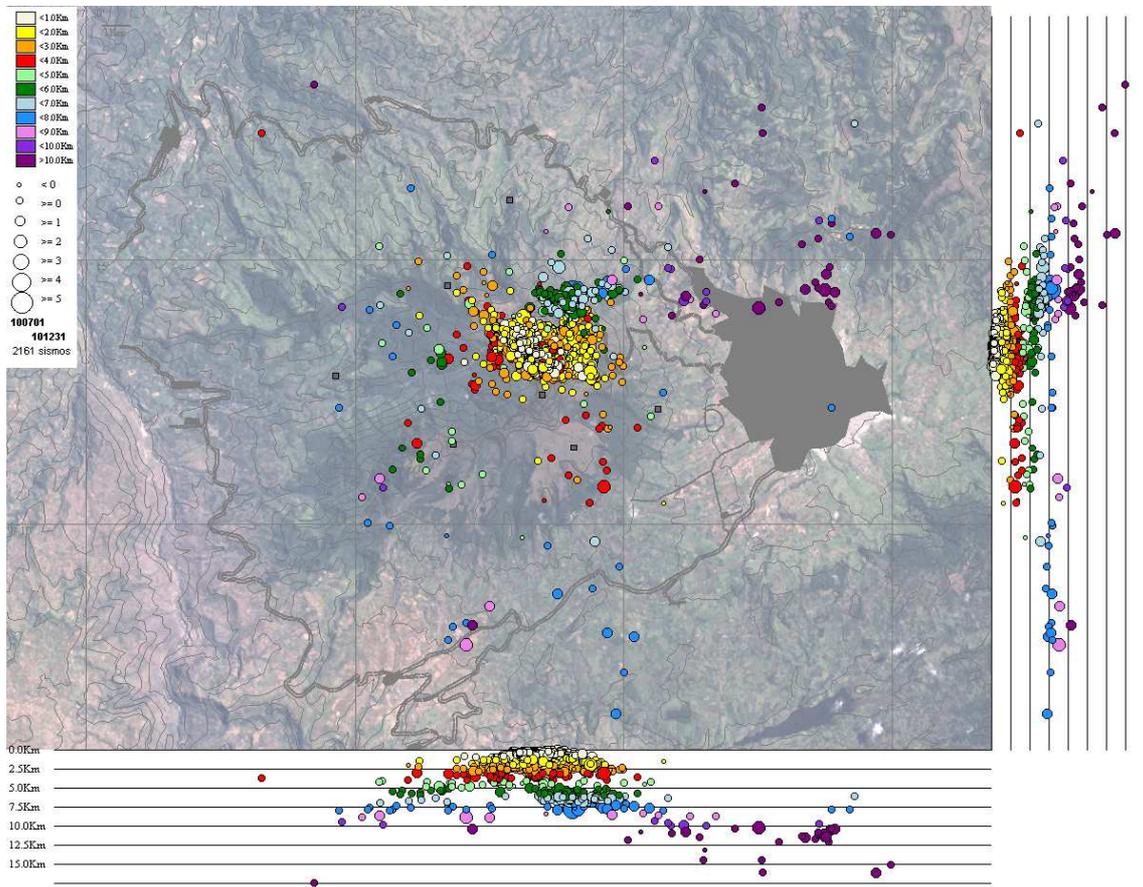


Figura 2.1.20. Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el segundo semestre de 2010. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2.5 Km.

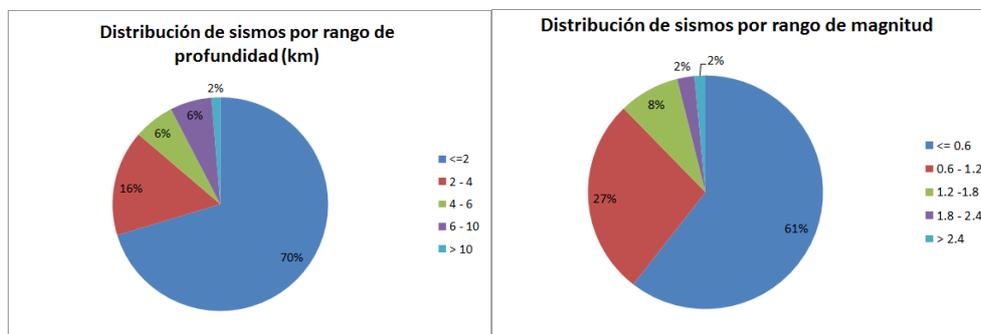


Figura 2.1.21. Relaciones porcentuales por rangos de profundidad (izquierda) y por rangos de magnitud local (derecha) para los sismos VT localizados durante el segundo semestre de 2010. A la derecha de cada diagrama se presentan sus convenciones.

En las gráficas de latitud vs tiempo y longitud vs tiempo se puede observar el incremento en la ocurrencia a partir de la tercera semana de agosto, así como también una distribución de la sismicidad cercana al cráter principal con excepción de algunos sismos más dispersos.

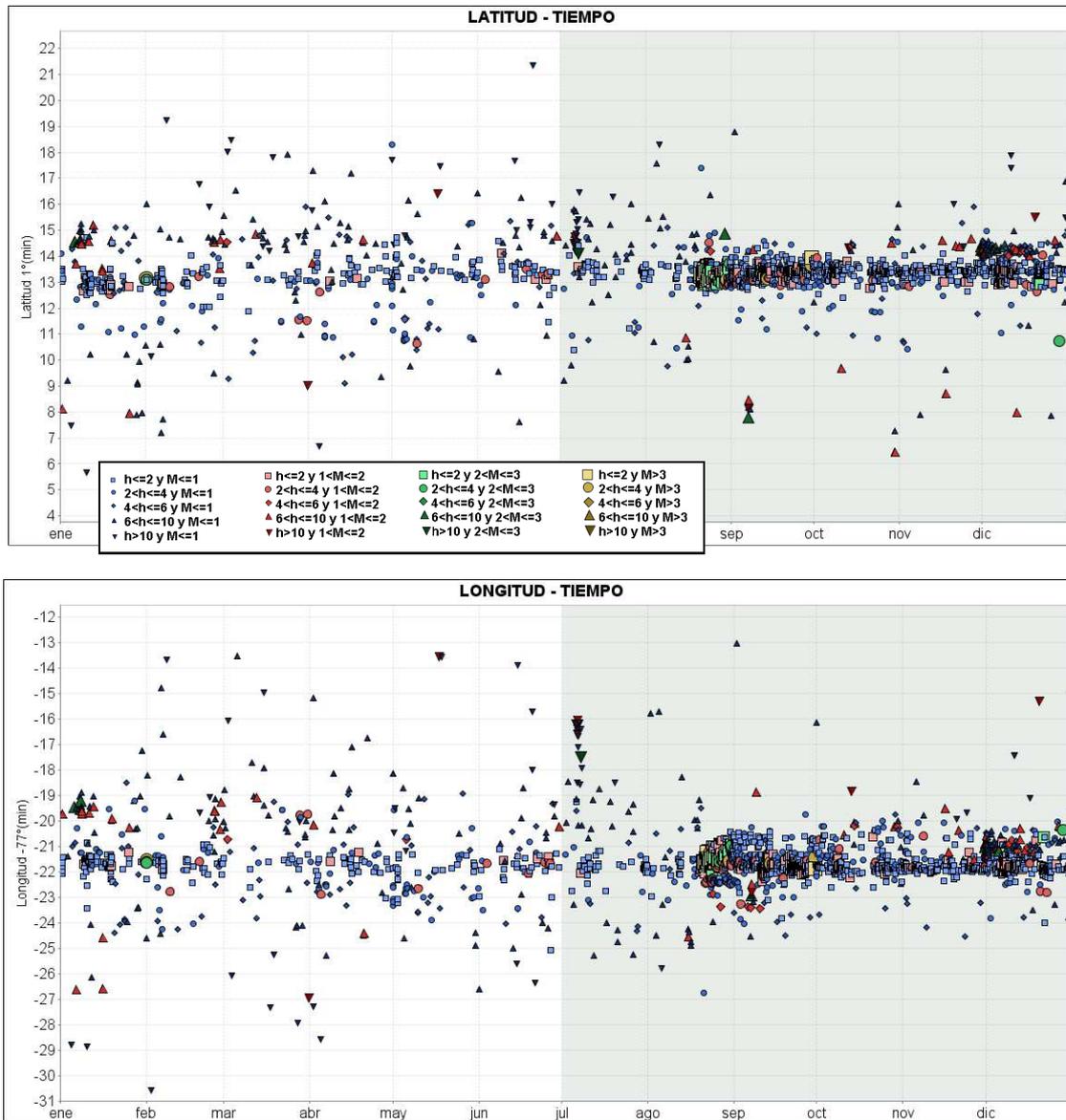


Figura 2.1.22. Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestres de 2010. En la gráfica superior se muestra las latitudes y en la inferior las longitudes.

Respecto a la profundidad vs tiempo se observa que en general la sismicidad tuvo una tendencia a superficializarse después de la erupción del 25 de agosto.

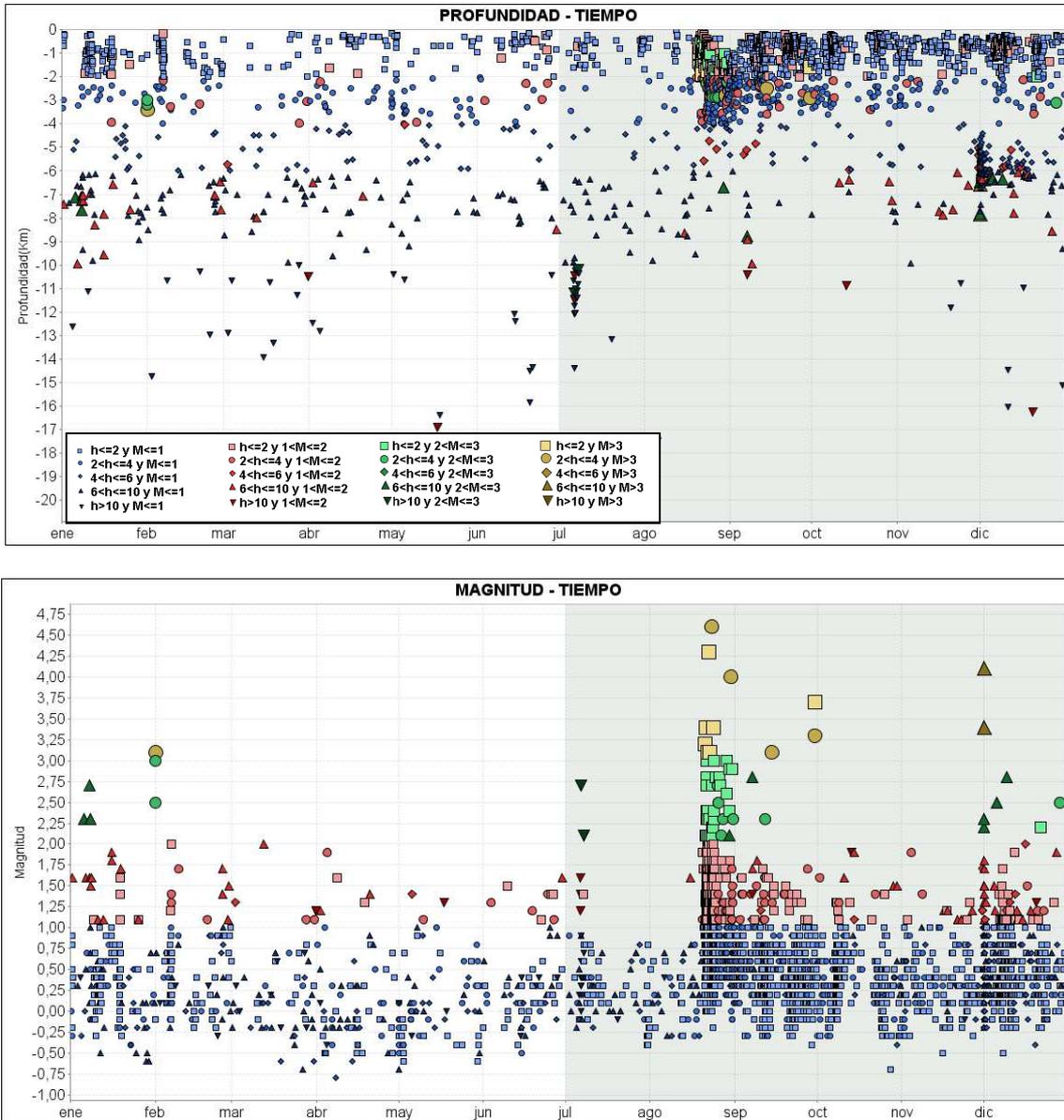


Figura 2.1.23. Evolución espacio temporal de sismos VT durante el primer y segundo semestres de 2010. En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes

A continuación se describe la sismicidad destacada a lo largo del segundo semestre de 2010.

Durante el mes de julio se destaca la ocurrencia de dos enjambres (gran cantidad de sismos en un periodo corto de tiempo), de bajo nivel energético, el primero ocurrió entre las 11:28 p.m. del 14 de julio y las 2:07 a.m. del 15 de julio, sismos no clasificables, totalizando 51 eventos (Figura 2.1.24.), y el segundo enjambre, ocurrió entre las 5:30 p.m. del 30 de julio y las 6:07 a.m. del 31 de julio, totalizando 119 eventos, de los cuales 6 sismos son clasificables (Figura 2.1.25.). En su mayoría estos eventos presentaron características tanto de movimiento de fluidos como de fractura de material cortical.

Adicionalmente se resaltan los eventos TRE ocurridos el 3 y el 4 julio, a las 7:07 p.m. y a las 8:54 p.m. por presentar características monocromáticas con un valor de frecuencia igual a 2.35 y 2.39 Hz en la mayoría de las estaciones de la red sísmica de Galeras (Figuras 2.1.26. y 2.1.27.). De igual forma es importante destacar la ocurrencia de un evento clasificado como Tornillo – TOR, registrado el 5 de julio, a las 00:57 a.m, su espectro de Fourier mostró frecuencias dominantes de 2.1 y 5.3 Hz en varias de las estaciones de la red sísmica de Galeras (Figura 2.1.28.).

También se resaltan algunos eventos asociados a movimiento de fluidos, tipo LP, que mostraron frecuencias dominantes claramente diferenciables en su espectro, como las que se muestran en las Figuras 2.1.29. y 2.1.30..

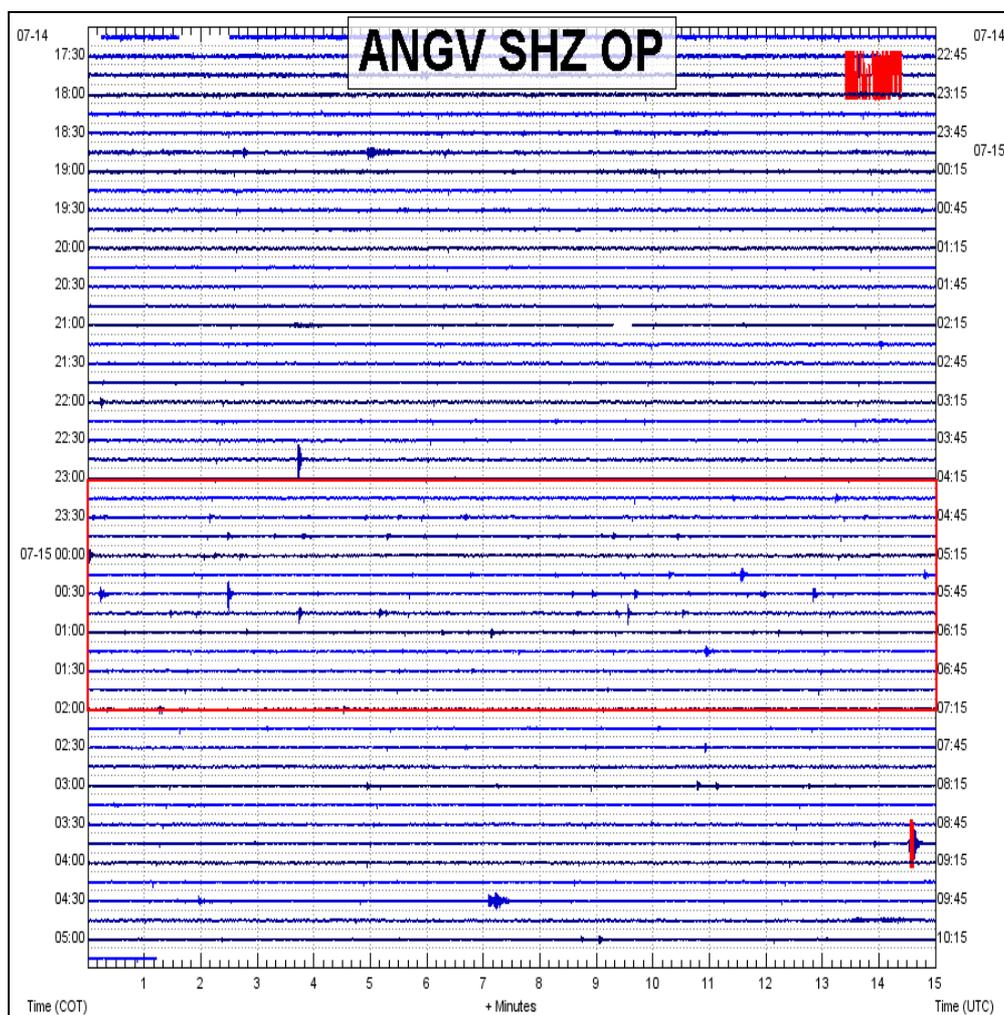


Figura 2.1.24. Sismograma de la estación Anganoy (ANGV-componente Vertical), el recuadro en coloración rojo, muestra el enjambre de eventos ocurrido entre el 14 y 15 de julio de 2010.

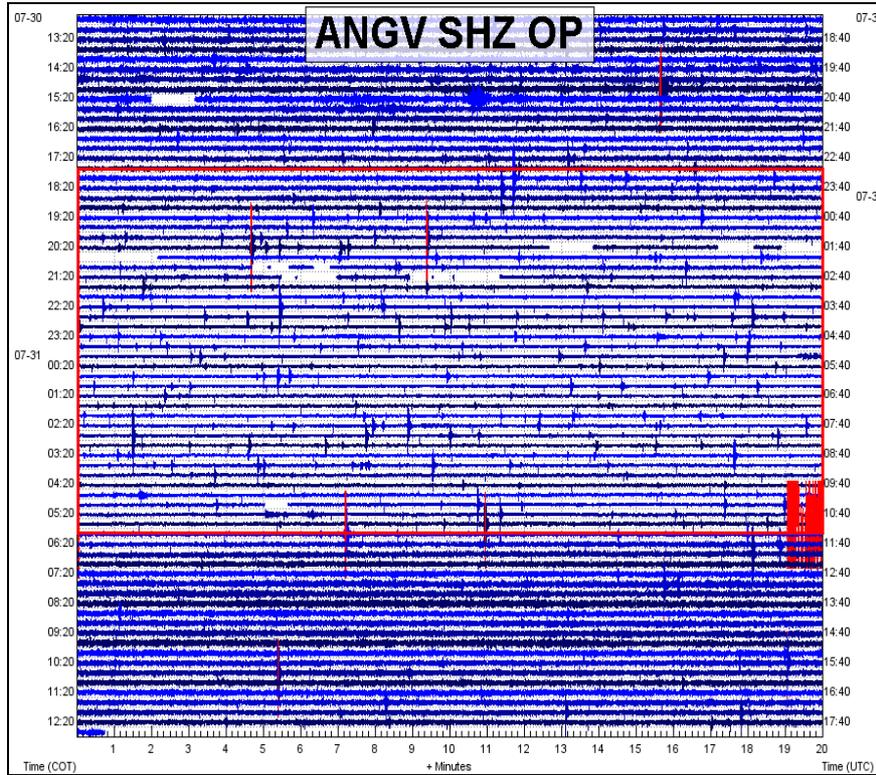


Figura 2.1.25. Sismograma de la estación Anganoy (ANGV-componente Vertical), el recuadro en coloración rojo, muestra el enjambre de eventos ocurrido entre el 30 y 31 de julio de 2010.

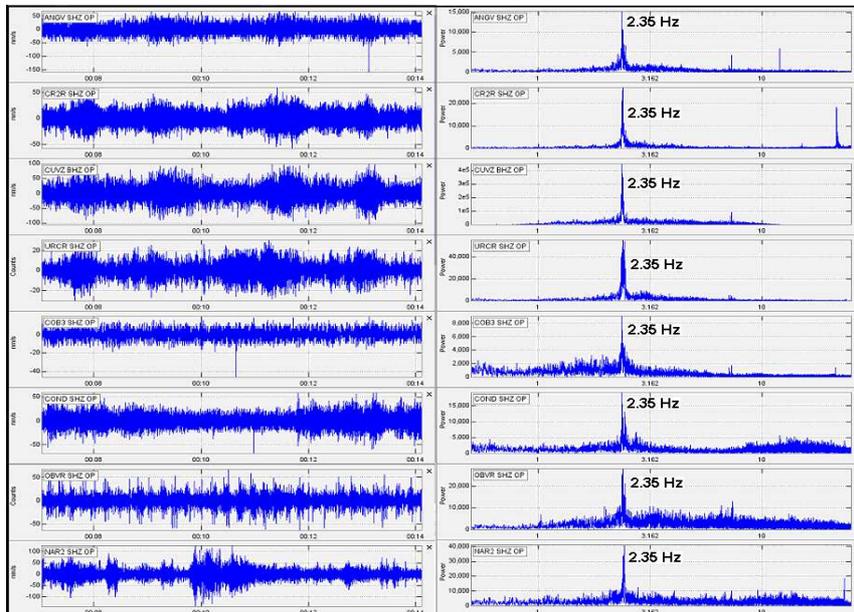


Figura 2.1.26. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE ocurrido el 3 de julio a las 7:07 p.m.

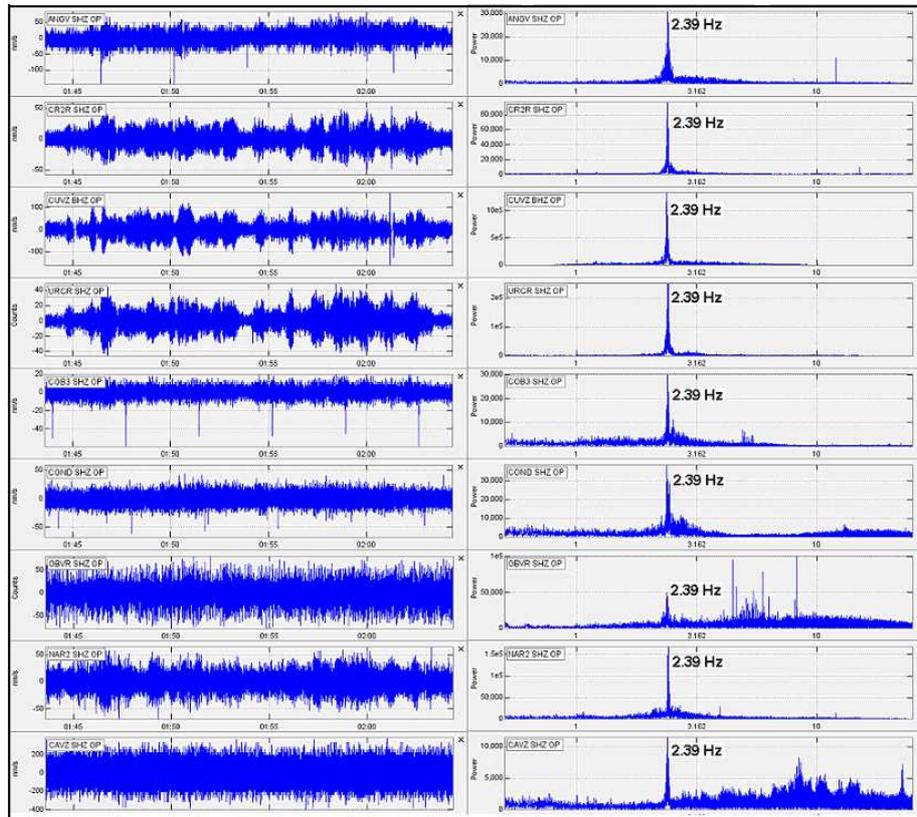


Figura 2.1.27. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE ocurrido el 4 de julio a las 8:54 p.m.

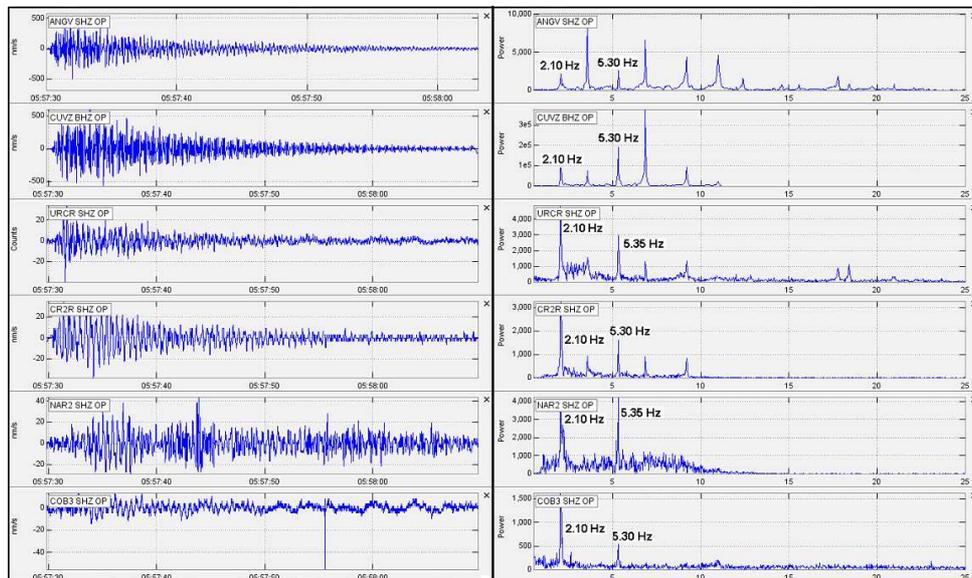


Figura 2.1.28. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR ocurrido el 5 de julio a las 00:57 a.m.

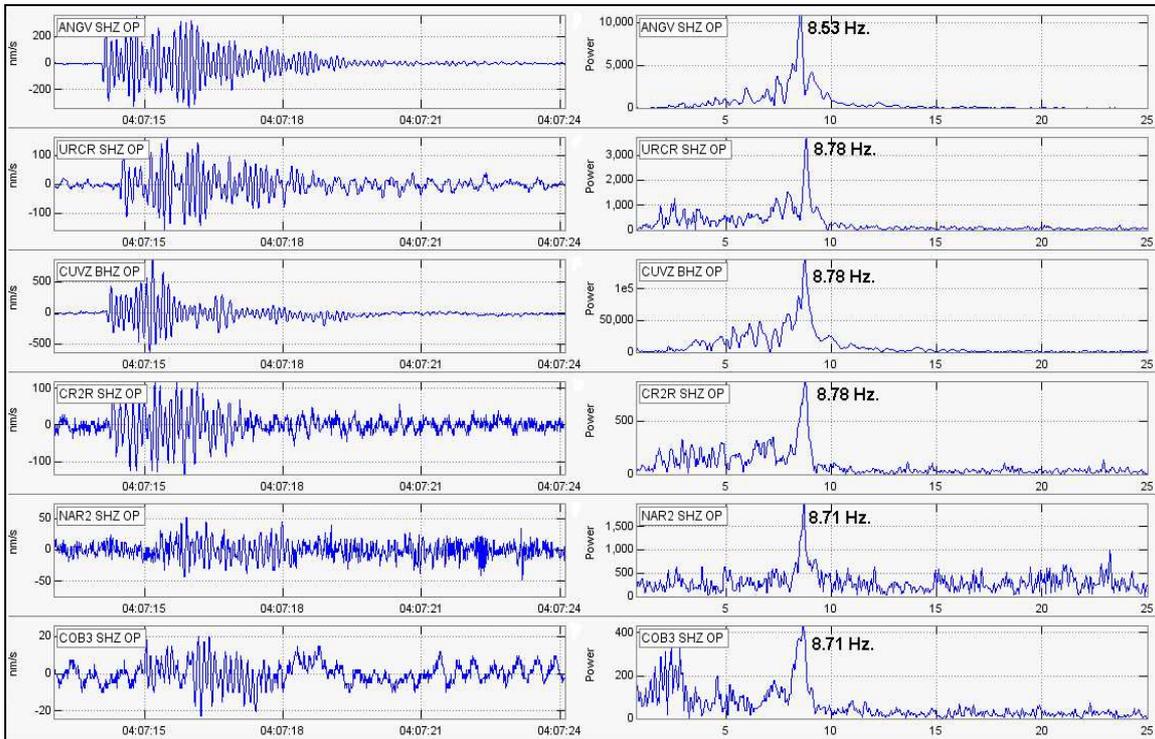


Figura 2.1.29. Sismogramas (componente Vertical) y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 15 de julio a las 11:07 p.m.

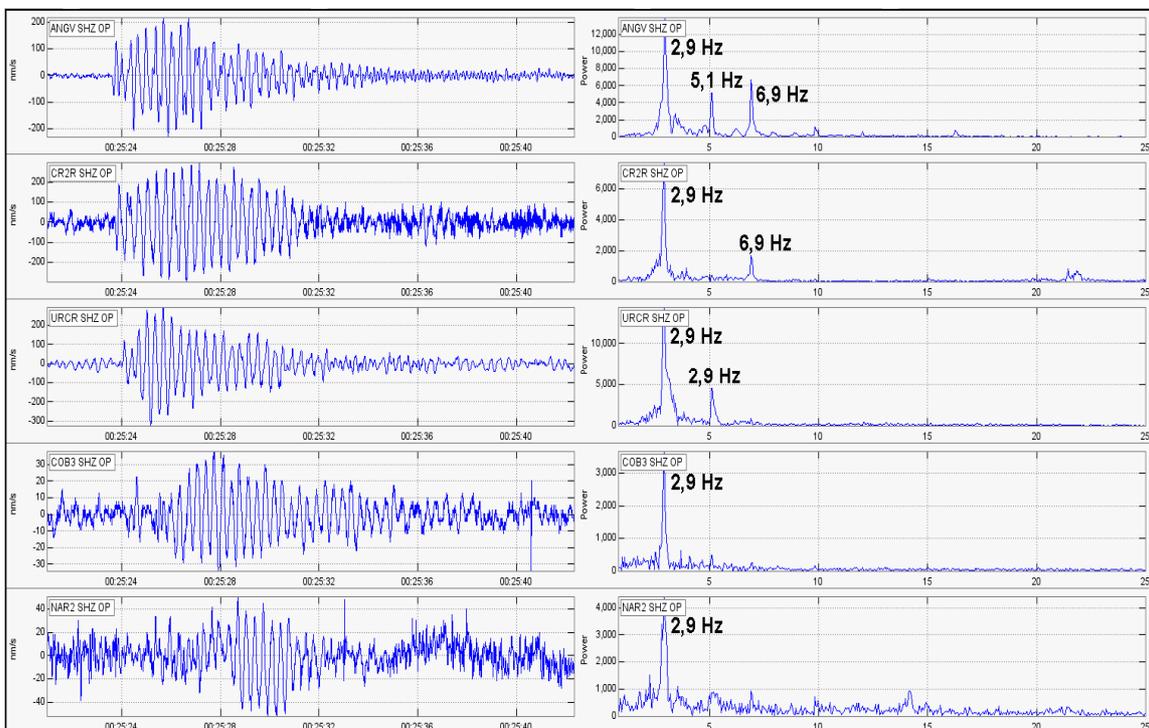


Figura 2.1.30. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 22 de julio de 2010 a las 7:25 p.m.

De igual forma, se destaca la ocurrencia del episodio de tremor espasmódico registrado el 25 de julio de 2010 a las 9:59 p.m., por su duración de 5,5 minutos y una energía liberada de ondas de cuerpo de $3,43 \times 10^{10}$ ergios en la estación de referencia Anganoy (ANGV) (Figura 2.1.31.).

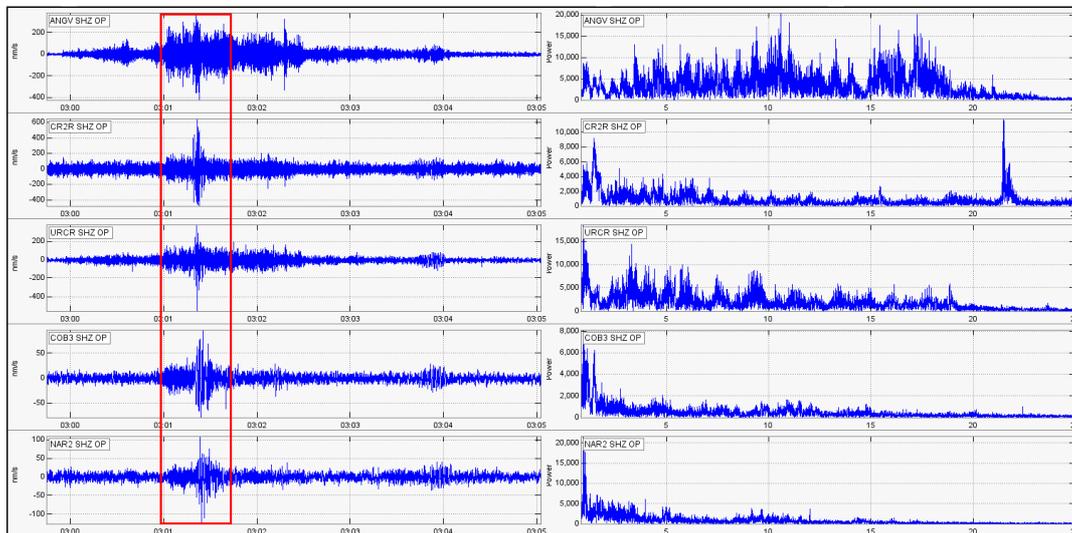


Figura 2.1.31. Sismogramas y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 25 de julio de 2010 a las 9:59 p.m. El recuadro en rojo resalta el registro de un evento regional el cual coincidió con el registro del tremor.

2.1.2.1. Evento eruptivo del 25 de agosto de 2010

El episodio eruptivo fue precedido por un enjambre de sismos volcánicos asociados tanto con procesos de fracturamiento de material cortical, como de dinámica de fluidos, así como también por aquellos eventos que mezclan los dos tipos de procesos. El enjambre comenzó a las 2:36 a.m., del 20 de agosto y se prolongó hasta pocas horas antes de la erupción, destacándose la ocurrencia de eventos VT muy energéticos, algunos de los cuales fueron reportados como sentidos por la población en inmediaciones del volcán. Se registraron eventos tipo HYB, eventos LP e incluso episodios de Tremor.

En el periodo de desarrollo del enjambre las emisiones de SO_2 fueron bajas o nulas e infortunadamente las condiciones climáticas en la cima volcánica no permitieron documentar la actividad superficial, pero la evaluación de los diferentes parámetros de la vigilancia volcánica permitió prever la presencia de magma a niveles superficiales, dando lugar a un sistema volcánico parcialmente sellado e inestable y que podría evolucionar a estados eruptivos, razón por la cual en agosto 23 se tomó la decisión de cambiar el nivel de actividad de Galeras a Naranja ■ “Il Erupción probable en término de días o semanas”.

El 25 de agosto, hacia la 1:17 a.m., las características de los procesos generadores de la sismicidad registradas hasta ese momento cambiaron, mostrando la ocurrencia de un evento asociado con dinámica de fluidos. Posteriormente a las 4:00 a.m., se desencadena un proceso eruptivo evidenciado por el registro de un episodio de Tremor, el cual no tuvo características de explosivo. En ese momento se cambia nuevamente el nivel de actividad del volcán a I - Rojo, ■ “Erupción inminente o en curso”.

En la Figura 2.1.32, se presenta el sismograma de la estación de corto periodo Anganoy (1 km al E del cráter), entre el 19 de agosto a las 6:00 a.m., y el 25 de agosto a las 6:00 a.m., donde se identifica la ocurrencia del enjambre con sus variaciones energéticas y el inicio del proceso eruptivo.

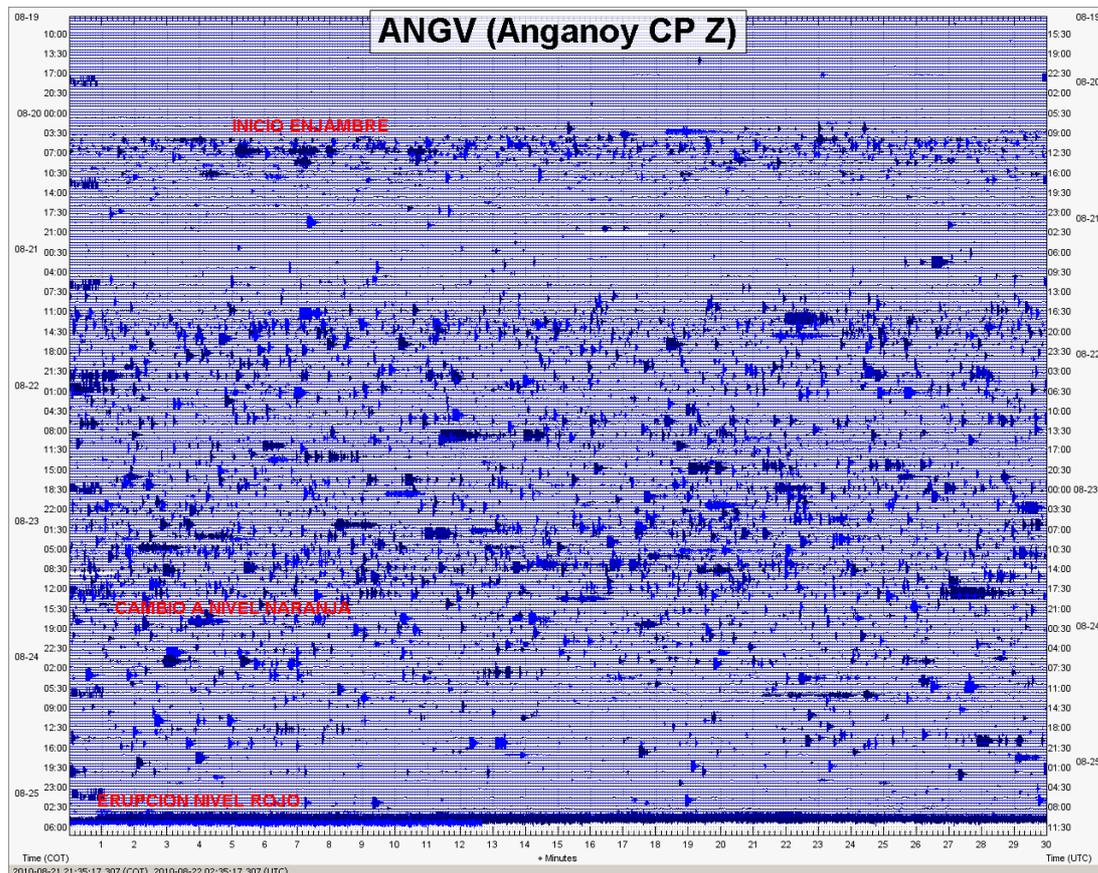


Figura 2.1.32. Sismograma de la estación Anganoy, entre el 19 y el 25 de agosto de 2010.

La erupción comenzó a las 4:00 a.m. del 25 de agosto, su señal sísmica corresponde a un episodio de Tremor que no alcanzó amplitudes lo suficientemente grandes como para saturar los registros de las estaciones más cercanas al cono volcánico. Su duración fue aproximadamente de 11 horas, siendo la fase más energética la registrada entre las 4:00 a.m., y las 9:00 a.m. En su parte final se evidenció que se continuaba registrando sismicidad, de manera similar al periodo inmediatamente anterior al evento eruptivo, pero con niveles de ocurrencia y energía un poco más bajos, sugiriendo que el sistema volcánico retornaba a condiciones ligeramente más estables, por lo cual la actividad cambió a Nivel II - Naranja ■ “Erupción probable en término de días o semanas”, que es el nivel en que se mantuvo hasta el 31 de agosto de 2010 (Figura 2.1.33.). Posteriormente al evento eruptivo, volvió a presentarse sismicidad asociada con procesos de fracturamiento de material cortical, tipo VT, destacándose eventos muy energéticos, con magnitud local estimada, de hasta 4,0 en la escala de Richter, y algunos de estos eventos, nuevamente se reportaron como sentidos, especialmente en las veredas aledañas a la carretera de ascenso a la cima de Galeras. Al finalizar el mes de agosto continuó registrándose este tipo de sismicidad a manera de enjambre, pero con ocurrencia y energía mucho menor que la registrada antes del evento eruptivo (Figura 2.1.34.).

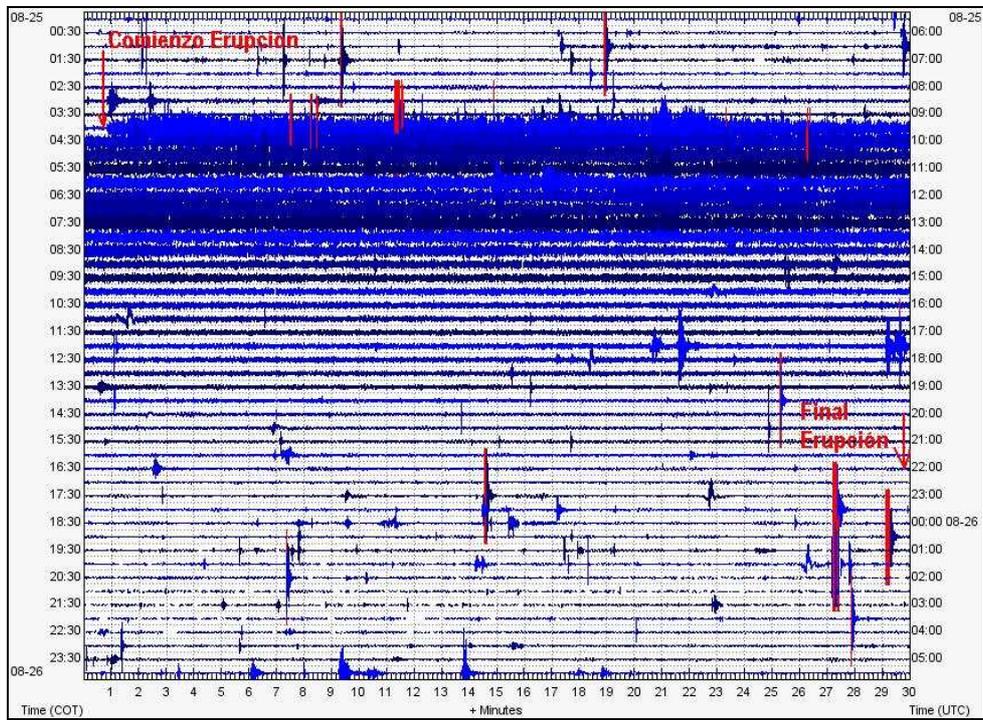


Figura 2.1.33. Sismograma de la estación sísmica de banda ancha Cufiño (1,8 km ENE del cráter), correspondiente al 25 de agosto de 2010, fecha de la ocurrencia del evento eruptivo.

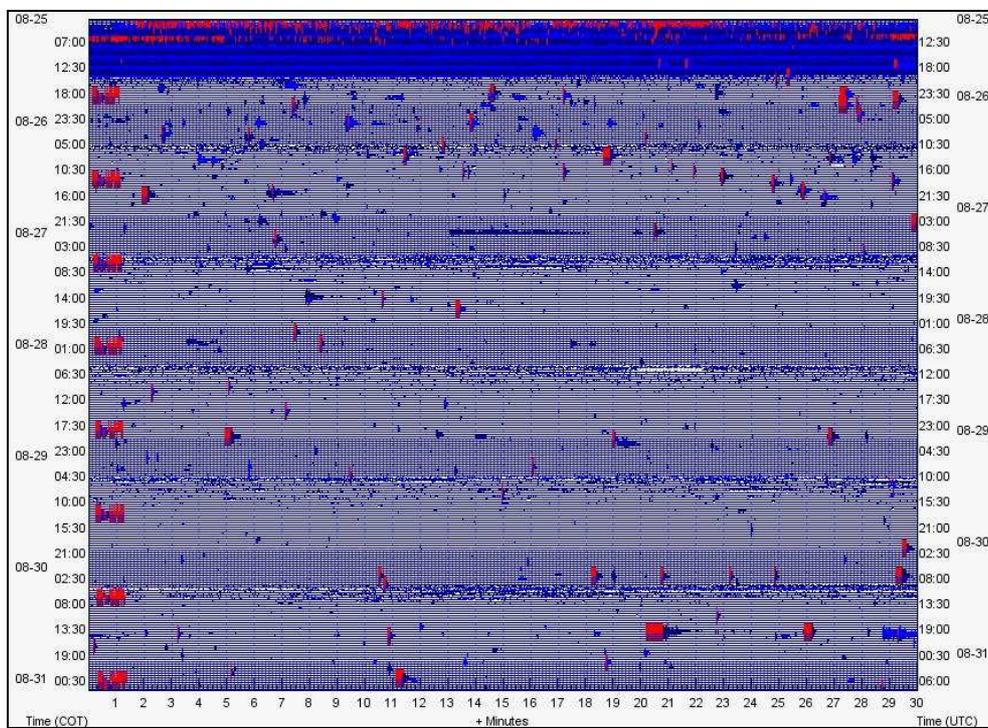


Figura 2.1.34. Sismograma de la estación Anganoy, entre las 02:00 a.m., del 25 de agosto y las 4:00 a.m., del 31 de agosto de 2010.

El episodio de Tremor, asociado con el evento eruptivo, mostró en su espectro de Fourier, frecuencias entre 1,7 y 11 Hz con un pico dominante alrededor de 3,0 Hz. En la Figura 2.1.35, se muestra el inicio del registro del Tremor de la erupción en las estaciones de corto periodo Anganoy y de banda ancha Cufiño.

El evento eruptivo del 25 de agosto no tuvo características de explosividad, por lo cual no se obtuvo una señal clara del evento en los sensores acústicos; en comparación con lo que se ha visto en las anteriores erupciones explosivas de Galeras. La Figura 2.1.36, muestra la señal sísmica del comienzo de la erupción en la estación de banda ancha Cufiño y las señales sincronizadas de los sensores acústicos localizados en la estación Cráter – CRAC y en la estación Calabozo - CAAC y CAMI.

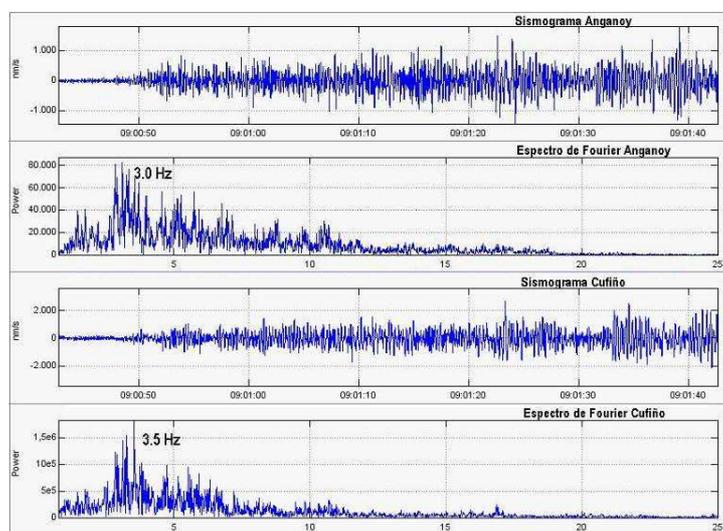


Figura 2.1.35. Sismograma y espectro de Fourier del comienzo de la erupción del 25 de agosto de 2010, en la estación de corto periodo Anganoy y la componente vertical de la estación de banda ancha Cufiño.

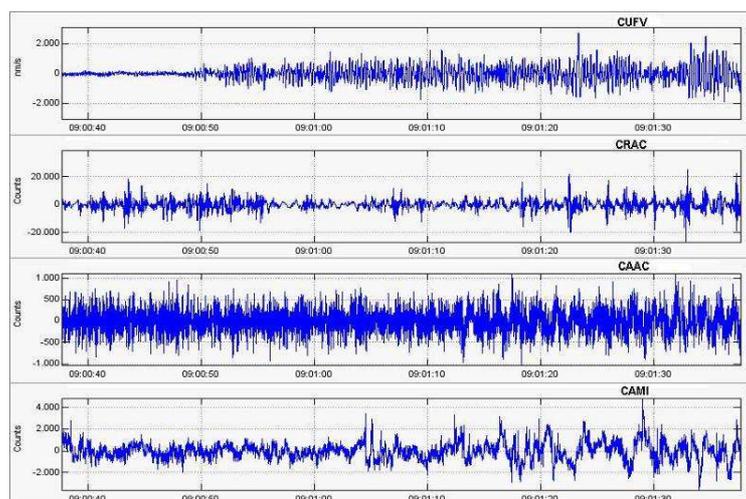


Figura 2.1.36. Sismograma del comienzo de la erupción del 25 de agosto de 2010 en la componente vertical de la estación Cufiño y señales en los sensores acústicos de Galeras, ubicados en las estaciones Cráter, CRAC y Calabozo CAAC y CAMI.

Haciendo una comparación de la energía liberada en las erupciones de Galeras entre 2004 y 2010, se observa que la energía de la erupción del 25 de agosto de 2010, es mayor que las erupciones del 29 de abril, 30 de septiembre y 20 de noviembre de 2009, y también es mayor que las erupciones del 11 de agosto de 2004, 24 de noviembre de 2005 y 12 de julio 2006 (Figura 2.1.37.). Una estimación de la energía, evaluada en la estación de banda ancha Cufiño para las primeras cinco horas de duración del episodio de Tremor, se estimó en $1,90 \times 10^{14}$ ergios y un desplazamiento reducido por ondas de cuerpo de 572 cm^2 .

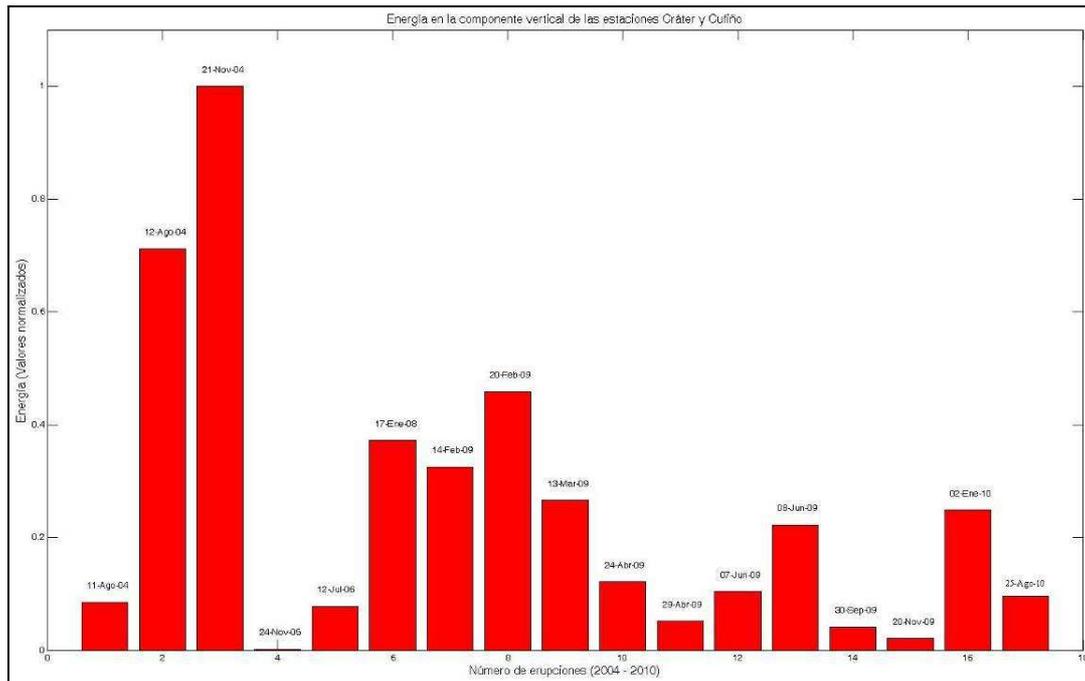


Figura 2.1.37. Comparación de la energía sísmica de las erupciones de Galeras entre 2004 y 2010, usando la componente vertical de las estaciones Cráter y Cufiño.

En cuanto al contenido frecuencial de la sismicidad volcánica, de acuerdo con el registro del sistema SSAM (Seismic Spectral-Amplitude Measurement: Medición de Amplitudes Espectrales Sísmicas) para la estación base de clasificación Anganoy, se observó que el 20 de agosto las frecuencias dominantes de la sismicidad volcánica oscilaron entre 3 y 5 Hz, el 21 de agosto la amplitud espectral aumentó levemente conservando las frecuencias dominantes registradas el día anterior, los días 22 y 23 de agosto la amplitud espectral aumentó nuevamente y las frecuencias dominantes oscilaron entre los 4 Hz y los 11 Hz, el 24 de agosto la amplitud espectral disminuyó notablemente con frecuencias dominantes similares a las registradas el 20 de agosto, el 25 de agosto, la amplitud espectral aumentó notablemente con una frecuencia dominante bien definida alrededor de los 3,5 Hz, que corresponde principalmente a las frecuencias dominantes del tremor generado por el episodio eruptivo registrado este día. El 26 de agosto las amplitudes espectrales disminuyen notoriamente, comportándose de manera similar a los días anteriores al enjambre, con frecuencias dominantes entre los 3 y 5 Hz (Figura 2.1.38.).

De la sismicidad registrada en el mes de agosto de 2010, relacionada con eventos asociados a dinámica de fluidos de fuente transitoria (LP), se destaca que algunos sismos que se caracterizaron

por el dominio de bajas frecuencias en su espectro y por la presencia de armónicos que se observan en la mayoría de las estaciones de la red sísmica de vigilancia de Galeras, como se muestran en las figuras 2.1.39. a 2.1.43.

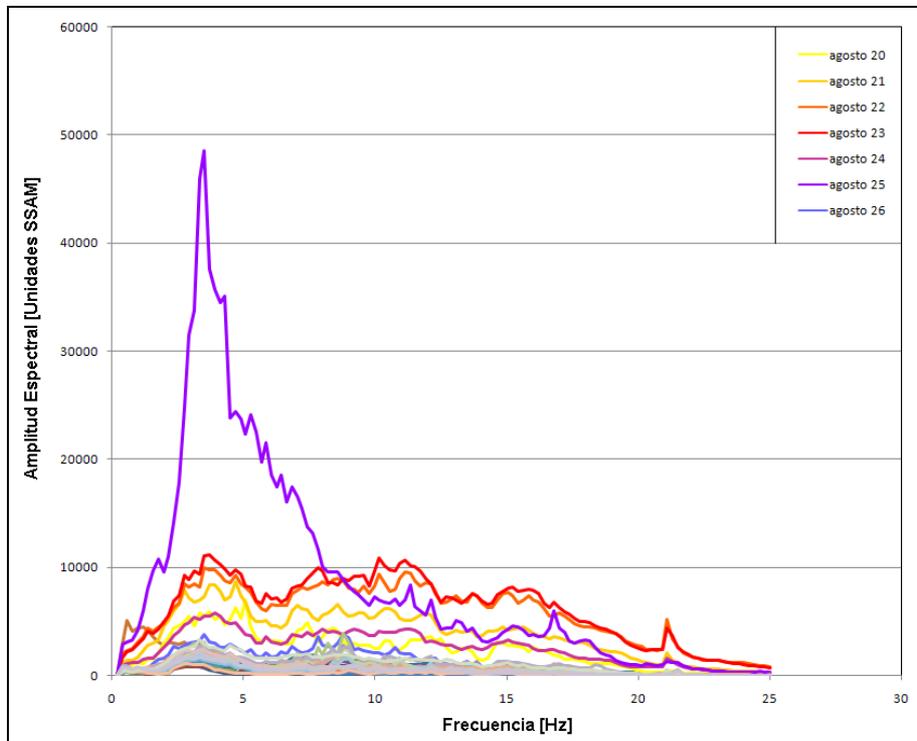


Figura 2.1.38. Registros espectrales del sistema SSAM, en la estación sísmológica de Anganoy, entre el 1 y 30 de agosto de 2010. Las amplitudes espectrales (medidas en unidades SSAM) son proporcionales a los niveles energéticos.

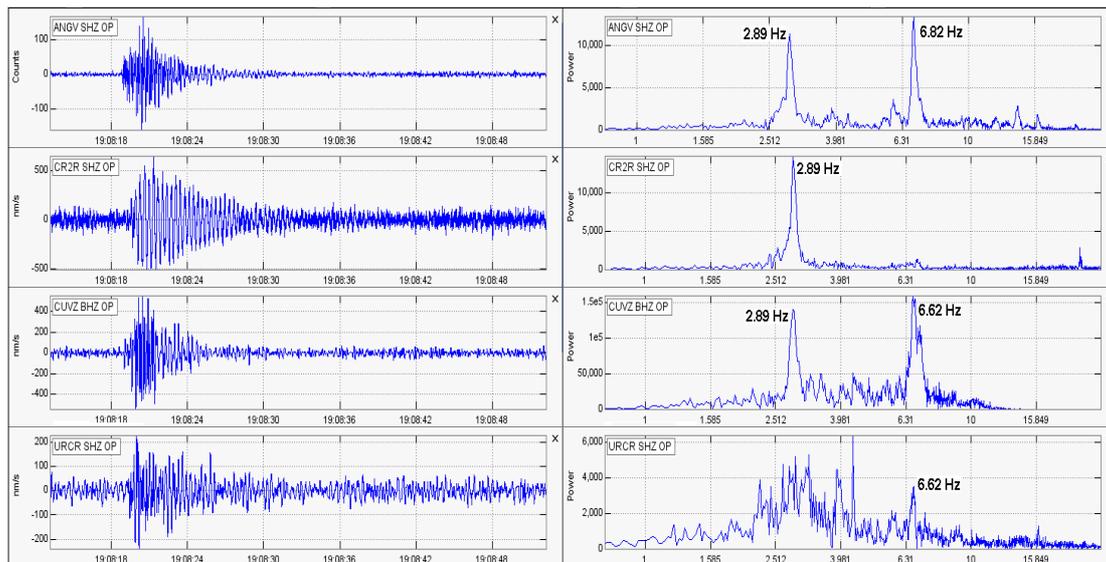


Figura 2.1.39. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 9 de agosto de 2010 a las 2:08 p.m.

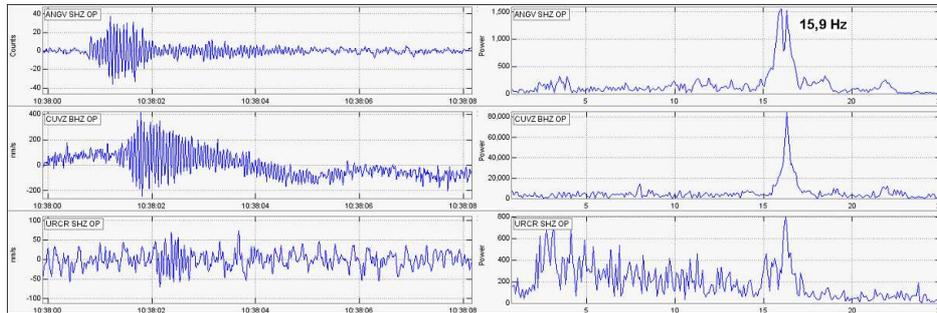


Figura 2.1.40. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 11 de agosto de 2010 a las 5:13 a.m.

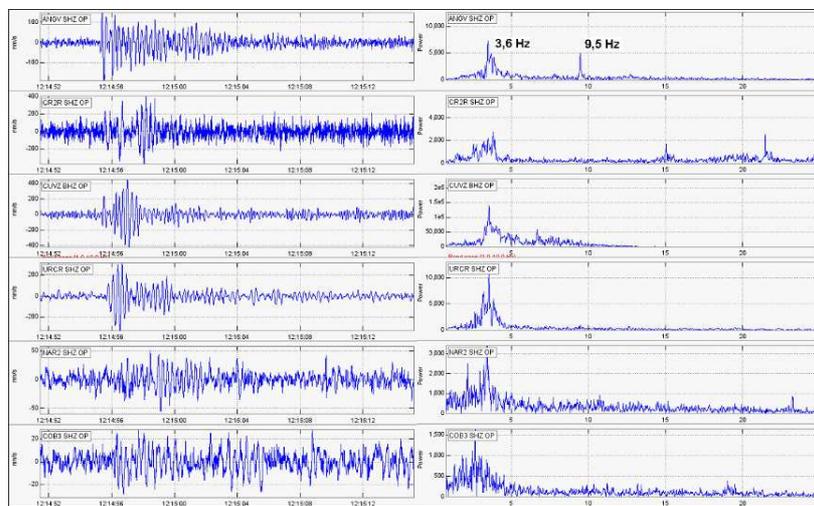


Figura 2.1.41. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 16 de agosto de 2010 a las 7:14 a.m.

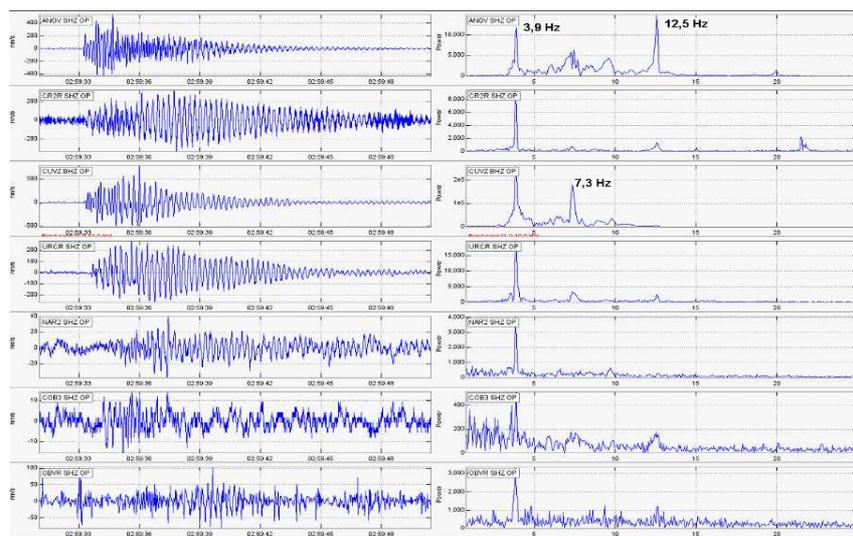


Figura 2.1.42. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 16 de agosto de 2010 a las 9:59 p.m.

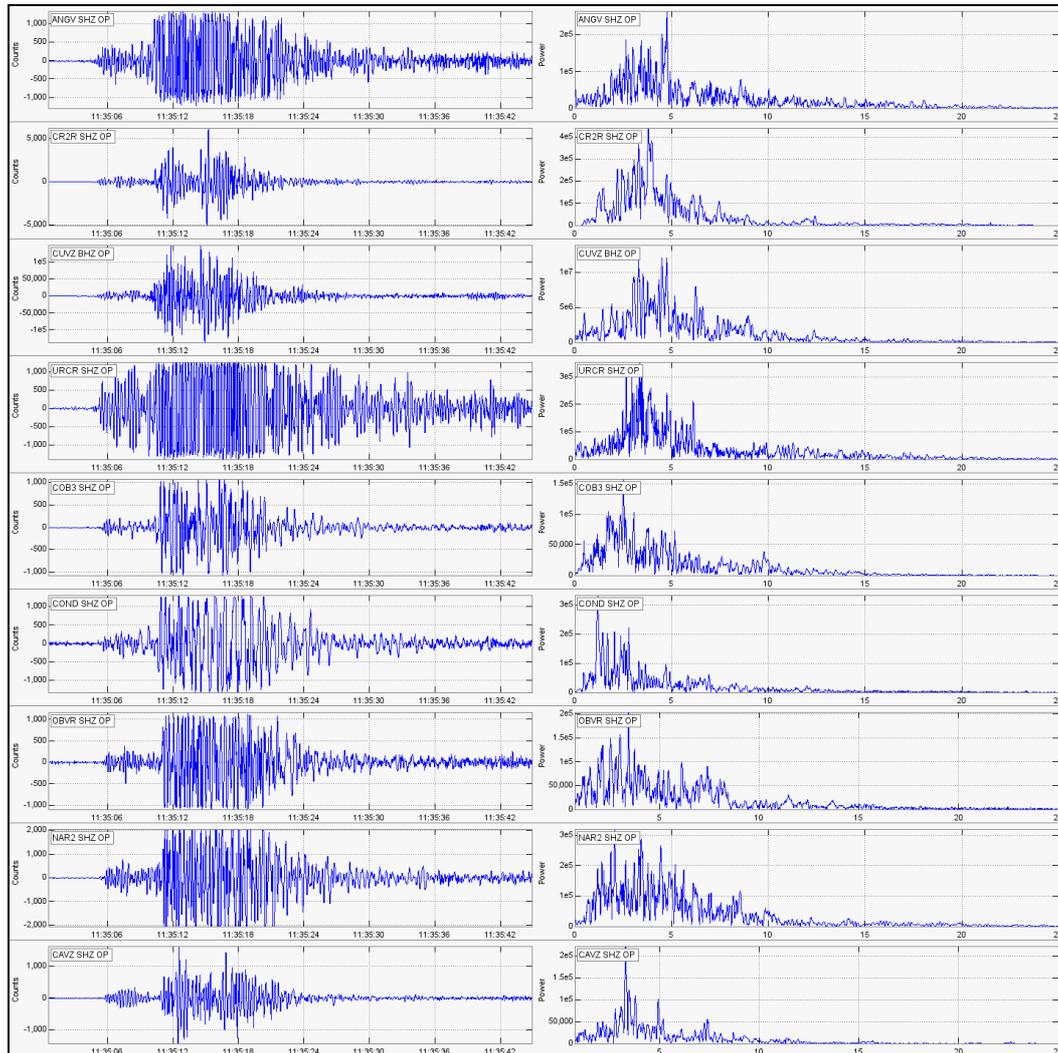


Figura 2.1.43. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 22 de agosto de 2010 a las 5:11 a.m., a este evento se le estimó un desplazamiento reducido para ondas de cuerpo de 200 cm².

De la sismicidad registrada en el mes de septiembre, destacaremos la ocurrencia de algunos de los eventos relacionados con movimiento de fluidos, como LPS y TRE, primero por mostrar frecuencias bajas y segundo porque algunos mostraron características armónicas, es decir, por mostrar en su espectro de Fourier, picos definidos con armónicos frecuenciales dominantes. A manera de ejemplo, se muestran los eventos de las Figuras .2.1.44. a 2.1.49.

También es importante mencionar que de las emisiones de gases observadas sobre la cima de Galeras, dos de ellas se encuentran asociadas con eventos sísmicos; tal es el caso del evento ocurrido el 8 de septiembre, a las 5:10 p.m. (Figura 2.1.49.), posterior a este registro se observó salida de gas, a manera de pulso sobre la cima, cuya coloración evidencio la presencia de partículas finas de ceniza, y del evento registrado el 9 de septiembre, a las 11:19 a.m., de igual manera, posterior a este, se observó una pequeña emisión de gas de coloración blanca sobre la cima de Galeras, a manera de pulso. Así mismo, el 29 de septiembre, desde las 3:00 p.m. hasta las 3:15 p.m., se observó una emisión de gases asociada a un evento tipo Tremor.

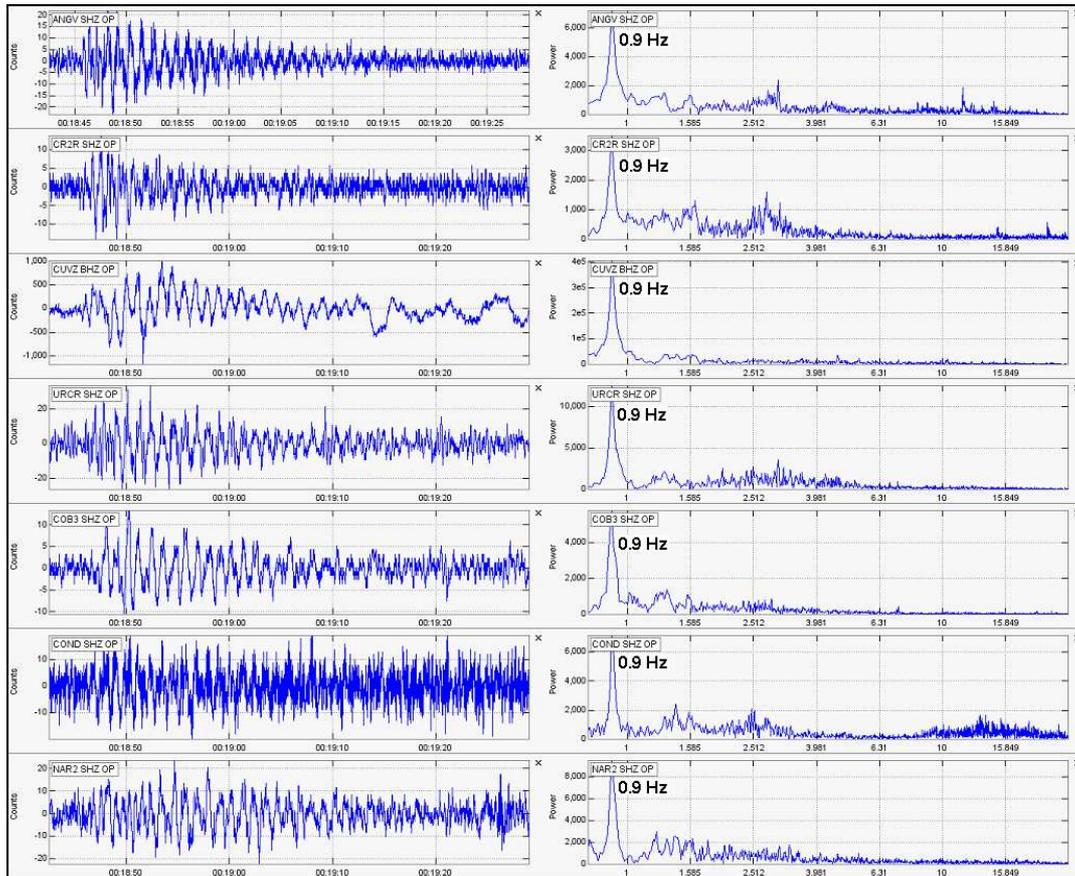


Figura 2.1.44. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 4 de septiembre a las 7:18 p.m.

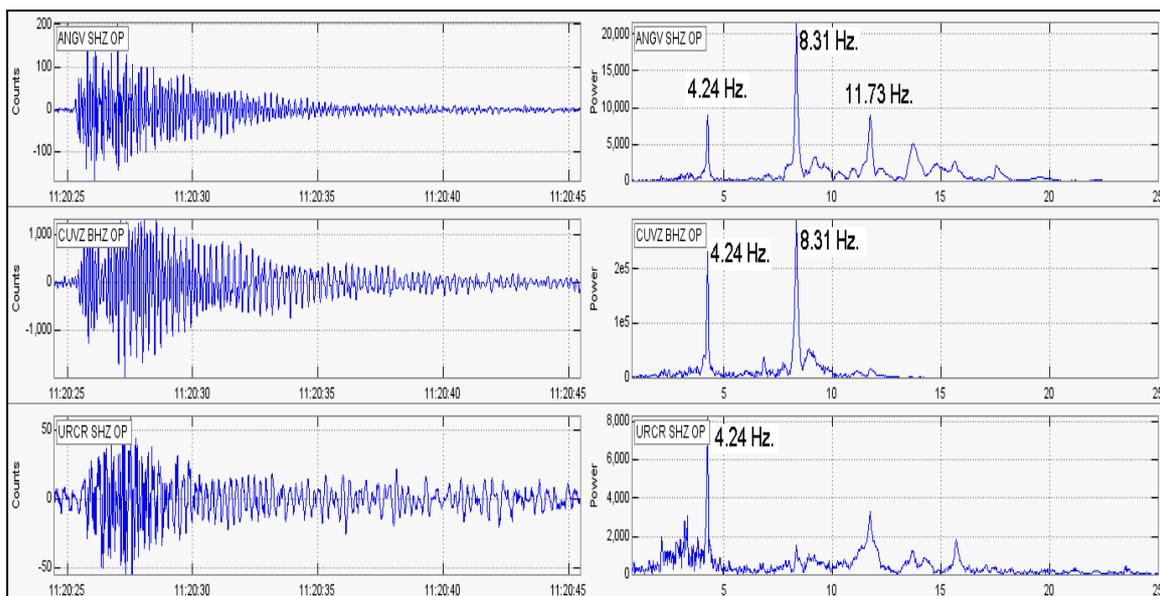


Figura 2.1.45. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 13 de septiembre de 2010, a las 6:20 a.m.

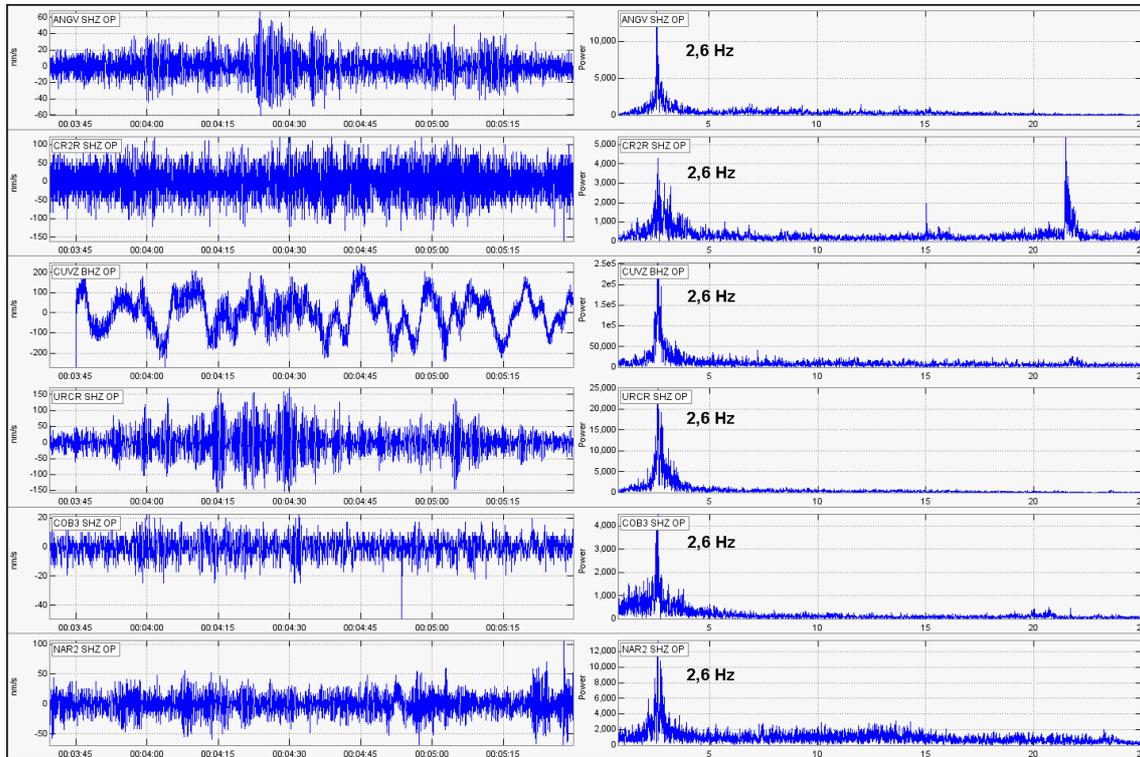


Figura 2.1.46. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE armónico registrado el 14 de septiembre de 2010 a las 7:03 p.m.

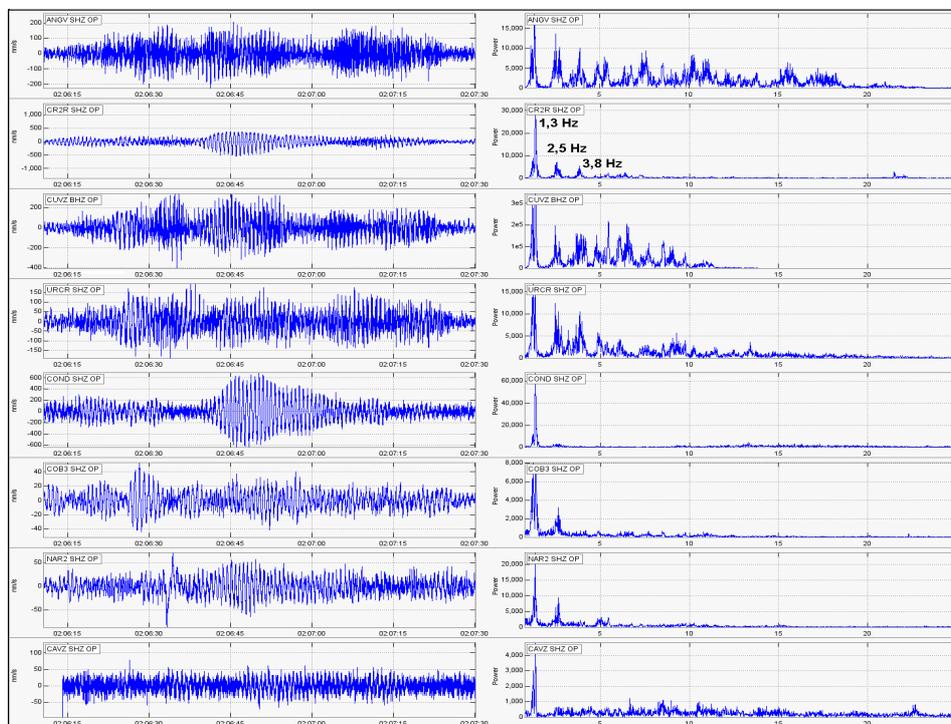


Figura 2.1.47. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE armónico registrado el 17 de septiembre de 2010 a las 9:05 p.m.

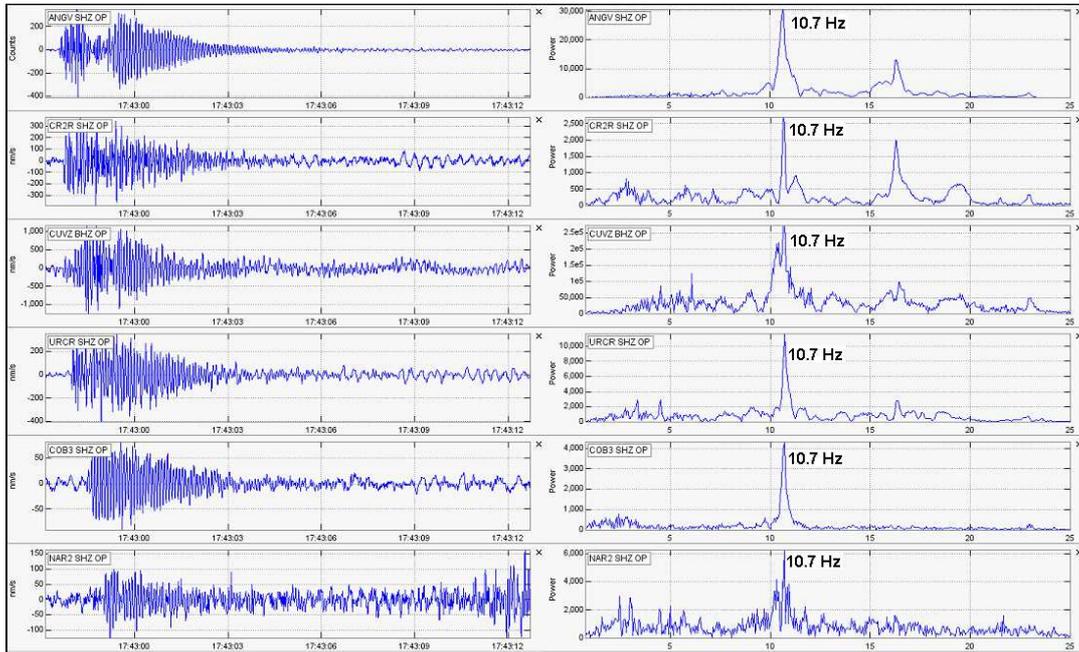


Figura 2.1.48. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 28 de septiembre de 2010, a las 12:43 p.m.

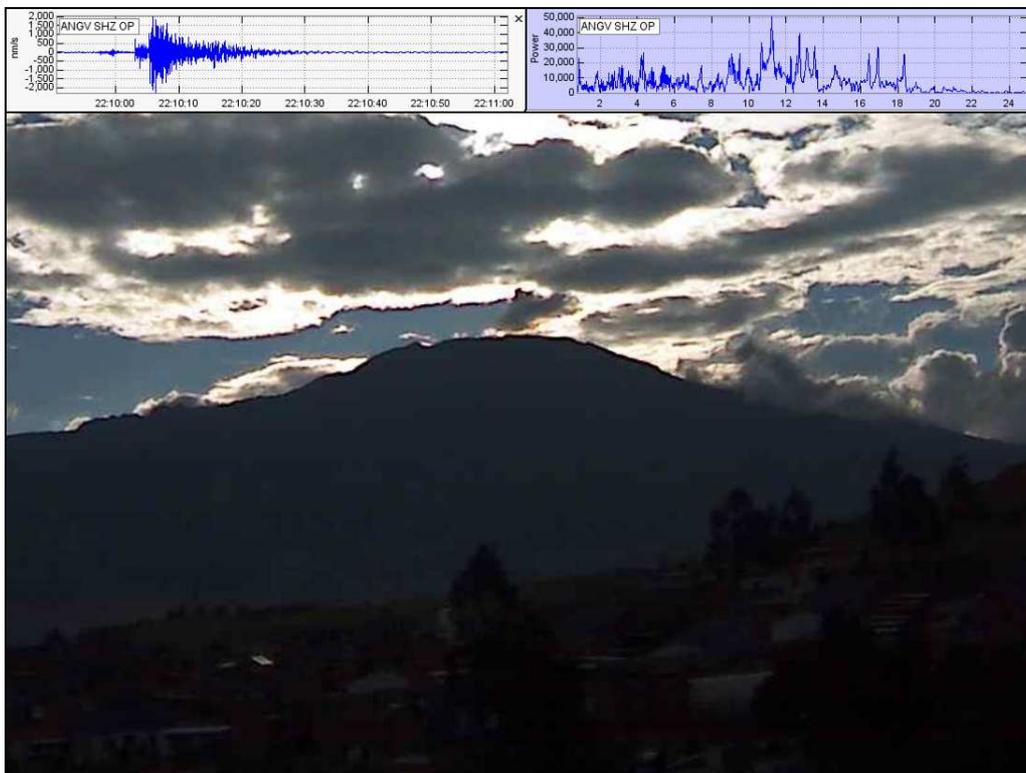


Figura 2.1.49. Sismograma del evento registrado el 8 de septiembre de 2010, a las 5:10 p.m., e imagen de Galeras, en la fotografía se observa la emisión de gas asociada al evento sísmico.

Por otra parte, durante el mes de octubre, se mantuvo el registro de eventos tipo LP, caracterizados por el dominio de bajas frecuencias en su espectro y por la presencia de armónicos que se observan en la mayoría de las estaciones de la red sísmica. A manera de ejemplo, se muestran los eventos de las Figuras 2.1.50. a 2.1.53.

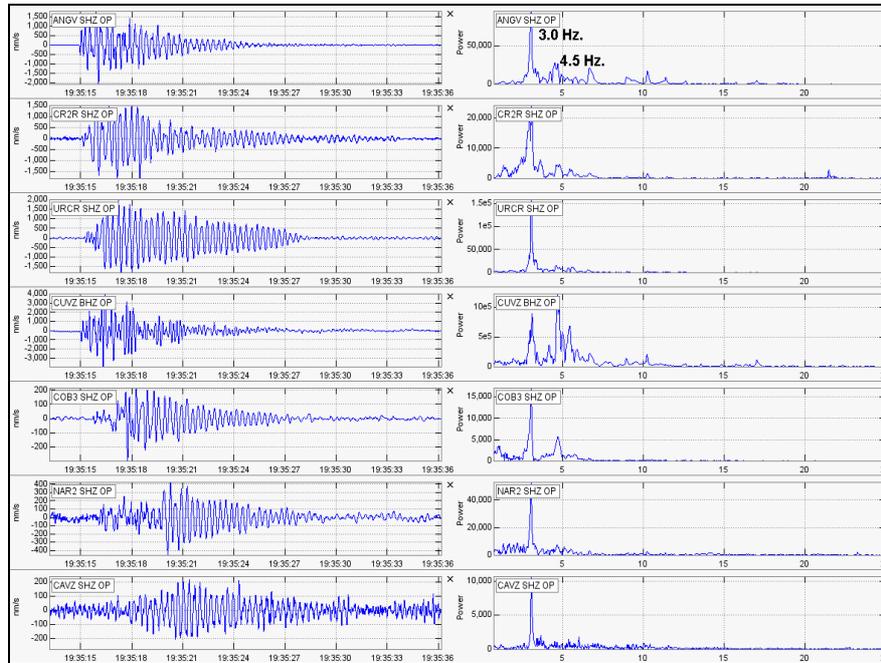


Figura 2.1.50. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 8 de octubre de 2010 a las 2:35 p.m.

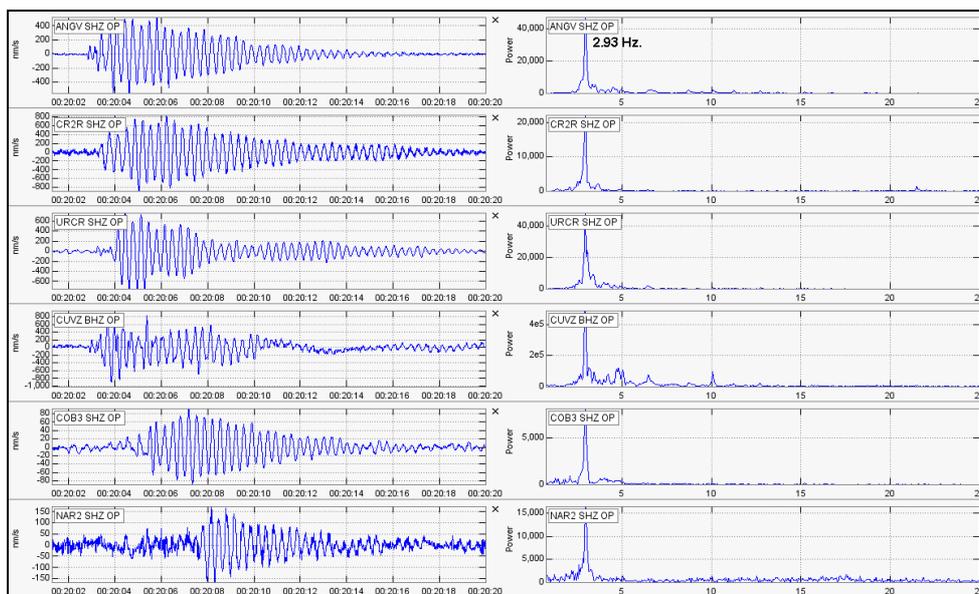


Figura 2.1.51. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 8 de octubre de 2010 a las 7:20 p.m.

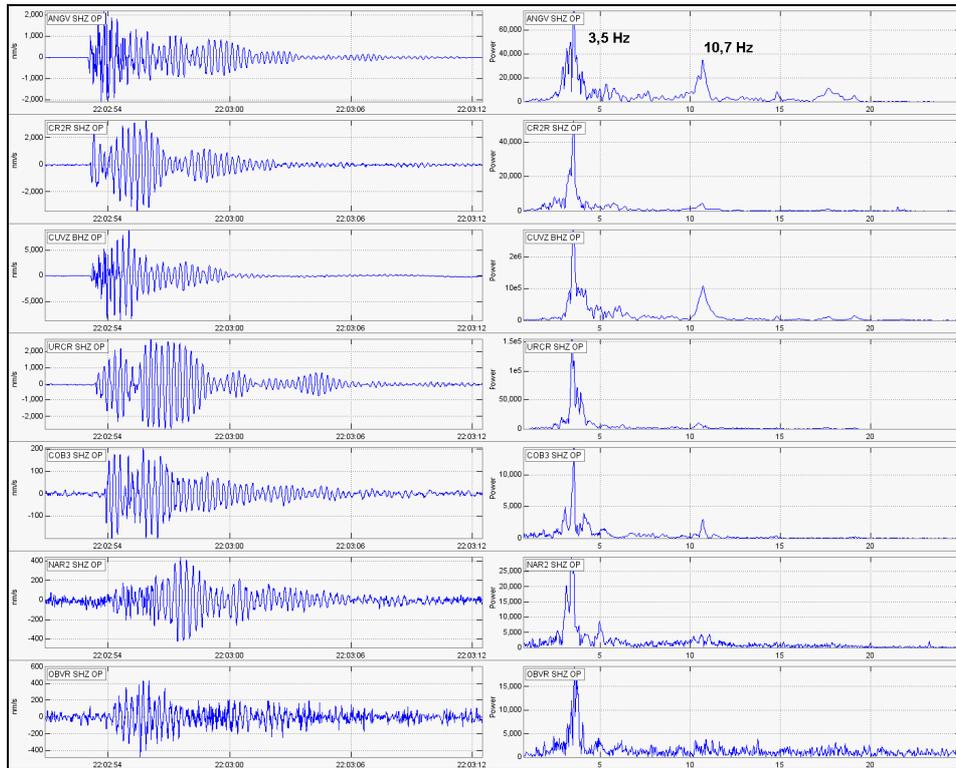


Figura 2.1.52. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 12 de octubre de 2010 a las 5:02 p.m.

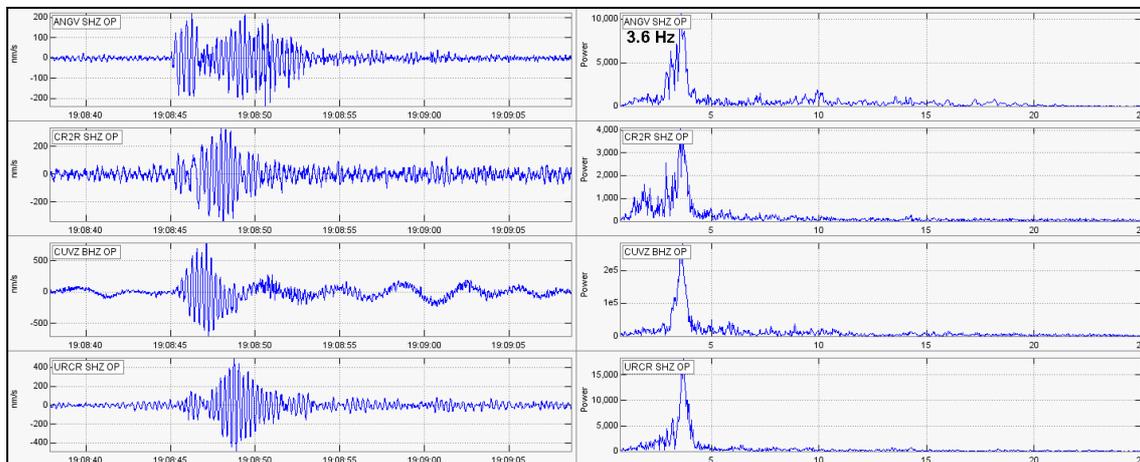


Figura 2.1.53. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 30 de octubre de 2010 a las 2:08 p.m.

Adicionalmente, dentro del proceso registrado durante el mes de octubre de 2010, se resalta la ocurrencia de sismos tipo TRE, destacándose el ocurrido el 15 de octubre de 2010 a las 2:51 a.m., el cual tuvo una duración aproximada de 15 minutos (Figura 2.1.54.).

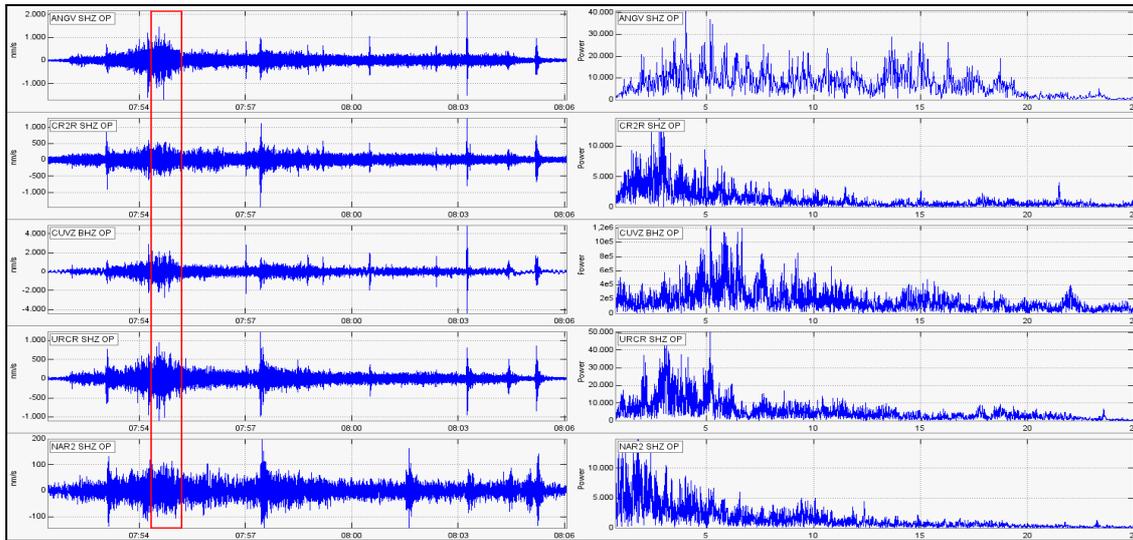


Figura 2.1.54. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 15 de octubre de 2010 a las 2:51 a.m. Los espectros en frecuencia (derecha) corresponden al sector del sismograma (izquierda) encerrado en el cuadro rojo.

Cabe mencionar que partir del 15 de octubre de 2010, luego de la ocurrencia del evento tipo TRE mencionado anteriormente, se registró una señal que se mantuvo hasta el día 17 de octubre a las 9:47a.m. (Tremor de fondo), a partir de esta hora, la señal cambió notoriamente, mostrando variaciones en su amplitud, a manera de pulsos, manteniéndose así hasta el 20 de octubre de 2010 (Figuras 2.1.55, 2.1.56. y 2.1.57.). Este episodio de tremor se asoció con procesos de emisión de gases y ceniza fina, por el color de las columnas y los reportes de caída de ceniza fina en los municipios de Sandoná y La Florida.

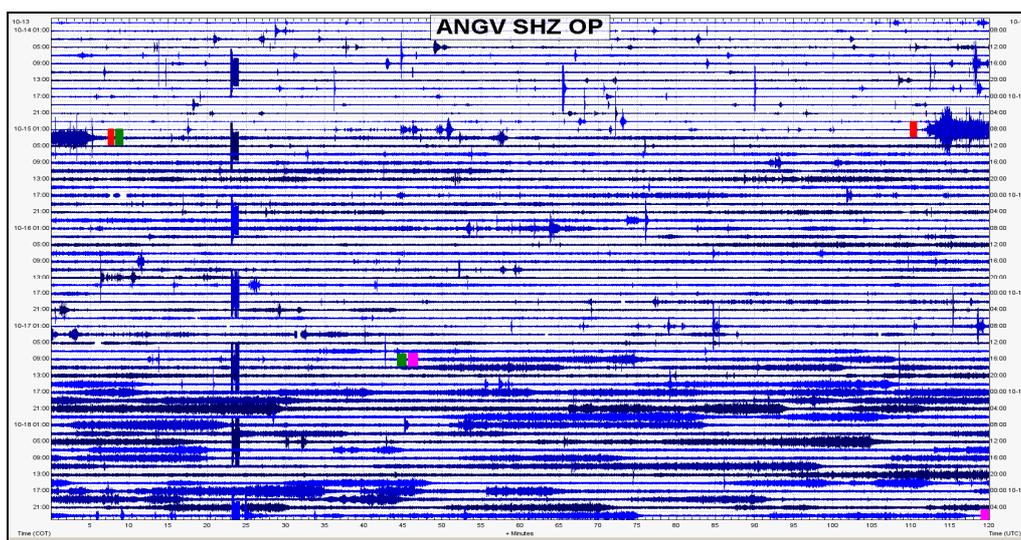


Figura 2.1.55. Sismograma de la estación Sismológica Anganoy entre el 14 y 18 de octubre de 2010. El intervalo de tiempo registrado entre barras rojas corresponde al evento tipo TRE registrado el 15 de octubre de 2010, entre barras verdes corresponde a Tremor de fondo y entre barras color magenta corresponde al registro del episodio de tremor a partir de las 9:47 a.m. del 17 de octubre de 2010.

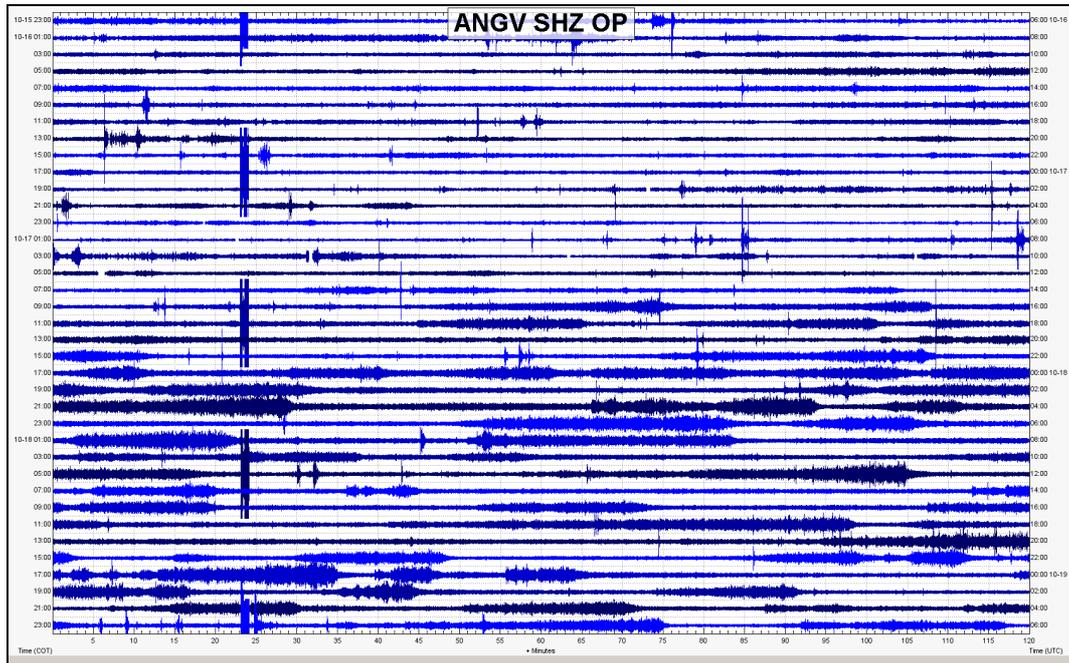


Figura 2.1.56. Sismograma de la estación Sismológica Anganoy entre el 16 y 18 de octubre de 2010. En la figura se aprecia como a partir del 17 de octubre de 2010 la amplitud del tremor presenta variaciones a manera de pulsos.

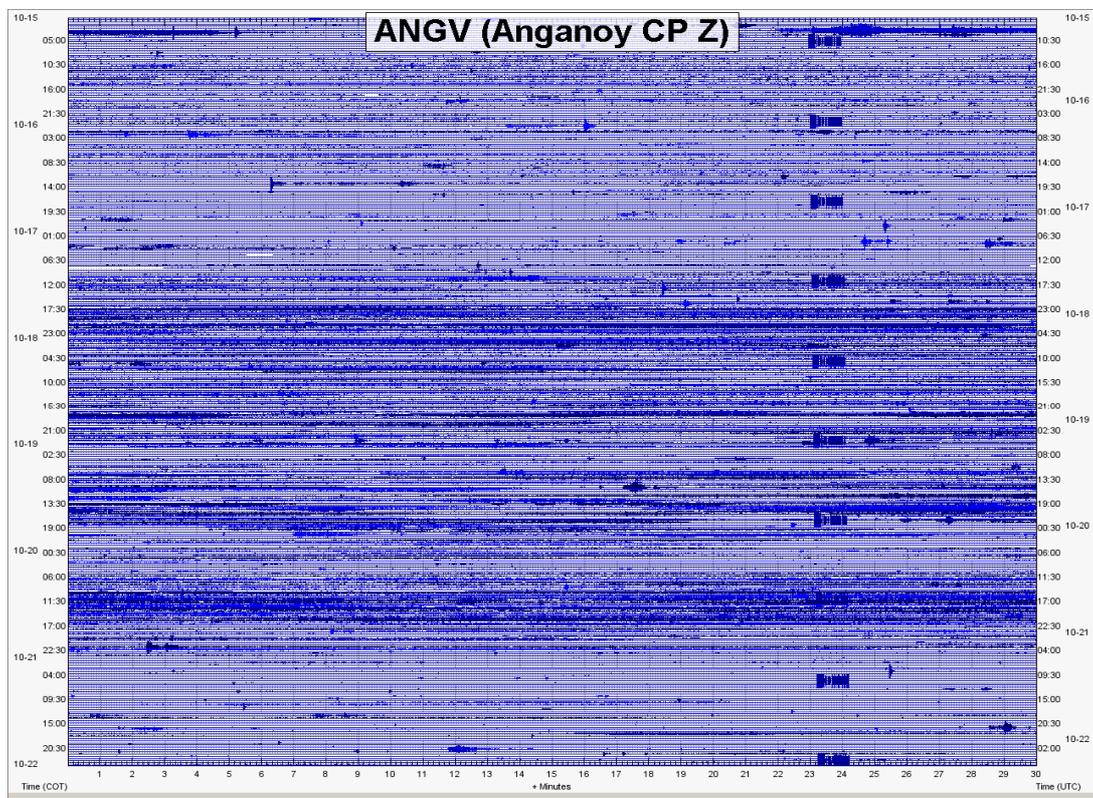


Figura 2.1.57. Sismograma de la estación Sismológica Anganoy entre el 15 y 21 de octubre de 2010. En la figura se aprecia como el tremor se registra entre el 17 y 21 de octubre de 2010.

Las Figura 2.1.58. muestra a manera de ejemplo las trazas del evento tipo TRE registrado el 8 de octubre de 2010 a las 9:08 p.m., caracterizado por presentar un valor de frecuencia monocromática igual a 2,41 Hz observada en la mayoría de las estaciones de la red sísmica de Galeras. La Figura 2.1.59. muestra la traza del tremor de fondo registrado el 19 de octubre de 2010, este evento fue de tipo espasmódico.

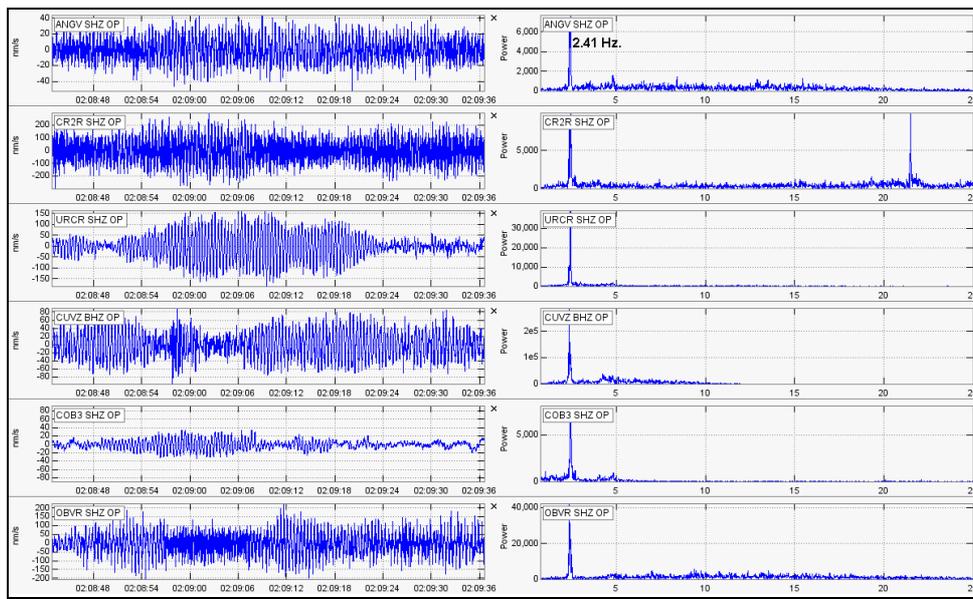


Figura 2.1.58. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 8 de octubre a las 9:08 p.m.

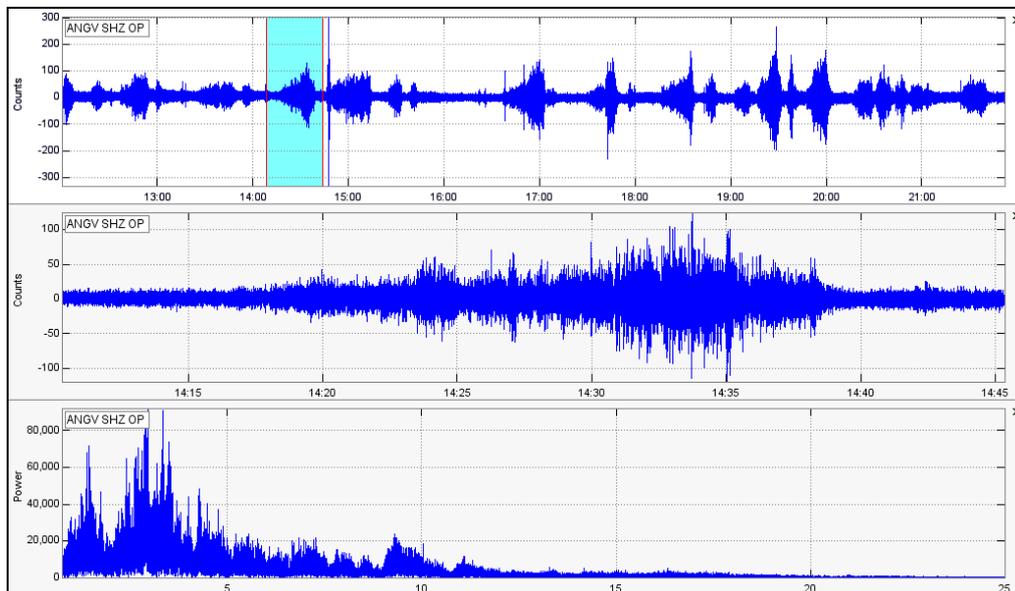


Figura 2.1.59. Diez horas del sismograma registrado el día 19 de octubre de 2010, en la estación base de clasificación Anganoy, desde las 7:00 am hasta las 4:00 pm, en donde se observan los incrementos del nivel del tremor de fondo (arriba). Detalle de uno de los incrementos del nivel del tremor de fondo (abajo) en donde se observa el sismograma y el espectro.

En el mes de noviembre, se destaca la ocurrencia de 9 eventos relacionados con el incremento de presiones en el sistema volcánico que sísmicamente se reflejaron en el registro de tres señales clasificadas como Tornillo (TOR) y seis eventos clasificados como Seudo-Tornillos (PST). El primer evento PST se registró el 1 de noviembre y el primer TOR el 7 de noviembre; estos eventos mostraron frecuencias dominantes con valores entre 12 y 17 Hz (Figuras 2.1.60, 2.1.61, 2.1.62 y 2.1.63.).

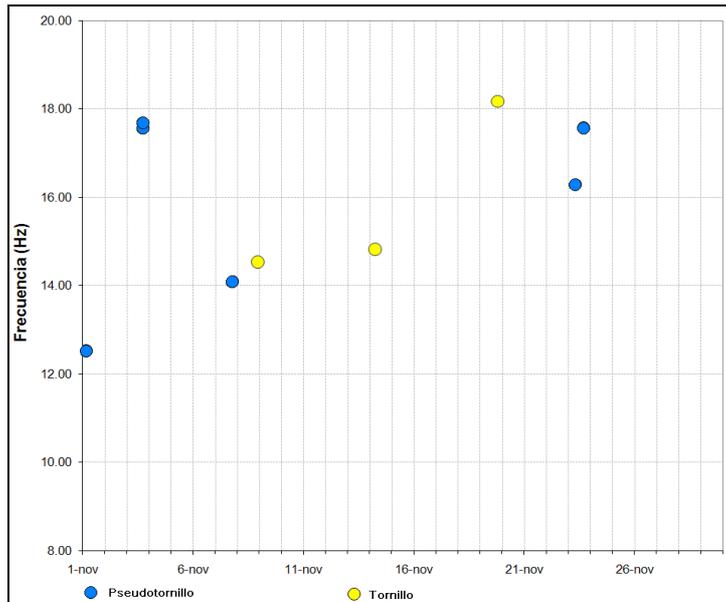


Figura 2.1.60. Frecuencia mostrada por los eventos tipo TOR y PST registrados en el mes de noviembre de 2010.

Para Galeras, la importancia del registro de eventos tipo Tornillo o Seudo-Tornillo radica en que se han presentado en etapas que antecedieron a varios de los episodios eruptivos.

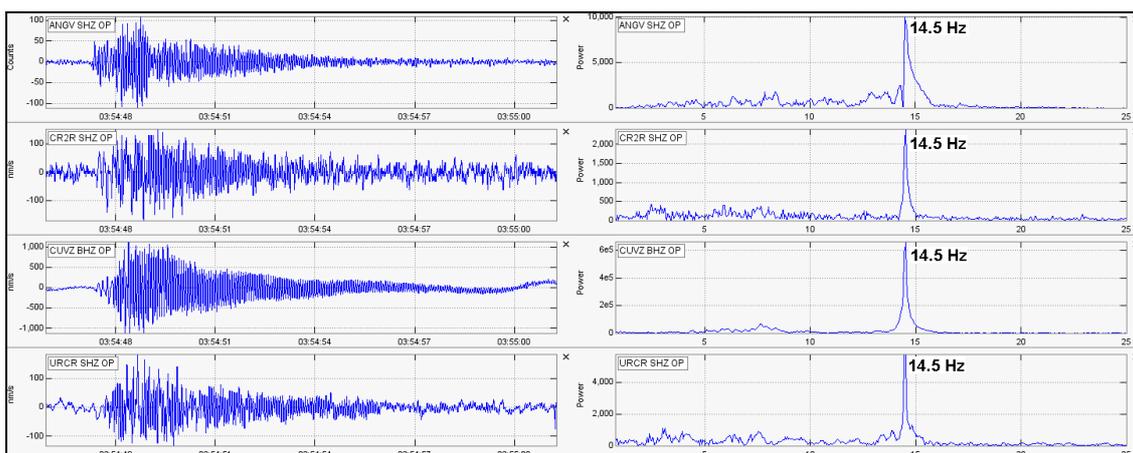


Figura 2.1.61. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudotornillo registrado el 8 de noviembre de 2010, a las 10:54 p.m.

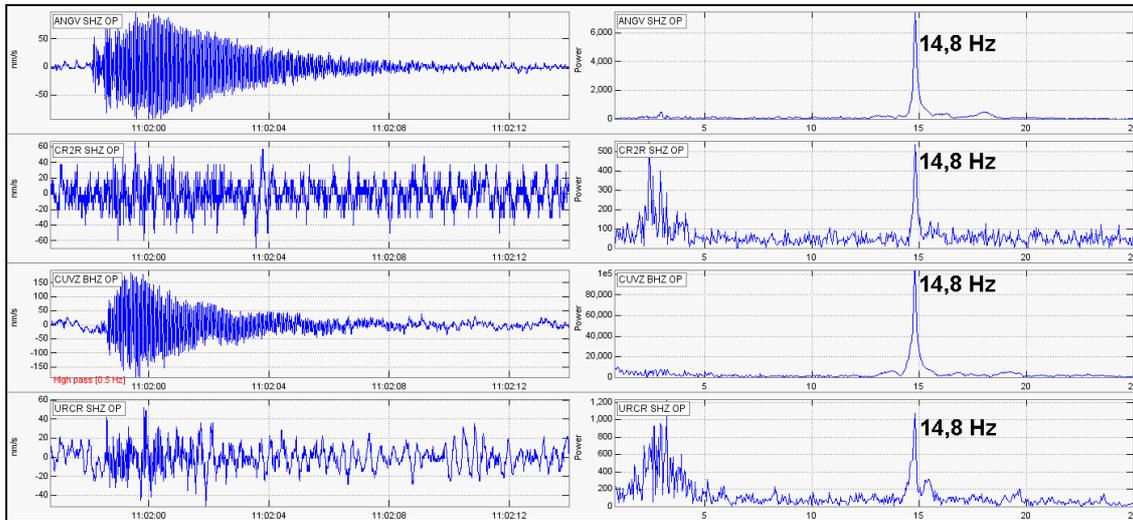


Figura 2.1.62. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Tornillo registrado el 14 de noviembre de 2010, a las 6:02 a.m. En la estación CUVZ se aplicó un filtro pasa alto con frecuencia de corte a 0.5 Hz.

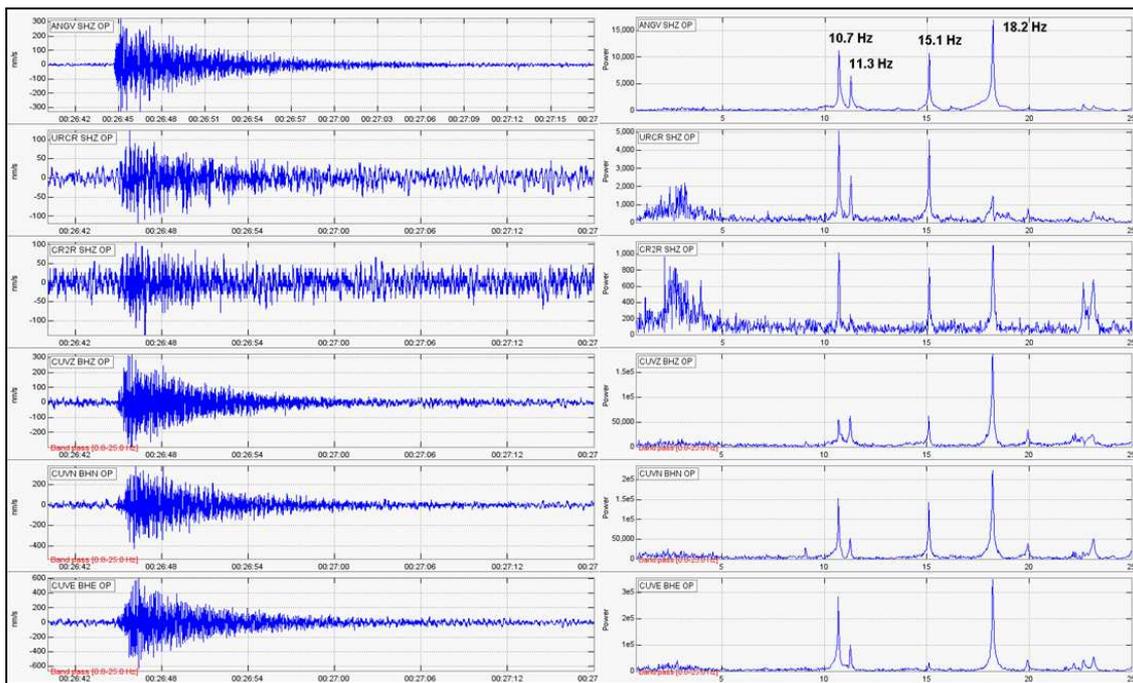


Figura 2.1.63. Sismograma (izquierda) y espectro (derecha) del evento tipo TOR registrado el 17 de noviembre de 2010, a las 7:26 p.m. con frecuencias dominantes y subdominantes en 18.2, 10.7, 15.0 y 11.3 Hz.

Adicionalmente se resaltan que algunos de los eventos relacionados con movimiento de fluidos, presentaron un lento decaimiento en la amplitud del registro y frecuencia dominante claramente identificable en el espectro de Fourier. A manera de ejemplos se muestran algunos de los eventos registrados en el periodo evaluado (Figuras 2.1.64, 2.1.65, 2.1.66 y 2.1.67.).

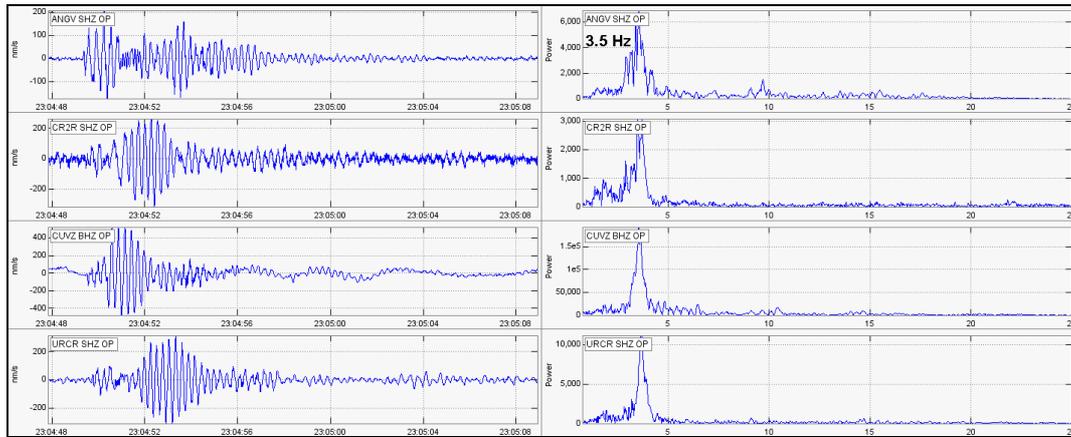


Figura 2.1.64. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 1 de noviembre de 2010, a las 06:04 p.m.

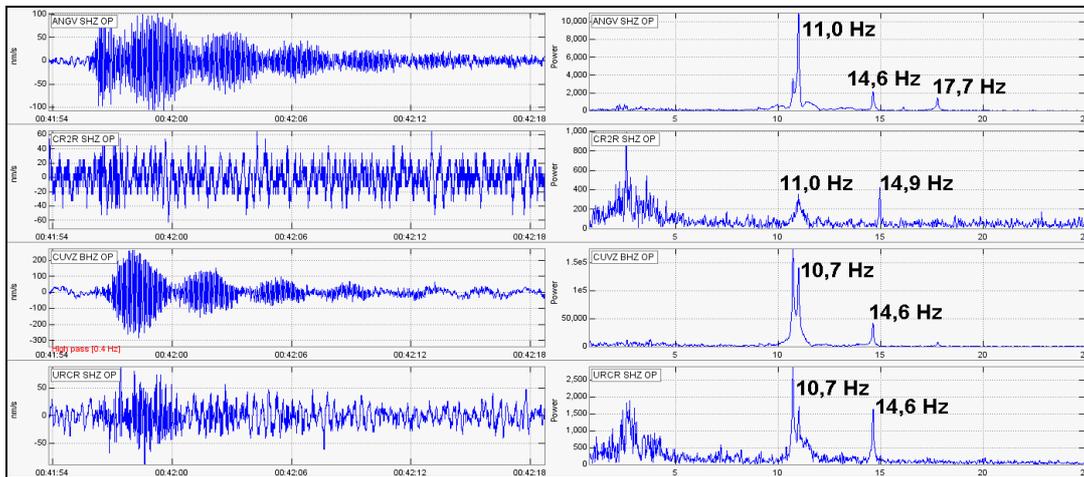


Figura 2.1.65. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP registrado el 12 de noviembre de 2010, a las 7:42 p.m. En la estación CUVZ se aplicó un filtro pasa alto con frecuencia de corte a 0.4 Hz.

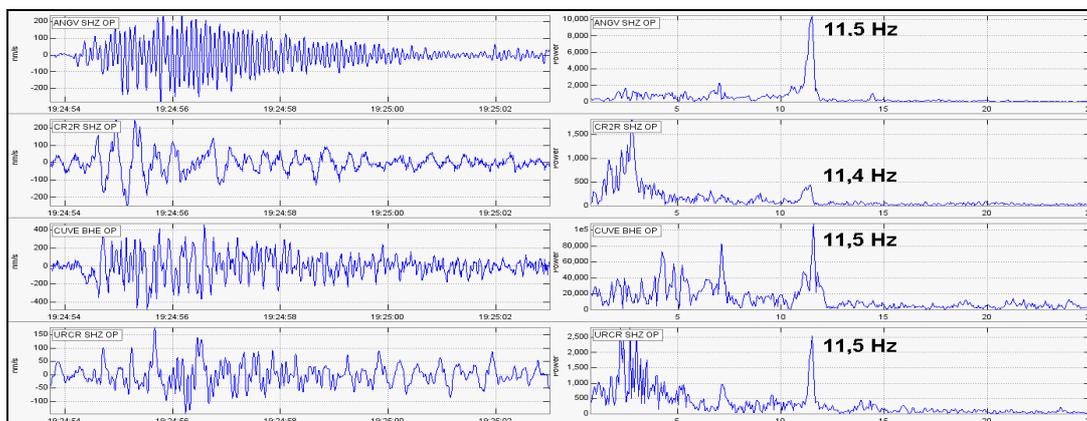


Figura 2.1.66. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP no clasificable registrado el 15 de noviembre de 2010, a las 2:24 p.m.

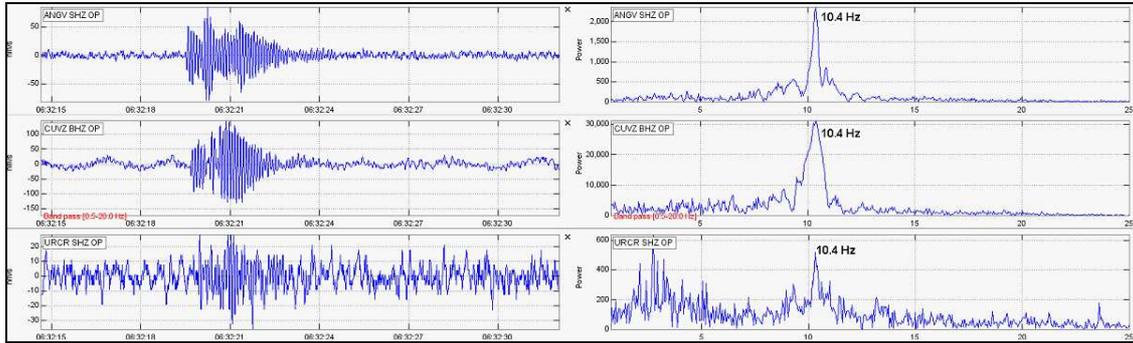


Figura 2.1.67. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado a la 1:32 a.m.

Para el mes de diciembre, se mantuvo el registro de eventos tipo LP. Las Figuras 2.1.68. a 2.1.71. muestran a manera de ejemplo los sismogramas y los espectros en frecuencia de cuatro de estos eventos, algunos de ellos caracterizados por el dominio de bajas frecuencias en su espectro y por la presencia de armónicos que se observan en la mayoría de las estaciones de la red sísmica. Se resalta el registro de eventos tipo Pseudo-Tornillo (PST), los cuales se presentaron el 8 de diciembre de 2010 (Figuras 2.1.72, 2.1.73. y 2.1.74.).

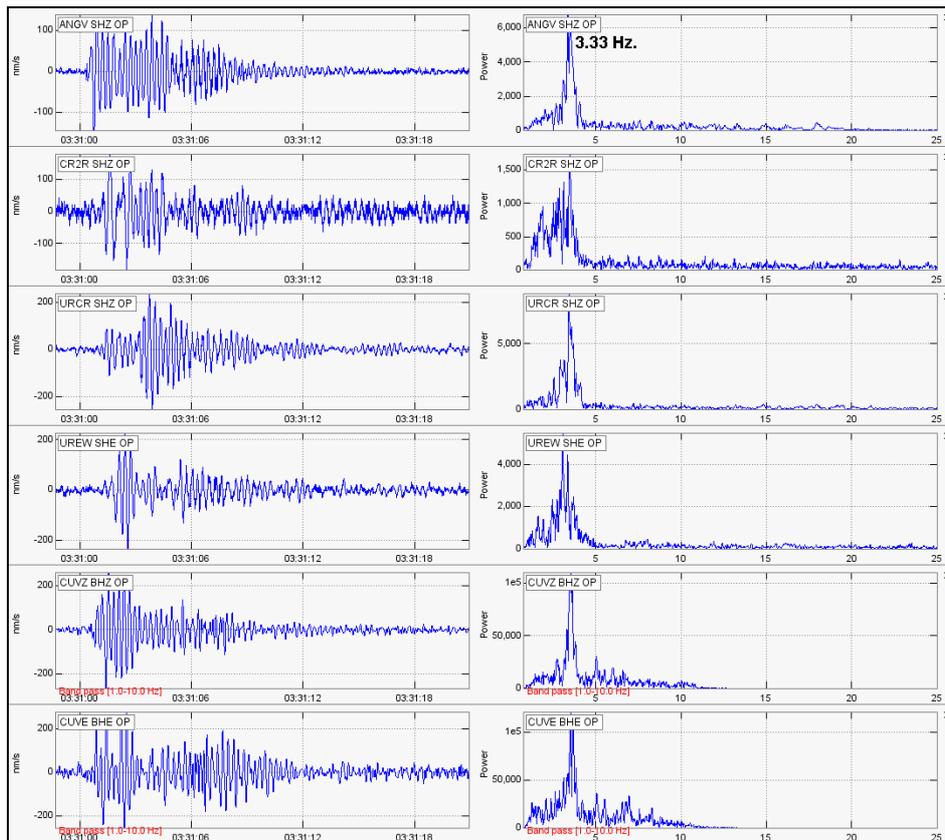


Figura 2.1.68. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 2 de diciembre de 2010 a las 10:05 p.m.

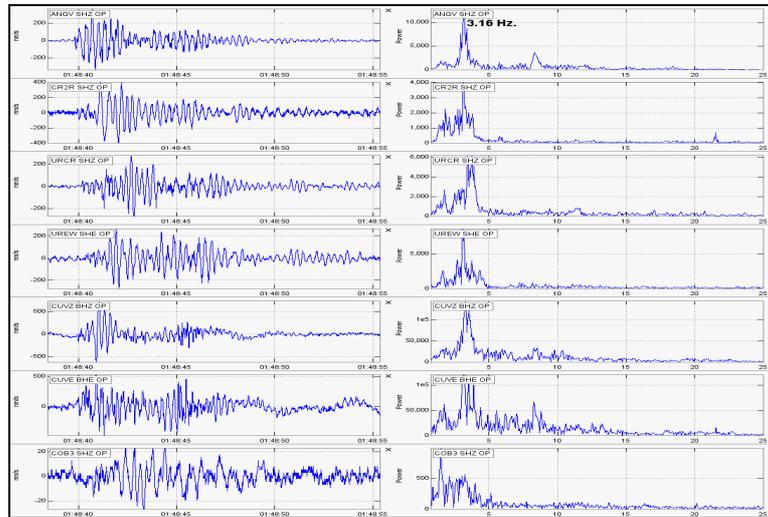


Figura 2.1.69. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 6 de diciembre de 2010 a las 8:48 p.m.

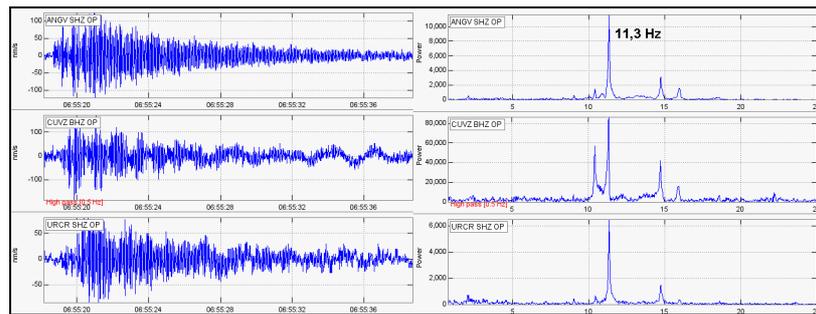


Figura 2.1.70. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP (No Clasificable) registrado el 7 de diciembre de 2010 a la 1:55 a.m.

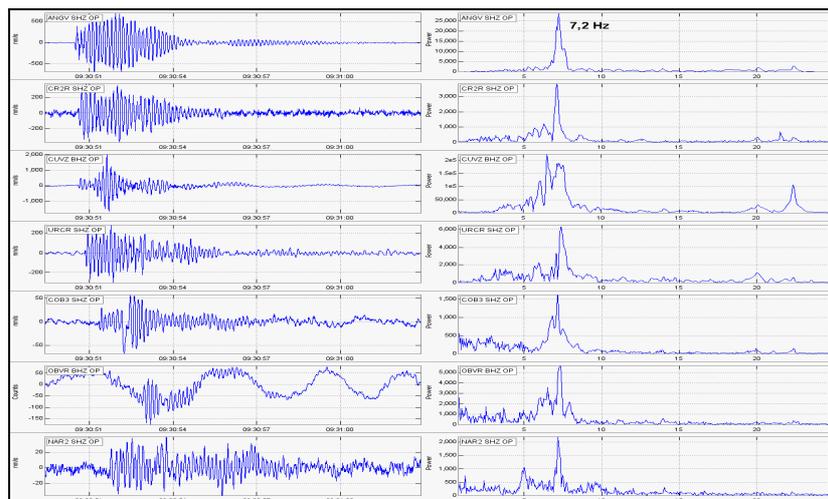


Figura 2.1.71. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 7 de diciembre de 2010 a las 4:30 a.m.

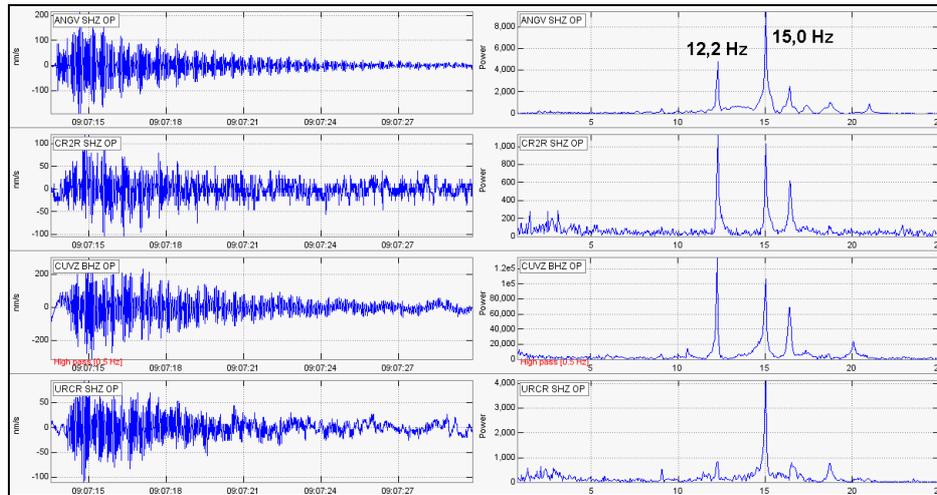


Figura 2.1.72. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST no clasificable registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 4:07 a.m.

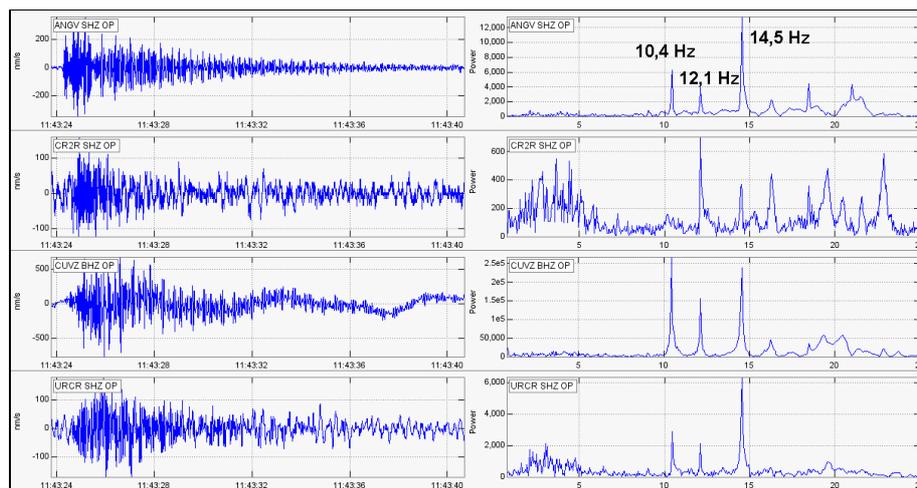


Figura 2.1.73. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 6:43 a.m.

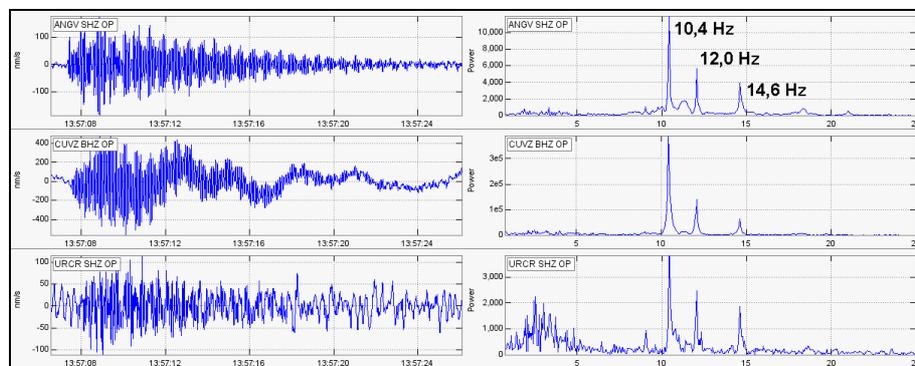


Figura 2.1.74. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento PST registrado el 8 de diciembre de 2010 a las 8:57 a.m.

Adicionalmente, se resalta la ocurrencia de sismos tipo TRE, caracterizados por presentar una banda espectral amplia con frecuencias dominantes que oscilan entre 2 y 15 Hz, en la estación base de clasificación ANGANOY (Figuras 2.175. y 2.1.76.).

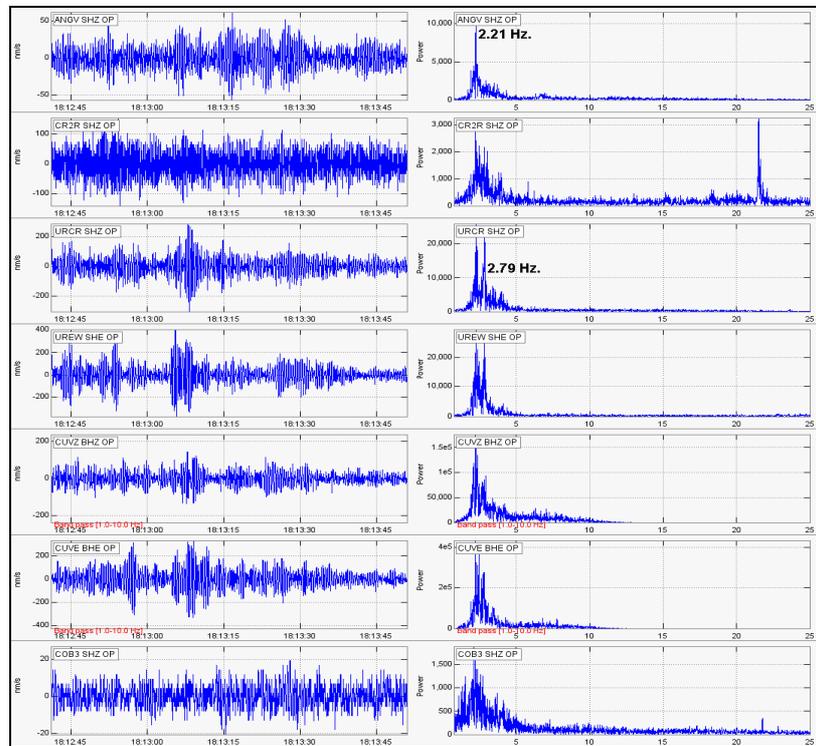


Figura 2.1.75. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 5 de diciembre 2010 a la 1:12 p.m.

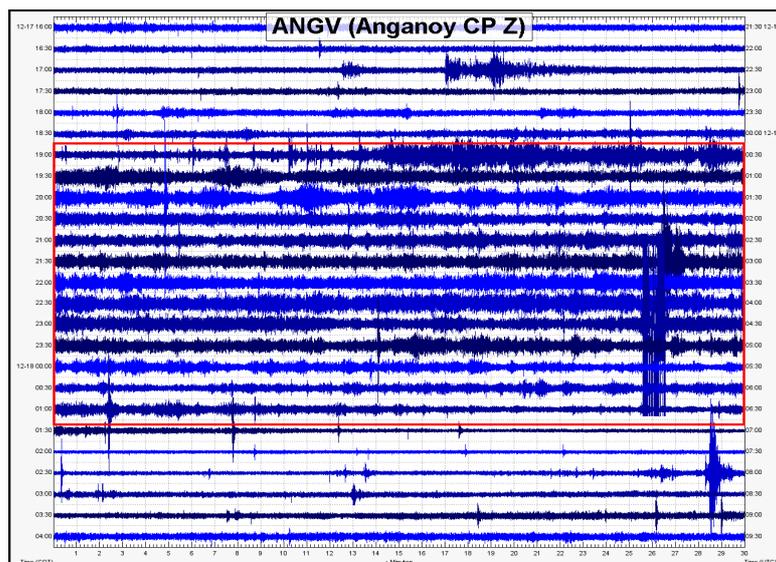


Figura 2.1.76. Sismograma del evento tipo TRE registrado el 17 de diciembre de 2010 a las 7:10 p.m. Este episodio tuvo una duración aproximada de seis horas.



Libertad y Orden

2.1.3 Deformación

El interior de los volcanes activos se encuentra sometido a altas presiones y temperaturas que conllevan, en ciertos casos, a que un volcán experimente deformaciones verticales y horizontales en su parte exterior (inflación o deflación). Para identificar en qué sector del edificio volcánico se están produciendo las deformaciones, en Galeras se adoptaron los métodos de monitoreo usando las técnicas de Inclinometría Electrónica y E.D.M., esta última metodología implementada en este último semestre.

Para el segundo semestre de 2010, el volcán Galeras contó con una red compuesta por 5 inclinómetros electrónicos telemétricos y se construyó una primera línea de control EDM, formada por 11 prismas reflectores y dos Bases.

2.1.3.1. Inclinometría Electrónica

Para el segundo semestre de 2010, fue destacable la información registrada en el inclinómetro Cráter (ubicado a 0.8 km., al este-noreste del cráter principal, 4060 msnm), luego de mostrar un comportamiento estable, se observaron cambios en sus dos componentes, en la componente Tangencial se presentó una tendencia descendente, que hasta el 9 de septiembre alcanzó 58 μrad , fecha en la cual es más pronunciado este descenso, que culminó el 5 de noviembre totalizando 1680 μrad , posteriormente se observó un cambio en la tendencia a ascenso, entre el 5 de noviembre y el 31 de diciembre alcanzando unos 560 μrad . Por su parte, en la componente Radial, se observó una tendencia ascendente desde el 24 de agosto, y hasta el 9 de septiembre de 164 μrad , de igual forma desde el 9 de septiembre, el cambio fue más resaltante, y hasta el 5 de noviembre, este cambio fue de 5440 μrad , luego se mostró un comportamiento descendente alcanzando hasta el 31 de diciembre de 2010, unos 1600 μrad (Figura 2.1.77.).

En el inclinómetro Peladitos (ubicado a 1.4 km., al sureste del cráter principal, 3850 msnm), la componente Tangencial, entre el 9 de enero y el 14 de julio de 2010, mostró un comportamiento ascendente alcanzando cerca de 33 μrad , luego se presentó un leve descenso hasta el 17 de agosto de 6 μrad , posteriormente y de igual forma que en el inclinómetro Cráter, se resalta el cambio suscitado el 9 de septiembre, con un ascenso que hasta el 31 de diciembre de 2010, fue de 57 μrad . En la componente Radial el ascenso mostrado desde el 3 de enero, culminó el 23 de agosto alcanzando 17 μrad , luego se estabilizó con variaciones menores a 5 μrad (Figura 2.1.78.).

En el inclinómetro Huairatola (ubicado a 1.7 km., al norte del cráter principal, 3745 msnm), las principales variaciones se dieron en la componente Radial, con un cambio descendente desde el 2 de abril hasta el 31 de diciembre de 2010, de unos 104 μrad . La componente Tangencial debido a las fluctuaciones en el registro, para el periodo evaluado no es posible definir una tendencia, (Figura 2.1.79.).

Para el inclinómetro Cobanegra (ubicado a 3.9 km., al sur-sureste del cráter principal, 3610 msnm), en el periodo evaluado se observó que las componentes del inclinómetro se comportaron de manera similar en cuanto a sus tendencias, con diferentes valores en sus acumulados. Así, las componentes hasta el 11 de junio, mostraron una tendencia descendente con un acumulado cercano a los 50 μrad , para la componente tangencial y de 60 μrad para la componente radial. A partir del 11 de junio y hasta el 25 de agosto se presentó un leve ascenso para la componente tangencial y

radial de 15 μ rad y 20 μ rad, respectivamente; entre el 25 de agosto y el 11 de noviembre se dio un cambio en la tendencia, a descendente de 60 μ rad y 40 μ rad, para la componente tangencia y radial, respectivamente. Finalmente, solo para la componente tangencial se presentó un ascenso entre el 18 de noviembre y el 31 de diciembre, de unos 50 μ rad, mientras que la otra componente se mantuvo estable (Figura 2.1.80.).

En el inclinómetro Calabozo (ubicado a 6.8 km., al oeste-suroeste del cráter principal, 2350 msnm), entre 1 enero y 5 abril se tienen variaciones similares en las dos componentes. Hasta mediados de febrero un descenso de unos 50 μ rad para las dos componentes, luego un ascenso brusco de 30 , para luego mostrar un descenso entre finales de febrero y principios de abril de unos 80 μ rad para las dos componentes. La componente tangencial, a partir del 5 de abril y hasta el 19 de julio se observó un ascenso cercano a los 78 μ rad, luego entre el 19 de julio y el 18 de septiembre se presentó un descenso, el cual registro 63 μ rad, posteriormente y hasta el 12 de noviembre, se observó un ascenso de unos 54 μ rad. Por su parte, el registro de la componente Radial, mostró entre el 29 de marzo y el 14 de abril, un ascenso de 25 μ rad, finalmente un descenso entre el 14 de abril y el 13 de noviembre, cercano a los 17 μ rad (Figura 2.1.81.).

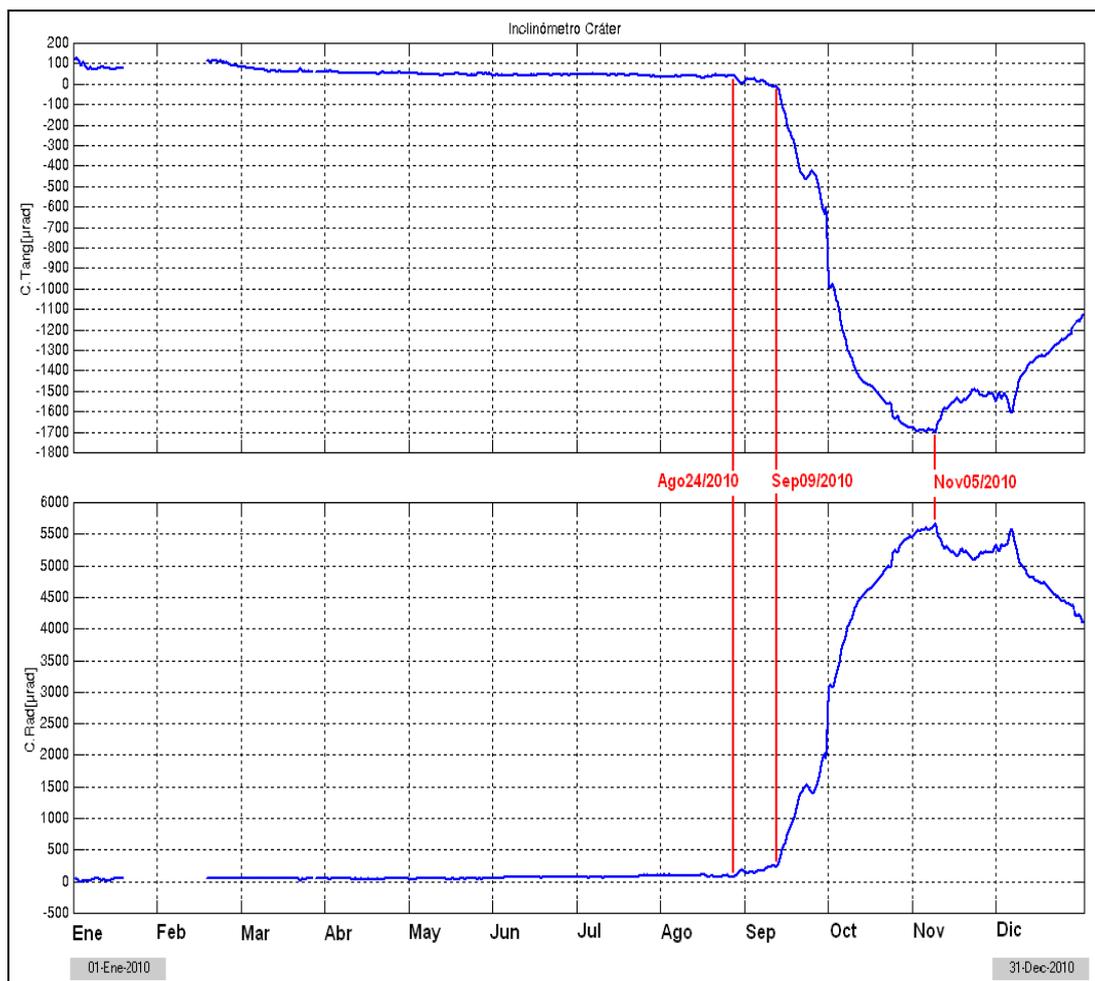


Figura 2.1.77. Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Cráter, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

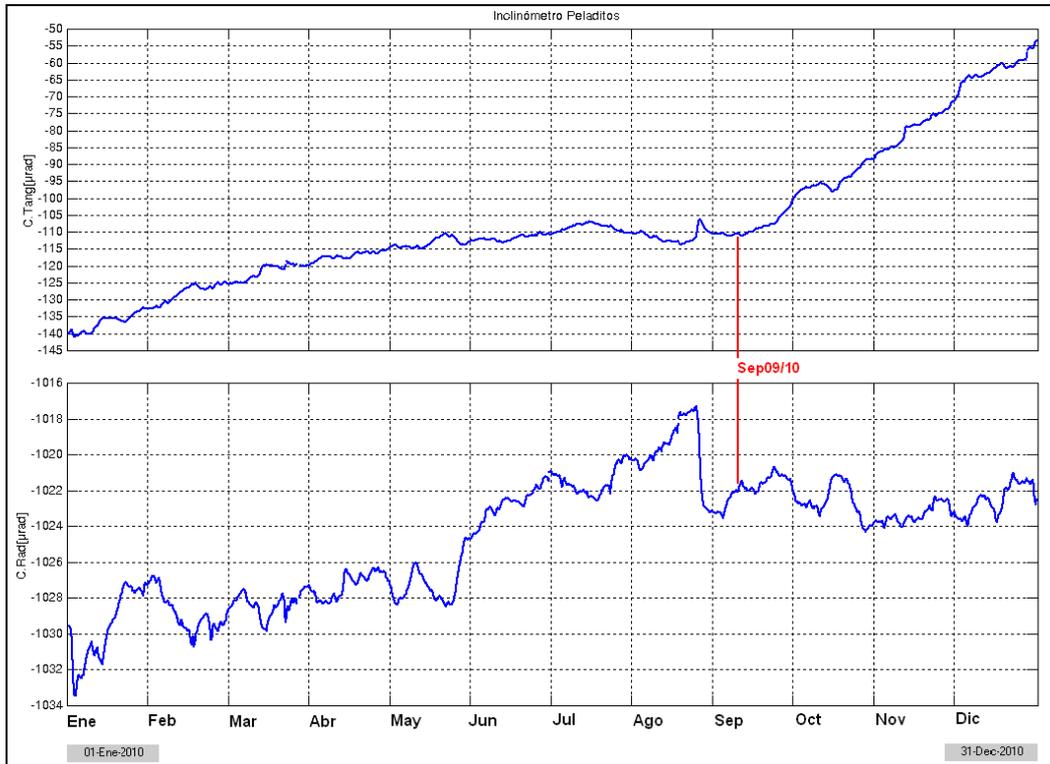


Figura 2.1.78. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Peladitos, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

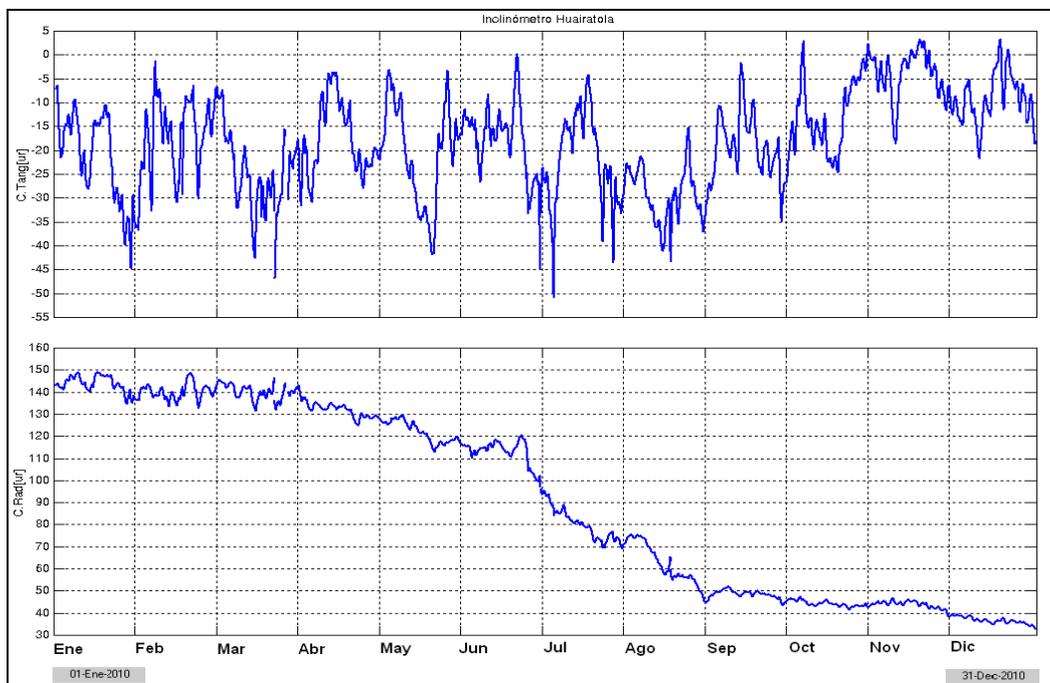


Figura 2.1.79. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Huairatola, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

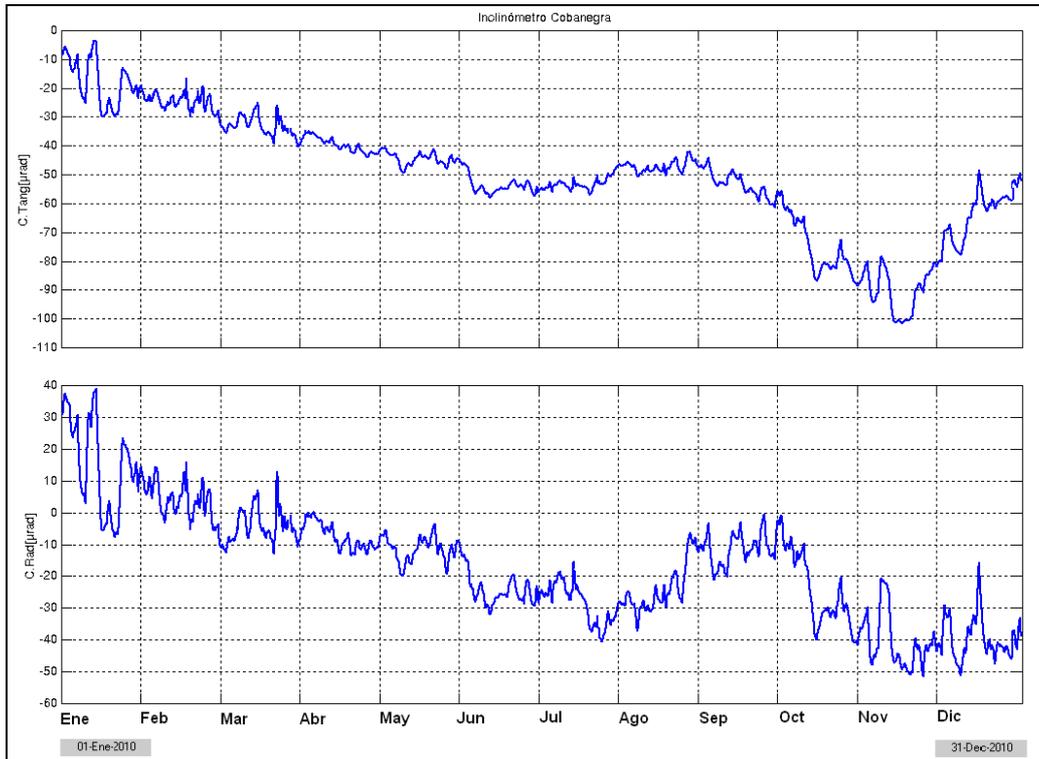


Figura 2.1.80. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Cobanegra, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

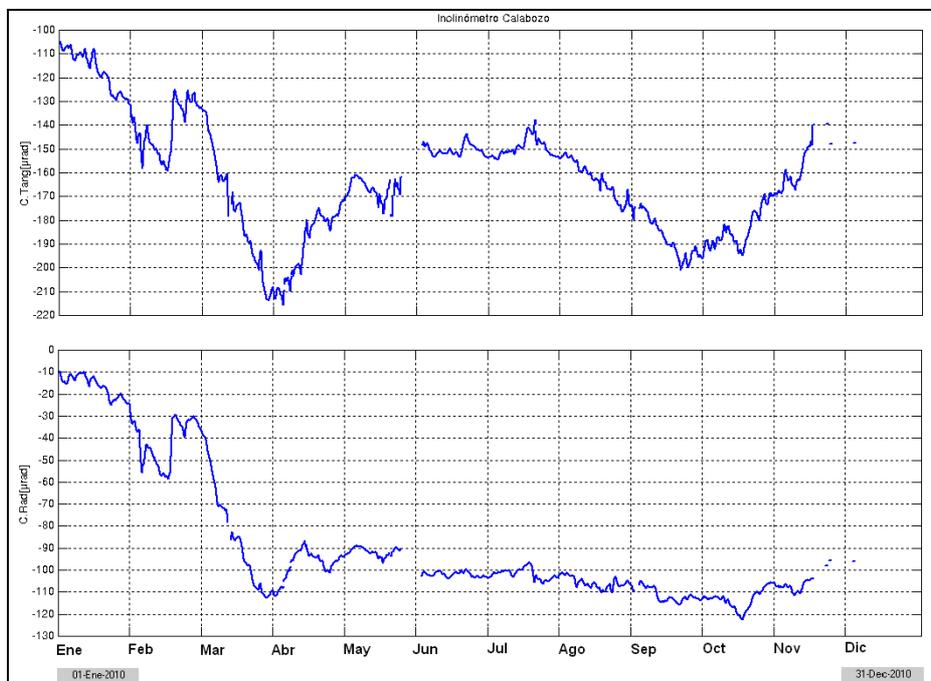


Figura 2.1.81. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, del inclinómetro Calabozo, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

Es importante mencionar que algunas de las variaciones observadas en el registro de los inclinómetros que están ubicados en la parte alta del volcán mostraron un comportamiento que está relacionado con los eventos de fractura ocurridos principalmente en los meses de agosto y diciembre de 2010, algunos reportados como sentidos y magnitudes locales de hasta 4.1 en la escala de Richter.

Se resalta los cambios presentados desde el 9 de septiembre de 2010, variaciones observadas en las dos componentes de los inclinómetros Cráter, Cobanegra y en la componente tangencial de Peladitos (Figura 2.1.82.). En general, se observa un comportamiento inflacionario hacia el sector del cono activo (Figura 2.1.83.). Estos cambios, posiblemente se relacionan con la actividad sísmica suscitada después de la erupción del 25 de agosto de 2010.

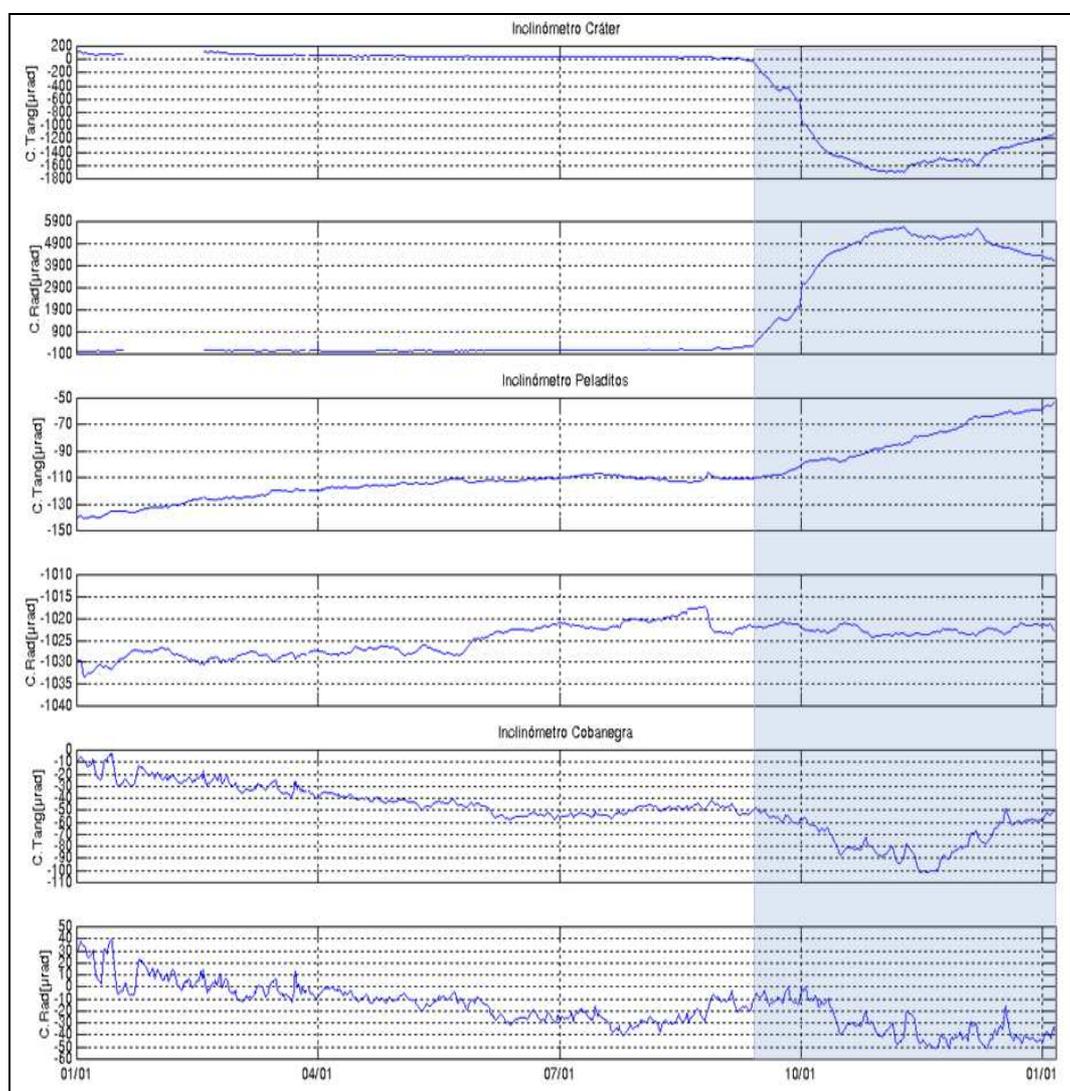


Figura 2.1.82. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, de los inclinómetros electrónicos Cráter, Peladitos y Cobanegra, instalados en Galeras, para el periodo comprendido entre enero y diciembre de 2010.

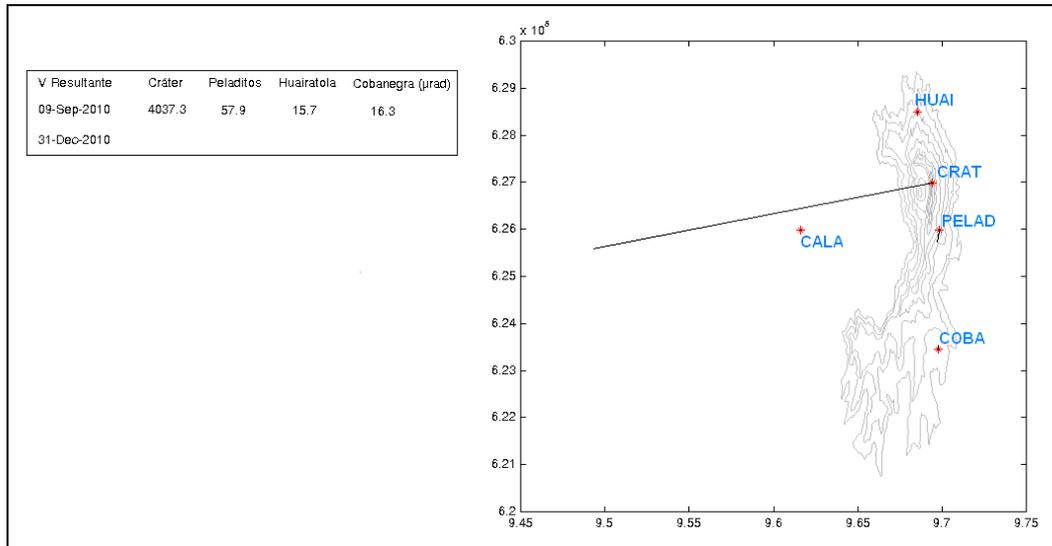


Figura 2.1.83. Vectores resultantes para los inclinómetros electrónicos Cráter, Peladitos, Huairatola y Cobanegra para el periodo comprendido entre el 9 de septiembre de 2010 y el 31 de diciembre de 2010. El asterisco indica el lugar donde se encuentra cada estación.

2.1.3.2. Medición Electrónica de Distancias - EDM

En la Figura 2.1.84. se muestran los puntos materializados en Galeras en el segundo semestre de 2010. Debido a las condiciones climáticas adversas, entre ellas lluvia y nubosidad, para Galeras no fue posible realizar mediciones EDM.

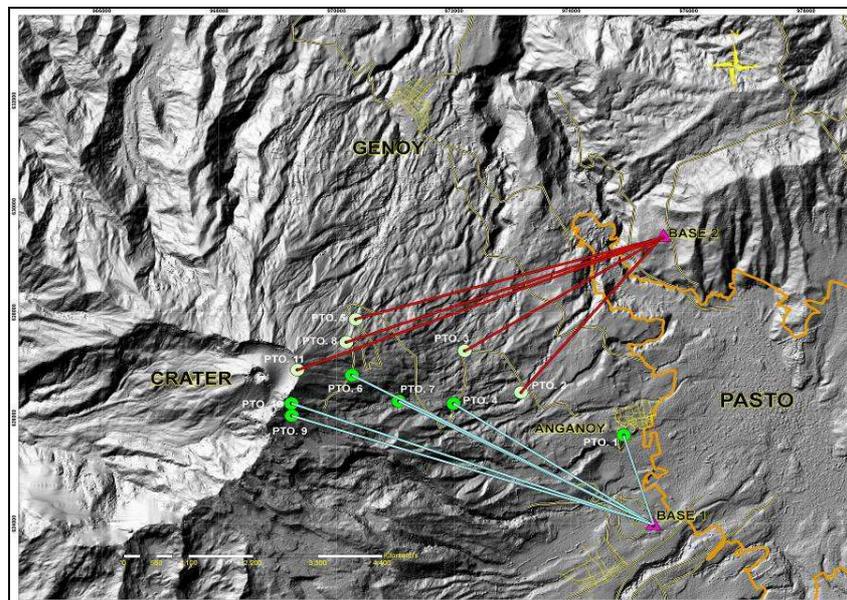


Figura 2.1.84. Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Galeras. Las figuras de color violeta indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color verde (oscuro y claro) indican la ubicación de los prismas reflectores.

2.1.4 Físicoquímica

Durante el segundo semestre de 2010, se midió el flujo de Dióxido de Azufre (SO_2) emitido por Galeras a la atmósfera, las emisiones de Radón (Rn_{222}) en suelos y algunos muestreos en aguas termales. Para medir el SO_2 se utilizó las estaciones telemétricas permanentes tipo Scan-DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy – Espectroscopía Óptica Diferencial de Absorción) del Proyecto NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change) de la Unión Europea del cual INGEOMINAS es partícipe. Las estaciones se localizan en el cuadrante noroccidental de Galeras (Figura 2.1.85.a.) debido a que el viento se dirige hacia ese sector durante la mayor parte del año. Los datos de dirección y velocidad del viento para calcular el flujo de SO_2 se obtienen de la estación climática ubicada en la cima volcánica y cuando ésta se daña, entonces se usa los datos del IDEAM y siempre se reporta el valor máximo del flujo obtenido en el día. Además se utilizó la información de las imágenes satelitales de OMI (Ozono Monitoring Instrument) que monitorea la presencia de algunos gases en la atmósfera, entre ellos el SO_2 . Para medir las emisiones de Rn_{222} en suelos se utilizó las estaciones isotópicas (Figura 2.1.85b.) distribuidas en la Línea Galeras.

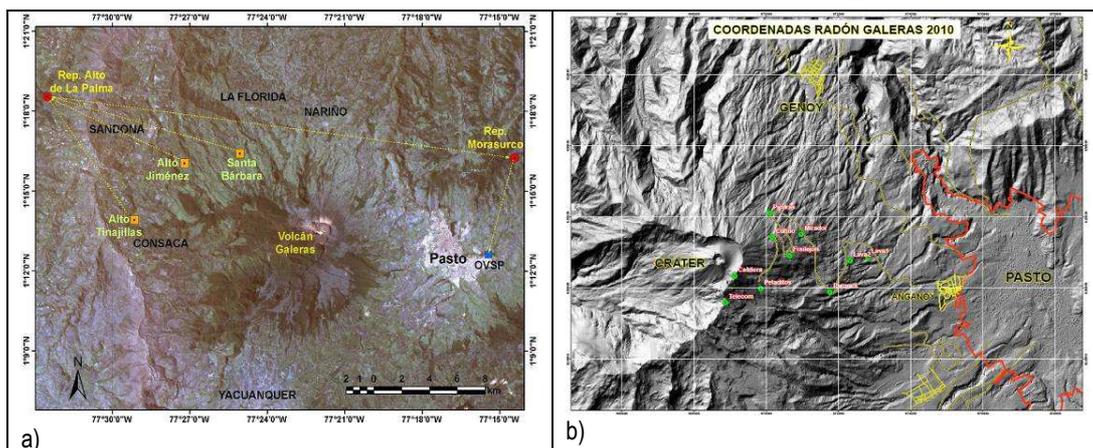


Figura 2.1.85. Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS y de las estaciones isotópicas de Rn_{222} .

2.1.4.1. Mediciones de Dióxido de Azufre SO_2

Lo más importante del monitoreo del flujo de SO_2 para el segundo semestre de 2010 es que se observó un proceso de descenso de los valores de flujo, en los días previos a la erupción del 25 de agosto de 2010 a las 04:00 a. m. y luego se nota que hubo desgasificación, pues hay más datos de flujo y con valores superiores a los registrados en el semestre anterior, lo cual se mantiene hasta finales de octubre, luego en noviembre se nota nuevamente un descenso en los valores del flujo y diciembre mostró fluctuaciones en valores bajos (Figura 2.1.86.). Este comportamiento general se ha visto en otros eventos eruptivos de Galeras, pues días antes de la erupción hay valores muy bajos o ausencia de SO_2 , lo cual puede estar correlacionado con la imposibilidad del gas para salir, debido a un tapón natural que incrementa la presión interna y cuando la explosión ocurre, también hay desgasificación, que se ve reflejada en el incremento de los valores del flujo y de los escaneos válidos para ser evaluados. Si se suman los valores máximos reportados en el segundo semestre de 2010 se obtiene un valor de 21.745 T/día y al compararlos con los del primer semestre que son

de 7.934 T/día, se tiene que el aumento del flujo fue de 2.7 veces, y básicamente fue debido al evento eruptivo de agosto.

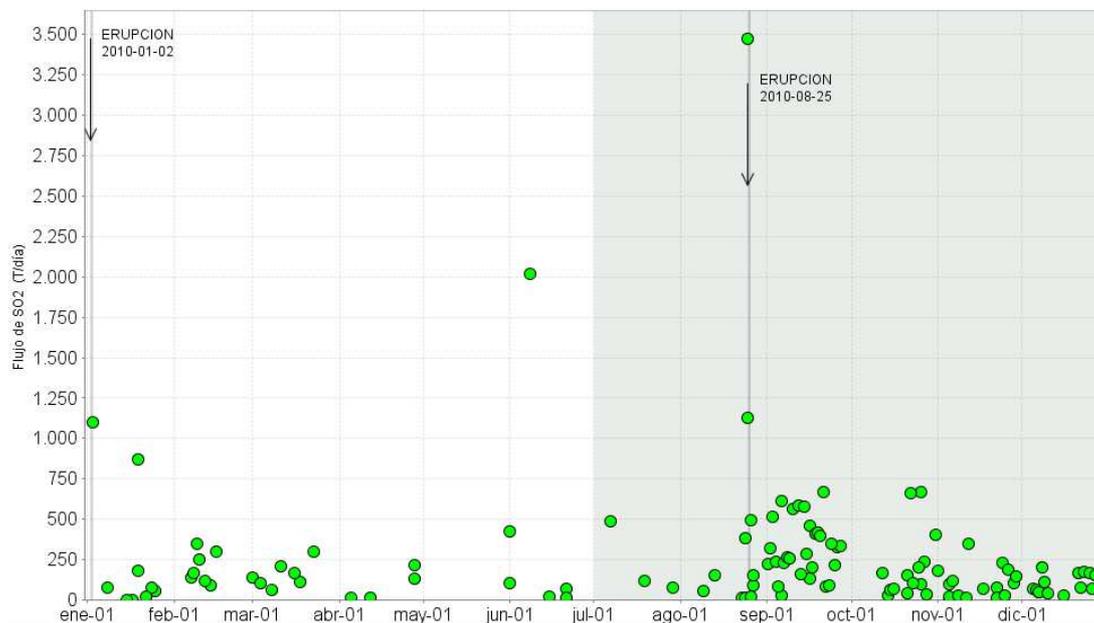


Figura 2.1.86. Flujo de SO₂ de Galeras, medido con estaciones Scan-DOAS (NOVAC). Enero a diciembre de 2010.

Para el segundo semestre de 2010 el rango de emisión de SO₂ fluctuó entre 11 T/día y 3.473 T/día, valores que se catalogan cualitativamente como muy bajo y muy alto para Galeras (Figura 2.1.87.). El máximo valor fue medido en agosto 25 a las 2:20 p.m. con velocidad del viento de 5.1 m/s y dirección hacia la estación de Alto Tinajillas, unas 10 horas después de la erupción. El 61 % de los valores máximos fueron medidos en la estación de Santa Bárbara, un 23% en la estación de Alto Tinajillas y un 15% fueron medidos en la estación Alto Jiménez.

También se usó el movilDOAS para hacer medidas en la carretera circunvalar al Galeras, en total se hicieron 22 mediciones en el semestre, de las cuales la que arrojó el mayor valor de flujo, se registró en agosto 25 a las 3:34 p.m., unas 11 horas después de la erupción, con una pluma dirigida hacia el sector occidental de Galeras y con un valor de flujo de 1.125 T/día (Figura 2.1.87.).

Los datos de sensor OMI (Ozono Monitoring Instrument) acoplado al satélite Aura (NASA), mostraron solamente cuatro imágenes tomadas a una altura de 5.000 m.s.n.m. con valores de concentración de 39.9, 20.5, 16.2, 34.2 y 22.8 mg/m² en las fechas del 25 de agosto, 9 y 12 de septiembre, 1 de octubre y 14 diciembre, respectivamente. El resto del semestre no se vio concentración de SO₂ a esa altura sobre Galeras. En la figura 2.1.88. se puede observar la imagen OMI de agosto 25 de 2010, tomada a las 2:32 p.m., unas 10 horas después de la erupción, con una pluma dirigida hacia el WNW y con un valor máximo de concentración de 1.4 DU (39.9 mg/m²). 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.s.n.m y los instrumentos en tierra miden flujo de SO₂, además las horas de medición son diferentes.

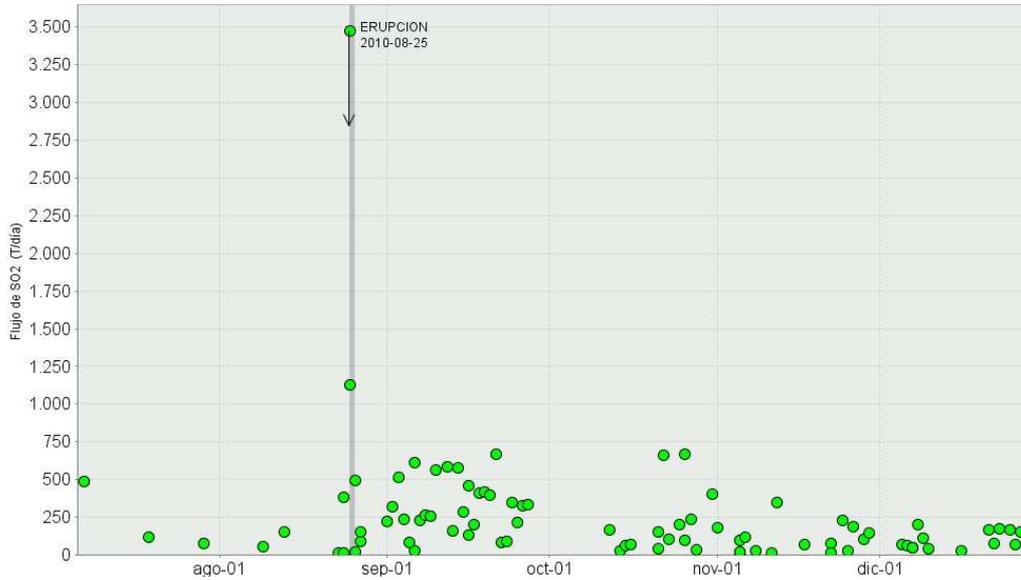


Figura 2.1.87. Flujo de SO₂ de Galeras, medido con estaciones Scan-DOAS (NOVAC). Segundo semestre de 2010.

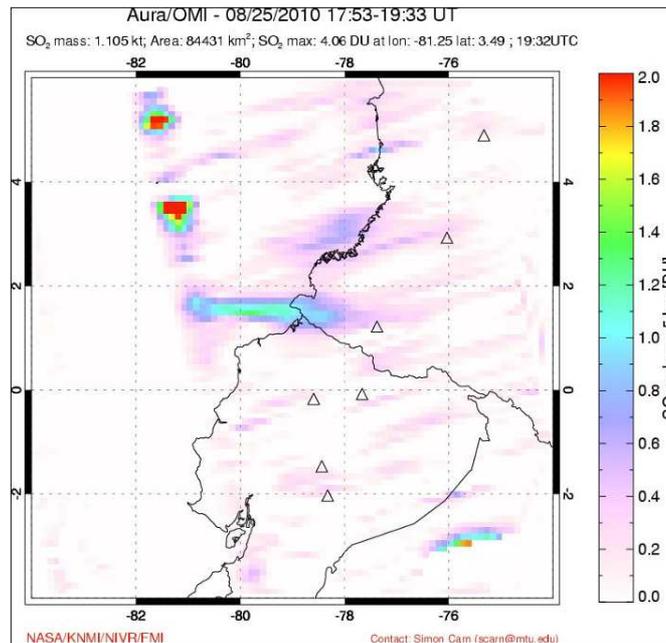


Figura 2.1.88. Imagen satelital OMI de concentración de SO₂ en la atmósfera capturada a una altura de 5.000 m.s.n.m. sobre Galeras. Agosto 25 de 2010

Las estaciones para monitoreo de gas Rn₂₂₂ funcionaron durante todo el semestre, hasta el 10 de diciembre de 2010, pues por razones logísticas y administrativas fue necesario suspender las mediciones. Durante el periodo evaluado se contó con 10 estaciones isotópicas, localizadas a lo largo de la carretera a la cima y denominada Línea Galeras (Figura 2.1.85). El comportamiento de las emisiones de Rn₂₂₂ se representa en gráficas que tienen los datos de cada dos estaciones comenzando con las de mayor altitud hasta llegar a las de menor altitud.

En la figura 2.1.89. se puede apreciar el comportamiento de las medidas para las estaciones Caldera y Telecom, entre abril y diciembre de 2010, el recuadro gris representa el semestre en evaluación. Los valores de emisión de Rn_{222} para la estación Caldera oscilaron entre 58 y 1.685 pCi/L, siendo registrado el pico unas dos semanas antes de la erupción, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 250 pCi/L. Para la estación Telecom se tiene un rango de emisión de Rn_{222} entre 111 y 1.982 pCi/L, se puede observar que después de la erupción de agosto, los valores aumentan los rangos de fluctuación y el pico fue registrado en la segunda semana de noviembre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 270 pCi/L. Los acumulados indican que es muy constante el ascenso de Telecom y aumentan los valores al final del semestre, en cambio en Caldera se ve dos episodios de aumento de las emisiones en agosto y octubre (Figura 2.1.90.).

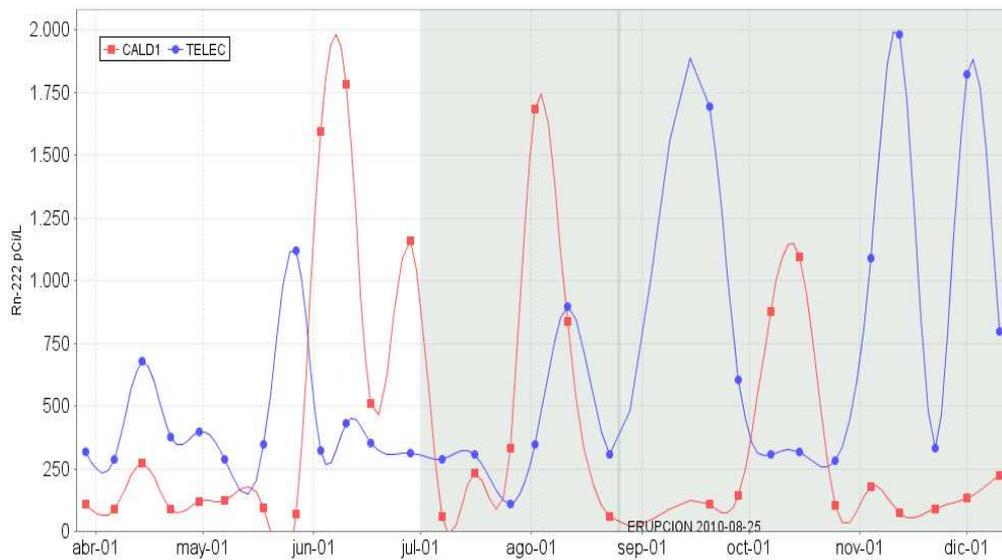


Figura 2.1.89. Emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Caldera y Telecom. Abril a diciembre de 2010.

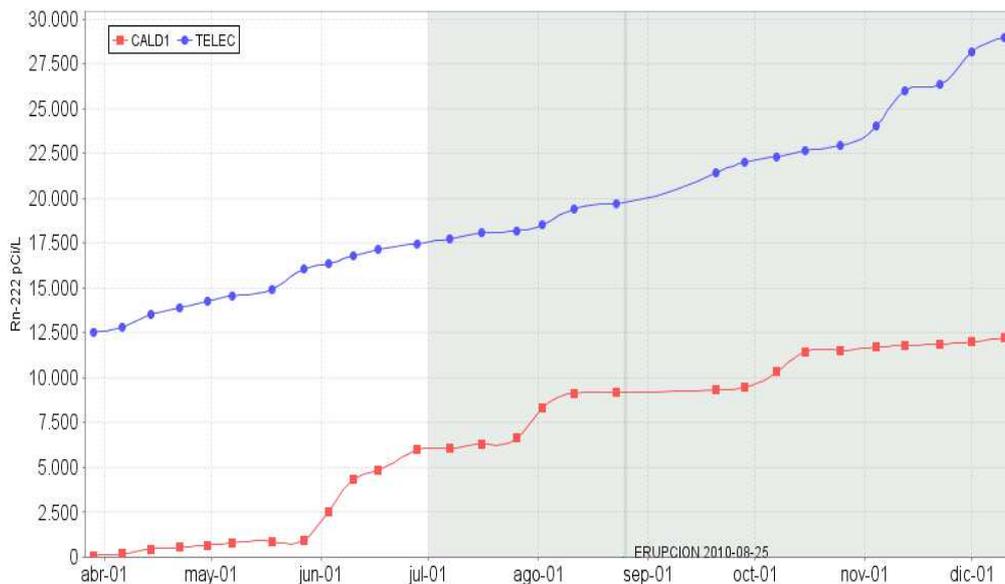


Figura 2.1.90. Acumulado de las emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Caldera y Telecom. Abril a diciembre de 2010.

En la figura 2.1.91. se puede apreciar el comportamiento de las medidas para las estaciones Peladitos y Cufiño, entre abril y diciembre de 2010, el recuadro gris representa el semestre en evaluación. Los valores de emisión de Rn_{222} para la estación Peladitos oscilaron entre 11 y 839 pCi/L, siendo registrado el pico en la última semana de octubre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 150 pCi/L. La estación Cufiño tiene un rango de emisión de Rn_{222} entre 29 y 3.085 pCi/L, y sus mayores fluctuaciones se presentaron previo a la erupción, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 250 pCi/L. Los acumulados indican que es muy constante el ascenso de Peladitos y solamente se ven dos cambios suaves de pendiente a finales de agosto y finales de octubre, en cambio en Cufiño se ve una pendiente marcada a principios del semestre, antes de la erupción, luego se estabiliza y vuelven a subir los valores al final del semestre, pero de manera más moderada (Figura 2.1.92.).

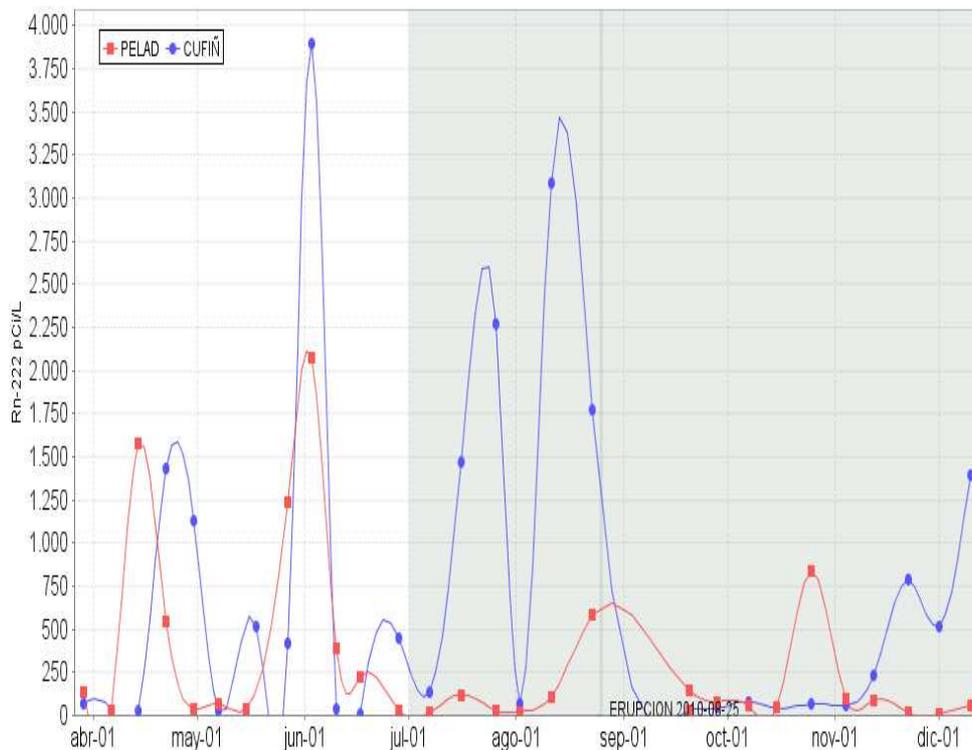


Figura 2.1.91. Emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Peladitos y Cufiño. Abril a diciembre de 2010.



Figura 2.1.92. Acumulado de las emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Peladitos y Cufiño. Abril a diciembre de 2010.

En la figura 2.1.93. se puede apreciar el comportamiento de las medidas para las estaciones Frailejón y Piedras, entre abril y diciembre de 2010, el recuadro gris representa el semestre en evaluación. Los valores de emisión de Rn_{222} para la estación Frailejón oscilaron entre 81 y 4.492 pCi/L, siendo registrado el pico en la segunda semana de julio, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 350 pCi/L. La estación Piedras tiene un rango de emisión de Rn_{222} entre 28 y 4.067 pCi/L, y sus mayores fluctuaciones se presentaron al finalizar el semestre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 650 pCi/L. Los acumulados indican para Piedras un pequeño cambio en la pendiente antes de la erupción y los mayores valores al finalizar el semestre, con un cambio de pendiente importante, en cambio en Frailejón se ve dos cambios de pendiente pequeños, uno al comienzo del semestre y otro menor a finales de septiembre (Figura 2.1.94.).

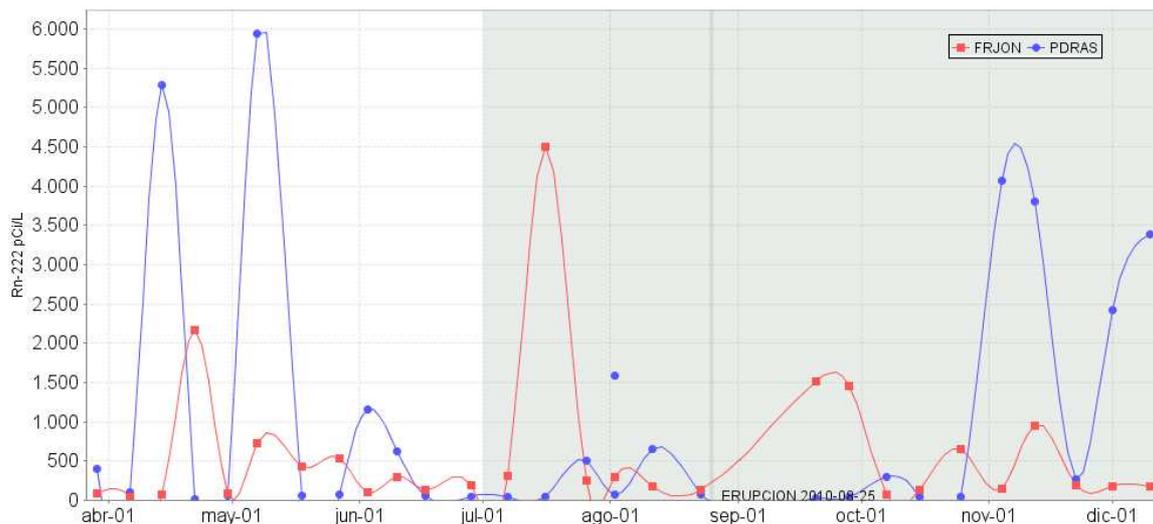


Figura 2.1.93. Emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Frailejón y Piedras. Abril a diciembre de 2010.



Figura 2.1.94. Acumulado de las emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Frailejón y Piedras. Abril a diciembre de 2010.

En la figura 2.1.95. se puede apreciar el comportamiento de las medidas para las estaciones Mirador y Parques, entre abril y diciembre de 2010, el recuadro gris representa el semestre en evaluación. Los valores de emisión de Rn_{222} para la estación Mirador oscilaron entre 162 y 5.000 pCi/L, siendo registrado el pico en la segunda semana de noviembre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 500 pCi/L. La estación Parques tiene un rango de emisión de Rn_{222} entre 373 y 3.468 pCi/L, y sus mayores fluctuaciones se presentaron en la segunda mitad del semestre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 2000 pCi/L. Los acumulados indican para Mirador un cambio importante a finales de octubre y se mantiene hasta finalizar el semestre, en Parques se ve el cambio a finales de septiembre y se mantiene también hasta finalizar el semestre (Figura 2.1.96).

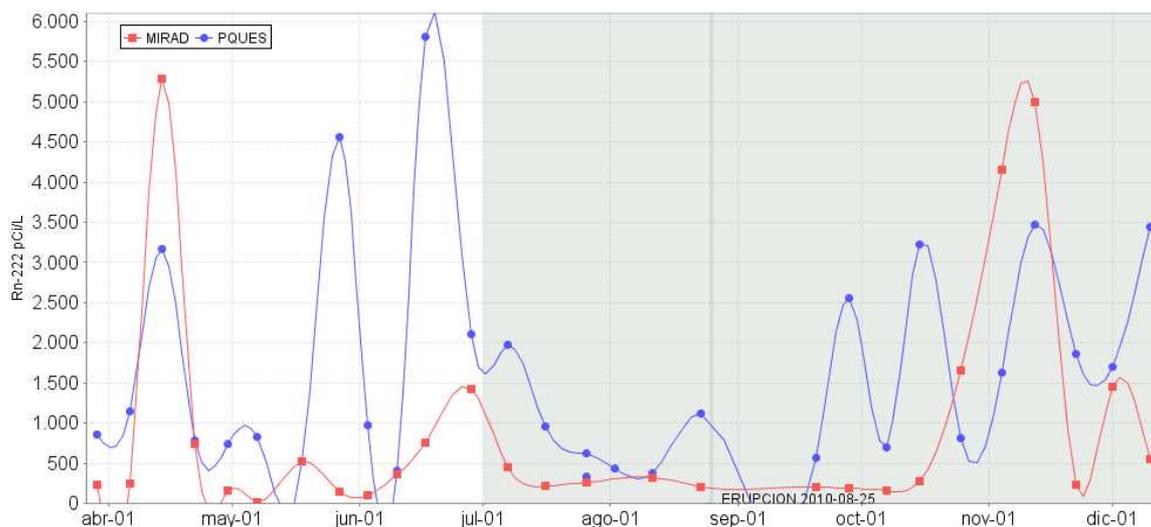


Figura 2.1.95. Emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Mirador y Parques. Abril a diciembre de 2010

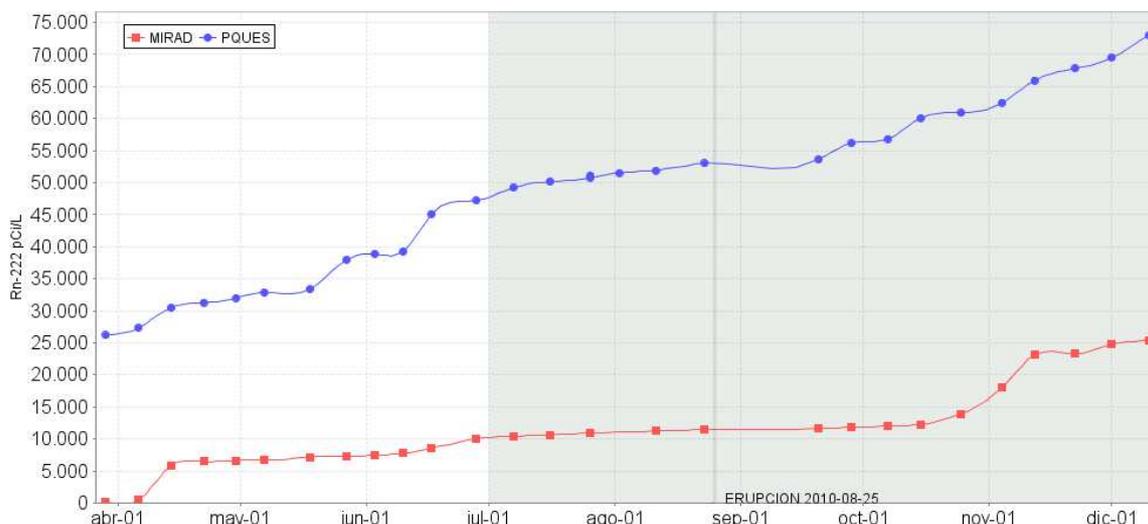


Figura 2.1.96. Acumulado de las emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Mirador y Parques. Abril a diciembre de 2010

En la figura 2.1.97. se puede apreciar el comportamiento de las medidas para las estaciones Lava 1 y Lava2, entre abril y diciembre de 2010, el recuadro gris representa el semestre en evaluación. Los valores de emisión de Rn_{222} para la estación Lava1 oscilaron entre 42 y 4.322 pCi/L, siendo registrado el pico al finalizar el semestre, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 2.500 pCi/L. La estación Lava2 tiene un rango de emisión de Rn_{222} entre 89 y 4.903 pCi/L, y sus mayores fluctuaciones se presentaron antes de la erupción, en general sus valores se mantuvieron por debajo de los 1.000 pCi/L. Los acumulados indican para Lava 2 un cambio importante unas tres semanas antes de la erupción y luego estabilidad, en cambio en Lava1 se ve un cambio importante en julio, luego estabilidad y nuevamente cambia la pendiente subiendo los valores en los dos últimos meses del semestre (Figura 2.1.98.).

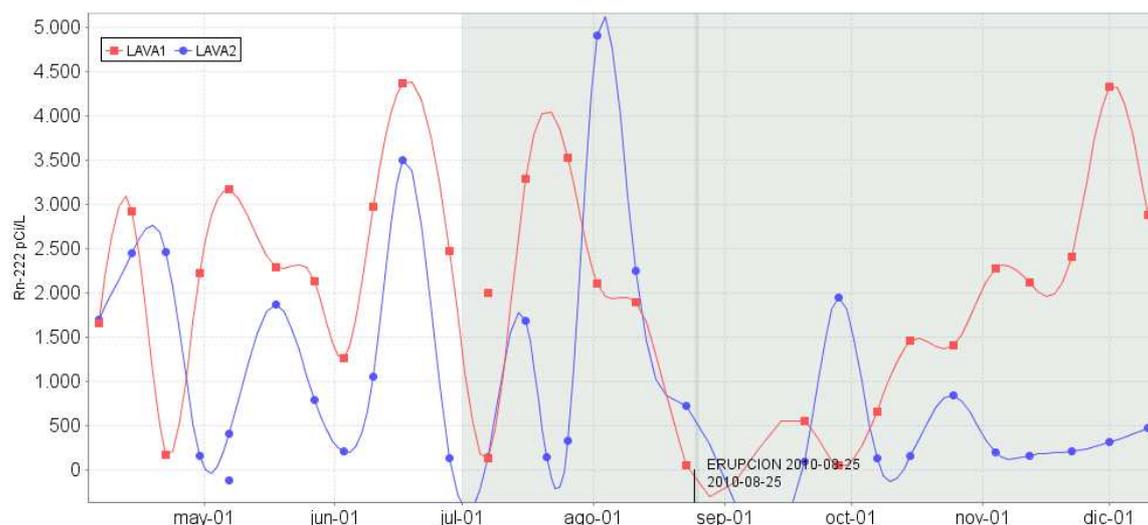


Figura 2.1.97. Emisiones de Rn_{222} , en las estaciones Lava1 y Lava2. Abril a diciembre de 2010

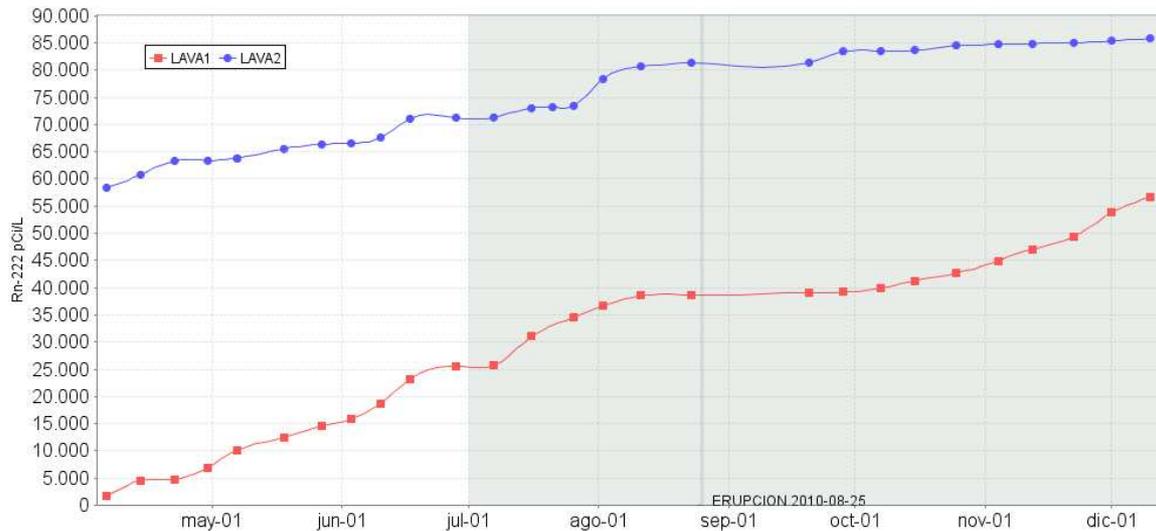


Figura 2.1.98. Acumulado de las emisiones de Rn₂₂₂, en las estaciones Lava1 y Lava2. Abril a diciembre de 2010

Según las gráficas de acumulados, las estaciones Caldera, Cufiño, Piedras, Lava1 y Lava2 son las que mostraron aumento en los valores de emisión y también en sus fluctuaciones antes de la erupción de agosto de 25 de 2010 y en general, en las siguientes semanas después de la erupción lo que se tiene es una relativa estabilidad.

2.1.4.2. Muestreo de aguas termales

En septiembre y noviembre se realizó el muestreo de las fuentes termales del volcán Galeras: CEHANI, Aguas Agrias, Río Pasto, Fuente Blanca y Licamancha. En la Figura 2.1.99, se muestra la ubicación de las fuentes termales del volcán Galeras. Se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos como temperatura y pH, si la temperatura es menor a 30°C, se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.1.8. se indican los parámetros medidos in situ en septiembre de 2010 y en comparación con los que se midieron en abril de 2010.

Tabla 2.1.8. Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del volcán Galeras, abril, septiembre y noviembre de 2010.

| Fuente Termal | pH Abr/10 | pH Sep/10 | pH Nov/10 | T° Abr/10 | T° S Sep/10 | T° Nov/10 | Conductividad Sep/10 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|-------------------------|
| CEHANI | 7.3 | 7.2 | 7.0 | 31°C | 35°C | 36°C | - |
| Aguas Agrias | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 28°C | 28°C | 28°C | 5.03 μS/cm |
| Río Pasto | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 43°C | 43°C | 42°C | - |
| Fuente Blanca | 6.2 | 5.9 | - | 23°C | 22°C | - | 1957 μS/cm |
| Licamancha | 3.8 | 4.2 | 4.5 | 14°C | 14°C | 14°C | 516 μS/cm |

Para las fuentes termales CEHANI y Río Pasto no se realizó medición de conductividad ya que su temperatura es superior a los 30°C y con un aumento en la temperatura, disminuiría la viscosidad del agua y permitiría que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ión, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, como las aguas termales que estamos analizando, la conductividad varía de 1 a 4% por cada grado centígrado.

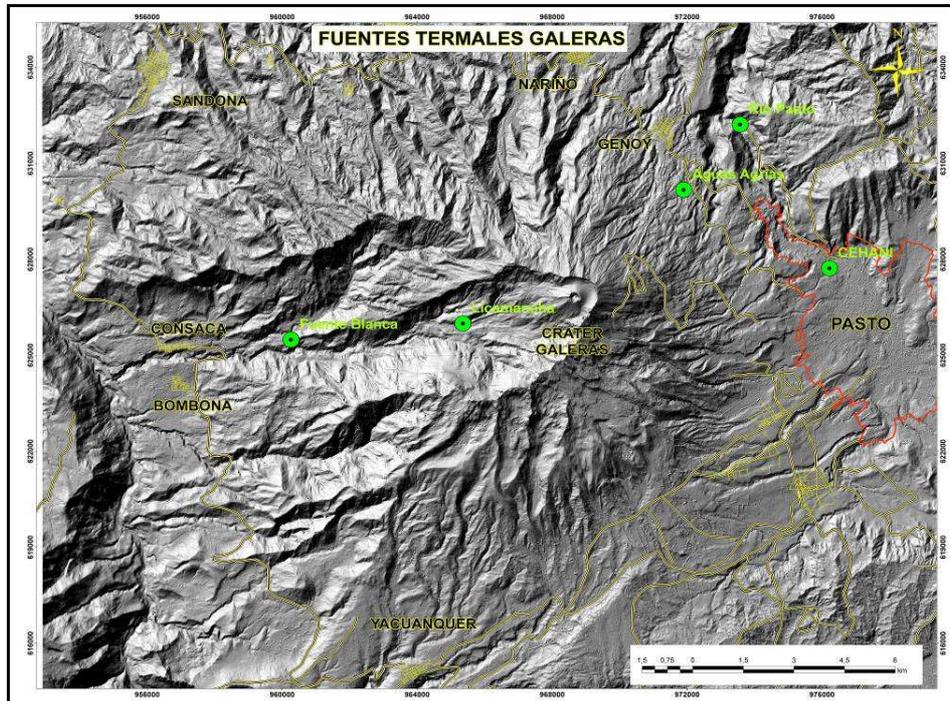


Figura 2.1.99. Mapa de localización de las fuentes termales presentes en Galeras.

Los valores de conductividad eléctrica indican que las aguas de la fuente termal Fuente Blanca se ionizan en forma más completa que las otras fuentes, lo que quiere decir, que hay mayor presencia de sales disueltas que las aguas termales de Licamancha y Aguas Agrias.

Los valores de pH para las fuentes termales Río Pasto y Fuente Blanca son de carácter ácido y se destaca que las fuentes termales Aguas Agrias y Licamancha son ácidas con un pH bajo que significa que estas fuentes termales están en una zona de alta producción protónica, típica de un ambiente de alta influencia magmática y/o hidrotermal. Para la fuente termal CEHANI su pH es de 7.2 lo que indica que son aguas neutras.

En cuanto a la temperatura, los valores registrados en los meses de septiembre y noviembre de 2010 se mantienen muy similares en comparación con las medidas realizadas en la campaña del mes de abril de 2010.

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

Los análisis de bicarbonatos se determinaron por titulación de la muestra con una solución valorada de un ácido fuerte como el HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados por medio del cambio de color de azul a verde, utilizando dos indicadores ácido-base como fenolftaleína y azul de bromo fenol. Este análisis se realizó en campo ya que los resultados de muestras almacenadas no son representativos. Los análisis correspondientes a Cloruros y Sulfatos se



realizaron en el laboratorio del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. Los resultados de estos análisis se expresan en la tabla 2.1.9, en comparación con los obtenidos en la campaña del mes de abril de 2010.

Tabla 2.1.9. Concentraciones de aniones presentes en las fuentes termales de Galeras, en los periodos indicados.

| FUENTE TERMAL | Cl ⁻ (mg/L) | | | SO ₄ ⁼ (mg/L) | | | HCO ₃ ⁻ (mg/L) | | |
|---------------|------------------------|--------|--------|-------------------------------------|---------|--------|--------------------------------------|--------|--------|
| | Abr/10 | Sep/10 | Nov/10 | Abr/10 | Sep/10 | Nov/10 | Abr/10 | Sep/10 | Nov/10 |
| CEHANI | 55.30 | 64.52 | 53.18 | 100.5 | 116.50 | 18.75 | 2031.3 | 1908.9 | 1921.5 |
| Río Pasto | 337.90 | 390.66 | 342.45 | 624.58 | 572.92 | 565.83 | 945.5 | 894.6 | 837.9 |
| Aguas Agrias | 388.53 | 397.75 | 392.79 | 2614.58 | 2777.08 | 792.08 | 1677.5 | 1625.4 | 1713.6 |
| Licamancha | 17.02 | 17.02 | 34.74 | 2162.50 | 190.21 | 182.15 | 183 | 195.3 | 189 |
| Fuente Blanca | 138,26 | 211,28 | - | 1460,42 | 1335,63 | - | 36,6 | 44,1 | - |

Giggenbach (1981,1984)¹ estudió la “madurez” de muchas aguas geotermales en el mundo por medio de gráficas de concentraciones de diferentes cationes y aniones en diagramas de actividad. El asume idealidad en las soluciones, o sea actividad igual a concentración para los diferentes iones porque los diagramas son generalmente logarítmicos y también porque en la mayoría de los casos usa razones de concentración entre diferentes iones. Como ya se mencionó, el uso de diagramas logarítmicos hace imperceptible la diferencia entre actividad y concentración si la solución no es muy concentrada. Los diagramas desarrollados por Giggenbach presentan las reacciones químicas que pueden explicar la asociación mineral comúnmente encontrada en sistemas hidrotermales volcánicos.

Para realizar el análisis de las muestras tomadas en el volcán Galeras se utilizó el diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, presentado en la figura 2.1.100. Las aguas se clasifican de acuerdo al anión dominante como aguas sulfatadas, bicarbonatadas o cloruradas.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 2.1.9. y el diagrama de la figura 2.1.100, del muestreo realizado en septiembre de 2010 a las fuentes termales del volcán Galeras, se puede observar que las fuentes CEHANI, Río Pasto, Aguas Agrias y Fuente Blanca no presentaron cambios en su composición química. En cambio la fuente termal Licamancha ubicada en el municipio de Consacá, presentó un cambio significativo en la composición de algunos iones, pasando de aguas completamente sulfatadas a aguas sulfato – bicarbonatadas, lo que podría estar relacionado con el ligero aumento del pH en esta fuente, que puede ser causado por la presencia de iones bicarbonatados, asociados con cationes como Na⁺ (sodio), K⁺ (potasio), Ca⁺ (calcio) y Mg⁺ (magnesio). Puede ser que la variación de estos valores esté reflejando un medio más fracturado y más caliente lo que facilitaría que los fluidos magmáticos puedan viajar con mayor facilidad a través del medio y afectar de manera significativa la disminución de las concentraciones de los aniones como sulfatos medidos en la fuente termal Licamancha. La fuente termal Fuente Blanca sigue presentando altas concentraciones de sulfatos más que de cloruros y bicarbonatos, esto podría asociarse con la condensación de gases volcánicos cerca de la superficie con aguas meteóricas, que se hayan presentado en esos días.

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

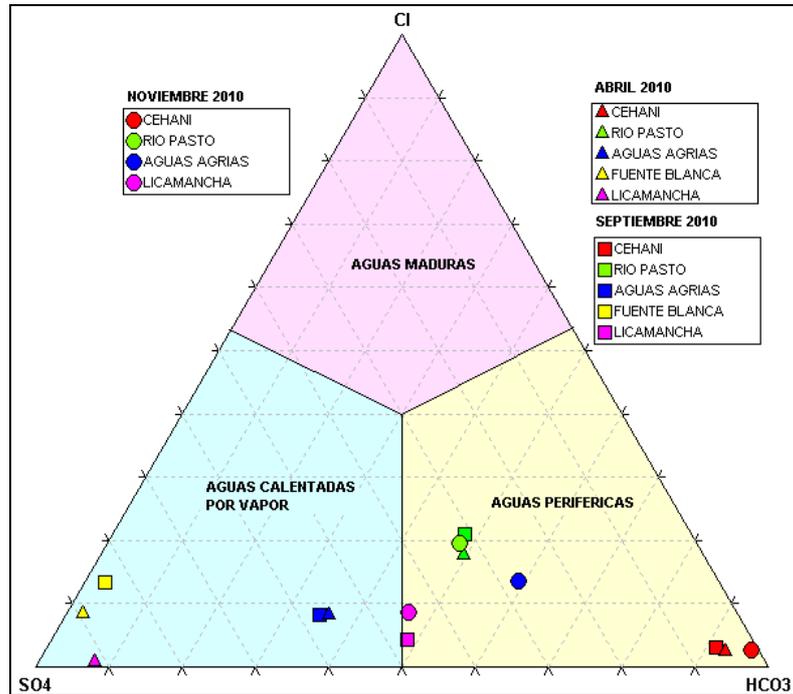


Figura 2.1.100. Diagrama triangular Cl, HCO₃⁻ y SO₄²⁻ para las fuentes termales del Volcán Galeras.

Según el diagrama de la figura 2.1.100. y la tabla 2.1.9, para el mes de noviembre y en comparación con el mes de septiembre, se puede observar que en las fuentes CEHANI, Río Pasto y Licamancha no se presentó cambio en su composición química. En cambio la fuente termal Aguas Agrias, ubicada en el corregimiento de Genoy, presentó un cambio significativo en la composición de algunos iones, pasando de aguas sulfato – bicarbonatadas a aguas bicarbonato - sulfatadas, lo cual puede ser causado por la presencia de iones bicarbonatados, asociados con cationes como Na⁺ (sodio), K⁺ (potasio), Ca⁺ (calcio) y Mg⁺ (magnesio). Fuente Blanca no pudo ser visitada para muestreo. En la tabla 2.1.10. se puede apreciar la clasificación de las fuentes termales de Galeras en los meses muestreados.

Tabla 2.1.10. Clasificación de las fuentes termales del Volcán Galeras.

| FUENTE TERMAL | CLASIFICACION | | |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Abril 2010 | Septiembre 2010 | Noviembre 2010 |
| CEHANI | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas |
| Río Pasto | Aguas Bicarbonato – sulfatadas | Aguas Bicarbonato – sulfatadas | Aguas Bicarbonato – sulfatadas |
| Aguas Agrias | Aguas Sulfato - bicarbonatadas | Aguas Sulfato - bicarbonatadas | Aguas Bicarbonato – sulfatadas |
| Licamancha | Aguas Sulfatadas | Aguas Sulfato - bicarbonatadas | Aguas Sulfatadas |
| Fuente Blanca | Aguas Sulfatadas | Aguas Sulfatadas | No se muestreó |

2.1.5. Geología

La erupción del 25 de agosto del 2010, así como las ocurridas recientemente en el volcán (2009 - enero 2 de 2010) fue de tipo vulcaniana, se caracterizó por tener un nivel bajo de explosividad, con una columna ancha y de poca altura; la agencia de Washington relacionada con Advertencia de Emisión de Cenizas Volcánicas (VAAC) no detectó la columna debido a la nubosidad presente.

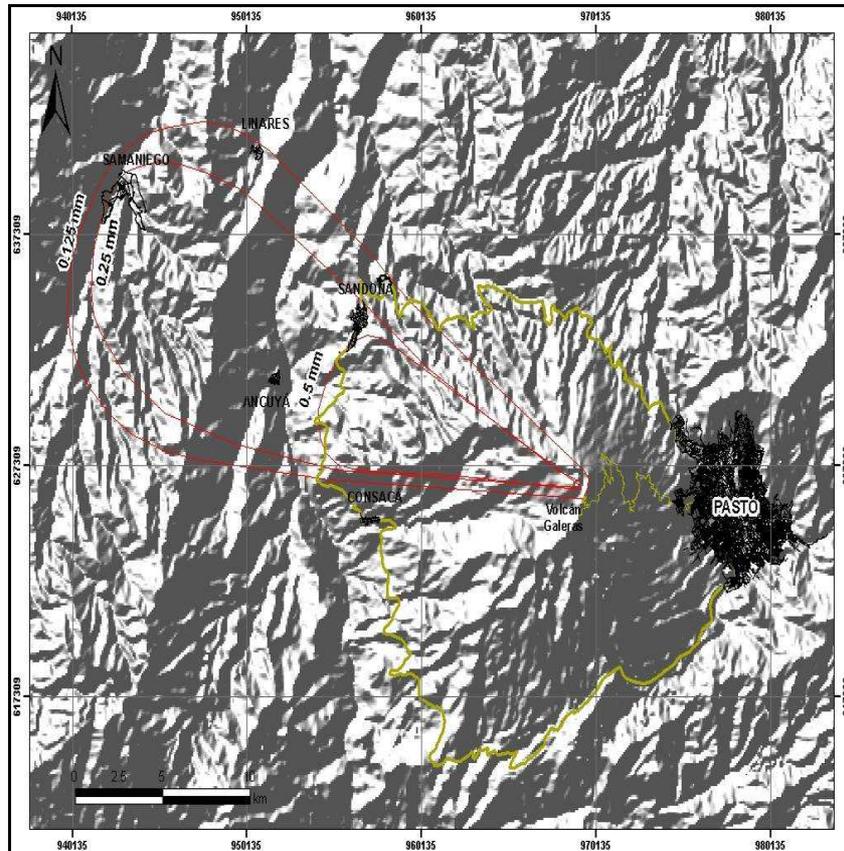


Figura 2.1.102. Concentraciones de SO₂ asociadas a la columna eruptiva del volcán Galeras el 25 de agosto de 2010 (Fuente NOAA).

2.1.5.2. Espesor de los depósitos de ceniza

Al recolectar la ceniza se dificulta medir o estimar de manera exacta espesores que son del orden milimétrico o incluso de décimas de milímetro. En este caso para evaluar el valor de espesor de los depósitos de ceniza se empleó el método de estimación “visual”, considerando la subjetividad del método. En general los espesores de los depósitos muestreados es bajo, variando de 0.1 a 0.3 mm, en algunos casos la ceniza se presenta a manera de manchas sobre la vegetación, como ocurre en la vereda San Antonio y San José del municipio Consacá. Por otro lado en la vereda El Guabo del municipio de Consacá, los espesores de los depósitos de ceniza emitida son los mayores muestreados, los habitantes de la zona advierten que la ceniza cubría completamente los patios. En la Figura 2.1.103, se presenta una serie de imágenes de los sitios de recolección de caída piroclástica.



Villa Inés, Consacá en la cancha de la escuela, 13.8 km al oeste del cráter



Ancuya, 17,8 km al oeste de cráter del volcán Galeras



Vereda Alto Tinajillas, 13.7 km al oeste del cráter del volcán Galeras

Figura 2.1.103. Aspecto de las cenizas depositadas en veredas de los municipios Consacá y Ancuya, zonas afectadas por la caída de ceniza de la erupción del volcán Galeras el 25 de agosto de 2010

En la Figura 2.1.104. se presenta la variación del espesor de los depósitos con las distancia al cráter, como se puede observar el espesor de los depósitos disminuye con la distancia al cráter. A partir de este mapa se calculo que el área afectada por la ceniza corresponde a 285 km² y el volumen de material depositado fue de 37033 m³ sin incluir el material que se deposito en la parte superior del volcán (borde del cráter, entre la caldera y el cráter, hasta la estación Cufiño).

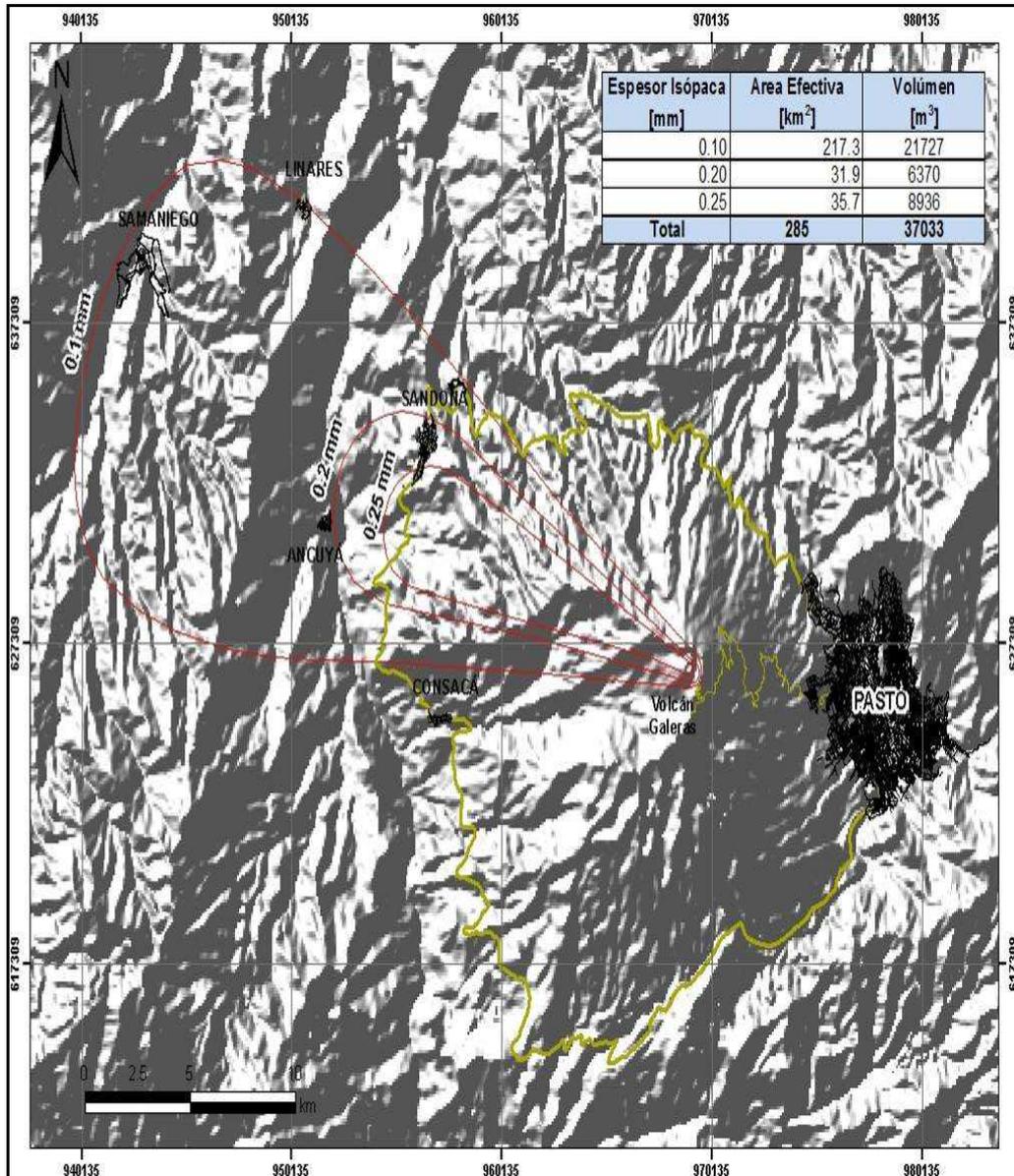


Figura 2.1.104. Mapa de Isópacas desarrolla a partir de los datos recolectados en campo de caída piroclástica.

2.1.5.3. Descripción de componentes de la ceniza

Realizando un análisis preliminar de las muestras de ceniza se encontró que el mayor porcentaje de la muestra es el vidrio generalmente de color traslucido, con variaciones a vidrio de tonalidades grises y vidrio oscuro en menor proporción, los granos son angulares y subangulares. Las muestras de ceniza tienen un tamaño de grano uniforme y en general tienen una composición similar a las emitidas durante los últimos eventos del volcán Galeras: alto porcentaje de vidrio, porcentaje moderado de líticos y bajo porcentaje de cristales. En la Figura 2.1.105, se presenta una serie de imágenes donde se observa la variación del tamaño de grano de la ceniza emitida en la erupción de agosto 25 de 2010.



Foto tomada a la muestra GA-AM-25-25-08-10. Ceniza recolectada a 13,7 km del cráter



Foto tomada a la muestra GA-RM-25-25-08-10. Ceniza recolectada a 13,7 km del cráter



Foto tomada a la muestra GA-RM-07-25-08-10. Ceniza recolectada a 14,8 km del cráter

Figura 2.1.105. Variación del tamaño de grano de la ceniza emitida por el volcán Galeras el 25 de agosto de 2010. Izquierda: aspecto de la ceniza; derecha: aspecto de la ceniza bajo lupa binocular

A continuación se realiza una breve descripción de los diversos componentes emitidos en la erupción de agosto 25 de 2010. En la Figura 2.1.106, se presenta una muestra de material volcánico, donde se observa el porcentaje de líticos en la muestra es mayor que los otros componentes.

-Vidrio claro: En algunos casos es totalmente traslucido y también se presenta con microinclusiones de opacos. Presentan abundante brillo y la mayoría son angulares con bordes bien marcados. Se

encuentran en todas las fracciones de tamaño de grano, es el componente más frecuente de la ceniza emitida.

-Vidrio gris claro: Con tonos gris, menor brillo que el vidrio traslúcido. Generalmente tienen forma angular y se presenta en mayor proporción en la ceniza de tamaño medio que en la de tamaño fino.

-Vidrio oscuro: El vidrio de tono oscuro se presenta en mayor proporción en la ceniza de tamaño medio.

-Líticos: Presentan tonalidades ocre, rojizas, brillo mate y hábito terroso, fácilmente deleznable con los que se presentan en mayor abundancia.

-Líticos Gris Claro: Son subredondeados, porfíricos y poseen mayor dureza.



Figura 2.1.106. El porcentaje de líticos de color rojizo en esta muestra es mucho mayor, aunque no supera el porcentaje de vidrio.

2.1.5.4. Características de los tamaños de material emitido por la erupción.

El material emitido con tamaño de grano ceniza media se recolectó en veredas El Guabo del municipio de Consacá y Alto Tinajillas del municipio de Sandoná. Está compuesto principalmente por vidrio traslúcido, vidrio de tono gris y vidrio con incrustaciones de opacos, en general el vidrio es angular a subangular. El porcentaje de líticos tanto color ocre ó rojizo como gris claro es intermedio y la presencia de cristales es muy baja, en algunas muestras no se observan.

-Las muestras con tamaño de grano ceniza fina se recolectaron en el municipio de Linares y Consacá. El mayor componente de estas muestras es el vidrio traslúcido, lo que le da al material una tonalidad clara. En una de estas muestras la concentración de líticos es mayor, pero no supera la concentración de vidrio.

-Gran parte del material recolectado en los depósitos formados durante la erupción del volcán Galeras del 25 de agosto de 2010 es tamaño polvo, llegando a distancias de hasta 23 km del cráter. El mayor componente de este tamaño es el vidrio claro.



Libertad y Orden

2.1.6 Actividad superficial y cambios geomorfológicos

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

El sitio web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto tiene como URL: <http://www.ingeminas.gov.co/Pasto.aspx>. 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://www.ingeminas.gov.co/Nosotros/Políticas-de-Privacidad-y-Terminos-de-Uso.aspx>

En la mayoría de visitas de reconocimiento, orientadas a realizar labores de mantenimiento de la red de monitoreo, adicionalmente se hizo seguimiento de la información de la actividad superficial, se observó la columna de gases de color blanco, tendida hacia el costado sur y sur occidental y se reportaron fuertes olores a gases azufrados.

A partir de registros de cámaras web ubicadas en el Observatorio y en el municipio de Consacá, se logro identificar durante la mayor parte del semestre emisiones de vapor de agua y otros gases volcánicos (Figuras 2.1.110, 2.1.111. y 2.1.112.), que en ocasiones evidenciaban un contenido de ceniza, se resalta la columna de emisión del día 19 de octubre que alcanzó una altura aproximada de 1500 m sobre la cima del volcán que estuvo asociado a reportes de caída de ceniza desde varias poblaciones del área de influencia del volcán.

En el segundo semestre de 2010 se realizaron 9 sobrevuelos, los días 23 de julio, 1 y 25 de agosto, 1, 4 y 24 de septiembre, 6 y 14 de octubre y 27 de diciembre (Figuras 2.1.118, 2.1.119, 2.1.120, 2.1.121, 2.1.122, 2.1.123, 2.1.124 y 2.1.125; en siete de ellos (1 y 25 de agosto, 1, 4 y 24 de septiembre y 6 y 14 de octubre) se tomaron imágenes térmicas que permitieron observar la variación de las condiciones de temperatura del material rocoso en el cono volcánico, registrándose temperaturas de hasta de 220 °C aproximadamente. Los principales focos de emisión fueron el cráter principal y los cráteres secundarios El Paisita (interno y externo), y Las Chavas, puntos de emisión como Las Deformes y La Grieta Nueva detectada en este semestre sobre el costado norte.

Durante el periodo del presente informe, no fue posible evidenciar cambios en la geomorfología del volcán.

- El 9 de agosto de 2010 a las 12:27 p.m., personal del OVSP que se encontraba en el municipio de Consacá, observó salida de gases de coloración blanca de forma pulsátil de los campos fumarólicos Chavas, Paisita y Deformes (Figura 2.1.107).



Figura 2.1.107. Emisión de gases vista desde el municipio de Consacá, el 9 de agosto de 2010 a 12:27 p.m. En la gráfica se observa emisión de gases volcánicos de tonalidad blanca, desde el los cráteres secundarios El Paisita (sector Norte de Galeras) y desde el cráter las Chavas (sector occidente-sur-occidente de Galeras).

El día 13 de septiembre, Gracias a imágenes capturadas por personal del INGEOMINAS, en trabajos de campo por la cima de Galeras, es posible observar salida de gas, de forma continua, a manera de chorro, principalmente desde el campo fumarólico Las Deformes (Figura 2.1.108.).



Figura 2.1.108. Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana del 13 de septiembre de 2010, 10:56 a.m. (izquierda) y 11:05 a.m. (derecha). Se observa la salida de gas desde el campo fumarólico Las Deformes.

El día 7 de octubre, funcionarios del INGEOMINAS que se encontraban en comisión en la cima de Galeras reportaron fuerte disminución en la cantidad del gas emitido, en comparación con lo observado en el sobrevuelo del día 6, con salida de gas de color blanco desde Las Chavas, Paisita, el fondo y las paredes internas del cráter principal y desde Las Deformes, los gases eran dispersados hacia el noroccidente por acción del viento; por instantes alguna cantidad del gas emitido desde el cráter principal tenía color café, lo cual podría indicar presencia de material particulado muy fino, también se reportó olor a gases azufrados (Figura 2.1.109.).



Figura 2.1.109. Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana del 7 de octubre de 2010, por personal del Ingeominas en la cima volcánica.



Figura 2.1.110. Imágenes de Galeras, capturadas desde el OVSP, en horas de la mañana del 10 de septiembre de 2010, 9:44 a.m. (izquierda) y 9:49 a.m. (derecha), en las fotografías se observa la salida de gas.



Figura 2.1.111. Imágenes de Galeras tomadas desde la sede del OVSP el día 29 de septiembre de 2010 en horas de la mañana.



Figura 2.1.112. Imágenes de Galeras capturadas por las cámaras web del OVSP (instaladas en la población de Consacá – izquierda y en la sede del OVSP – derecha) el día 2 de octubre de 2010 en horas de la mañana.

El 19 de octubre de 2010 se tuvieron varios reportes de emisión de ceniza, que estuvieron asociados con incrementos en el nivel del tremor de fondo. Desde la sede del OVSP se observaron columnas de emisión de color gris y alcanzaron alturas de hasta 1500 m sobre la cima (Figuras 2.1.113. y 2.1.114.).

En este mismo día, funcionarios de INGEOMINAS tomaron muestras de la ceniza depositada en la parte alta del volcán; y adicionalmente, se contó con dos muestras suministradas por el señor Mario Alberto Caicedo, funcionario de RTVC (Radio y Televisión de Colombia) cuya sede de antenas funciona cerca de la cima de Galeras, quien las tomó el 19 y 20 de octubre desde el borde de la caldera en el sector sur. El material depositado en la parte alta tuvo espesores de hasta 1 mm y se caracterizó por ser muy fino (Figura 2.1.115.).



Figura 2.1.113. Emisión de gases vista desde la sede del OVSP el día 19 de octubre de 2010 a las 9:27 a.m. En la imagen se observa salida de gases y material particulado (ceniza).



Figura 2.1.114. Fotografía tomada por el señor Mario Alberto Caicedo, funcionario de RTVC (Radio Televisión Nacional de Colombia), el día 19 de octubre de 2010, en donde se observa columna de emisión de color blanco desde los sectores de la fumarola Deformes, el cráter secundario Las Chavas y la parte interna del cráter principal al nivel del cráter secundario El Paisita; y también se observa emisión de color gris desde el cráter secundario El Paisita, asociada con salida de material particulado (ceniza).



Figura 2.1.115. Fotografías tomadas por el señor Mario Alberto Caicedo, funcionario de RTVC, en donde se observa la depositación de ceniza en el piso antes de tomar la muestra (izquierda) y la cantidad de ceniza recogida (derecha).

Por otra parte, otra de las comisiones del INGEOMINAS realizó un recorrido por la zona de influencia de Galeras y detectaron poca caída de ceniza en los sectores de la bocatoma San Felipe de la planta de tratamiento de agua potable del mismo nombre en la ciudad de Pasto y también en sectores del municipio de La Florida (Figura 2.1.116.).



Figura 2.1.116. Fotografías tomadas en la bocatoma San Felipe, Pasto (izquierda) y en la Florida (derecha) donde se observa poca caída de ceniza en estos sectores.

La ceniza emitida durante la erupción llegó hasta las poblaciones de Samaniego, Linares, Ancuya, Sandoná y Consacá, con una dispersión preferencial hacia el sector occidente-sur-occidente debido tanto a su tamaño fino como a la acción de los vientos. En la ciudad de Pasto no se reportó caída de ceniza. Al parecer la ceniza fue muy vítrea lo cual ha sido característico de las erupciones de Galeras, indicando presencia de material juvenil en el proceso.

La Figura 2.1.117. muestra el mapa de isópacas para la erupción del 25 de agosto de 2010, obtenido con base en los puntos de recolección de cenizas realizados por los funcionarios del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto en diferentes comisiones que se desplazaron hasta los sitios donde se reportó caída de ceniza. El volumen depositado se estimó en 37.033 m³ sin tener en cuenta el material depositado en la cima.

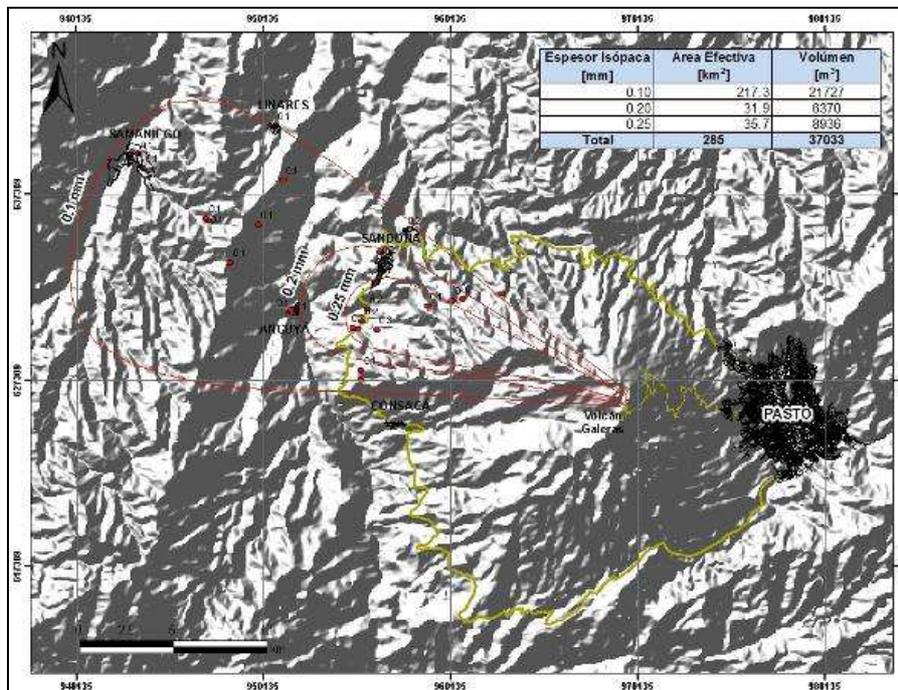


Figura 2.1.117. Mapa de isópacas de la ceniza emitida por Galeras durante la erupción del 25 de agosto de 2010.

En reconocimiento aéreo realizado el 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), se observó salida de gas en gran cantidad de coloración blanca, en forma continua desde el campo fumarólico Las Deformes, Las Chavas, El Paisita y de la pared interna del cono, hacia el sector norte, debajo del Paisita y en poca cantidad del cráter principal (Figura 2.1.118.), además durante el sobrevuelo no se percibió olor a gases azufrados.



Figura 2.1.118. Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Se observa la salida de gas de varios de los cráteres secundarios de Galeras y del cráter principal.

Gracias a la colaboración de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se pudo realizar un sobrevuelo en las primeras horas de la mañana del 25 de agosto de 2010, en el cual se pudo observar algunos pulsos de emisión de cenizas y con la cámara térmica de la FAC se pudo tomar imágenes de salida de material, al parecer desde inmediaciones del cráter secundario El Paisita, localizado al norte de cráter activo, infortunadamente las condiciones atmosféricas y la abundante nubosidad en la cima impidieron tomar imágenes que permitieran evidenciar la actividad superficial, así como tampoco evidenciar los depósitos de material del proceso eruptivo. En las figuras 2.1.119. y 2.1.120. se muestran imágenes de emisiones de ceniza, captadas durante la emisión.



Figura 2.1.119. Pulso de emisión de cenizas tomado durante un lapso del proceso eruptivo del 25 de agosto de 2010, a las 7:39 a.m.



Figura 2.1.120. Pulso de emisión tomado durante un lapso del proceso eruptivo del 25 de agosto de 2010, a las 08:09 a.m.

Adicionalmente, se pudieron hacer sobrevuelos el 1 y 4 de septiembre de 2010, así como el 6 de octubre de 2010 (Figuras 2.1.121, 2.1.122, 2.1.123).



Figura 2.1.121. Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, el cual se realizó en horas de la mañana del 1 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. En la fotografía se observa salida de gas desde varios puntos del cono activo.



Figura 2.1.122. Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, el cual se realizó en horas de la mañana del 4 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. En la fotografía se observa salida de gas desde varios puntos del cono activo.



Figura 2.1.123. Imágenes del cono activo de Galeras, capturadas en horas de la mañana en sobrevuelo efectuado el 6 de octubre, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC.

El 14 de octubre de 2010, se realizó sobrevuelo sobre la cima de Galeras (Figura 2.1.124.), durante el cual se observó salida de gases en proporción muy baja respecto al sobrevuelo realizado el 6 de octubre de 2010, observándose algunos pulsos de emisión desde los cráteres secundarios El Paisita y Las Chavas, desde el campo fumarólico Las Deformes y desde algunos puntos del fondo del cráter principal.



Figura 2.1.124. Imágenes aéreas del cono activo de Galeras, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 14 de octubre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

El día 27 de diciembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC – Helicóptero Huey II) y gracias a las condiciones climáticas favorables, se efectuó un sobrevuelo a la cima de Galeras, durante el cual se pudo observar emisiones de gases principalmente desde focos alrededor del cono activo y especialmente desde el flanco norte del mismo, presentando un lineamiento radial correspondiente a los focos de emisión vistos por primera vez en el sobrevuelo del 25 de agosto de 2010 y reportados en el comunicado posterior al episodio eruptivo de ese mismo día (Figura 2.1.125.), situación descrita con mayor detalle en el informe semanal del 24 al 30 de agosto de 2010.



Figura 2.1.125. Registro Fotográfico de la emisión de gases observada durante el sobrevuelo efectuado el día 27 de diciembre de 2010 en horas de la mañana con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. El óvalo rojo resalta los focos de emisión de gases alineados a manera de una fisura radial en el flanco norte del cono.

2.1.7. Electromagnetismo

El análisis de la información de variaciones en los campos eléctricos y magnéticos, registradas en la estación de monitores electromagnético, Frailejón, asociadas con la actividad volcánica, mostró para el segundo semestre del 2010, anomalías relacionadas con la actividad volcánica, específicamente con el episodio sísmico de eventos de fractura que inició el 20 de agosto a las 2:26 a.m. y que se asoció con procesos de intrusión y emplazamiento de material magmático.

De acuerdo con los registros, dichas anomalías son evidentes en la estación de campo eléctrico, en tanto que las componentes del campo magnético no muestra variación alguna asociada a este

episodio posiblemente porque los efectos producidos por el sismo no generan modificaciones a las propiedades magnéticas del material rocoso (Figura 2.1.126). Las anomalías más resaltables se asocian con los eventos correspondientes al 22 de agosto a las 08:41 a.m. con magnitud local de 4.3 en la escala de Richter y al 23 de agosto a las 12:57 p.m., con magnitud local de 4.6. Se observaron variaciones adicionales asociadas con eventos de menor magnitud local, pero no tan significativa como los antes mencionados.

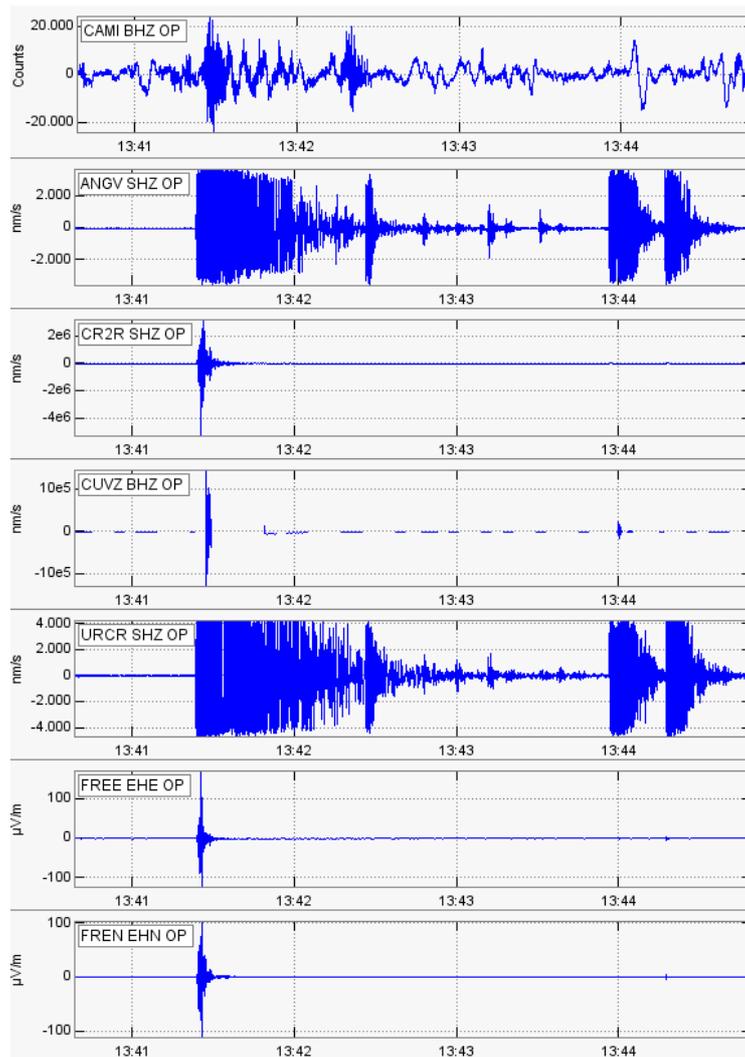


Figura 2.1.126. Evento sísmico del 22 de agosto de 2010, ocurrido a las 08:43 a.m., con su registro en la estación de monitoreo acústico CAMI, en las estaciones sismológicas de Anganoy, Cráter, Cufiño y Urcunina y, en las estaciones de campo eléctrico FREE y FREN.

De acuerdo con los registros, las variaciones observadas para este evento en las componentes eléctricas fueron de aproximadamente 290 $\mu\text{V/m}$ (voltaje medido pico a pico), para la componente EW y de aproximadamente 200 $\mu\text{V/m}$ para la componente NS (Figura 2.1.127.). Estas variaciones son significativas, ya que en condiciones de bajo nivel de actividad, estas componentes registran variaciones mínimas del orden de 2 $\mu\text{V/m}$. Adicionalmente, los registros en frecuencia en las

componentes eléctricas muestran un comportamiento muestran valores en el rango de las bajas frecuencias, entre 4 y 8 Hz (Figura 2.1.127.).

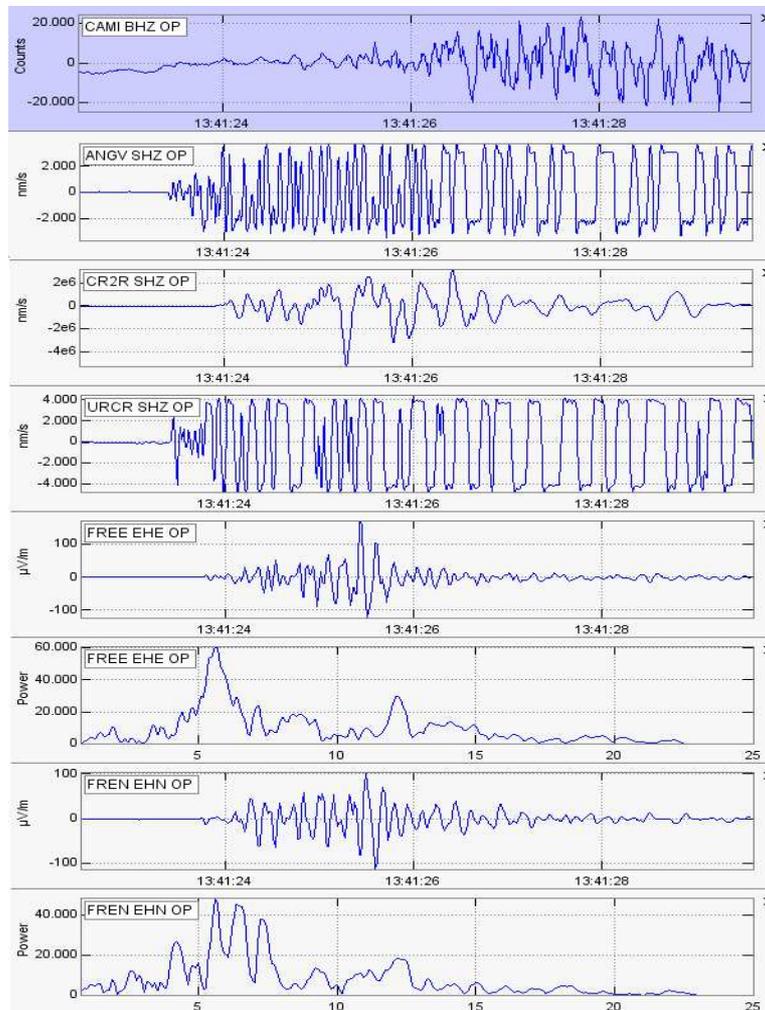


Figura 2.1.127. Evento sísmico del 22 de agosto de 2010, ocurrido a las 08:43 a.m., con su registro en estación acústica CAMI, en las estaciones sismológicas de Anganoy, Cráter y Urcunina; en la estación de campo eléctrico FREE, espectro de la componente FREE, componente FREN y espectro de la componente.

Un aspecto que se analiza es la forma de onda que reflejan las variaciones del campo eléctrico, ya que si se comparan con las formas de onda obtenidas para los eventos de emisión del 16 y 21 de julio de 2004 (Figura 2.1.128.), estos muestran formas muy diferentes, pues el proceso de emisión de ceniza refleja una forma de onda de largo período, que caracteriza el proceso de salida de material con propiedades magnéticas importantes (Figura 2.1.128.). Para los registros de agosto de 2010, debido a que la roca no tuvo la capacidad de resistir los esfuerzos almacenados, ésta se rompe y se desplaza, facilitando la circulación de fluidos atrapados en la zona, los cuales transportan iones libres que generan un potencial o voltaje en el sitio donde se está produciendo el fenómeno. Puede generarse también por efecto piezoeléctrico, el cual es un fenómeno físico que presentan algunos cristales debido al cual, aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica

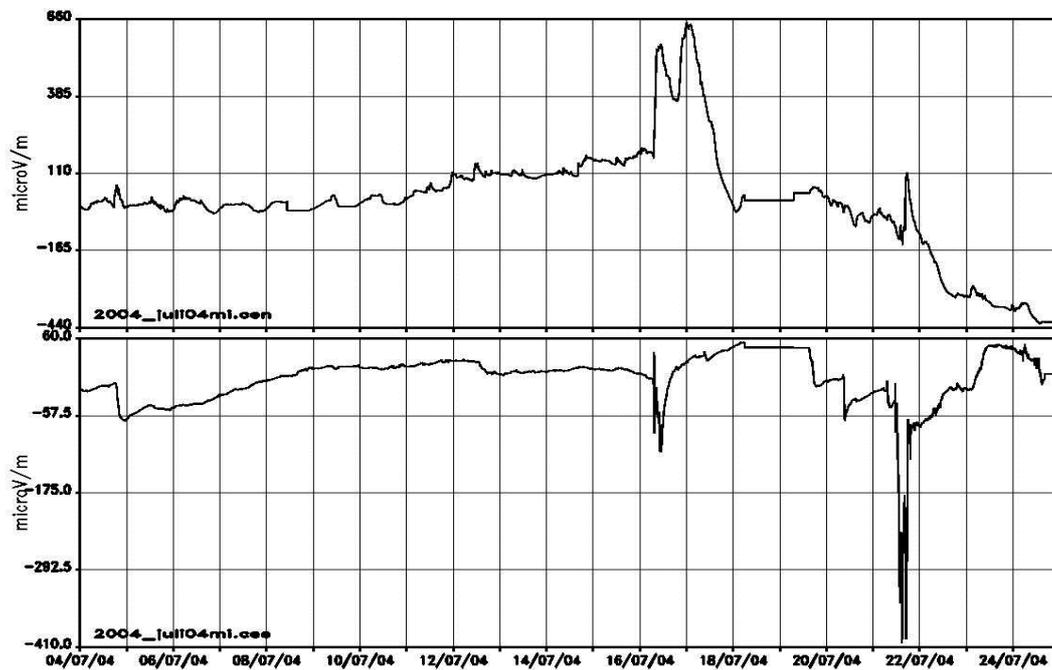


Figura 2.1.128. Registro de las variaciones eléctricas de la estación Cráter, ubicada en la base del cono volcánico de Galeras. La curva superior corresponde a la componente NS y la inferior a la componente EW. El período de tiempo considerado para la grafica está entre el 4 y el 25 de Julio de 2004.

En cuanto al evento del 23 de agosto, a las 12:57 p.m., con magnitud de 4.6 en la escala de Richter, los registros eléctricos muestran características similares a las del evento mencionado anteriormente, con amplitudes de alrededor de los 240 $\mu\text{V}/\text{m}$ para la componente EW y 220 $\mu\text{V}/\text{m}$ para la componente NS. Este es otro aspecto importante, pues aun cuando este evento fue más energético, su variación disminuye en la componente EW y aumenta ligeramente en la componente NS, en comparación con el evento de magnitud 4.3. Esto puede estar relacionado con la orientación de la zona de ruptura que movilizaría los fluidos que se analizará con más detalle.

De los otros sismos que mostraron su reflejo en las componentes eléctricas, ninguno muestra amplitudes de este orden, registrándose en un rango entre 2 $\mu\text{V}/\text{m}$ hasta aproximadamente 45 $\mu\text{V}/\text{m}$.

2.1.7. Imágenes térmicas

Es importante mencionar que gracias a las imágenes térmicas capturadas durante el sobrevuelo a la cima de Galeras, es posible evidenciar alteraciones térmicas en el cráter principal, cráteres secundarios y campos fumarólicos, a continuación se presenta una serie de imágenes térmicas tomadas durante el segundo semestre de 2010. En la tabla 2.1.11. se muestran valores de las temperaturas máximas registradas durante este periodo.

Tabla 2.1.11. Sobrevuelos realizados con las temperaturas máximas obtenidas en el segundo semestre de 2011.

| Fecha sobrevuelo | Zona anomalía térmica en °C | |
|------------------|-----------------------------|------------|
| | Fondo del cráter | El Paisita |
| 01 de agosto | 60 | 100 |
| 01 de septiembre | 220 | 62 |
| 14 e octubre | > 204 (dato saturado) | 32 |

El día 1 de agosto se registró una mayor temperatura, de 99°C la mostró el cráter secundario El Paisita. En comparación con imágenes térmicas anteriores, se observó que en las diferentes zonas con anomalía térmica se han incrementado las temperaturas (Figura 2.1.129.).

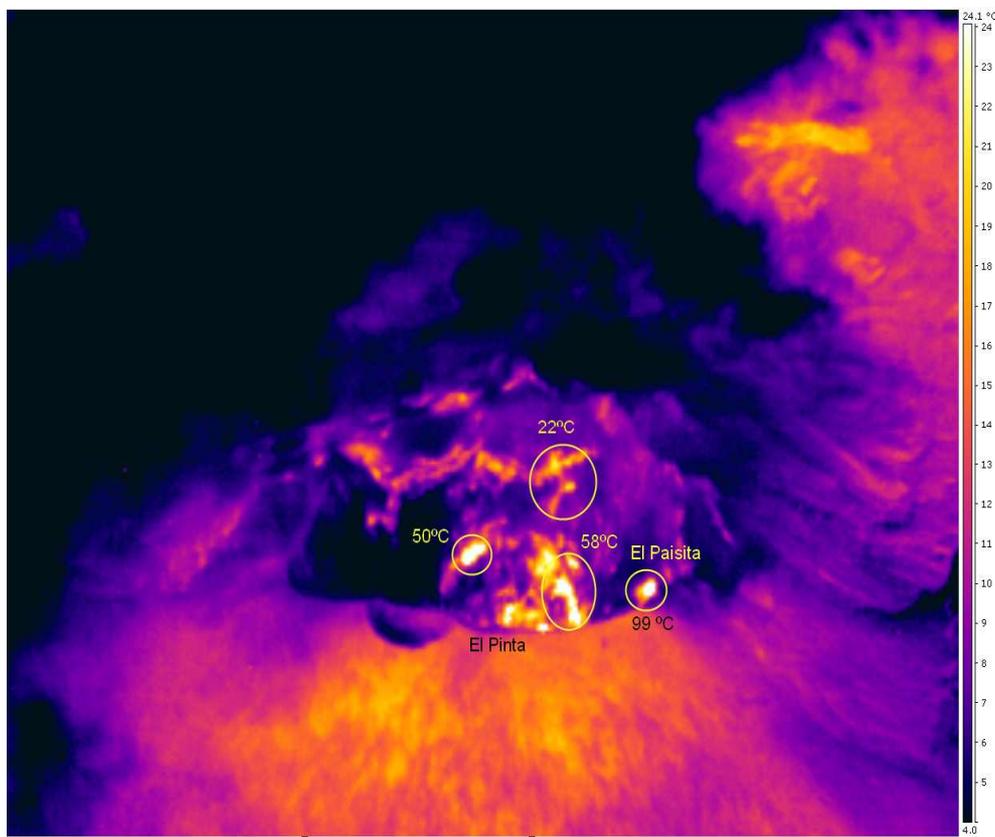


Figura 2.1.129. Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.

Las Figuras 2.1.130, 2.1.131, 2.1.132 presenta imágenes térmicas tomadas con la cámara FLIR instalada en el helicóptero de la FAC, para los sobrevuelos del 1 y 4 de septiembre de 2010.

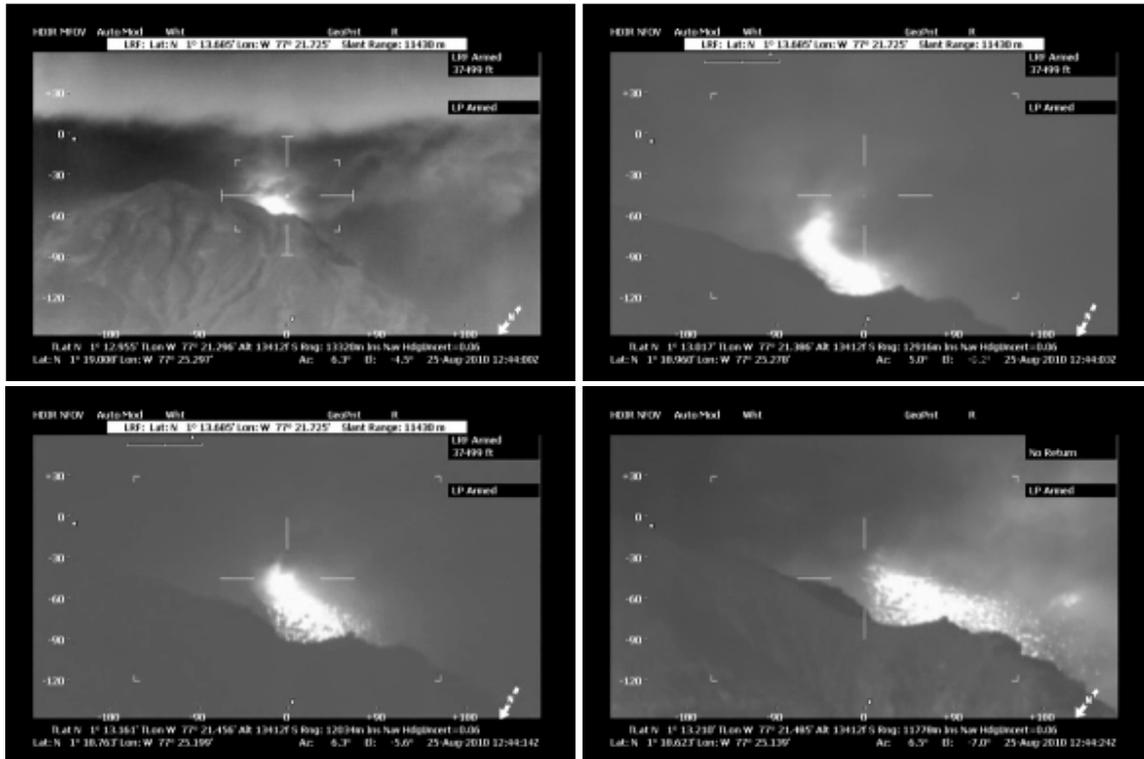


Figura 2.1.130. Imágenes de calor, tomadas con la cámara térmica del helicóptero de la FAC. En ellas se observa salida de material desde el cráter secundario El Paisita.

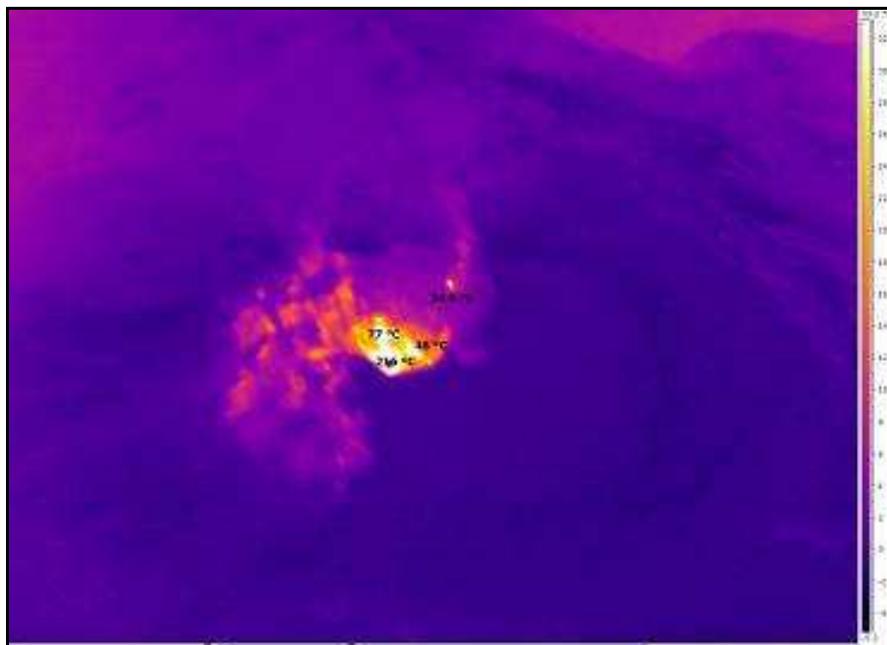


Figura 2.1.131. Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.



Figura 2.1.132. Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 4 de septiembre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

Durante el sobrevuelo del día 14 de octubre, se tomaron imágenes térmicas donde se resalta una zona de anomalía en el fondo del cráter principal con un máximo de temperatura de 203 °C, otra zona ubicada en la pared sur del cráter principal la cual presenta una temperatura de 150 °C y la pared interna bajo el cráter El Paisita, la cual presenta un temperatura de 132 °C (Figura 2.1.133.).

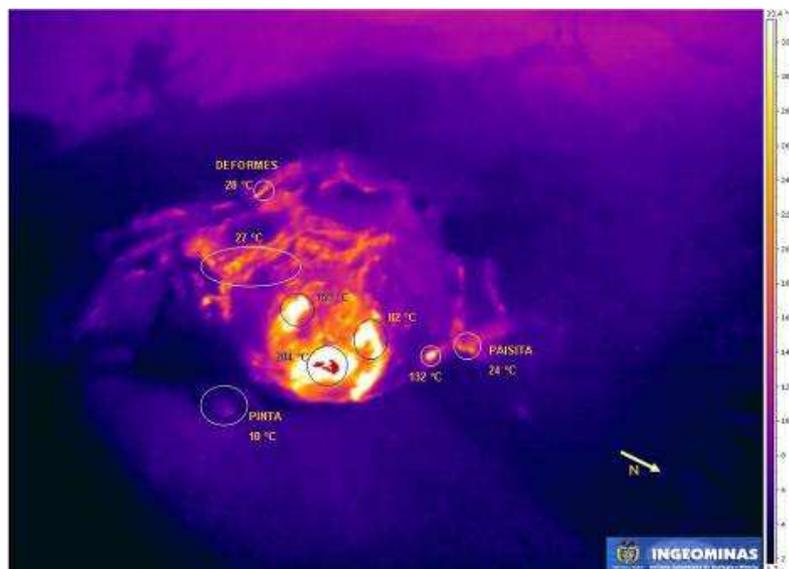


Figura 2.1.133. Imagen térmica del cono activo de Galeras, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 14 de octubre de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.



Libertad y Orden

CONCLUSIONES

- En niveles bajos de sismicidad, tanto en ocurrencia como a nivel energético, se resalta la ocurrencia del evento tipo TRE, ocurrido el 25 de julio, el cual se asocia con liberación de gases y relajación de presiones en el sistema volcánico, de igual forma, se destaca la ocurrencia de episodios sísmicos, a manera de enjambre de eventos, los cuales se asocian con variaciones en las condiciones de presión del sistema volcánico.
- La actividad sísmica durante el mes de julio y hasta el 20 de agosto se caracterizó por mantener niveles bajos tanto en ocurrencia como en nivel energético, a partir del 20 de agosto se evidenció cambios significativos en las condiciones internas del volcán con el registro de un enjambre de sismos aunado a bajas emisiones de Dióxido de Azufre; los cambios registrados permitieron prever la presencia de material magmático a niveles superficiales en un sistema volcánico sellado o un material magmático con bajo contenido de gas; con la posibilidad de evolucionar hacia estados eruptivos, razón por la cual el 23 de agosto de 2010 el OVSP cambió el nivel de actividad de Amarillo ■ III (Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica) a Naranja ■ II (Erupción en términos de días o semanas).
- De manera general, la actividad sísmica registrada entre el 20 y 25 de agosto de 2010, presenta los mayores valores energéticos en comparación con cualquiera de los procesos que ha registrado Galeras desde el 2004, especialmente por el aporte energético de los sismos relacionados con procesos de fracturamiento de material cortical en inmediaciones del edificio volcánico, varios de los cuales fueron reportados como sentidos desde diferentes sectores de la zona de influencia del volcán Galeras.
- El 25 de agosto de 2010 se registró un evento eruptivo que se destaca por este no tener características explosivas, a diferencia de los eventos eruptivos del año pasado; este evento eruptivo generó en los registros sísmicos un episodio de Tremor que duró por un lapso de 11 horas, posteriormente al episodio de Tremor asociado con el evento eruptivo, continuó registrándose sismicidad similar a la ocurrida en el período previo, a manera de enjambre, donde predominaron los eventos VT e HYB; sin embargo, sus niveles tanto de ocurrencia como de energía fueron menores a los obtenidos previos al evento eruptivo.
- Posterior al evento eruptivo del 25 de agosto, se registraron cambios en el sistema permitiendo la liberación de gases a la atmósfera, con la consecuente relajación parcial de esfuerzos y disminución de sobrepresiones internas, por lo cual el 7 de septiembre, se decidió cambiar el nivel de actividad de Naranja a Amarillo.
- Durante el resto del semestre continuaron observándose cambios en el comportamiento de la actividad reflejados en fluctuaciones en la actividad sísmica, debido a la presencia de material magmático en niveles someros resaltándose el incremento de eventos tipo HYB registrado a inicios de la segunda semana de octubre que conllevó a que el 8 de octubre se emitiera un reporte extraordinario y el aumento en el mes de diciembre en la ocurrencia de sismicidad



Libertad y Orden

asociada a los procesos de fracturamiento de material cortical a diferentes niveles de profundidad involucrando una fuente más profunda (por ejemplo los sismos del 1 de diciembre, y 9 de diciembre, reportados como sentidos en varios sectores de la zona de influencia de Galeras) y otra más somera con posterior ocurrencia de sismos de movimiento de fluidos, algunos asociados con emisiones de gases.

- Respecto a los procesos de deformación del edificio volcánico, a partir de la información obtenida por medio de la red de monitoreo volcánico se destaca las variaciones registradas en los inclinómetros Cráter y Peladitos las cuales presentan cambios significativos a partir del 25 de agosto de 2010, con vector resultante hacia el suroccidente del cono activo, el 9 de septiembre estas variaciones se incrementaron para el inclinómetro Cráter y continuaron hasta el 5 de noviembre donde se observa un cambio en las componentes que se ve reflejado en el cambio del vector resultante de suroccidente a suroriente del cono activo.
- Durante la mayor parte del semestre evaluado las emisiones de Dioxido de Azufre (SO_2) se mantuvieron en niveles considerados como bajos para el volcán Galeras, se exceptúan los valores registrados el 25 de agosto de 2010 (3473 ton/día) (considerado como muy alto para Galeras), día en el cual se registro un evento eruptivo, y los valores registrados el 22 y 26 de octubre (663 y 670 ton/día respectivamente), los cuales son considerados como moderados para Galeras.
- A lo largo de estos seis años el volcán ha intruido material magmático desde niveles más profundos respecto a la cima de Galeras. Parte de este material ha extruido formando domos de lava en superficie, el resto aparentemente aún continúa presente en los conductos posibilitando erupciones como la registrada el 25 de agosto.

Teniendo como base lo anteriormente expuesto, el nivel de actividad al finalizar el periodo evaluado es:

Nivel Amarillo ■ (III) "Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica".

2.2 VOLCÁN DOÑA JUANA

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

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

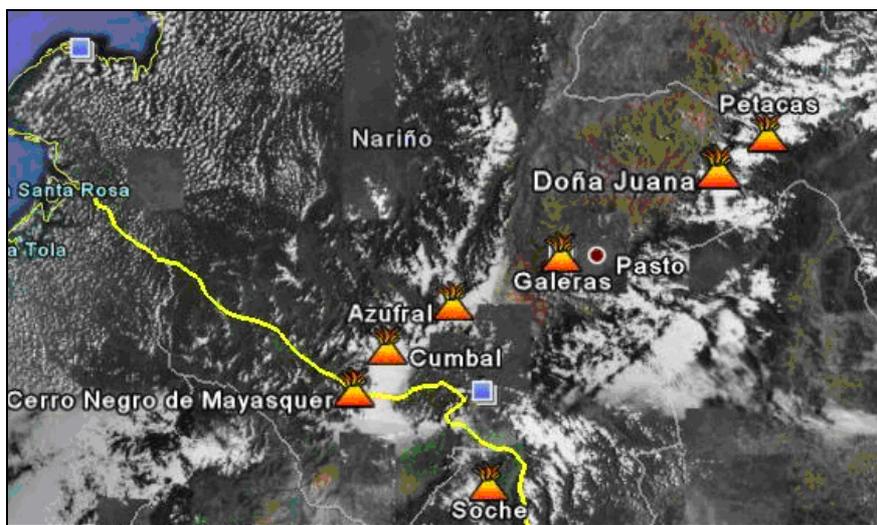


Figura 2.2.1. Imagen tomada de Google Earth en donde se observan algunos volcanes del sur de Colombia y del norte del Ecuador, entre ellos están Doña Juana, Galeras, Azufral y Cumbal, monitoreados por el OVSP - INGEOMINAS.



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



Libertad y Orden

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

2.2.1 Red de vigilancia

Durante el segundo semestre de 2010, la red de vigilancia de Doña Juana estuvo conformada por:

- Tres estaciones sísmicas telemétricas triaxiales: dos de Corto Periodo y una de Banda Ancha (Tabla 2.2.1, Figura 2.2.3). La recepción de la información que detectan estas estaciones en la sede del OVSP, se realiza a través de una red telemétrica tipo punto a punto con una repetidora instalada en el volcán Galeras en la estación de Cufiño (Figura 2.2.4.). La información de la estación de banda ancha Paramo y de la de Florida sísmológica e inclinometría electrónica de este volcán se concentra en la Repetidora de Cufiño, mediante una unidad DCM, la cual optimiza el uso de equipo para radio telemetría. La información de la estación sísmológica de Lavas se sigue realizando por el enlace punto a punto con repetidoras en Morasurco1 y Cruz de Amarillo.
- Dos inclinómetros electrónicos telemétricos (Tabla 2.2.1, Figura 2.2.3.). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño.

Las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Doña Juana tuvieron un funcionamiento total del 88% (Figura 2.2.5.). No se tuvo un 100% de funcionamiento, debido a múltiples factores que van desde el hurto de elementos en las estaciones hasta fallas en el sistema de alimentación eléctrico en las repetidoras. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- Presentó un porcentaje de funcionamiento del 79%, debido a que se presentó el hurto de la antena de comunicaciones de la estación motivo por el cual estuvo por fuera durante varios días. Adicionalmente en la estación repetidora de Morasurco1 se han presentado daños en la red de alimentación, esto afecta el sistema de alimentación de la estación, se han producido daños en la batería que alimenta la estación produciéndose el corte de energía y por lo tanto la estación no repite la señal de Lavas presentando esta un porcentaje de 0% en el lapso en el que no hay energía en la estación repetidora.

- En el mes de Julio se realizaron cambios en la telemetría de las estaciones de Paramo y Florida, las dos estaciones sísmológicas y la de inclinometría de Florida, se repiten por la estación de Cufiño, en donde se ha dispuesto una estación repetidora. Se instaló un modulo de comunicaciones DCM el cual se configura con puerto de salida a 115200 bps canal A a 57600 bps y de los canales B a F a 19200 bps. La estación de Paramo es recibida por un radio modem FREEEWAVE modelo FGR-115RC y su salida se conecta al canal C del DCM, la señal de la estación de Florida que trae la señal sísmológica y de inclinometría electrónica se conecta al canal B y la señal de la estación Cufiño de Galeras se conecta al canal A, todas estas señales se multiplexan y se envían por un solo radio al OVSP.



La estación de Florida presenta un porcentaje de funcionamiento del 86 %, esto se debe principalmente a que se realizaron cambios en la estación, se instaló un digitalizador GURALP el cual digitaliza las señales de la estación sismológica en campo, estas señales se conectan al canal A, de alta tasa de muestreo a unas 100 mps y se envían utilizando un radio-modem Freewave. A partir de la realización de este cambio y del cambio en la telemetría, como se mencionó, la estación viene presentando un porcentaje de funcionamiento óptimo.

- La estación sismológica de banda ancha Páramo tuvo un porcentaje de funcionamiento del 91%, debido a problemas en el radioenlace y al programa de adquisición de SCREAM, sin embargo luego de realizar el cambio en la telemetría de la estación esta mejoró su porcentaje de funcionamiento de forma ostensible.

- El porcentaje de funcionamiento de los inclinómetros electrónicos Páramo y Florida fue del 92% y 94% respectivamente. La señal del inclinómetro electrónico de Florida se conecta al canal de baja tasa de muestreo del digitalizador y se envía unida a la señal sismológica, este cambio mejora sustancialmente la recepción de la señal puesto que a partir de este cambio la señal se recibe de forma óptima.

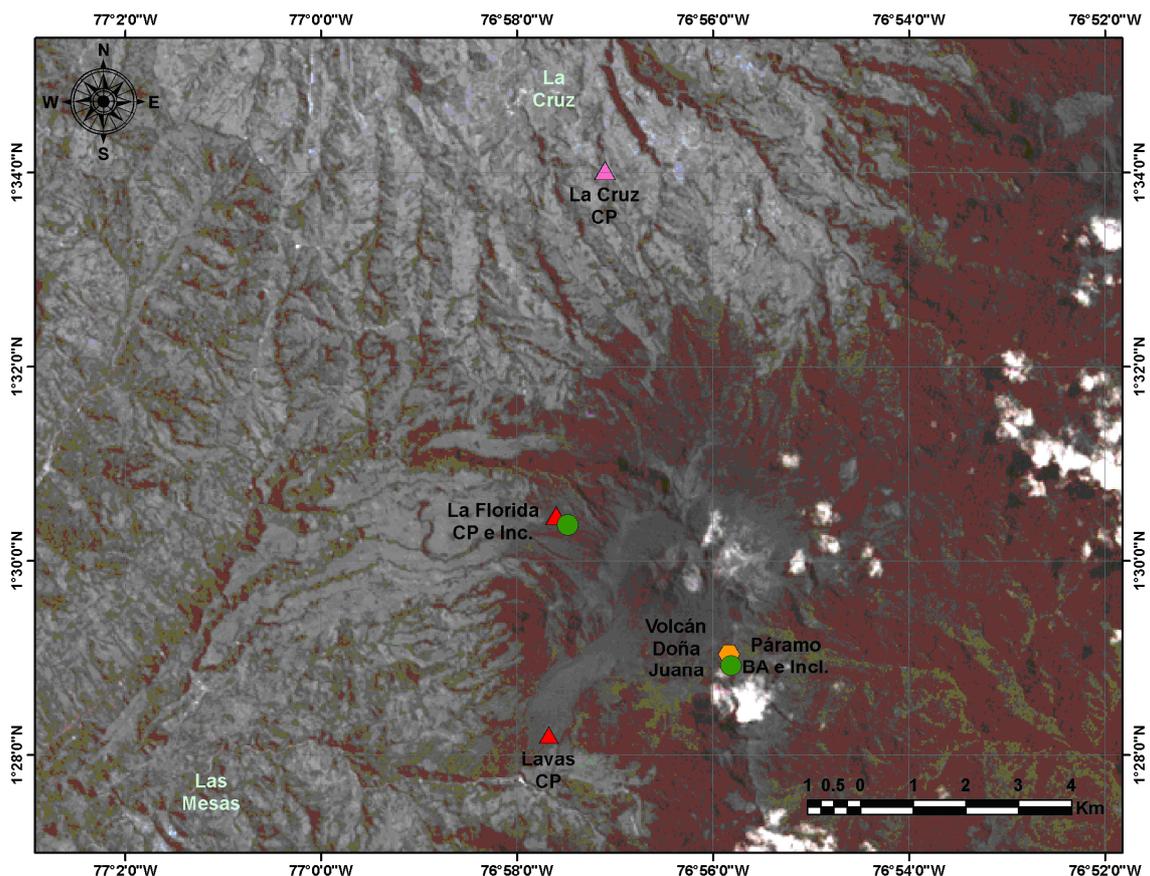


Figura 2.2.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2010.

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 2010.

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

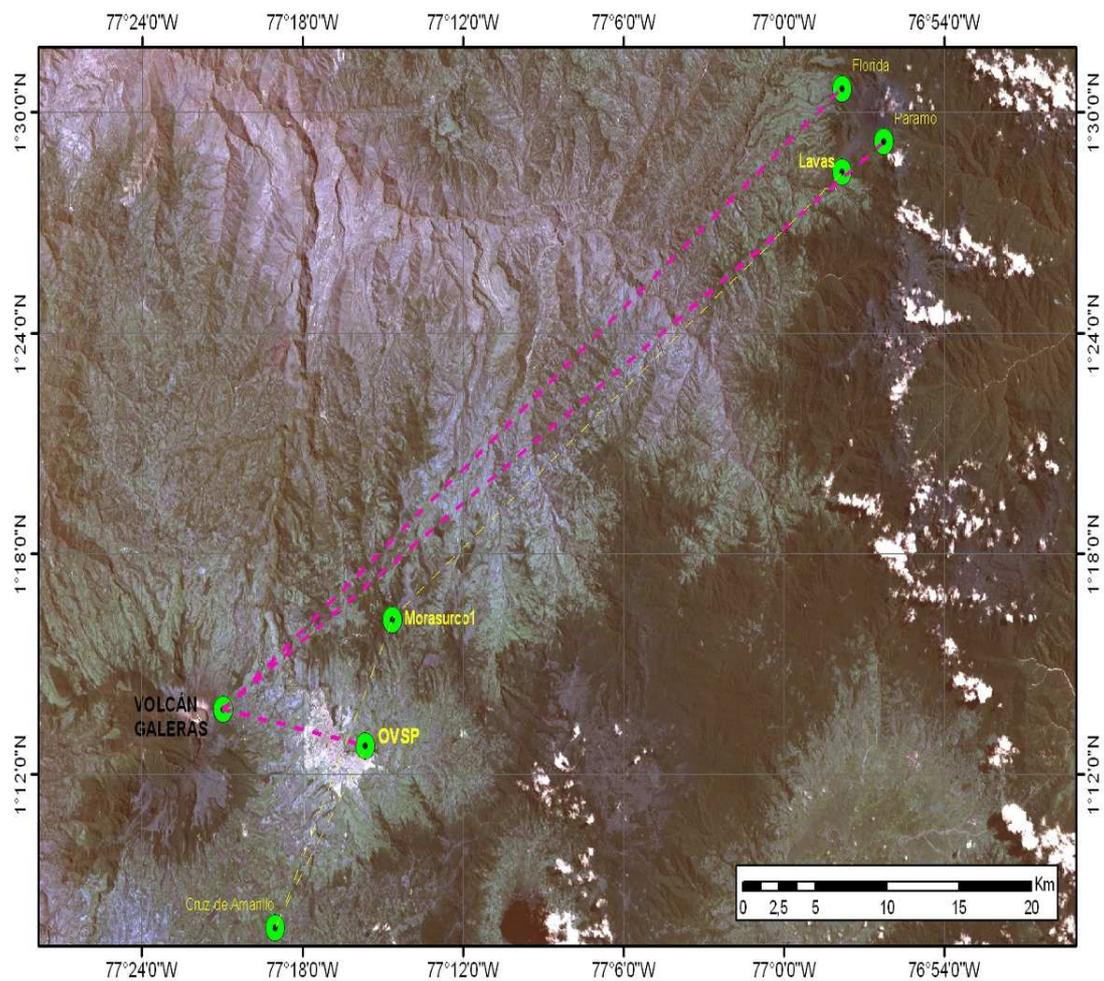


Figura 2.2.4. Mapa de indicación de los radioenlaces de la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

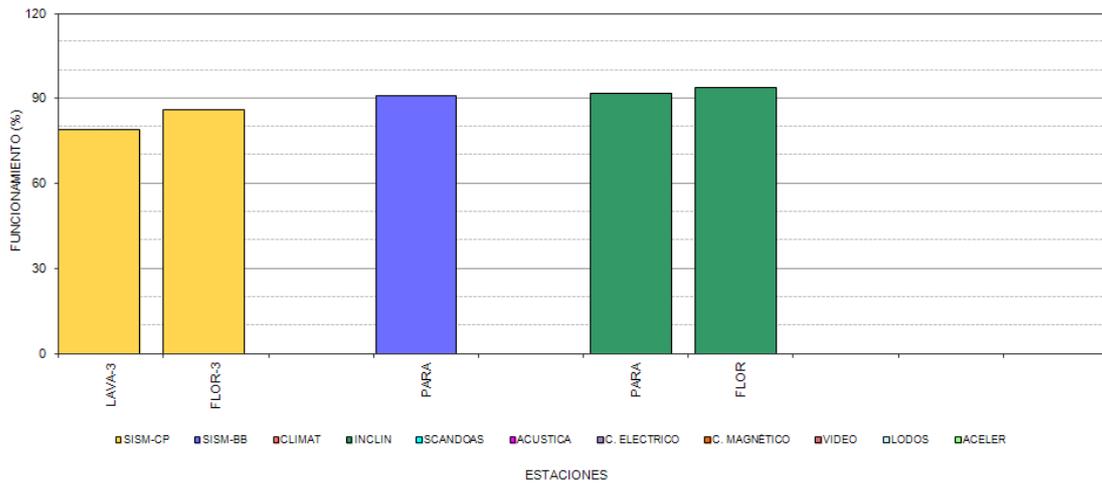


Figura 2.2.5. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana.

2.2.2 Sismología

Durante el segundo semestre de 2010 la sismicidad dominante en el Complejo Volcánico Doña Juana fue la asociada con rompimiento de material sólido. Se observa que respecto al primer semestre de 2010 el número de sismos se incrementó. Los picos más altos en la ocurrencia de esta sismicidad se registraron entre los meses de agosto y septiembre, cuyo máximo está cerca de los 130 sismos VT en un día (Figura 2.2.6).

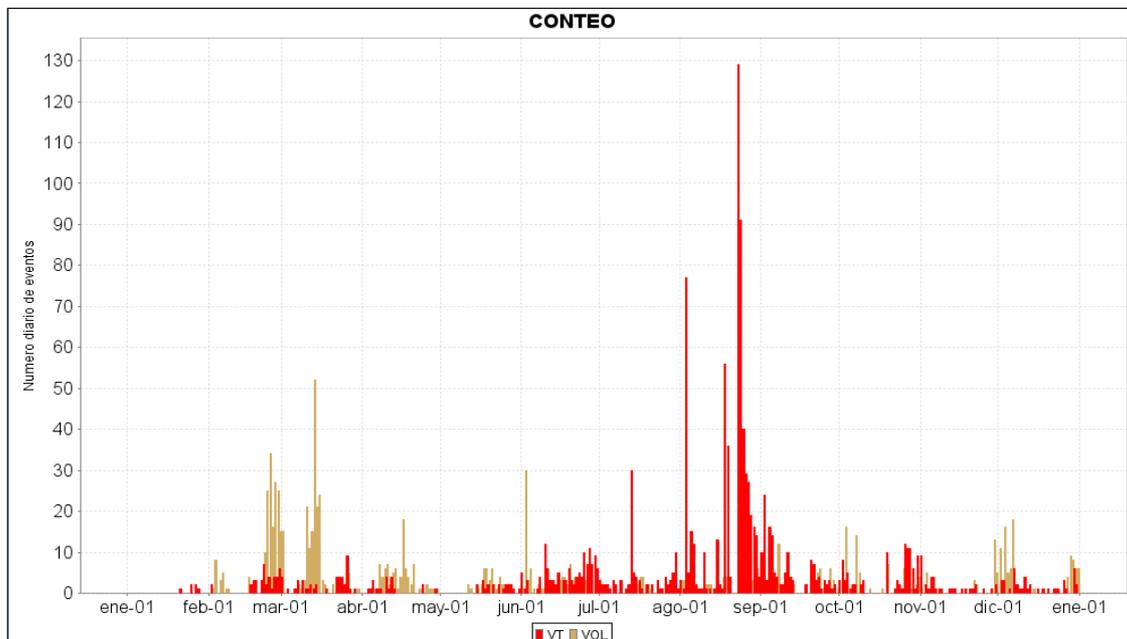


Figura 2.2.6. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

A manera de ejemplos de la sismicidad del volcán Doña Juana, en las Figuras de la 2.2.7 y 2.2.8. se muestran registros asociados con actividad de este volcán, junto con su espectro de Fourier.

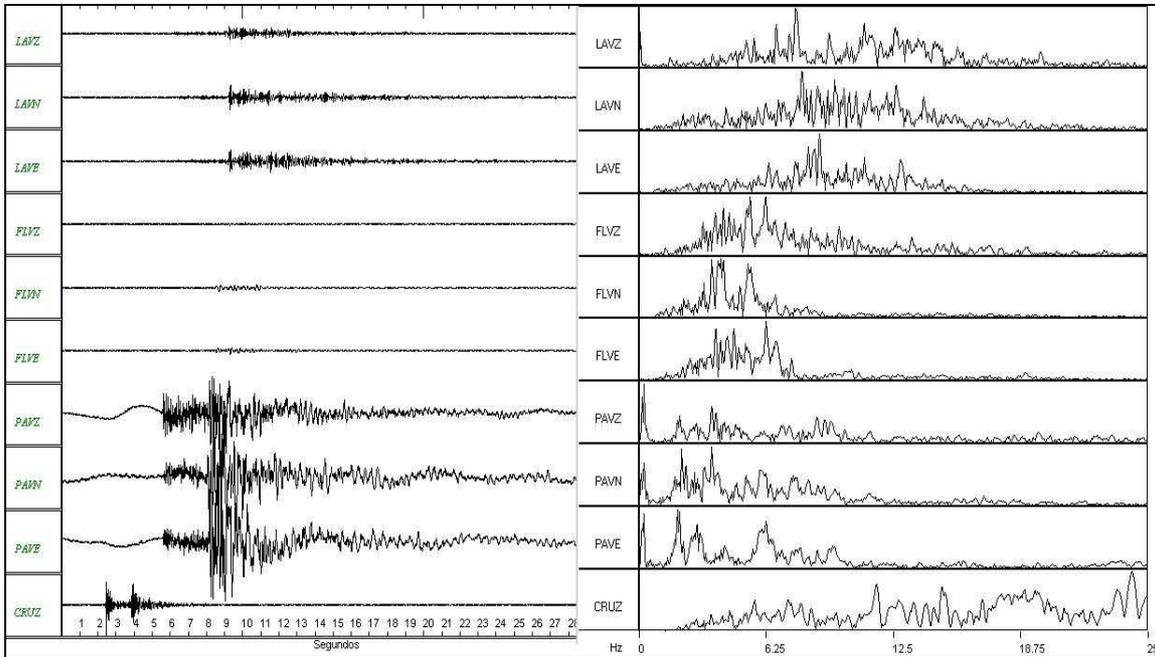


Figura 2.2.7 Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, ocurrido el 21 de julio de 2010, a las 3:37 a.m.

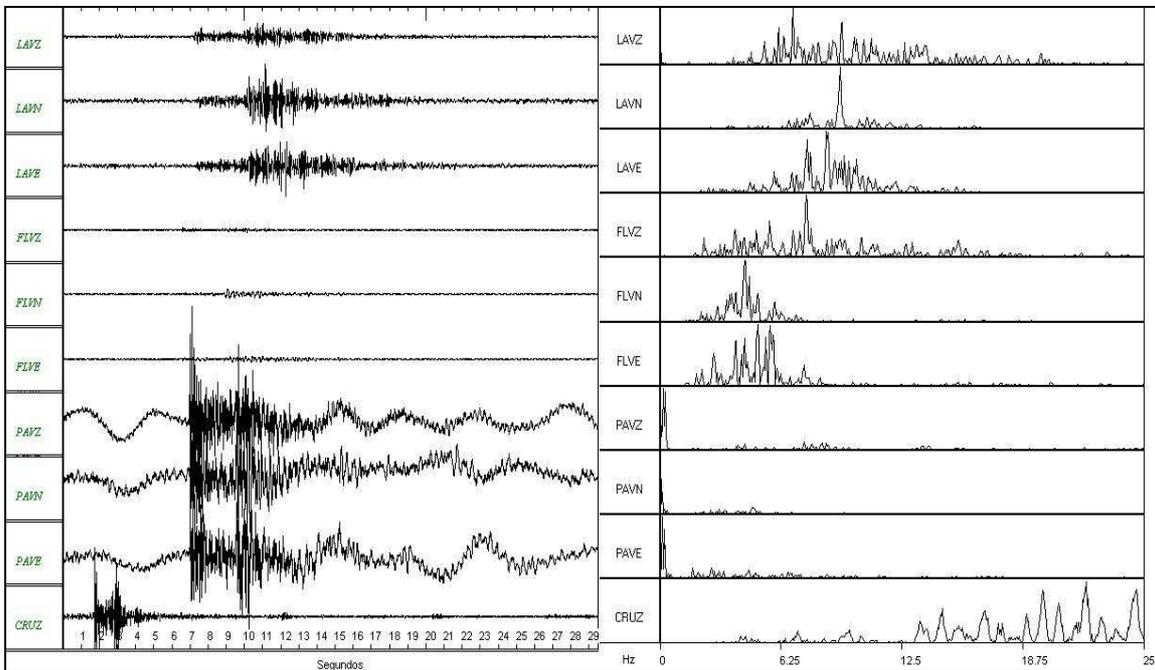


Figura 2.2.8. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, ocurrido el 21 de julio de 2010, a las 7:14 a.m.

2.2.3 Deformación

2.2.3.1. Inclínometría101 Electrónica

En la componente Tangencial del inclinómetro electrónico Florida (ubicado a 2.3 km., al Oeste de los domos, 3154 msnm) se observó que continuo el comportamiento ascendente mostrado desde el 19 de junio de 2010, registrando cerca de 1338 μ rad, mientras que en la Radial se observó un comportamiento descendente entre el 19 de junio y el 31 de diciembre de 2010, totalizando 5182 μ rad (Figura 2.2.9.). Con respecto al inclinómetro Páramo, se observó que continuo el comportamiento descendente en la componente Radial mostrado desde el 11 de junio de 2009 y hasta el 30 de noviembre de 2010, alcanzó cerca de 75 μ rad, posteriormente tiende a estabilizarse, en la componente Tangencial se observó un ascenso de 15 μ rad entre el 12 de julio y el 22 de septiembre, luego un descenso entre el 22 de septiembre y el 29 de noviembre, de 15 μ rad y finalmente un ascenso que hasta el 31 de diciembre de 2010, alcanzó los 9 μ rad (Figura 2.2.10.).

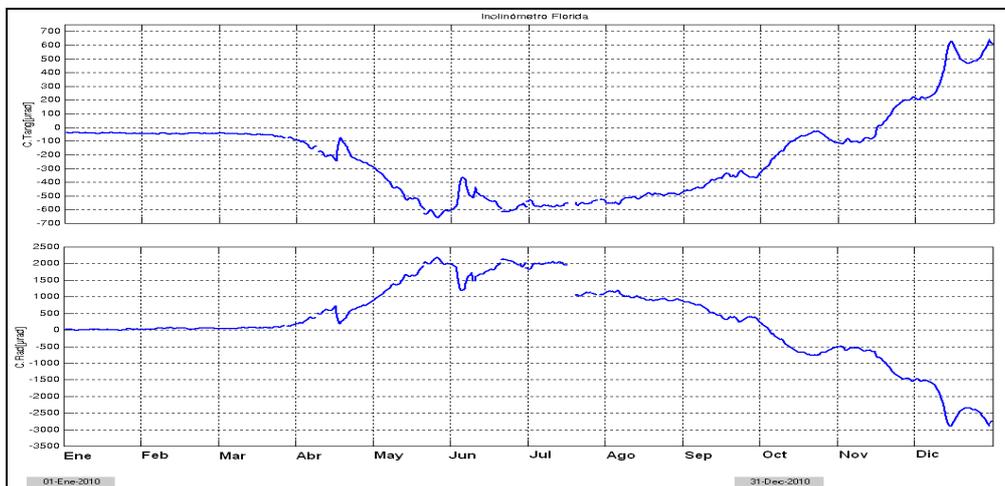


Figura 2.2.9. Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

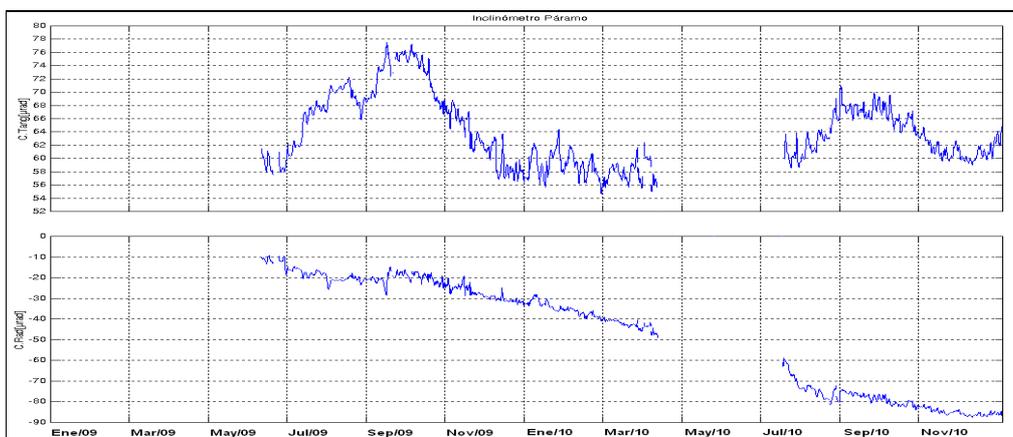


Figura 2.2.10. Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 11 de junio de 2009 y el 31 de diciembre de 2010.

2.2.4 Actividad superficial

La actividad superficial del volcán Doña Juana durante el segundo semestre de 2010, se documentó a partir de reportes e imágenes capturadas por personal del INGEOMINAS que realiza trabajos de mantenimiento en las estaciones

Personal del OVSP, en labores de campo, durante la segunda semana del mes de julio, reportó que pese a que en algunos instantes la cima del volcán Doña Juana se encontraba parcialmente despejada, no se observó ningún tipo de actividad superficial (Figura 2.2.11.).



Figura 2.2.11. Imágenes del volcán Doña Juana capturadas el 12 de julio de 2010, desde la estación sísmica Paramo.

2.2.5. Conclusiones

- La sismicidad registrada en el volcán Doña Juana principalmente estuvo asociada con fracturamiento de material cortical al interior del sistema volcánico estos eventos se ubicaron epicentralmente en el sector noreste del edificio volcánico a distancias que oscilan entre 7 y 10 Km, a profundidades alrededor de los 7Km y con magnitudes locales de hasta 2,7 grados en la escala de Richter.
- La evaluación de los parámetros monitoreados durante el mes segundo semestre de 2010, permiten establecer el NIVEL VERDE ● (IV): “Volcán activo y comportamiento estable”.

2.3 VOLCÁN AZUFRAL

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

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



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

2.3.1 Red de vigilancia

Durante el segundo semestre de 2010, la red de vigilancia del volcán Azufral estuvo conformada por:

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

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

Durante el segundo semestre de 2010, las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Azufral tuvieron un funcionamiento total del 75% (Figura 2.3.4.). No se tuvo un porcentaje de funcionamiento del 100% debido básicamente a problemas del radio-enlace, principalmente en la estación sismológica de la Roca. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- La estación sismológica Chaitán presentó un funcionamiento del 97 %, 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 93%.

- La señal de la estación sismológica de la Roca presentó un porcentaje de funcionamiento del 32% motivo por el cual se decide cambiar de sistema análogo a sistema digital el tratamiento de la señal para su transmisión. Se realiza el cambio de VCO a digitalizador GURALP utilizando el canal de alta tasa de muestreo para la señal sismológica y el canal de baja tasa de muestreo para la señal de inclinometría electrónica. Después de realizar estos cambios se recibe la señal de las dos estaciones sismológica e inclinometría de manera apropiada.

- El inclinómetro electrónico de la Roca presentó un porcentaje de funcionamiento de 78%.

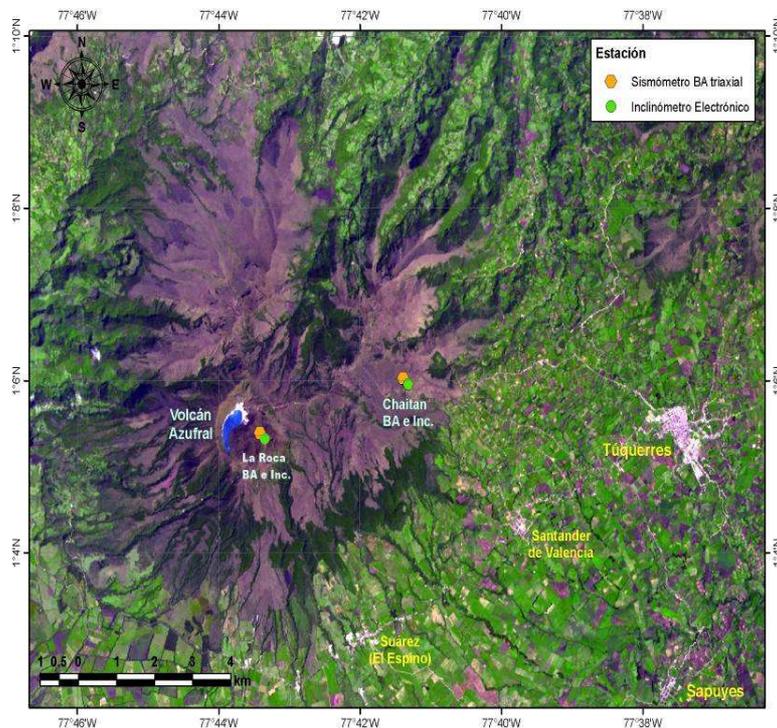


Figura 2.3.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2010.

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 2010.

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

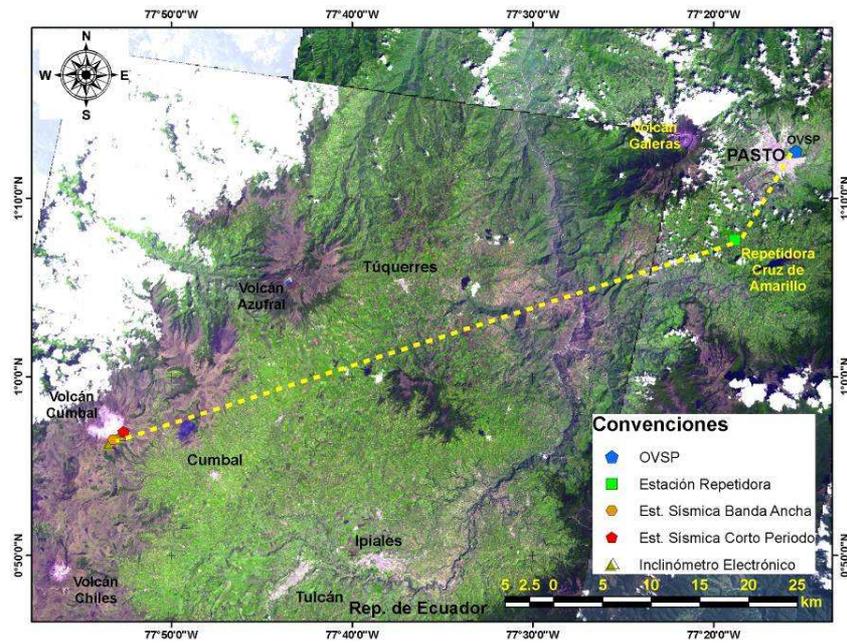


Figura 2.3.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemáticos utilizados para la transmisión de los datos.

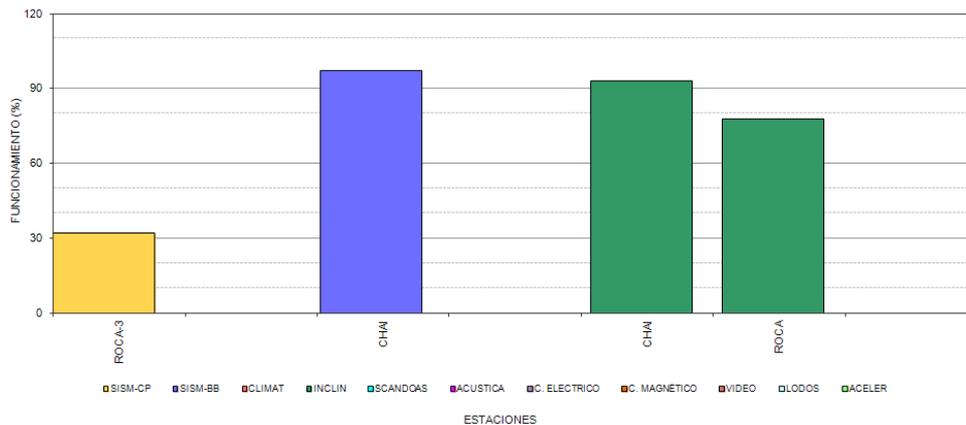


Figura 2.3.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral.

2.3.2 Sismología

Durante el segundo semestre de 2010 la sismicidad del volcán Azufral se mantuvo en niveles bajos y estuvo relacionada con fractura de material cortical (Figura 2.3.5). Respecto al semestre anterior no se evidencian grandes cambios. La sismicidad tipo VOL tiene características de fracturamiento de material sólido, sin embargo, los eventos así clasificado serán reevaluados.

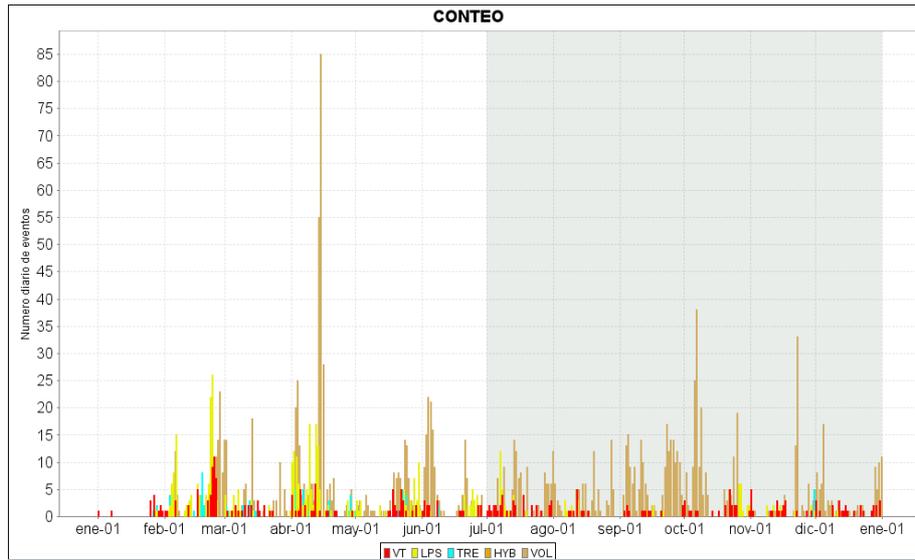


Figura 2.3.5. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde enero de 2010 a diciembre de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

En las Figuras 2.3.6. a 2.3.10. se presentan algunas señales ocurridas entre julio y diciembre de 2010, relacionadas con la sismicidad ocurrida en Azufral, junto con su espectro en frecuencia de Fourier.

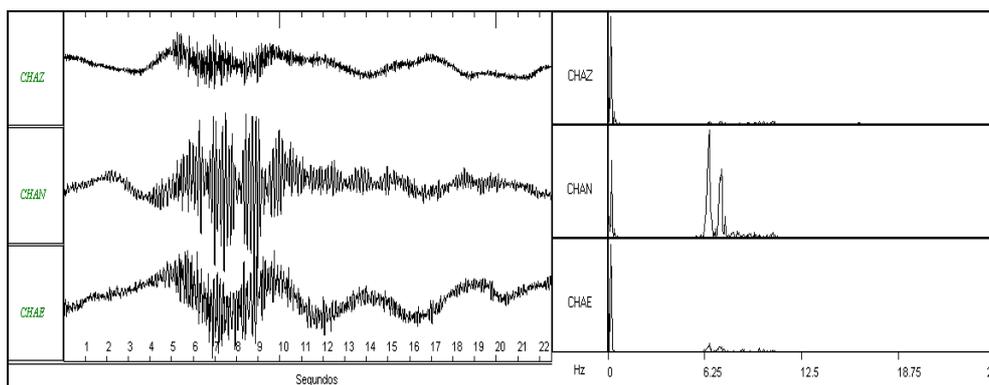


Figura 2.3.6. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento LP ocurrido en Azufral, registrado el 7 de julio a las 2:58 a.m.

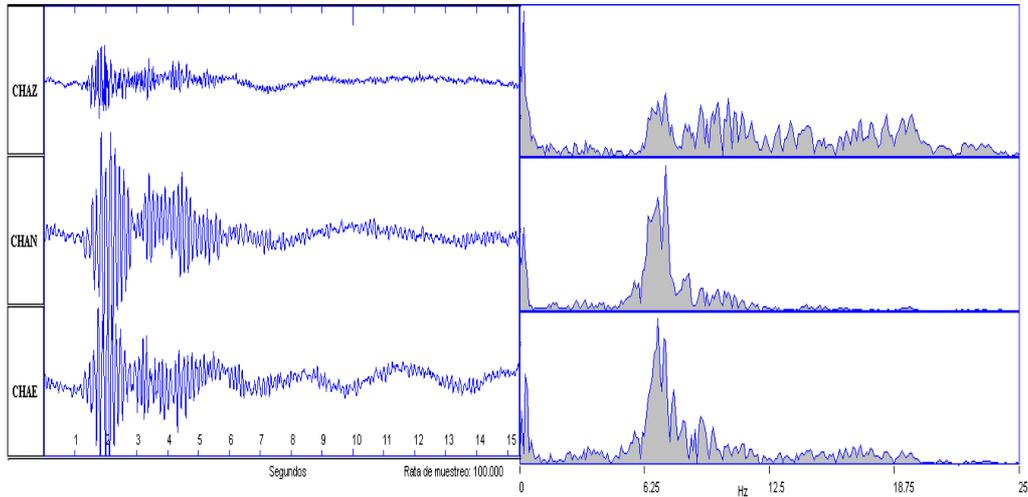


Figura 2.3.7. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 26 de octubre de 2010 a las 4:16 p.m. por la estación La Chaitán.

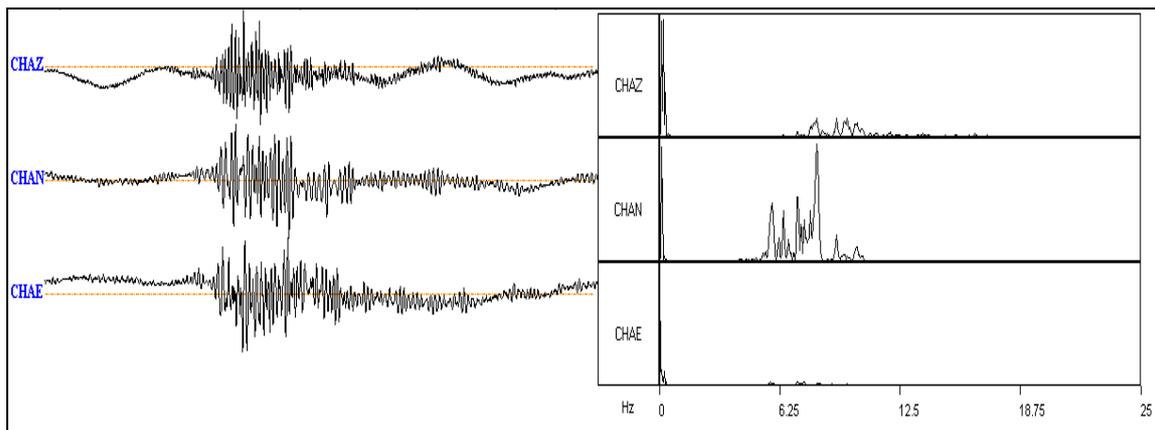


Figura 2.3.8. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, ocurrido en Azufral, registrado el 21 de noviembre de 2010, a las 1:58 a.m.

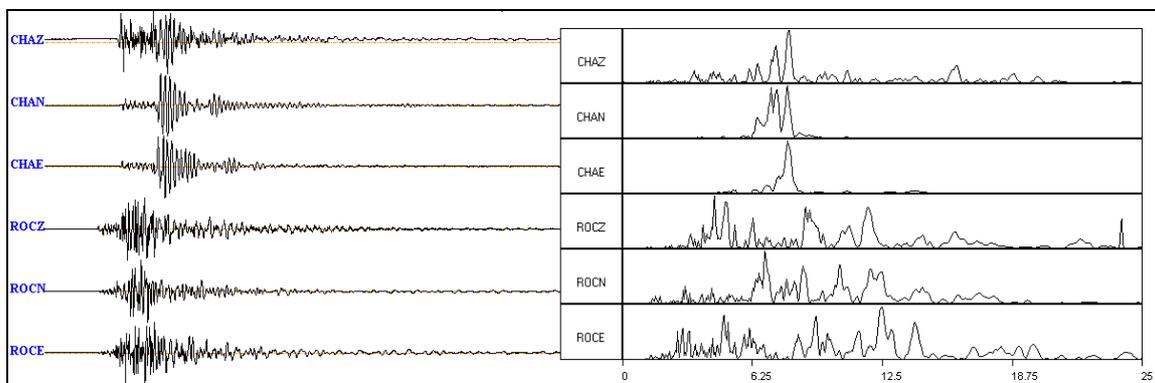


Figura 2.3.9. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento VT ocurrido en Azufral, registrado el 22 de noviembre de 2010, a las 8:19 p.m.

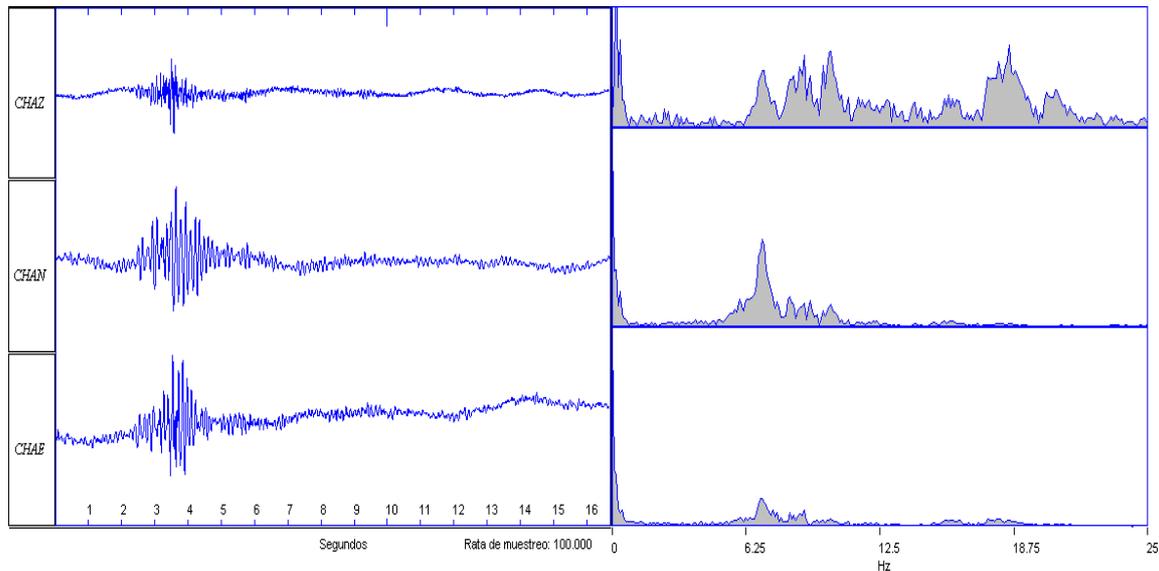


Figura 2.3.10. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 9 de diciembre de 2010 a las 8:16 a.m. por la estación Chaitán.

2.3.3 Deformación

Para el segundo semestre de 2010 en relación al monitoreo de los cambios en superficie del volcán Azufral se tiene instalado dos inclinómetros electrónicos y una red EDM, Medición Electrónica de Distancias.

2.3.3.1. Inclinometría Electrónica

En cuanto a la información suministrada por los inclinómetros electrónicos instalados en Azufral, sobre los procesos deformativos del edificio volcánico, para el primer semestre de 2011 se tiene:

En la Figura 2.3.11. se muestra el comportamiento de las componentes del inclinómetro Chaitán (ubicado a 4.3 km., al este-noreste de la laguna cratérea, 3730 msnm), en la Tangencial se observó que continuo la tendencia ascendente presente desde inicios del año, desde el mes de octubre estas variaciones no son muy pronunciadas, es así como entre el 16 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2010 el ascenso alcanzó cerca de 97 μ rad, mientras que en la componente Radial, debido a las fluctuaciones en su registro, no es posible definir una tendencia clara, sin embargo entre el 1 de septiembre y el 31 de diciembre se observó un ascenso, el cual registro 113 μ rad.

Con respecto al sensor de inclinometría en la estación La Roca (ubicado a 1.2 km., al este de la laguna cratérea, 4025 msnm), para este periodo no se considera, debido a que probablemente sus componentes están mostrando datos no reales

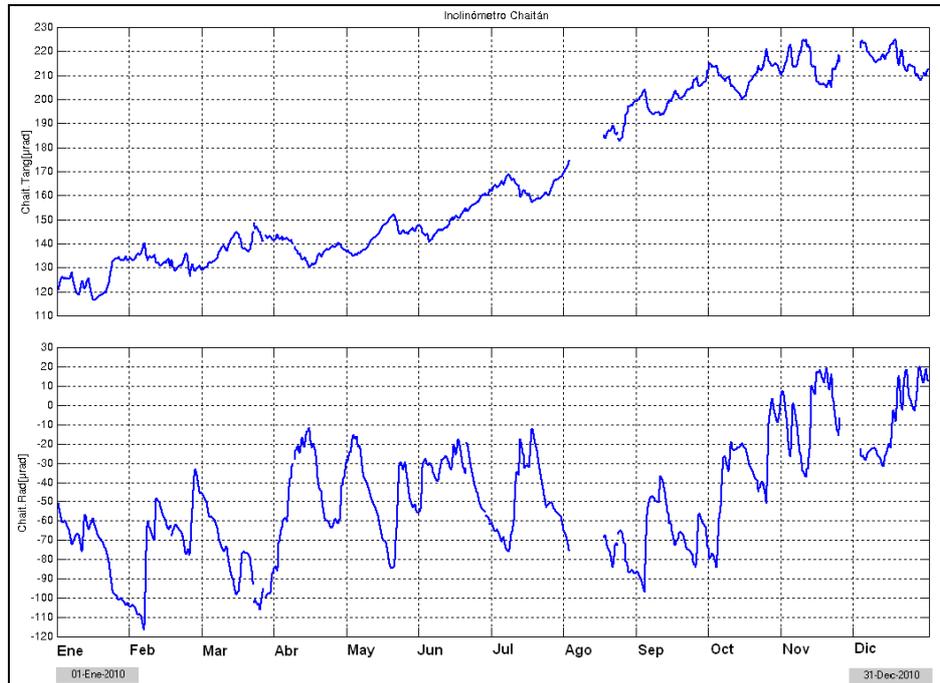


Figura 2.3.11. Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro Chaitán, instalado en el volcán Azufra, para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2010.

2.3.3.2. Medición Electrónica de Distancias - EDM

Desde la instalación de la red EDM en la superficie del volcán Azufra, en el mes de julio de 2010, se ha venido tomando datos de manera periódica. Esta primera red está formada por 9 prismas reflectores instalados sobre la superficie del volcán y dos Bases para realizar las respectivas mediciones (Tabla 2.3.2, Figura 2.3.12), esto con el fin de monitorear las variaciones de inflación o deflación del edificio volcánico.

Hasta el momento se está formando una línea base de información. Con la información que se tiene, aun no es posible definir un comportamiento o una tendencia. En las Figuras 2.3.13. y 2.3.14. se muestra la diferencia acumulativa respecto a cada punto de medición.

Tabla 2.3.2. Coordenadas WGS84 de los puntos materializados sobre la superficie del volcán Azufra, donde se ubican reflectores EDM y las Bases de medición.

| No. | Latitud °N | Longitud °W | Altitud [msnm] | Observaciones |
|--------|-------------|---------------|----------------|---|
| 1 | 1° 5' 14.7" | 77° 43' 0.1" | 4015 | Se observa desde la Base 1. |
| 2 | 1° 5' 32.2" | 77° 43' 25.1" | 3830 | Se observa desde la Base 1. |
| 3 | 1° 5' 14.9" | 77° 43' 38.2" | 3813 | Se observa desde la Base 1. |
| 4 | 1° 5' 55.3" | 77° 43' 18.9" | 3997 | Orientado hacia la Base 1. |
| 5 | 1° 5' 55.3" | 77° 43' 18.9" | 3997 | Orientado hacia la Base 2. |
| 6 | 1° 5' 3.3" | 77° 44' 1.1" | 3748 | Por Guaices-Se observa desde la Base 2. |
| 7 | 1° 4' 47.4" | 77° 44' 21.8" | 3488 | Por Guaices-Se observa desde la Base 2. |
| 8 | 1° 5' 8.7" | 77° 43' 7.5" | 4057 | Se observa desde la Base1. |
| 9 | 1° 4' 59.5" | 77° 43' 16.5" | 4022 | Se observa desde la Base2. |
| Base 1 | 1° 5' 31.4" | 77° 42' 56.0" | 3968 | Mojón |
| Base 2 | 1° 3' 54.5" | 77° 46' 20.4" | 3088 | El Amarillo - Cancha de baloncesto. |

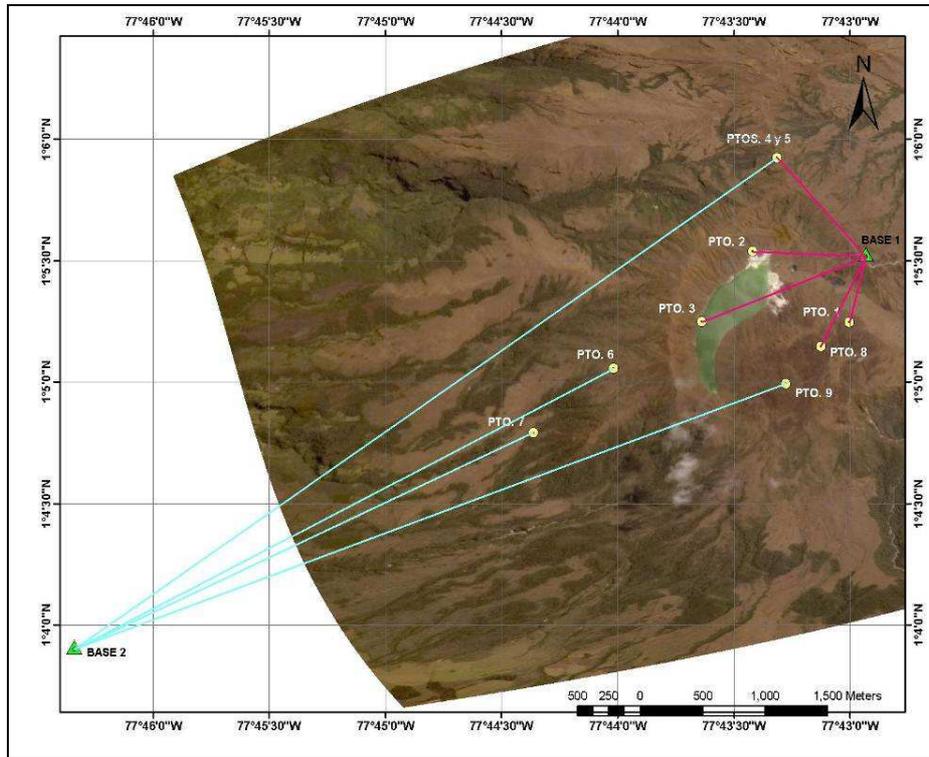


Figura 2.3.12. Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Azufral. Las figuras de color verde indican la ubicación de las Base 1 y 2, los círculos de color amarillo indican la ubicación de los prismas.

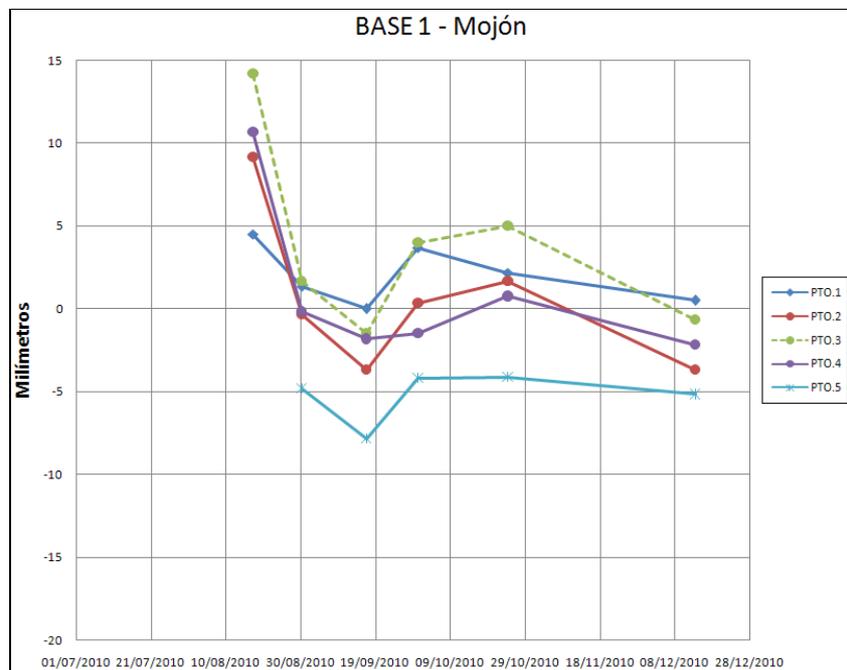


Figura 2.3.13. Comportamiento de los prismas-reflectores EDM, instalados en la superficie del volcán Azufral medidos desde la Base1. En la gráfica se representa la diferencia acumulativa en milímetros de cada prisma.

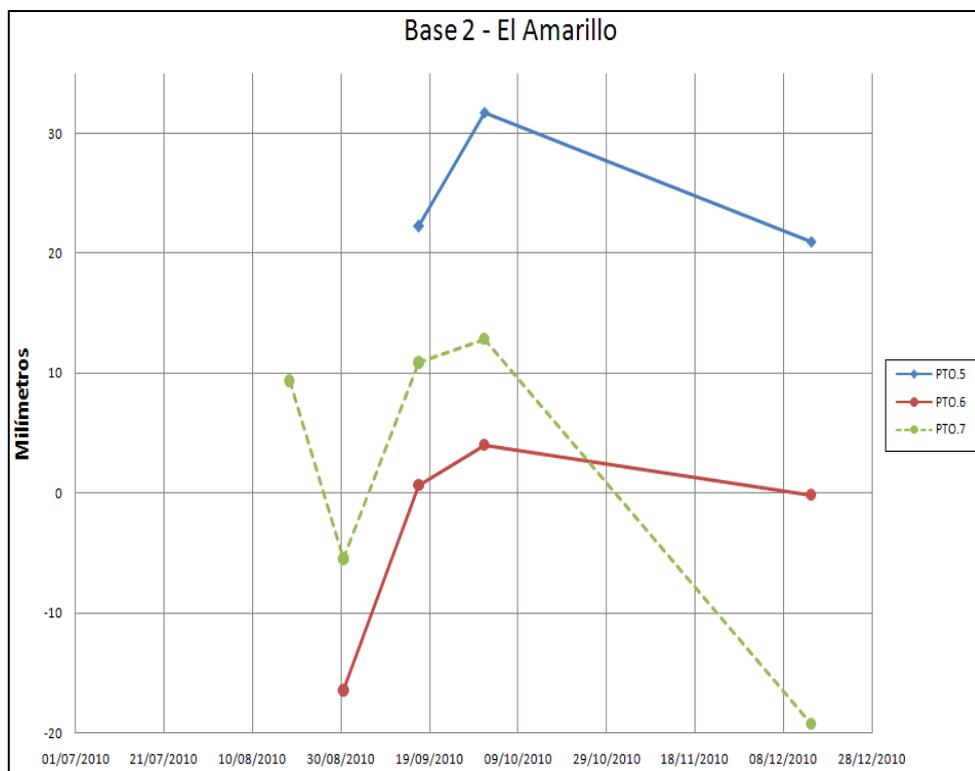


Figura 2.3.14. Comportamiento de los prismas-reflectores EDM, instalados en la superficie del volcán Azufral medidos desde la Base2. En la gráfica se representa la diferencia acumulativa en milímetros de cada prisma.

2.3.4 Físicoquímica

En el segundo semestre de 2010, la actividad superficial de Azufral se documentó a partir de reportes de visitas al lugar por parte de personal del INGEOMINAS y un sobrevuelo apoyados por la Fuerza Aérea Colombiana el día 23 de julio en el cual también se tomaron imágenes térmicas. En visitas realizadas en los meses de julio, agosto, septiembre octubre y diciembre, se resalta las variaciones en el nivel del agua y que se sigue presentando burbujeo en la Laguna Verde del volcán Azufral, así como también variaciones en la temperatura de salidas de agua y fumarolas, el burbujeo viene de agujeros en suelo y las burbujas suben hasta la superficie de la Laguna, principalmente por el sector norte de la misma. A continuación se presentan las observaciones de mayor relevancia durante el periodo evaluado y algunas imágenes que complementan la descripción:

En sobrevuelo efectuado en la mañana del 23 de julio de 2010, las imágenes térmicas mostraron temperaturas máximas de 16.7°C en la base del domo pequeño en contacto con la Laguna Verde; de igual forma en el campo fumarólico del domo pequeño (Figura 2.3.15.).

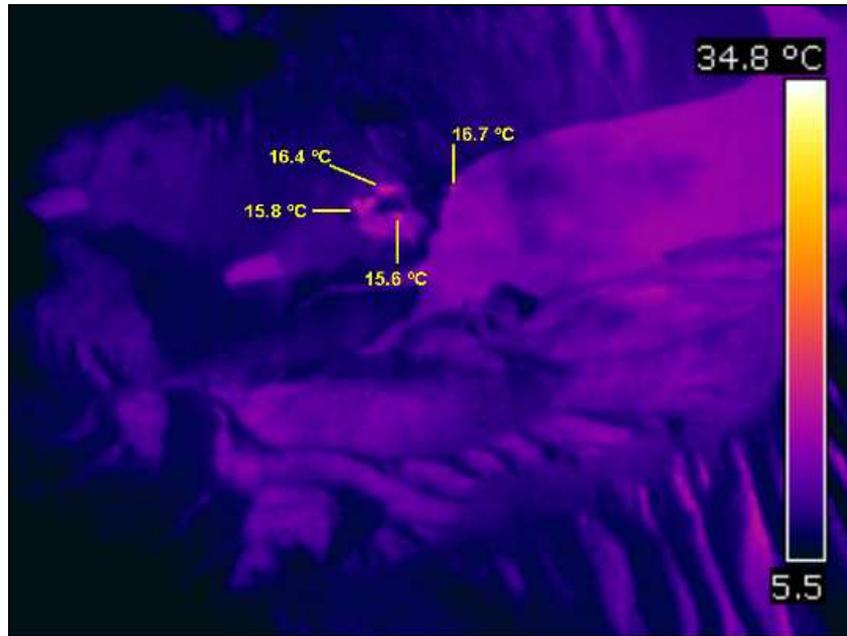


Figura 2.3.15. Imagen térmica de Azufral, tomada en sobrevuelo de julio 23 de 2010. Las flechas en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.

En visita hasta la Laguna Verde realizada entre el 22 y el 24 de julio, y teniendo en cuenta el reconocimiento realizado entre el 11 y el 15 de mayo de 2010, con base en registros fotográficos, se hace un recuento de los cambios que se han observado, principalmente con respecto al nivel del agua de la Laguna, los cuales son muy notorios.

En la Figura 2.3.16, se realizó una comparación del nivel del agua de la Laguna Verde del volcán Azufral, en estas imágenes se observan los cambios en el mismo, el cual es aún más bajo que en el mes de mayo de 2010. Otros aspectos por resaltar se relacionan con la coloración de la laguna La Barrosa, puesto que esta tiende a asemejarse a la coloración de la Laguna Verde (Figura 2.3.17.), también es importante destacar que el sonido que produce el burbujeo sobre la superficie de la Laguna Verde, es más intenso y en algunas imágenes capturadas cerca a la salida de material caliente, en el costado nor-occidental de la Laguna Verde, en el sector conocido como la Playita, el cual se presentó en julio de 2009, se observó un pequeño alineamiento de burbujas (Figuras 2.3.18 y 2.3.19.).

El día 22 de julio, en horas de la tarde, fue posible observar la línea de coloración blanca que atraviesa la Laguna (Figura 2.3.20.). Por otra parte, el cambio de textura, de color oscuro sobre la superficie, en el lado oriental, el cual bordeaba un sector amplio de la Laguna, no se encontraba.

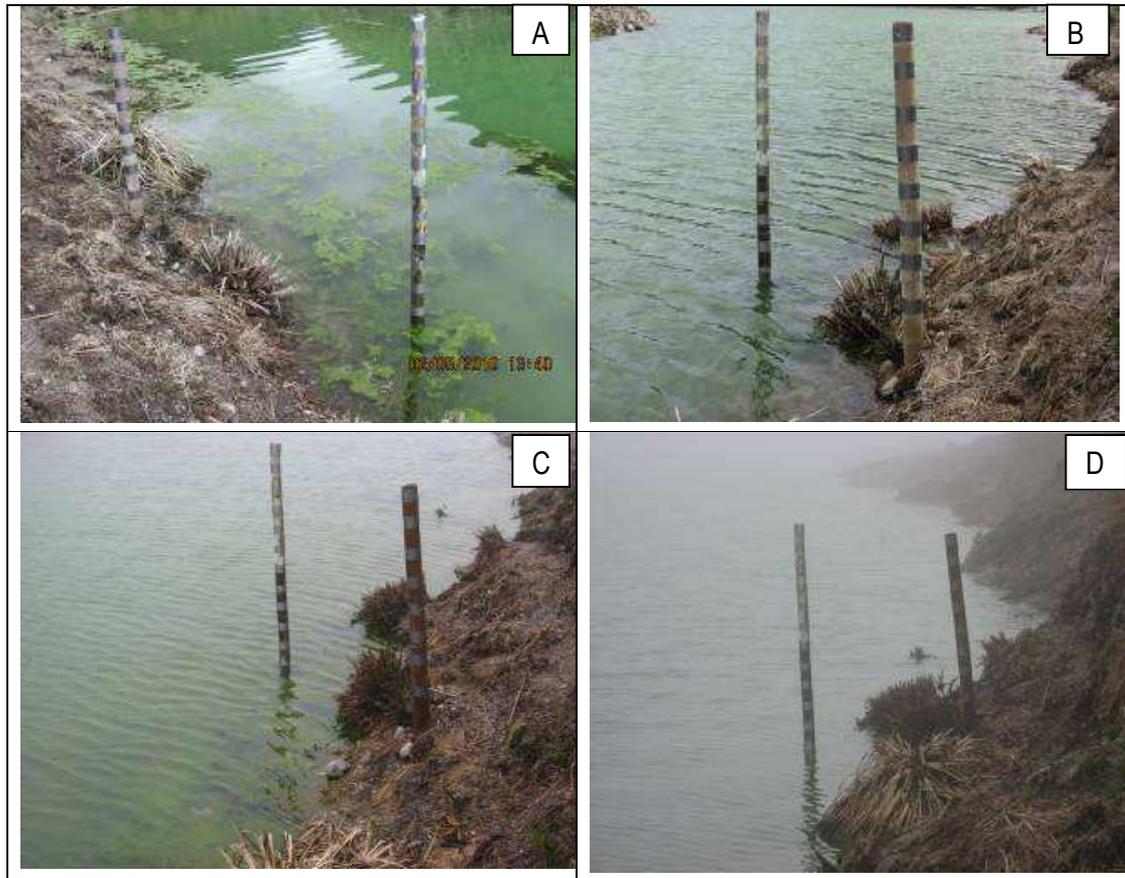


Figura 2.3.16. Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010; C) y D) 24 de julio de 2010.



Figura 2.3.17. Imágenes de la Laguna La Barrosa del Azufral, capturadas el 24 de julio de 2010.



Figura 2.3.18. Imagen de la Laguna Verde del Azufral, capturada el 24 de julio de 2010. En el ovalo rojo se resalta el pequeño alineamiento de burbujas sobre la superficie de la Laguna.



Figura 2.3.19. Imagen de la Laguna Verde del Azufral, capturada el 24 de julio de 2010. En la cual se observa el pequeño alineamiento de burbujas sobre la superficie de la Laguna.

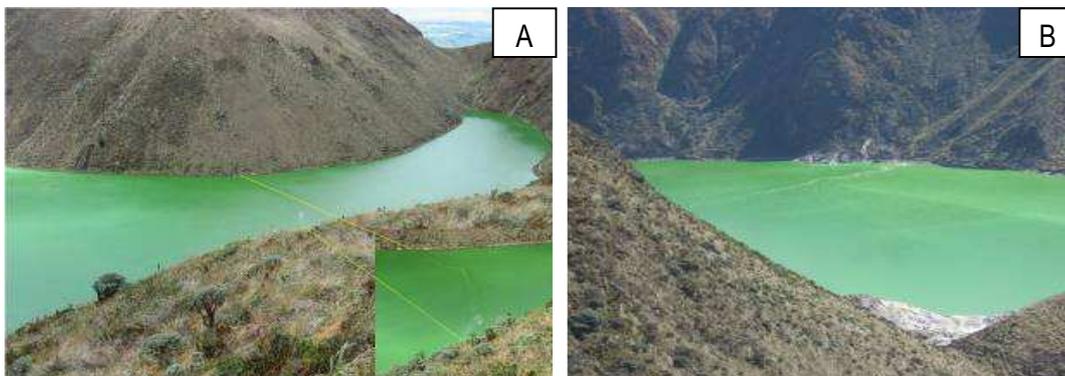


Figura 2.3.20. Imagen de la Laguna de Azufral, en la cual se aprecia la ubicación de la línea de coloración blanca, A) 14 de mayo de 2010; B) 22 de julio de 2010.

El 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), se realizó sobrevuelo sobre la cima del volcán Azufra (Figura 2.3.21.). Durante el sobrevuelo se observó salida de gases en proporción muy baja, además no se percibieron olores a gases azufrados. Se tomaron imágenes térmicas donde se resalta una zona de anomalía con un máximo de temperatura de 24°C, hacia el sector nororiente de la laguna Verde (Figura 2.3.22.).



Figura 2.3.21. Imágenes aéreas del volcán Azufra, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

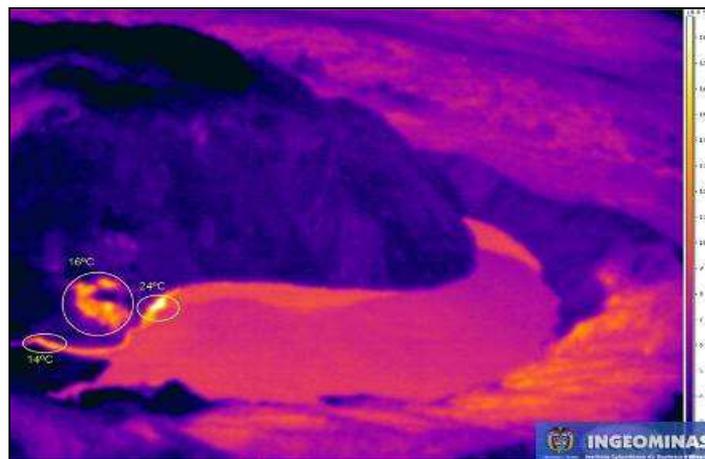


Figura 2.3.22. Imagen térmica de Azufra, capturada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Los óvalos en la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.

Entre el 4 y 5 de agosto de 2010 una comisión del OVSP que se encontraba en el volcán Azufra reportó que el nivel del agua de la Laguna Verde fue levemente menor en comparación a las imágenes observadas en el mes de julio de 2010 (Figura 2.3.23). Se resalta que la coloración de la laguna La Barrosa, cada vez se asemeja a la coloración de la Laguna Verde (Figura 2.3.24.). En algunas imágenes de las visitas realizadas el 4, 17 y 30 de agosto de 2010 se destaca que durante el transcurso de tiempo desde cuando se realizó la última visita (24 de julio de agosto de 2010), hubo salida de material caliente en el costado noroccidental de la Laguna Verde, en el sector conocido como la Playita en el sitio donde se presentó el evento eruptivo en julio de 2009 (Figura 2.3.25.).



Figura 2.3.23. Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. Izquierda) imagen tomada el 24 de julio de 2010 y Derecha) imagen tomada el 5 de agosto de 2010.

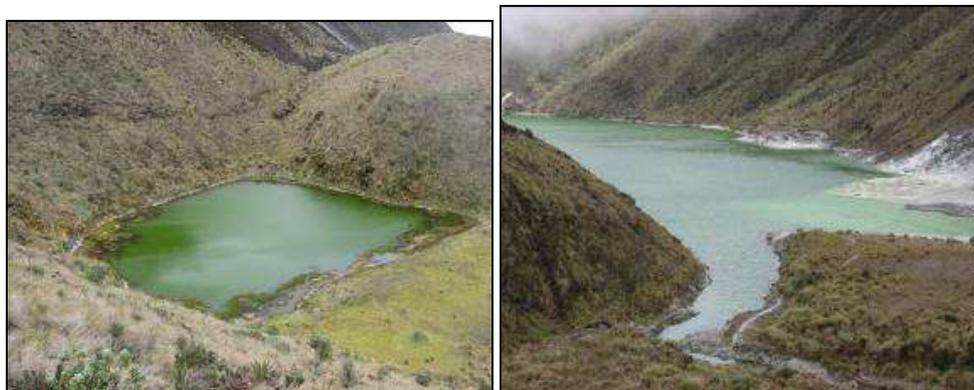


Figura 2.3.24. Imágenes de la Laguna La Barrosa (Izq.) y la Laguna Verde del volcán Azufral (Der.), capturadas el 4 de agosto de 2010.



Figura 2.3.25. Imágenes del depósito, observado desde varios puntos del volcán Azufral. A) 4 de agosto de 2010; B, C y D) 17 de agosto 2010; E y F) 30 de agosto de 2010.



En visita realizada el día 30 de septiembre al volcán Azufral, se observó correlación entre la lluvia e incremento de emisiones de gas, desde las orillas junto al sector conocido como La Playita (deposito de material, noroccidente de la laguna Verde), domos y desde las fumarolas de los domos. Además es importante mencionar que se observó emisiones de gas desde nuevas fumarolas, ubicadas por los domos, hacia el oriente de la laguna Verde (al frente de la Playita, por la pendiente). En las Figuras 2.3.26 a 2.3.29, se observa lo antes descrito.

Adicionalmente, el día 30 de septiembre se realizó medición de temperaturas por algunos puntos en agua y superficie del volcán Azufral. Las temperaturas fumarólicas alcanzaron los 85°C en el sector Mofeta-Mallama, cerca a los domos (Tabla 2.3.3, Figura 2.3.30.), las nuevas fumarolas se designaron con las letras A, B y C. Esta es una primera medición por lo cual aun no se puede comparar con anteriores mediciones, se observó también que el nivel de agua de la laguna Verde, ha disminuido, tendencia que se ha observado en los últimos meses (Figura 2.3.31.) y mayor cantidad de burbujeo, e intensidad del mismo, principalmente hacia el norte de la laguna Verde, y en la laguna La Barrosa (Figura 2.3.32.). De igual forma la coloración de la laguna La Barrosa, tiende a asemejarse a la de la Laguna Verde.

En cuanto a las manchas de color verde oscuro presentes en la superficie de la laguna Verde, se realizó un seguimiento a algunas de estas y se observó que se encuentran en sectores por donde emergen burbujas esporádicamente, esto es, el burbujeo aparece por periodos cortos de tiempo. Puede ser que el burbujeo desplace material particulado suspendido en el agua, cambiando su coloración; o que se dé algún tipo de reacción química entre el gas de las burbujas y el agua u otro compuesto presente en esta.

Como consecuencia de esta observación y de la hipótesis planteada, se propone que los alineamientos observados en mayo y julio del 2010, se generan a partir de alineamientos de fuentes burbujeantes en el fondo de la laguna que como se explicó anteriormente no persisten continuamente en el tiempo pero que sin embargo cambian la coloración del agua en superficie (Figuras 2.3.33. y 2.3.34.).

Tabla 2.3.3. Coordenadas WGS84 de los puntos donde se realizó medición de temperatura, en el Volcán Azufral.

| Coordenadas WGS84 | | Estación | Temp. °C 9/30/2010 | Observaciones |
|-------------------|---------------|-----------------|-----------------------|---|
| Lat °N | Long °W | | | |
| 1° 5' 28.7" | 77° 43' 17.7" | PTO. 1 | 69.1 | En el agua |
| 1° 5' 23.3" | 77° 43' 20.4" | PTO. 2 | 64.2 | En el agua, cerca de unaroca pintada 5 verde |
| 1° 5' 21.8" | 77° 43' 20.1" | PTO. 4 | 59.4 | En el agua |
| 1° 5' 21.1" | 77° 43' 16.8" | PTO. A | 82.2 | Al frente de la playita, por la pendiente, salida de gas |
| 1° 5' 20.4" | 77° 43' 17" | PTO. B | 78.3 | Al frente de la playita, por la pendiente, salida de gas |
| 1° 5' 20.3" | 77° 43' 17.9" | PTO. C | 83.7 | Al frente de la playita, por la pendiente, salida de gas |
| | | MOFETA- MALLAMA | 85.7 | Cerca a los domos |
| | | LA PLAYITA | 58.8 | Por la parte que hay grietas, donde se une el agua con el material. |



Figura 2.3.26. Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 16 de septiembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector.



Figura 2.3.27. Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 30 de septiembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector.

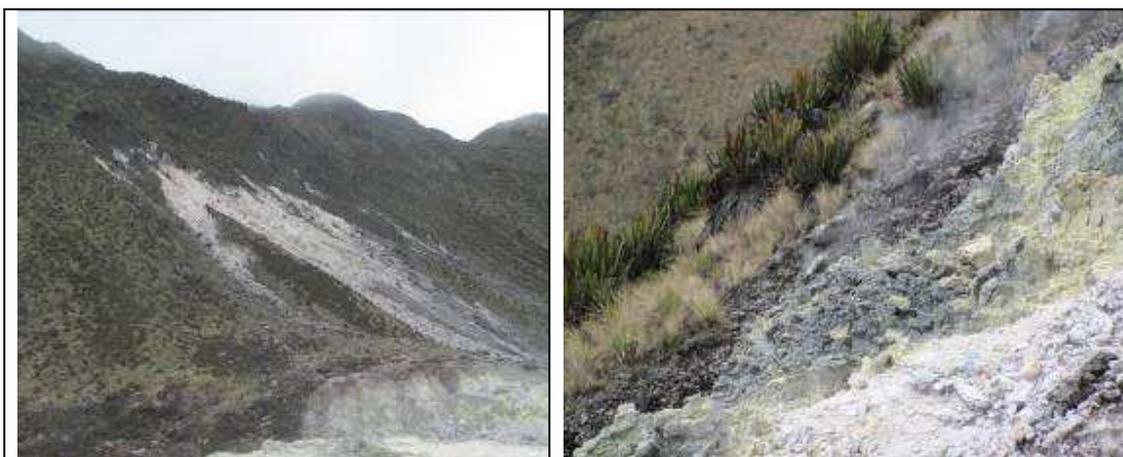


Figura 2.3.28. Imágenes de la ubicación de las fumarolas nuevas, por las cuales se observó emisión de gases, el 30 de septiembre de 2010, ubicadas hacia el oriente de la Laguna Verde del volcán Azufral.



Figura 2.3.29. Imágenes del volcán Azufra, izquierda – por la parte norte de la Laguna Verde, derecha – por el sector La Playita, salida de material; en las fotografías capturadas el 30 de septiembre de 2010, se puede observar emisiones de gas.

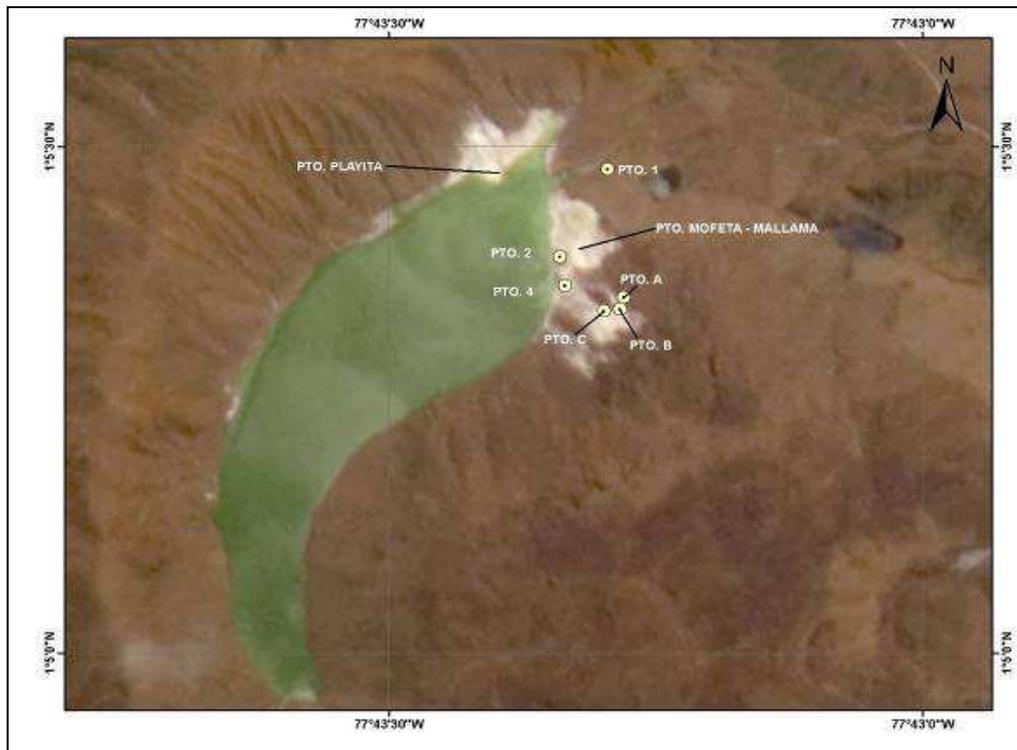


Figura 2.3.30. Mapa de localización de los puntos muestreados para toma de temperaturas, en agua y en superficie del volcán Azufra, medida realizada el 30 de septiembre de 2010.

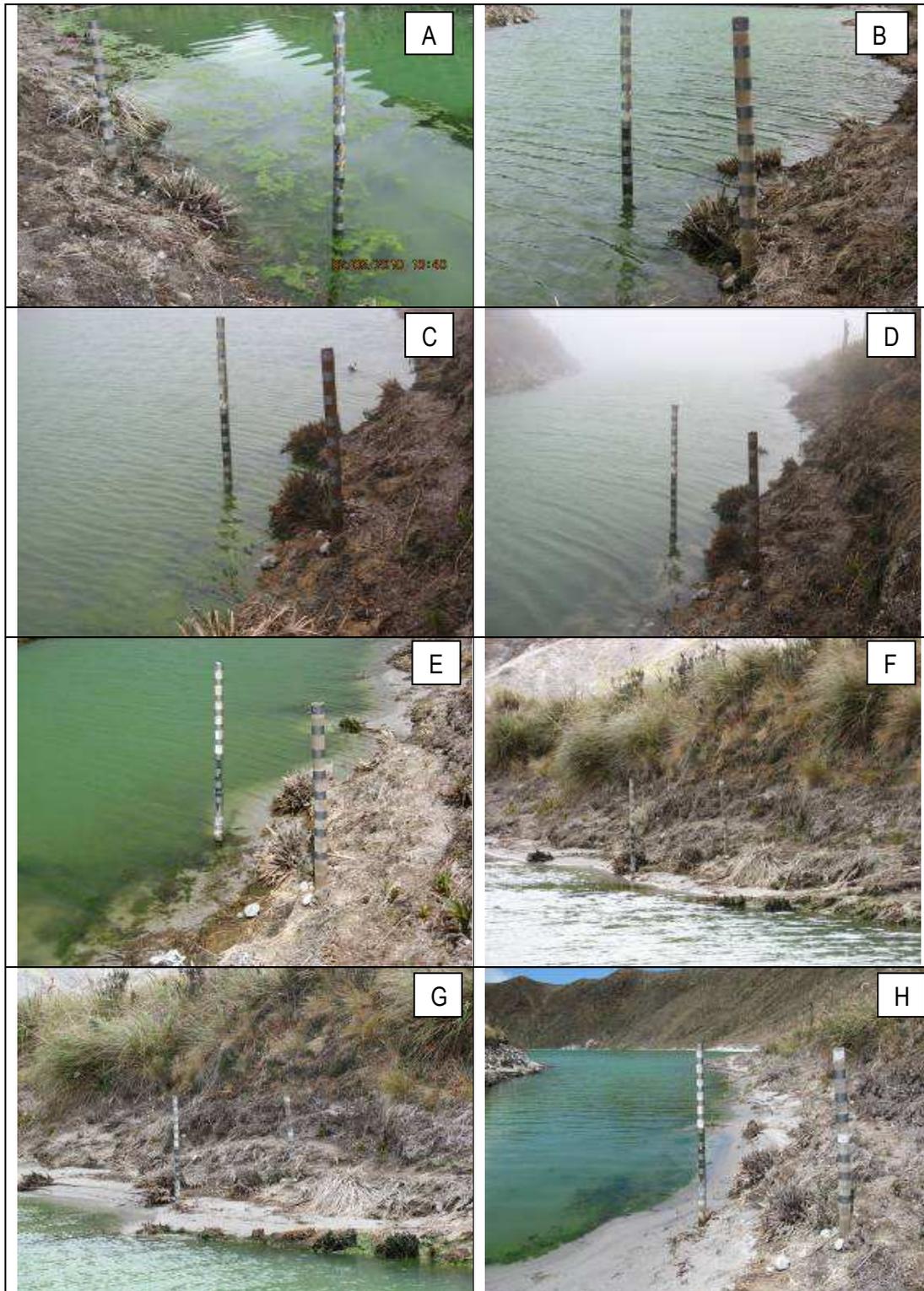


Figura 2.3.31. Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010; C) 24 de julio de 2010; D) 5 de agosto de 2010; E) 17 de agosto de 2010; F) 30 de agosto de 2010; G) 16 de septiembre de 2010; H) 30 de septiembre de 2010.



Figura 2.3.32. Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, en las cuales se observa zonas donde se ha presentado e incrementado el burbujeo, la fotografía inferior – derecha corresponde a la laguna La Barrosa.



Figura 2.3.33. Imágenes de la Laguna Verde, capturadas en el mes de mayo de 2010, en las fotografías se observa el cambio de textura y coloración más oscura en la superficie de la Laguna Verde.



Figura 2.3.34. Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, en las cuales se observa manchas de color más oscuro, las cuales por momentos se encuentran acompañadas por burbujeo, se propone que la coloración se genera por alineamientos de fuentes burbujeantes en el fondo de la laguna.

Respecto a lo observado el pasado 30 de septiembre de 2010, el 8 de octubre del mismo año, una de las comisiones del INGEOMINAS resalta que pese a que en la zona se han registrado fuertes lluvias se observa que el nivel de agua de la laguna Verde, continua disminuyendo por lo que hubo necesidad de reubicar los medidores artesanales instalados en las orillas de la Laguna (Figura 2.3.35.). De igual forma fue posible observar estos cambios en el sector conocido como la Playita, por el depósito de material (Figura 2.3.36.).

El 22 de octubre de 2010 se realizó medidas de Temperatura en puntos similares a los medidos el día 8, registrando temperaturas de 86 °C, destacándose una fumarola la cual sonaba a manera de silbido y presentaba coloración diferente a las otras, mas amarillo, y con una temperatura cercana a los 190°C (Figura 2.3.37.).



Figura 2.3.35. Reubicación del medidor artesanal de nivel de agua de la Laguna del volcán Azufral (sector norte). Arriba: Imágenes capturadas el 30 de septiembre de 2010. Abajo: Imágenes capturadas el 8 de octubre de 2010.



Figura 2.3.36. Imágenes del sector conocido como la Playita de la Laguna Verde del volcán Azufral, capturadas el 22 de octubre de 2010 en horas de la mañana. En la última fotografía, la persona se encuentra a una distancia de aproximadamente 11 pasos respecto al lugar donde se encuentra el depósito de salida de material.



Figura 2.3.37. Imagen de una de las fumarolas del volcán Azufral, la cual registró una temperatura de 188,7 °C. Medida Realizada el 22 de octubre de 2010.

Durante el mes de diciembre, el nivel del agua de la laguna Verde, ha aumentado considerablemente en comparación con visitas anteriores, se destaca que por el sector noroccidental, por donde se presentó la salida de material, este se encuentra casi en su totalidad cubierto por agua, además, algunos de los caminos para movilizarse, aledaños a la laguna, también se encuentran cubiertos por agua (Figura 2.3.38.).

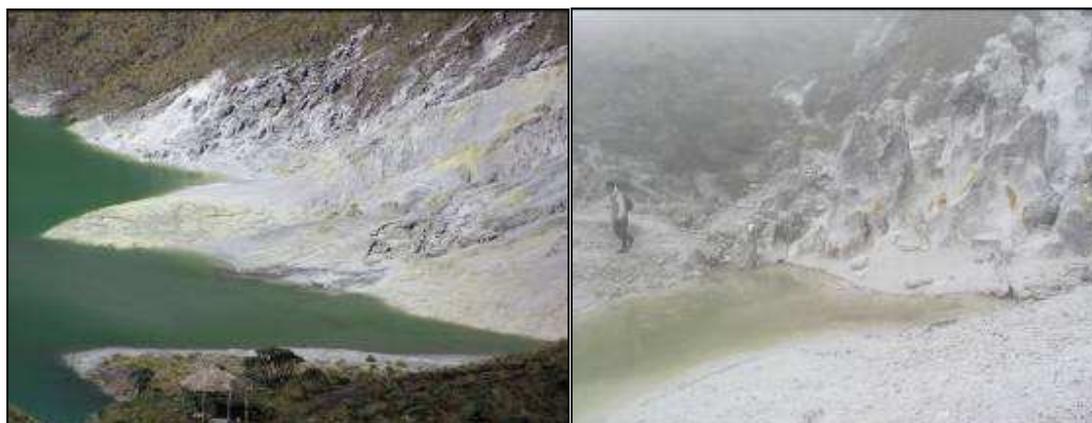


Figura 2.3.38. Imágenes de la Laguna Verde del volcán Azufral, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar en incremento en el nivel del agua de la Laguna.

En la Figura 2.3.39, se observa una comparación de unos niveles artesanales instalados en la Laguna Verde, en los cuales es posible evidenciar el incremento del nivel del agua.

Adicionalmente, se observó correlación entre la lluvia e incremento de emisiones de gas, principalmente desde los domos y desde las fumarolas de los domos (Figura 2.3.40.).

Se realizó medición de temperaturas por algunos puntos en agua y superficie del volcán Azufral. Las temperaturas fumarólicas alcanzaron los 86,3°C en el sector Mofeta-Mallama, cerca a los domos, siendo el último valor de temperatura medido en este punto de 85,7°C.

Se observó burbujeo en la laguna La Barrosa (Figura 2.3.41.). De igual forma la coloración de la laguna La Barrosa, tiende a asemejarse a la de la Laguna Verde.



Figura 2.3.39. Comparación de nivel del agua de la Laguna Verde de Azufral, con medidores artesanales (sector norte). Arriba: Imágenes capturadas el 22 de octubre de 2010. Abajo: Imágenes capturadas el 13 de diciembre de 2010.



Figura 2.3.40. Imágenes de algunos de los domos del volcán Azufral, principalmente de los ubicados por el sector nororiental de la Laguna Verde, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar las emisiones de gases presentes por este sector.



Figura 2.3.41. Imágenes de la Laguna La Barrosa del volcán Azufra, capturadas el 13 de diciembre de 2010. En las fotografías se puede observar el burbujeo presente en esta laguna, así como también la coloración de la misma, la cual se asemeja a la de la Laguna Verde.

2.3.5. Conclusiones

- Los registros sísmicos y los cambios observados en volcán Azufra, son reflejo de actividad volcánica, y son objeto de estudio y constante seguimiento.
- La evaluación de la actividad volcánica de Azufra durante el segundo semestre de 2010 permitió establecer el NIVEL VERDE ● (IV): “Volcán activo y comportamiento estable”.

2.4 VOLCÁN CUMBAL

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



Figura 2.4.1. Imagen del complejo volcánico Cumbal.

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

2.4.1 Red de vigilancia

Durante el Segundo semestre de 2010, la red de vigilancia del volcán Cumbal estuvo conformada por:

- Una estación sísmica telemétrica: de corto período de triaxial (Tabla 2.4.1, Figura 2.4.2.). Se realizan trabajos en la estación La mesa con el fin de obtener una señal al 100%. Se cambió el sistema análogo de VCO por un digitalizador GURALP, conectando la salida del sensor sismológico al canal de alta tasa de muestreo 100 mps, y se cambia el radio análogo Monitron por un radio modem FREEWAVE. La recepción de la información que detecta esta estación en la sede del OVSP, se realiza a través de una red telemétrica tipo punto a punto con una repetidora instalada en el cerro Cruz de Amarillo (Figura 2.4.3).

- Un inclinómetro electrónico telemétrico (Tabla 2.4.1, Figura 2.4.2.). Debido al cambio del VCO por el digitalizador, se aprovecha el canal auxiliar de baja rata de muestreo para conectar la señal del inclinómetro electrónico y de esta forma enviar la señal por el mismo radio modem que envía la señal sísmológica.

En este semestre, las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Cumbal tuvieron un funcionamiento total del 58 % (Figura 2.4.2). La estación La Mesa funcionó este periodo con un porcentaje del 83% y el inclinómetro presenta un porcentaje de funcionamiento del 32 %. Una vez realizados los cambios se presentó una mejora ostensible en la calidad y envío de los datos.

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 2010.

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

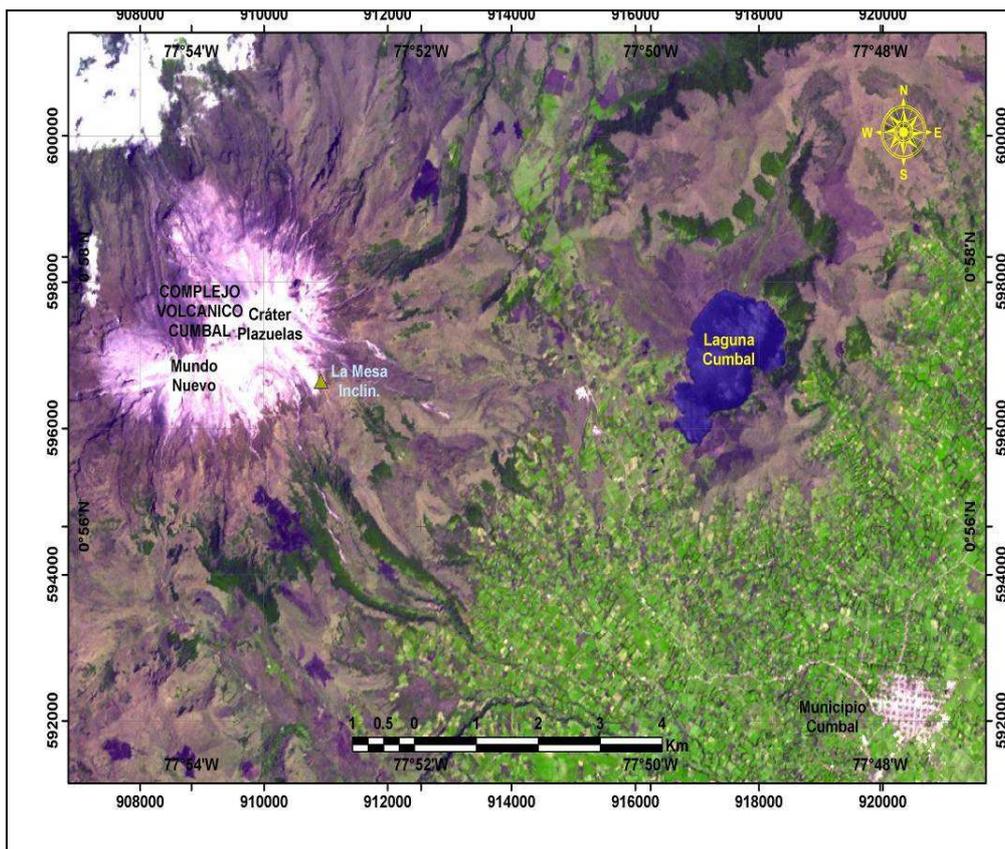


Figura 2.4.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2010.

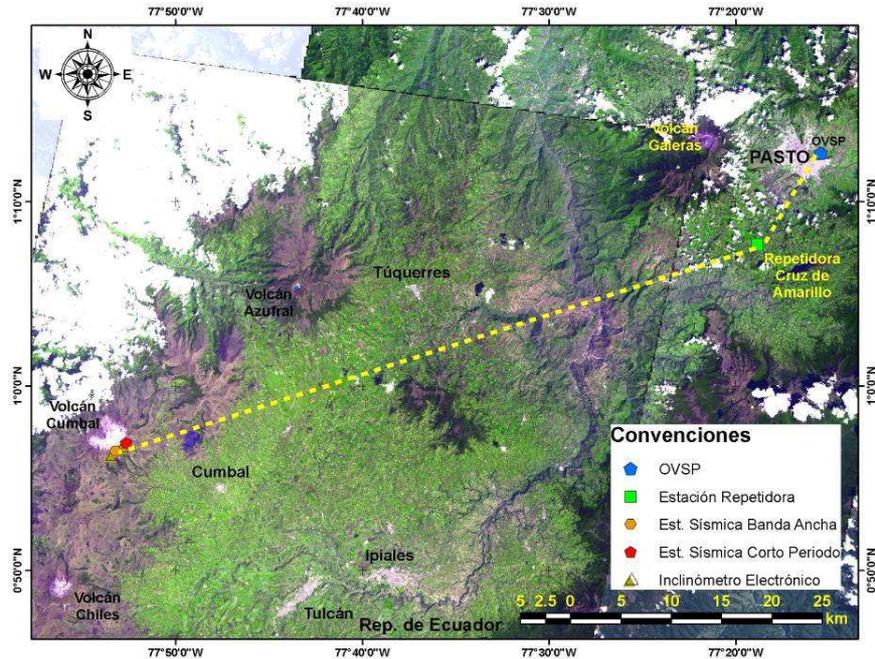


Figura 2.4.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

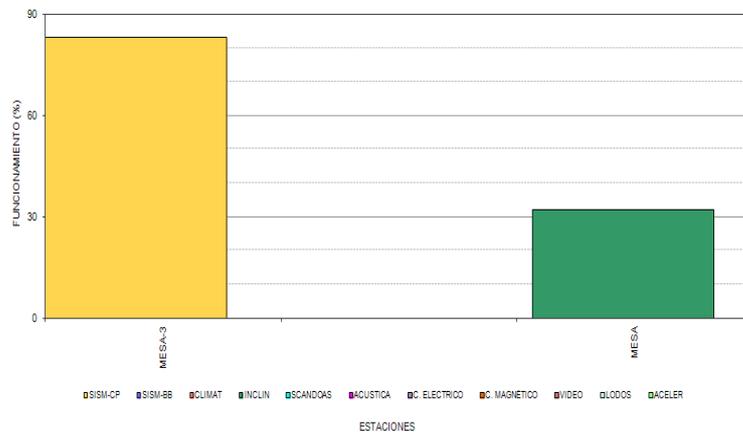


Figura 2.4.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el segundo semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal.

2.4.2 Sismología

La sismicidad del Complejo Volcánico Cumbal para el segundo semestre de 2010 estuvo relacionada en su mayoría con movimiento de fluidos de fuente transitoria, en menor cantidad se presentaron sismos de los tipos HYB y VT (Figura 2.4.5). Debido a problemas de redioenlace no se tienen datos para comparación con el peimer semestre de 2010. En el volcán Cumbal se resalta el registro de eventos tipo tornillo, algunos de los cuales se muestran más adelante.

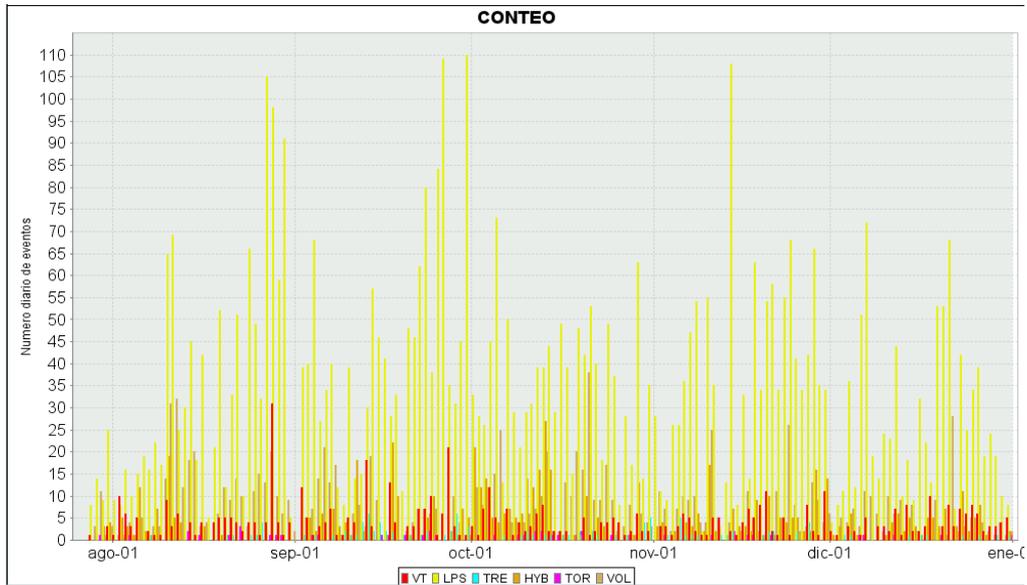


Figura 2.4.5. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde agosto de 2010 a diciembre de 2010.

En las Figuras de la 2.4.6. a 2.4.14., se muestran ejemplos de la sismicidad presente en el complejo volcánico de Cumbal, registrados por la estación La Mesa.

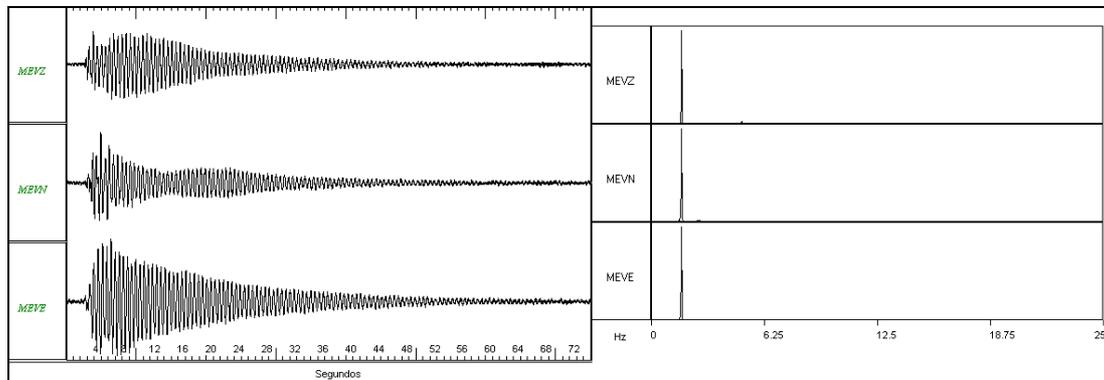


Figura 2.4.6. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, ocurrido en Cumbal, registrado el 29 de julio a las 9:30 a.m.

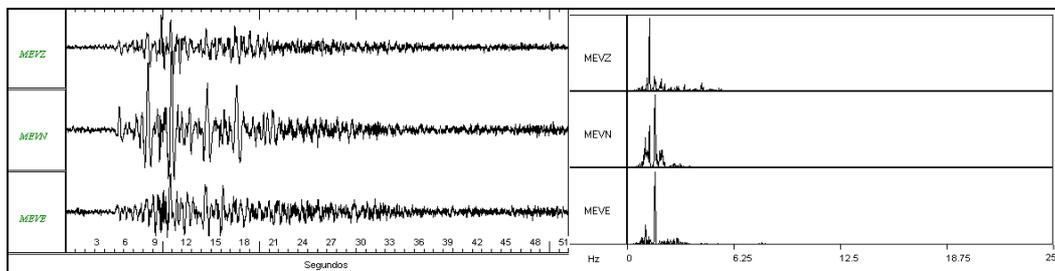


Figura 2.4.7. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, ocurrido en Cumbal, registrado el 29 de julio a las 8:45 a.m.

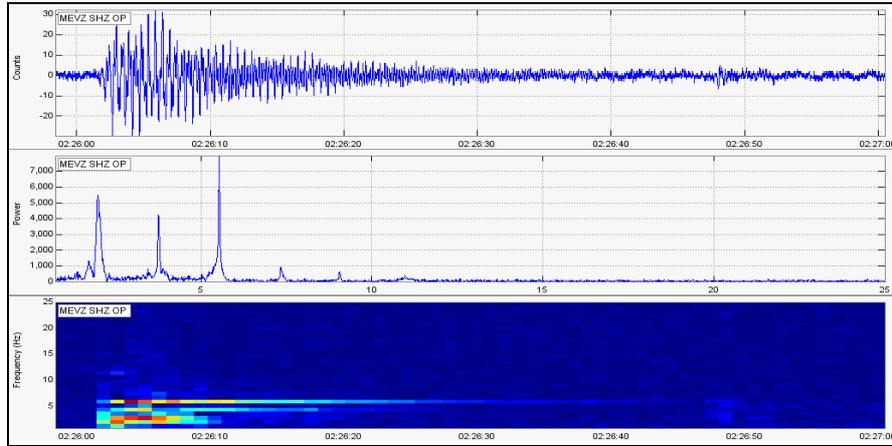


Figura 2.4.8. Sismograma, espectro y espectrograma en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 20 de agosto de 2010 a las 4:26 p.m. por la componente vertical de la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 5,4 Hz.

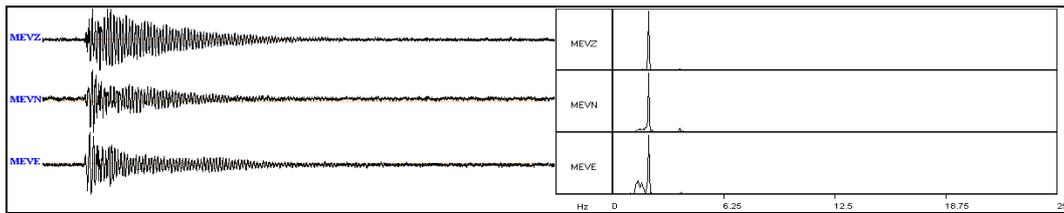


Figura 2.4.9. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, ocurrido en Cumbal, registrado el 19 de septiembre a las 2:02 p.m.

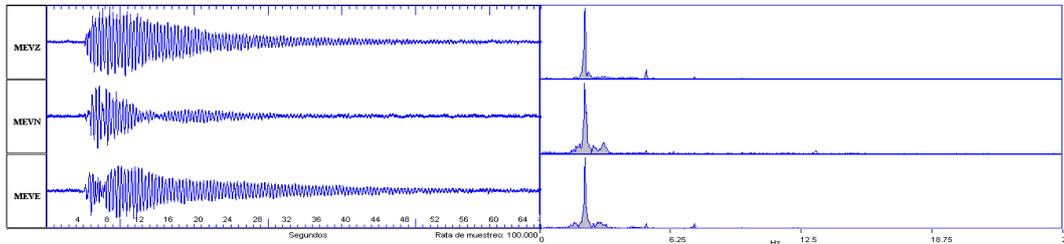


Figura 2.4.10. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 2 de octubre de 2010 a las 7:30 p.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 2,16 Hz.

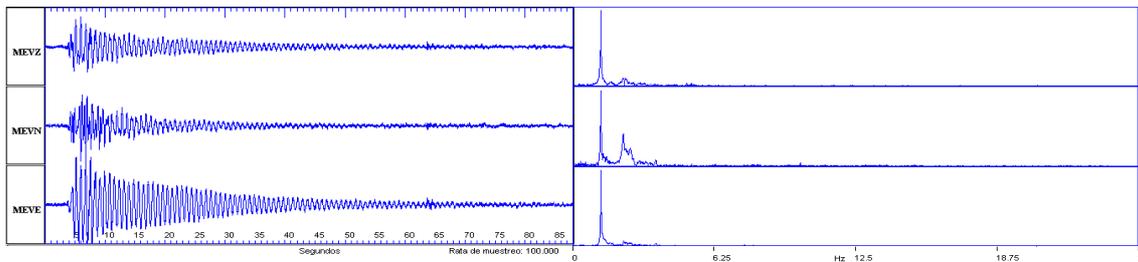


Figura 2.4.11. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 16 de octubre de 2010 a las 8:36 p.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una frecuencia dominante de 1,24 Hz.

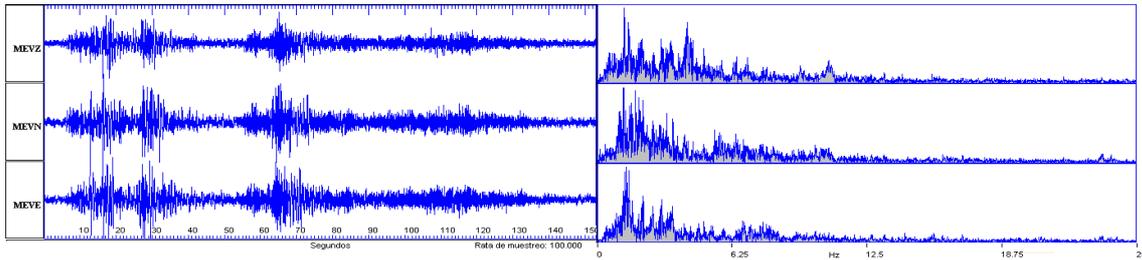


Figura 2.4.12. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE, registrado el 22 de octubre de 2010 a las 4:58 a.m. por la estación La Mesa. Este evento presentó una duración aproximada de 150 segundos, con frecuencias dominantes en un rango entre 1 y 5 Hz.

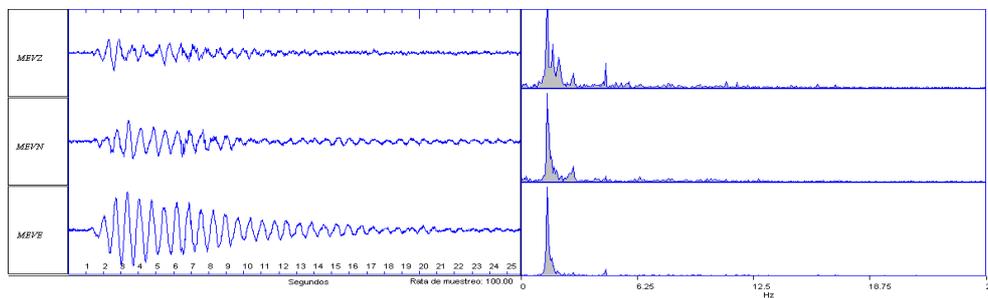


Figura 2.4.13. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 1 de diciembre de 2010 a las 12:28 p.m. por la estación La Mesa. La frecuencia dominante de este evento fue de 1,4 Hz.

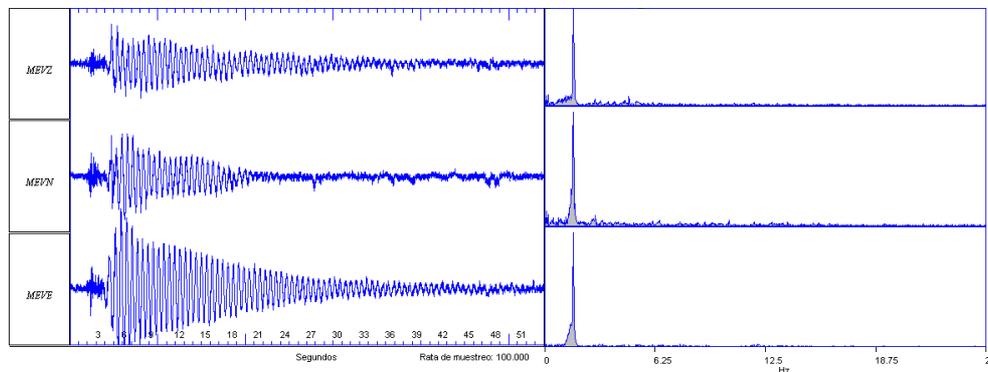


Figura 2.4.14. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR, registrado el 6 de diciembre de 2010 a las 8:35 p.m. por la estación La Mesa. La frecuencia dominante de este evento fue de 1,6 Hz.

2.4.3. Deformación

2.4.3.1. Inclínometría Electrónica

Para el seguimiento de los procesos deformativos del edificio volcánico del Complejo Cumbal, se contó con la información suministrada por el inclinómetro La Mesa (ubicado a 2,5 km al este-sureste del cráter Mundo Nuevo, 4270 msnm), desde el cambio de sensor realizado a finales del mes de noviembre de 2010, en la componente Tangencial se observaron variaciones que se encuentran dentro de los niveles de fluctuación normal del sensor, menores a 5 μ rad, mientras que en la

componente Radial, las fluctuaciones en el registro son cercanas a los 22 μ rad, pese a que es muy poco tiempo de registro es posible observar una leve tendencia ascendente (Figura 2.4.15.).

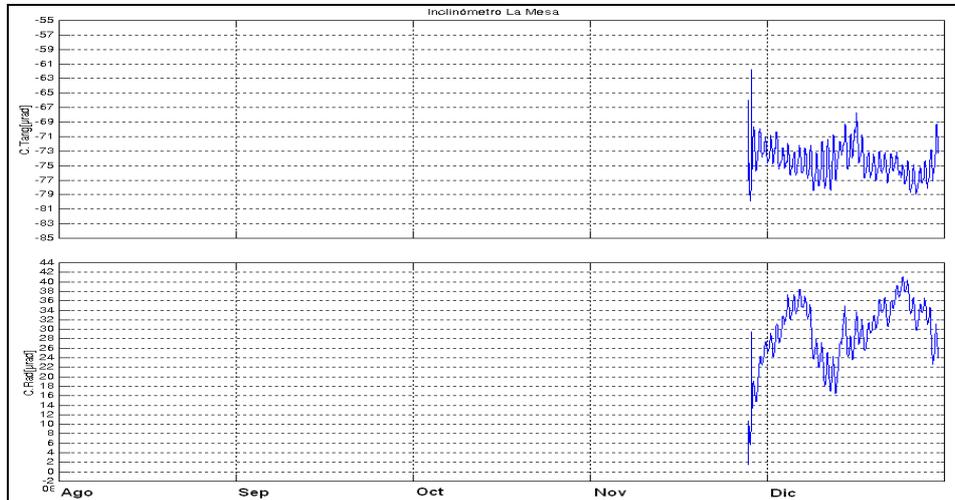


Figura 2.4.15. Componentes de inclinación Radial y Tangencial del inclinómetro La Mesa, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 29 de noviembre y el 31 de diciembre de 2010.

2.4.4 Físicoquímica

2.4.4.1. Muestreo de Aguas Termales

En agosto y noviembre de 2010 se realizó el muestreo de las fuentes termales que se encuentran en la zona de influencia del volcán Cumbal: El Salado, El Zapatero, Cuetial y Huevo Grande. En la Figura 2.4.16 se muestra la ubicación de las fuentes termales del volcán Cumbal.

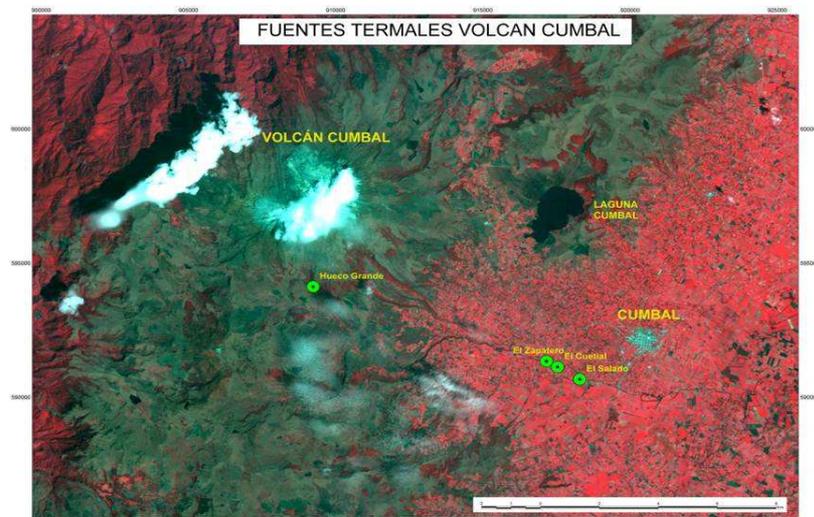


Figura 2.4.16. Mapa de localización de las fuentes termales del volcán Cumbal.



Se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos como Temperatura y pH. Si la temperatura es menor a 30°C se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.4.2. se indican los parámetros medidos in situ en agosto y noviembre, en comparación con los medidos en mayo de 2010.

Tabla 2.4.2. Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Cumbal en los periodos indicados.

| FUENTE TERMAL | pH May/10 | pH Ago/10 | pH Nov/10 | T° May/10 | T° Ago/10 | T° Nov/10 | Conductividad Ago/10 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| El Salado | 6,4 | 6,4 | 6,4 | 27°C | 27°C | 27°C | 2,60mS /cm |
| El Zapatero | 6,4 | 6,2 | 6,5 | 30°C | 31°C | 30°C | - |
| Cuetial | 6,3 | 6,1 | 6,5 | 34°C | 33°C | 32°C | - |
| Hueco Grande | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 29°C | 29°C | 25°C | 1760 µS/cm |

Según los resultados, el rango de temperatura de las diferentes fuentes termales del Volcán Cumbal se encuentra entre 26 y 35°C. Para las fuentes termales el Zapatero y Cuetial no se realizó medición de conductividad ya que su temperatura es superior a los 30°C, y con un aumento en la temperatura, disminuiría la viscosidad del agua y permitirían que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ión, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, como las aguas termales que se están analizando, la conductividad varía de 1 a 4% por cada grado centígrado. Se puede apreciar que para el mes de noviembre, la temperatura de las diferentes fuentes termales del Volcán Cumbal, no presentan cambios con excepción de la fuente termal Hueco Grande, la cual presentó un descenso de 4°C, debido a que esta fuente está ubicada en el cauce de un río, por lo cual pudo sufrir mezclas con estas aguas, debido al fuerte invierno que se presentó durante esos días. En cuanto al pH se puede afirmar que las fuentes termales muestreadas son ligeramente ácidas, con excepción de la fuente termal Hueco Grande que presenta neutralidad total. Los valores de conductividad eléctrica indican que en la fuente termal Hueco Grande las aguas se ionizan en forma más completa que las otras fuentes, lo que quiere decir, que hay mayor presencia de sales disueltas que en las aguas termales del Salado.

2.4.4.2. Análisis de Cloruros, Sulfatos y Bicarbonatos de las fuentes termales

De acuerdo con los resultados de los análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos se puede determinar la clasificación de las fuentes termales según el ión dominante utilizando el diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, (Figura 2.4.17.) los resultados de los análisis y la clasificación se describen en las tablas 2.4.3. y 2.4.4.

Tabla 2.4.3. Concentraciones de los aniones presentes en fuentes termales del Volcán Cumbal en los periodos indicados.

| FUENTE TERMAL | Cl ⁻ (mg/L) | | | SO ₄ ⁼ (mg/L) | | | HCO ₃ ⁻ (mg/L) | | |
|---------------|------------------------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|
| | Abr/10 | Ago/10 | Nov/10 | Abr/10 | Ago/10 | Nov/10 | Abr/10 | Ago/10 | Nov/10 |
| El Salado | 273.67 | 385.70 | 338.90 | 440 | 593.13 | 554.79 | 1067.5 | 806.4 | 976.5 |
| El Zapatero | 289.98 | 275.09 | 382.86 | 266.25 | 525.83 | 621.04 | 420.9 | 1033.2 | 882 |
| Cuetial | 450.22 | 224.75 | 235.39 | 632.71 | 425 | 472.5 | 762.5 | 945 | 882 |
| Hueco Grande | 239.64 | 306.29 | 270.84 | 250.12 | 363.13 | 414.58 | 854 | 428.4 | 428.4 |

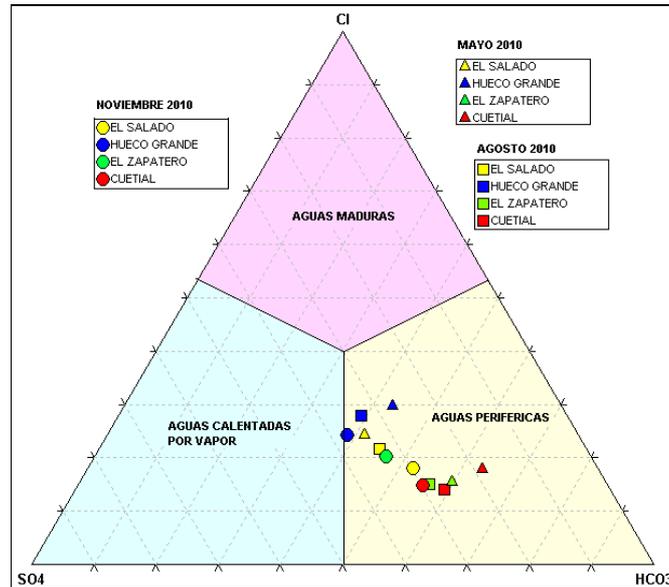


Figura 2.4.17. Diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻ para las fuentes termales del Volcán Cumbal.

Según los resultados de la tabla 2.4.3. y el diagrama de la figura 2.4.17, las fuentes termales del volcán Cumbal, en general, son aguas bicarbonatadas periféricas (Tabla 2.4.4.) ya que los iones HCO₃⁻ se presentan en pH comprendidos entre 6 y 8, además la presencia de bicarbonatos indican que en estas aguas hay una baja mineralización. No se observó cambios en su composición química entre mayo, agosto y noviembre de 2010.

Tabla 2.4.4. Clasificación de las fuentes termales del Volcán Cumbal.

| FUENTE TERMAL | CLASIFICACION | | |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Mayo 2010 | Agosto 2010 | Noviembre 2010 |
| El Salado | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas |
| El Zapatero | Aguas Bicarbonato-cloruradas | Aguas Bicarbonato-cloruradas | Aguas Bicarbonato-cloruradas |
| Cuetial | Aguas Bicarbonato - Sulfatadas | Aguas Bicarbonato - Sulfatadas | Aguas Bicarbonato - Sulfatadas |
| Hueco Grande | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas | Aguas Bicarbonatadas |

2.4.4.3. Muestreo de Gases Fumarólicos.

Se realizó el muestreo de gases ácidos en las fumarolas El Rastrojo, la Verde y Desfondada (Figura 2.4.18.) utilizando la botella de Giggenbach con 50 ml de solución 4N NaOH, a la cual se le ha extraído previamente el aire interno. La solución alcalina sirve de medio para absorber gases ácidos como el SO₂, H₂S, CO₂ y HCl; mientras que el resto de la botella atrapa gases neutros como He, H₂, Ar.

También se midió la temperatura directamente a cada una de las fumarolas obteniendo temperaturas de 177,6°C, 313°C y 278,4°C para El Rastrojo, El Verde y Desfondada respectivamente, las cuales corresponden a las temperaturas más altas encontradas en las diferentes fumarolas del volcán Cumbal. El muestreo se realizó con un tiempo de exposición de 25 minutos sobre la fumarola. Los gases condensados no se recolectaron debido a que la fumarola no

presentaba suficiente presión para tomar la muestra. Las muestras que se tomaron de las fumarolas el Rastrojo y la Verde del volcán Cumbal se envían al laboratorio del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales para el análisis de cloruro de Hidrogeno y de dióxido de Carbono.

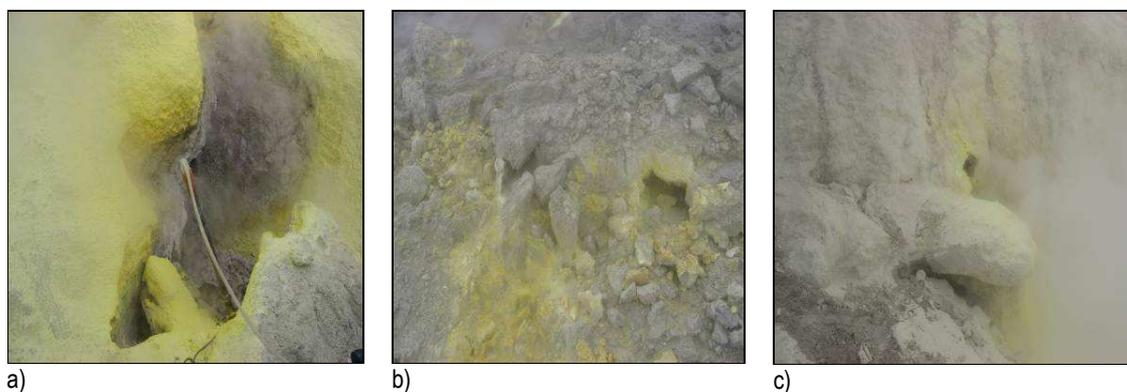


Figura 2.4.18. Fotografías de las Fumarolas a) El Rastrojo, b) El Verde y c) Desfondada, del Volcán Cumbal

En la tabla 2.4.5. se muestra las coordenadas y altitud de las fumarolas El Rastrojo, La Verde y Desfondada y las temperaturas medidas en fumarola.

Tabla 2.4.5. Posición geográfica de las fumarolas muestreadas en el Volcán Cumbal.

| FUMAROLA | COORDENADAS | | ALTITUD | TEMPERATURA |
|-------------|--------------|---------------|-----------|-------------|
| | Latitud N | Longitud W | | |
| El Rastrojo | 0° 56' 50,3" | 77° 53' 50,6" | 4557 msnm | 177.6°C |
| El Verde | 0° 57' 23,5" | 77° 53' 2,4" | 4701 msnm | 313.0°C |
| Desfondada | 0° 57' 20,1" | 77° 53' 11,1" | 4754 msnm | 278.4°C |

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

Los resultados de los análisis que se realizaron para las muestras de gases ácidos en las fumarolas el Rastrojo y El Verde mediante la botella de Giggenbach, se indican en la tabla 2.4.6.

Tabla 2.4.6. Concentraciones de los gases, medidos en las fumarolas del Volcán Cumbal.

| Fumarola | %CO ₂ | %SO ₂ | %S _{TOTAL} | %H ₂ S | %HCl |
|----------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------|
| El Verde | 67.63 | 42.29 | 31.72 | -10.55 | 0.627 |
| Rastrojo | 79.83 | 26.58 | 19.93 | -6.63 | 0.218 |



Libertad y Orden

De acuerdo a los resultados la concentración de CO₂ (Dióxido de Carbono) en porcentaje Molar para las fumarolas El Verde y el Rastrojo es de 67.63% y 79.83% respectivamente, lo cual es un valor alto en comparación con otras fumarolas de otros volcanes, este valor de carbono siempre es poco intensificado a altas temperaturas, lo que coincide con la temperatura registrada en las fumarolas. Esta concentración de CO₂ puede darse como resultado de una contribución magmática menor o por la absorción de elementos más ácidos por acuíferos someros y superficiales. En cuanto a la concentración de HCl (Cloruro de Hidrogeno), es considerada como un valor bajo que podría deberse a las reacciones que ocurren en la corteza con la participación de agua.

La concentración de SO₂ (Dióxido de Azufre) para la fumarola El Verde es de 42.29%, la cual sería alta, casi el doble en comparación a la de la fumarola el Rastrojo. La presencia de estos valores de SO₂ reflejaría un ascenso rápido de los gases magmáticos, tal que no permiten alcanzar condiciones de equilibrio con la roca encajante. De esta manera la cantidad de SO₂ eliminado a la atmósfera dependerá de las reacciones de SO₂ con los otros componentes del gas, tales como H₂ y H₂S (Sulfuro de Hidrogeno). En cuanto al Azufre total, las concentraciones para las dos fumarolas El Verde y Rastrojo son de 31.72% y 19.93% respectivamente, las cuales resultan de la reducción de SO₂ por H₂S que se inician inmediatamente después de la emisión del gas a la atmósfera.

2.4.5 Actividad superficial

La actividad superficial del volcán Cumbal durante el segundo semestre de 2010, se documentó a partir de reconocimientos aéreos realizados el 23 de julio y el 1 de agosto, de igual forma de imágenes capturadas por personal del INGEOMINAS que realizaba trabajos de geoquímica en el volcán los días 2 y 3 de agosto y mantenimientos realizados a estaciones del volcán Azufral los días 18 de agosto, 17 de septiembre, 1 de octubre y 29 de noviembre, en las fotografías se observó emisiones de gases de color blanco desde diferentes sectores del cono activo con dispersión variable debido a la acción de los vientos .

En sobrevuelo que se realizó el 23 de julio, en horas de la mañana, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), no fue imposible evidenciar algún tipo de actividad superficial debido a la alta nubosidad presente en la cima del complejo volcánico, sin embargo, en reconocimiento aéreo realizado el 1 de agosto, se observó salida de gas de coloración blanca, en gran cantidad y de forma continua desde el campo fumarólico El verde y en menor proporción desde el campo fumarólico Desfondada (Figura 2.4.19.), además durante el sobrevuelo no se percibió olor a gases azufrados.

El 18 de agosto de 2010, uno de los funcionarios del OVSP que se encontraba en el sector denominado El Espino en la vía que conduce al municipio de Tumaco reportó salida de gases de coloración blanca desde el sector norte del volcán Cumbal (Figura 2.4.20.).

El 17 de septiembre de 2010, uno de los funcionarios del OVSP que se encontraba en el sector denominado El Espino en la vía que conduce al municipio de Tumaco reportó muy poca salida de gases de coloración blanca desde el sector norte del volcán Cumbal (Figura 2.4.21.).

El 1 de octubre de 2010, uno de los funcionarios del OVSP que se encontraba en el sector denominado El Espino en la vía que conduce al municipio de Tumaco reportó salida de gases de coloración blanca desde el sector norte del volcán Cumbal (Figura 2.4.22.).

El 29 de noviembre de 2010, personal del OVSP que se encontraba por el volcán Cumbal, realizando trabajos de campo, reportaron salida de gases, de coloración blanca en muy poca cantidad desde el sector norte del volcán Cumbal (Figuras 2.4.23. y 2.4.24).



Figura 2.4.19. Imágenes del cono activo de Cumbal, capturadas durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 1 de agosto de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana. Se observa la salida de gases de coloración blanca de los cráteres secundarios Laverde y Desfondada.



Figura 2.4.20. Imágenes del cono activo de Cumbal, capturada desde El Espino (Nariño) el 18 de agosto de 2010 a las 9:00 a.m. Se observa la salida de gases de coloración blanca.



Figura 2.4.21. Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas desde El Espino (vía Tumaco), en horas de la mañana del 17 de septiembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca.



Figura 2.4.22. Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas desde El Espino (vía Tumaco), en horas de la mañana del 1 de octubre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de color blanco.



Figura 2.4.23. Imágenes del complejo volcánico de Cumbal, capturadas en horas de la mañana del 29 de noviembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca.



Figura 2.4.24. Imagen del complejo volcánico de Cumbal, capturada en horas de la mañana del 29 de noviembre de 2010, en las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca.



2.4.6. Conclusiones

- a evaluación de los parámetros monitoreados de la actividad volcánica de Cumbal durante el segundo semestre de 2010 permitió mantener el **NIVEL VERDE ● (IV): “Volcán activo y comportamiento estable”**.



2.5 BIBLIOGRAFÍA

Servicio Geológico Colombiano. Reportes Mensuales de Actividad del Volcán Galeras. Meses de julio a diciembre de 2010. Varios autores. Informes inéditos. Pasto. 2010.

Información complementaria puede ser consultada en la página web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto en: <http://intranet.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 volcánico en el Segundo Semestre del 2010.

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