

**INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO – INGEMMET
DIRECCIÓN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO – DGAR
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DEL INGEMMET – OVI**



REPORTE ANUAL DE ACTIVIDADES 2015

**MONITOREO ANUAL DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN
SABANCAYA**

2015

TABLA DE CONTENIDO

1.0 INTRODUCCIÓN.....	1
2.0 MONITOREO SÍSMICO.....	3
2.1 RED DE MONITOREO SÍSMICO.....	3
2.2 SISMOLOGÍA.....	6
2.2.1 Sismos de altas frecuencias.....	8
2.2.2 Sismos de baja frecuencia.....	10
2.2.3 Tremor espasmódico (TRE).....	12
3.1 OPERATIVIDAD DE LA CÁMARA DE VIGILANCIA DEL VOLCÁN SABANCAYA.....	15
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES.....	15
4.1 FUNDAMENTO DEL MONITOREO GEOQUÍMICO.....	22
4.2 EL MONITOREO DEL FLUJO DE SO ₂ EN FUMAROLAS DEL VOLCÁN SABANCAYA.....	23
4.3 MONITOREO GEOQUÍMICO DE FUENTES DE AGUA.....	28
4.3.1 Métodos de muestreo y análisis del agua.....	29
4.3.2 Características de las fuentes termales y resultados de análisis químicos de aguas.....	31
4.3.3. Características de los iones solubles en el agua.....	33
4.3.4 Resultados de la Fuente Termal SA3.....	35
4.4 MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE FUENTES DE AGUA.....	36
4.4.1 Resultados de la Temperatura en la Fuente SA3.....	36
5.0 MONITOREO DE DEFORMACIÓN.....	37
5.1 MONITOREO CON EQUIPOS EDM.....	37
5.2 MONITOREO CON EQUIPOS GPS.....	38
6.1 ANOMALÍAS TÉRMICAS MIROVA.....	42
7.0 EL PROYECTO UBINAS SABANCAYA MISTI (USM) 2015.....	43
7.1 La red telemétrica Sabancaya 2015.....	43
7.2 Implementación de la Red Telemétrica Sabancaya 2015.....	49
8.0 CONCLUSIONES.....	50
ANEXO I.....	54
HELLICORDERS ESTACION SISMICA SAB07 Y SAB11:.....	54

1.0 INTRODUCCIÓN

El volcán nevado Sabancaya es considerado como uno de los siete volcanes activos de la región sur del Perú. Se ubica en la región Arequipa, provincia de Caylloma, distrito de Achoma; con coordenadas geográficas: Lat: 15°47'16.01"S, Long: 71°51'20.53"O (Fig. 1.1).

Las primeras manifestaciones de una nueva actividad volcánica iniciaron a finales del 2012, incrementándose hacia mediados de febrero del 2013, presentando emisiones fumarólicas que

ascendieron sobre los 500 metros sobre el cráter (msc). Durante este periodo ocurrieron tres importantes sismos de magnitudes 4.6, 5.2 y 5.0 ML. A inicios de agosto del 2014 el volcán Sabancaya entra en una nueva fase con actividad volcánica incrementándose considerablemente al trascurrir el tiempo, así mismo durante este periodo, la actividad sísmica dominante fueron los sismos de tipo Largo Periodo - LP (asociados

a movimientos de magma), a su vez las emisiones fumarólicas se incrementaron, alcanzando los 2000 msc. A la actualidad el volcán mantiene una actividad fumarólica permanente y continua, incluso visibles desde la ciudad de Arequipa. Las continuas emisiones de gases se perciben en las localidades cercanas al volcán.

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) efectúa la vigilancia de los siete volcanes activos que existen en la región sur del Perú, entre ellos el volcán Sabancaya. Este trabajo lo



Figura 1.1. Ubicación del volcán Sabancaya.

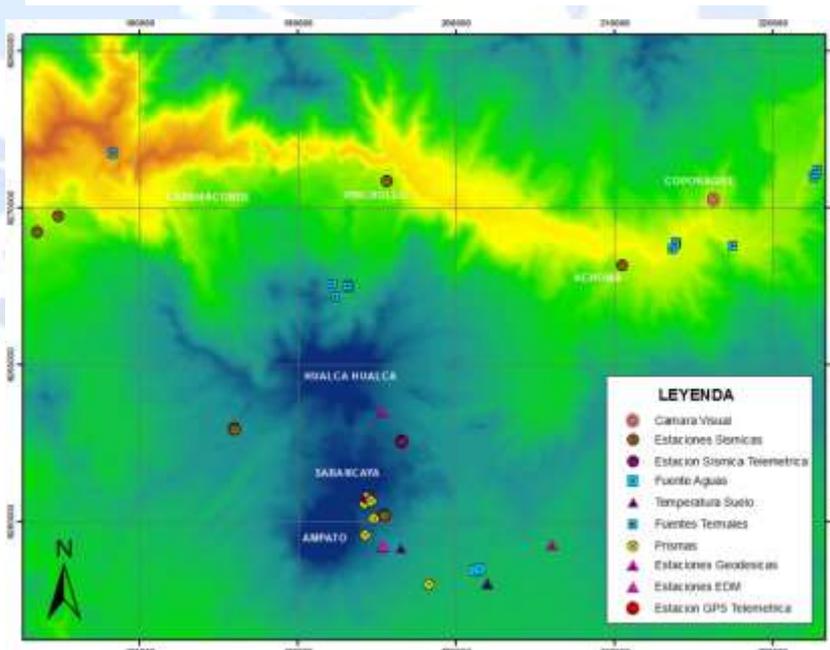


Figura 1.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo instaladas por el OVI en el volcán Ubinas.

realiza desde el 2007 como Grupo de Vulcanología y desde el año 2013 como OVI, a través de un sistema multidisciplinario que comprende el uso de cinco métodos: (1) monitoreo sísmico (movimiento en el interior del volcán), (2) monitoreo geodésico (variaciones en la forma y posición del volcán), (3) monitoreo geoquímico (composición química de aguas y gases), (4) monitoreo visual (características de emisiones y fenómenos asociados) y (5) monitoreo térmico (variaciones de temperatura del volcán). La información procedente de una red de vigilancia es registrada en tiempo real y de manera temporal (Fig. 1.2).



2.0 MONITOREO SÍSMICO

2.1 RED DE MONITOREO SÍSMICO

Durante el año 2015, la red de monitoreo sísmico estuvo conformada por 07 estaciones con sismógrafos de banda ancha: 05 estaciones con almacenamiento de data en su disco interno (SAB10, SAB12, SAB13, SAB14 y SAB15) y 02 estaciones con transmisión de data vía telemetría (SAB07 y SAB11), en tiempo real hacia el centro de monitoreo del OVI (Figura 2.1).

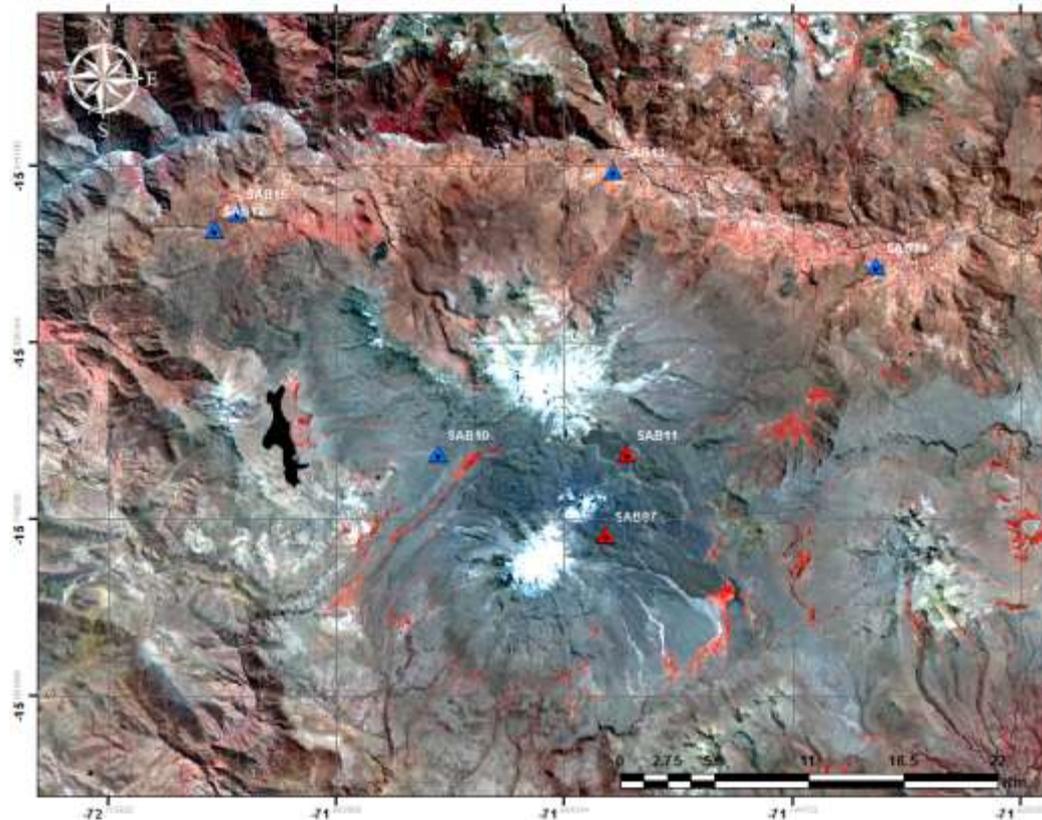


Figura 2.1. Red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya.

El porcentaje de operación de la red de monitoreo sísmico del OVI en este volcán durante el año 2015 se especifica en la tabla (Tabla 2.1 y Figura 2.2).

Tabla 2.1. Operatividad de los sensores que conforman la red sísmica de monitoreo del volcán Sabancaya; en rojo: estaciones telemétricas que transmiten información en tiempo real y en azul: estaciones temporales.

Estaciones	Operatividad (%)
SAB07	55.6
SAB10	77.3
SAB11	89.3
SAB12	30.4
SAB13	41.9
SAB14	72.9
SAB15	13.2

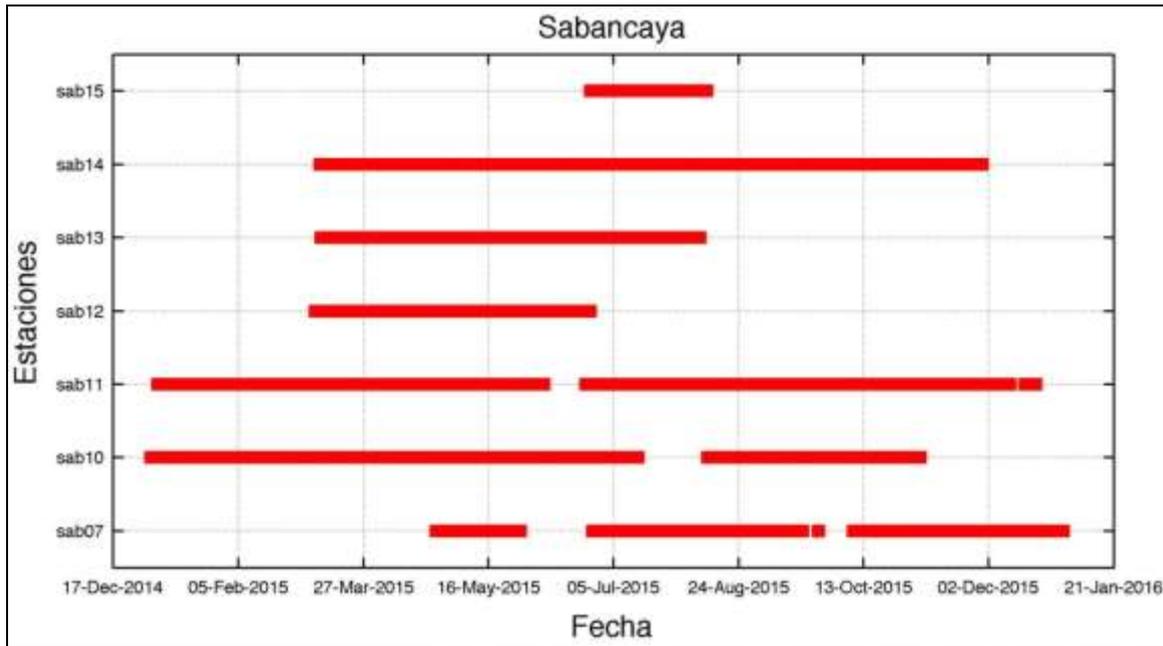


Figura 2.2. Operatividad de las estaciones sísmicas desplegadas en el volcán Sabancaya durante el 2014.

Se realizaron comisiones de servicio con la finalidad de construir casetas, descarga de la data sísmica y mantenimiento de las estaciones que conforman la red de monitoreo.

Durante el año 2015, se organizó una comisión de servicios al volcán Sabancaya con la finalidad de realizar la construcción de la caseta de seguridad para la estación telemétrica SAB07, ubicada a 2.5 km del cráter del volcán, tal como se observa en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Construcción de la caseta de seguridad para la estación telemétrica SAB07, ubicada en el flanco SE.

Periódicamente se realizaron labores de descarga de la data sísmica y el mantenimiento de las estaciones de banda ancha SAB07 (flanco SE) y SAB10 (flanco NW), ubicadas a 2.5 y 8.5 km del centro cráter del volcán, respectivamente.



Figura 2.4. Foto de la izquierda: ejemplo de descarga de data sísmica de la estación telemétrica SAB07 durante la comisión de servicios del 13 de julio del 2015. Foto de la derecha: mantenimiento de la estación sísmica telemétrica SAB07.



Figura 2.5. Descarga de la data sísmica correspondiente a la estación sísmica temporal SAB10, ubicada por la laguna Mucurca.



Figura 2.6. Mantenimiento de la estación sísmica temporal SAB10, ubicada en el flanco NW del volcán.

2.2 SISMOLOGÍA

La sismicidad del volcán Sabancaya, mostró una intensa actividad a lo largo del año 2015, dicha sismicidad estuvo dominada tanto por la ocurrencia de sismos volcano-tectónicos (VT), asociados al fracturamiento de roca en el interior del edificio volcánico y a su vez, se registró la ocurrencia de sismicidad distal (dVT), la cual, se asoció a la actividad de las fallas activas que existen en la zona. También se registró la ocurrencia de sismos tipo Largo Periodo (LP), Tornillos (TOR) e híbridos (HYB), las cuales están asociadas al movimiento y ascenso de fluidos en el interior del conducto del volcán. Finalmente se registraron episodios de tremor volcánico (TRE) con energías relativamente bajas.

En el año 2015 se registró un total de 44065 eventos sísmicos asociados principalmente al fracturamiento de roca y a la actividad de gases y fluidos en el interior del volcán (Figura 2.7). Así mismo, se registraron pulsos de tremor espasmódico de baja energía.

En la figura 2.7 se muestra un cuadro estadístico de la actividad sísmica del volcán Sabancaya, registrado durante el año 2015.

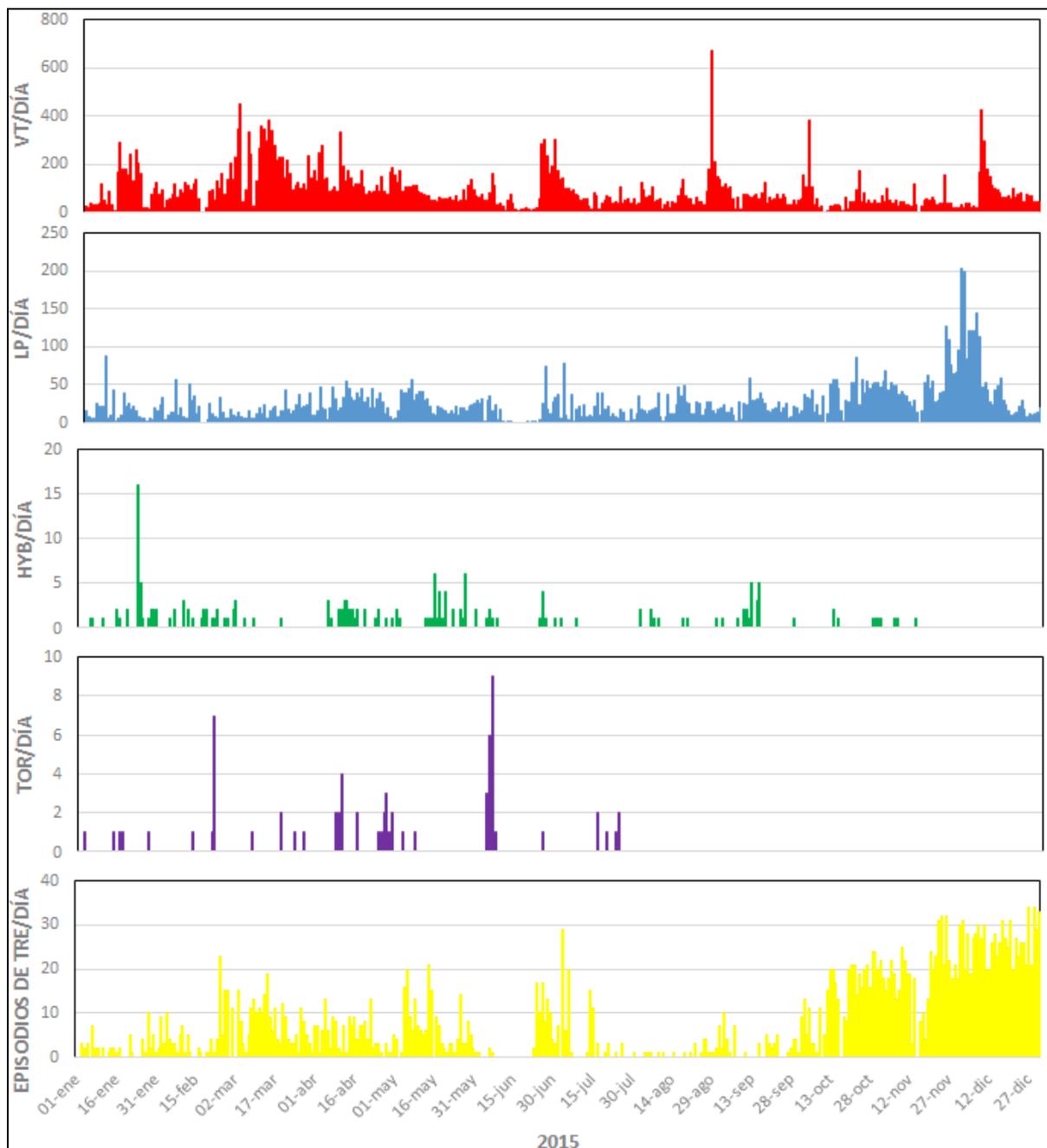


Figura 2.7. Cuadro estadístico de la actividad sísmica del volcán Sabancaya, registrado durante el año 2015 (sismos VT: volcano tectónicos; LP: largo periodo; HYB: hibrido; TOR: tornillo; TRE: tremor).

Asimismo, se realizó la estimación de la energía sísmica acumulada durante el año 2015 la cual es representada en la Figura 2.8. En base a los datos se deduce que los incrementos abruptos de la energía sísmica liberada, se deben a la ocurrencia de sismicidad distal (dVT), producto de la actividad de sistemas de fallas presentes en la zona de estudio; dichos sismos distales de tipo volcano-tectónicos (dVT) llegaron a liberar una energía sísmica promedio de 246 MJ aproximadamente. Por otro lado, la energía sísmica acumulada total durante el 2015 fue de 205049 MJ.

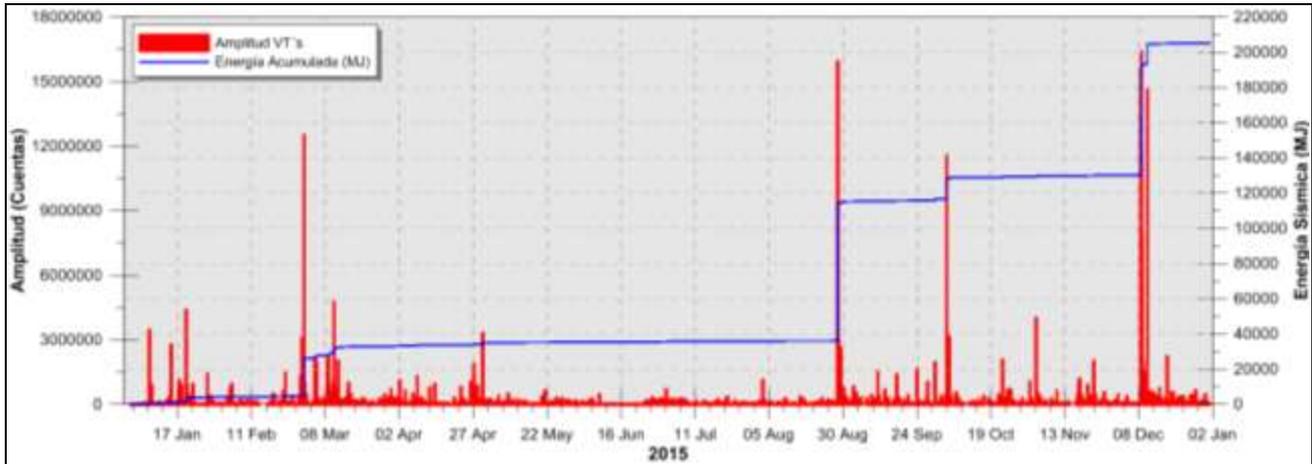


Figura 2.8. Gráfico de la energía sísmica acumulada liberada por los sismos volcánicos registrados durante el periodo 2015.

2.2.1 Sismos de altas frecuencias

- Volcano - tectónicos (VT y dVT)

Durante el año 2015 se registraron 33734 eventos sísmicos de tipo volcano-tectónicos relacionados con fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica (Figura 2.9 y 2.10). Durante este año se vio un incremento significativo comparado con la actividad registrada el año pasado (2014). Este incremento no solo es notorio respecto al número diario de eventos registrados, sino también con relación a la energía liberada y esto se debe a la ocurrencia de sismos distales que liberaron gran cantidad de energía, sin embargo, dicho eventos distales se asociaron a la actividad de sistemas de fallas en la zona del volcán Sabancaya.

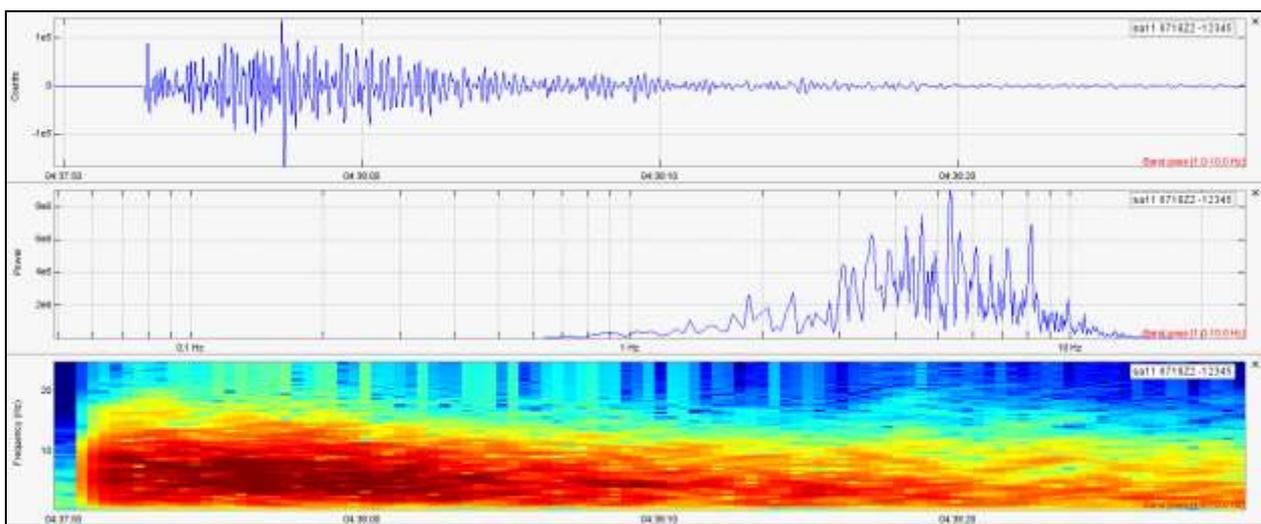


Figura 2.9. Señal sísmica volcano-tectónica (VT) asociada al fracturamiento de rocas en el interior del volcán (fecha: 14/01/2015 – 05:08 UTC), pico frecuencial en 5.3 Hz y una energía sísmica de 0.27 MJ.

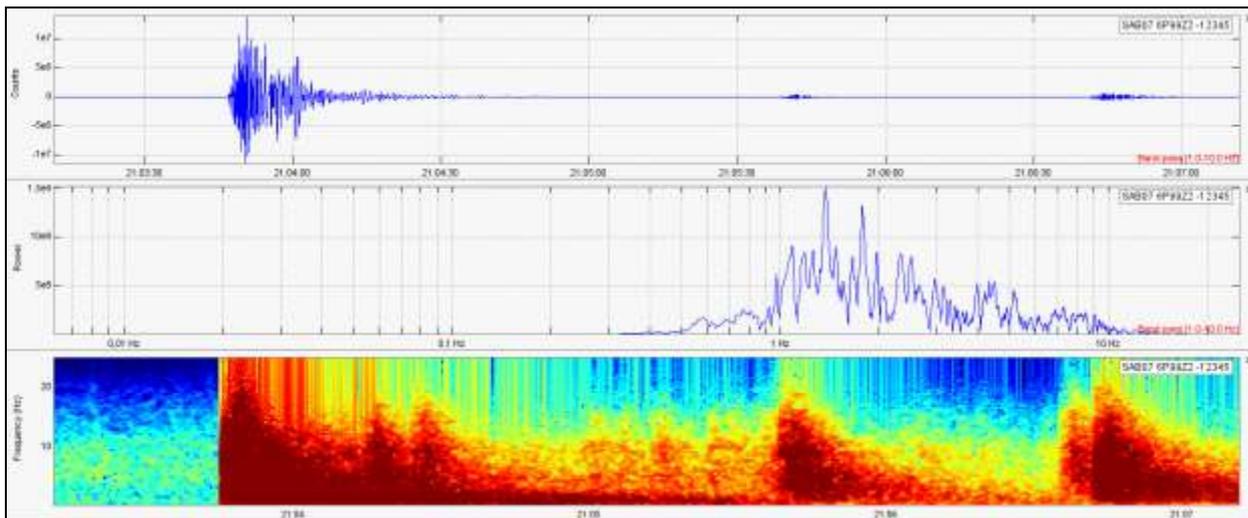


Figura 2.10. Señal sísmica volcano-tectónica distal (dVT) asociada a la actividad del sistema de fallas Huambo – Cabanaconde (fecha: 10/12/2015 – 21:36 UTC), pico frecuencial en 1.5 Hz y una energía sísmica de 39.86 MJ.

En enero del 2015 se registró la mayor ocurrencia de sismicidad tipo distal, contabilizándose hasta 248 sismos volcano-tectónicos distales (dVT) que liberaron una energía sísmica en promedio de 246.2 MJ. A continuación se muestra un sismograma de la intensa actividad sísmica distal para este mes de febrero (Figura 2.11).

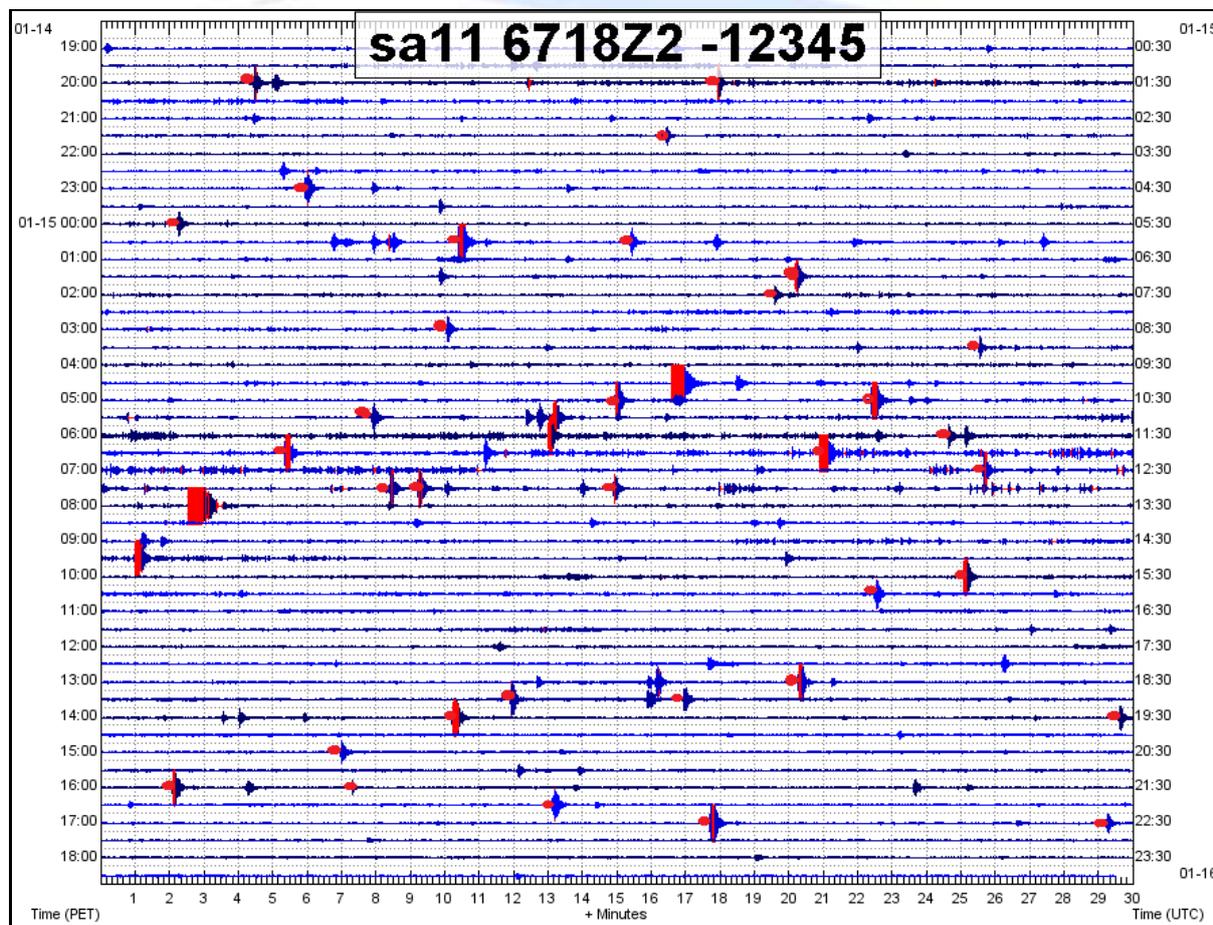


Figura 2.11. Sismograma digital de la estación SA11, componente vertical, correspondiente al día 15/01/2015. Nótese los eventos volcano-tectónicos distales (dVT) ocurridos durante este día entre las 09:30 y 13:30 UTC (puntos rojos).

Entre enero y junio de 2015 se registraron señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónicas (VT), asociadas al fracturamiento de rocas dentro del edificio volcánico, esto en dos fuentes sismogénicas, localizadas al NO y NE del volcán Hualca-Hualca; mientras que en inmediaciones del volcán Sabancaya no se presentaron sismos con características de poder ser localizados. Para este periodo de tiempo se localizaron 515 eventos VT's, con profundidades superficiales menores a los 13 km, aproximadamente. Posteriormente entre julio y diciembre de 2015 se localizaron 125 sismos, observándose que cierta cantidad se localizaron principalmente al NO del volcán Sabancaya (relativamente cerca a la estación SAB11). Durante este periodo los sismos localizados presentaron profundidades menores a los 6 km.

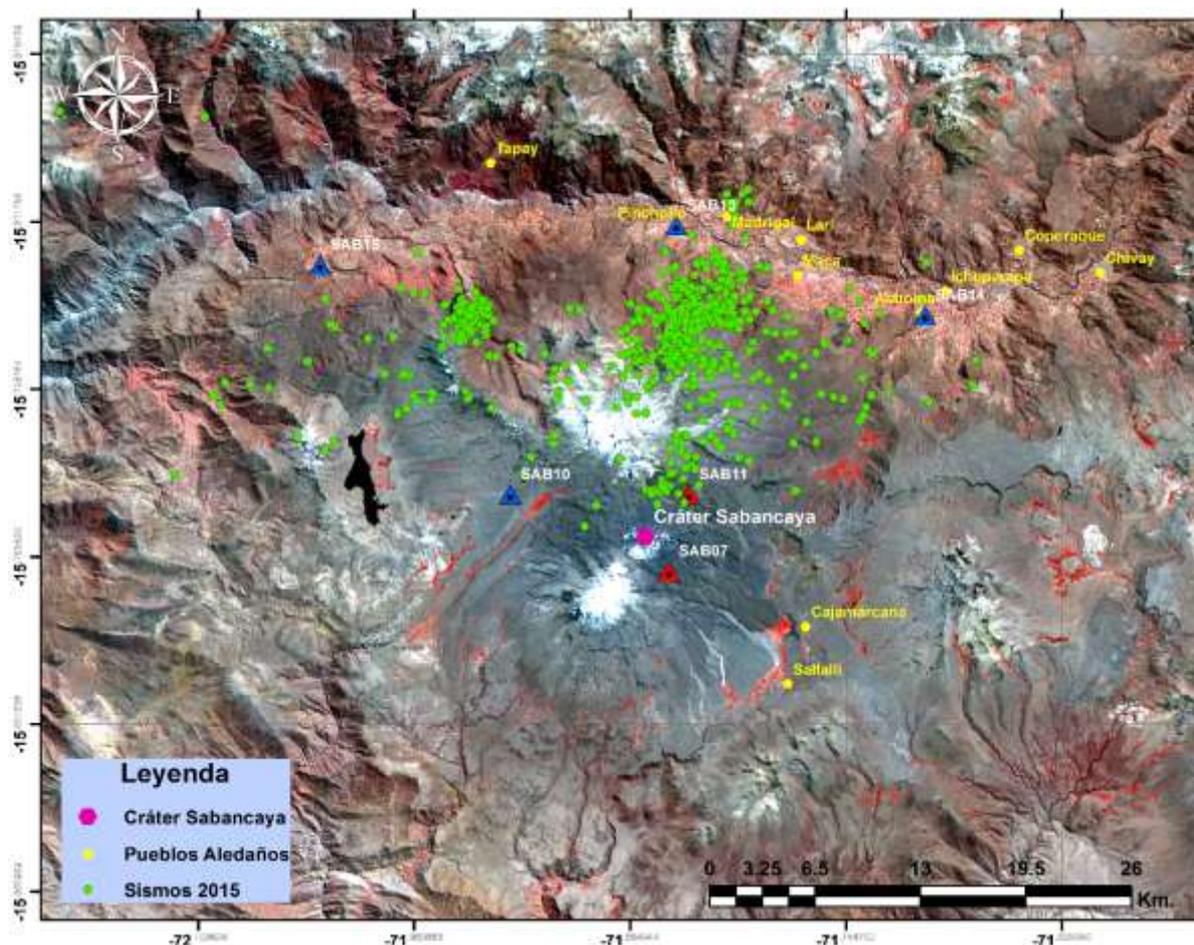


Figura 2.12. Distribución en superficie de 640 sismos registrados en 07 estaciones y localizados en la región del volcán Sabancaya para el periodo 2015.

2.2.2 Sismos de baja frecuencia

- **Largo Periodo (LP)**

En el año 2015 se registraron 10133 sismos tipo Largo Periodo. Cabe señalar que los eventos tipo Largo Periodo involucran a eventos híbridos (HYB) y tornillos (TOR). Estos eventos LP estuvieron asociados al movimiento de gases y fluidos volcánicos al interior del edificio volcánico. Al igual que los eventos de fractura, los eventos asociados a movimiento de fluidos mostraron un incremento considerable en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2015 (Figura 2.13 y 2.14).

En los meses de enero y mayo ocurrieron sismos de tipo híbridos, los cuales fueron registrándose en un promedio de 30 eventos por día. Por otra parte, se registraron esporádicamente eventos de tipo Tornillo. Los incrementos de este tipo de actividad se registraron simultáneamente con el incremento de sismos de tipo VT.

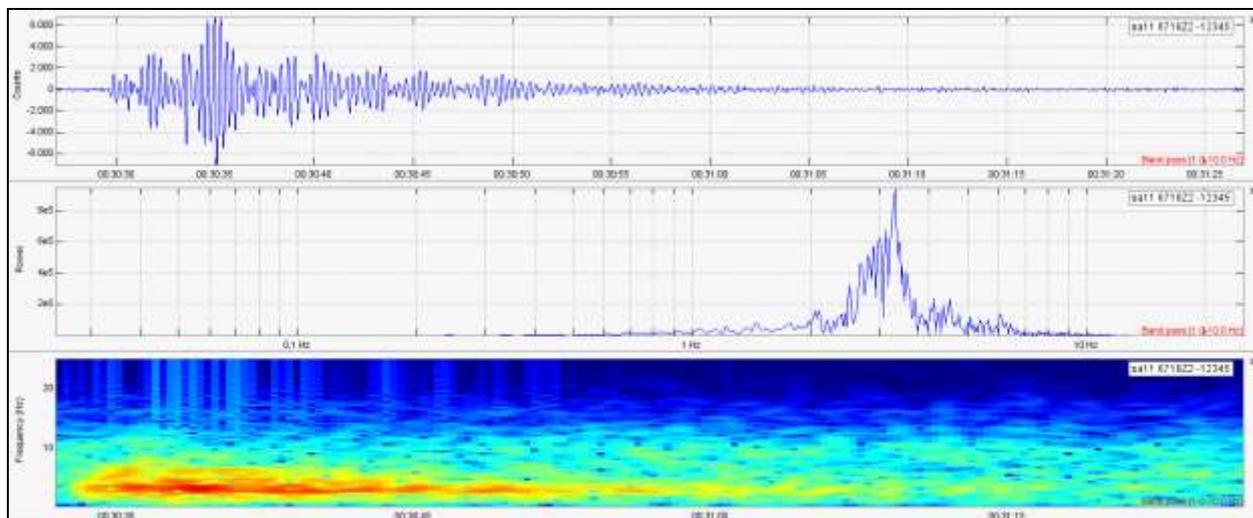


Figura 2.13. Señal sísmica de Largo Periodo (LP) asociada a la dinámica de gases y fluidos en el interior del volcán (fecha: 24/10/2015 – 15:37 UTC), pico frecuencial en 3.26 Hz y una energía sísmica de 0.25 MJ.

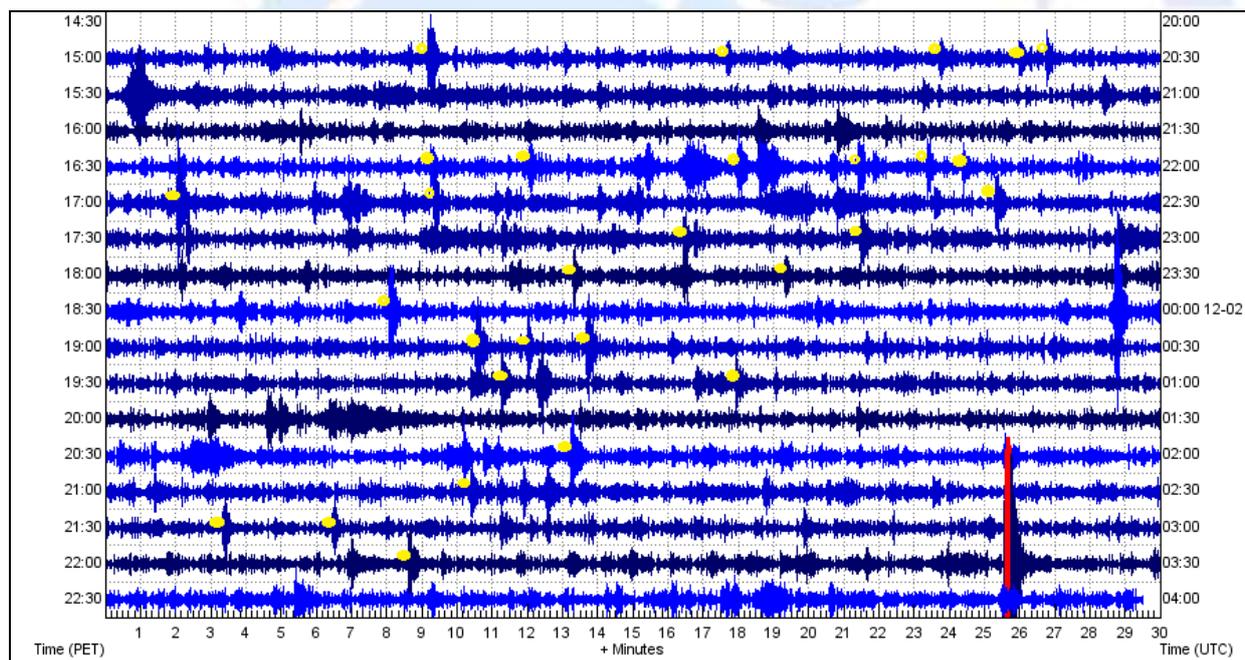


Figura 2.14. Sismograma digital de la estación SA07, componente vertical, correspondiente al día 01 y 02 de diciembre del 2015. Nótese los eventos de Largo Periodo ocurridos durante estos días (puntos amarillos).

Los periodos de estas señales de bajas frecuencias (LP's y TOR's) mostraron un promedio de 0.3 seg (Figura 2.15), sin embargo, entre octubre y noviembre se registraron eventos con periodos más largos (promedio 1.1 seg.). Pero en general, estos periodos se mantuvieron constantes, lo que indica que no existe un cambio relevante en el sistema-fuente que está generando dichos sismos, y además estos bajos periodos podrían estar asociadas a fuentes pequeñas con fluidos ricos en

material gaseoso como vapor de agua y gases, si es así, entonces estos parámetros responden más a una influencia de un sistema hidrotermal que de un sistema magmático.

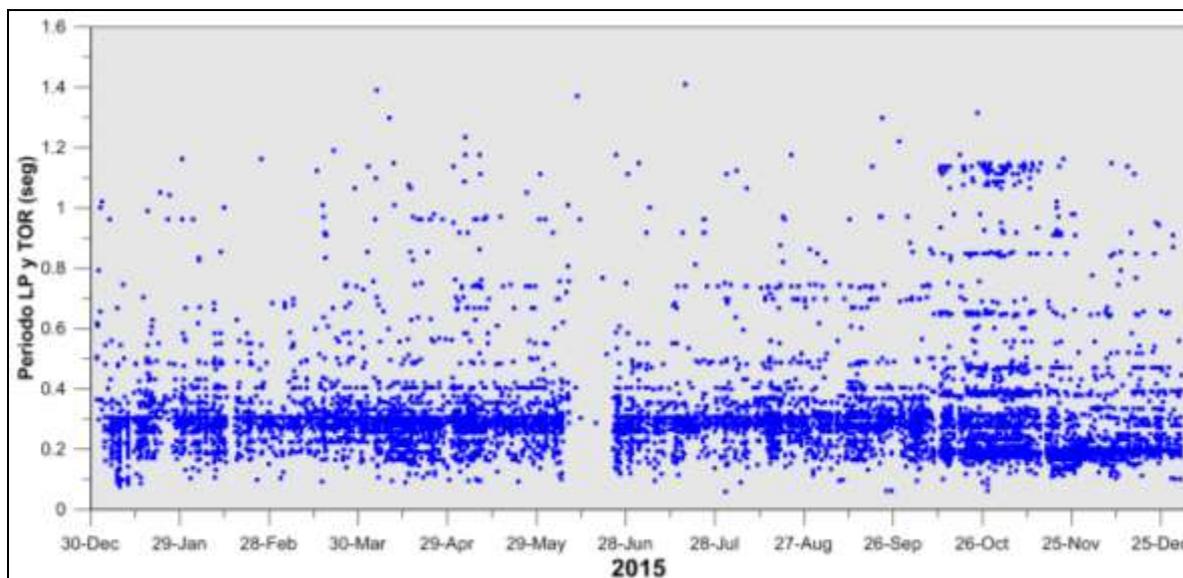


Figura 2.15. Evolución espacio – temporal del periodo de los sismos LP y TOR durante el año 2015 en el volcán Sabancaya.

2.2.3 Tremor espasmódico (TRE)

Durante el año 2015 se registraron alrededor de 2813 señales sísmicas tipo Tremor volcánico, que en ocasiones duraron hasta 1 hora aproximadamente (Figura 2.16). Algunos de estos episodios se asociaron a emisiones de gases y vapor de agua, tal como se puede apreciar en la Figura 2.17, en cuyo sismograma se observa un pequeño episodio de actividad tremórica ocurrida a las 12:17 hora UTC, y posteriormente se observa una actividad superficial ligada a la ocurrencia de una emisión leve de gases y vapor de agua.

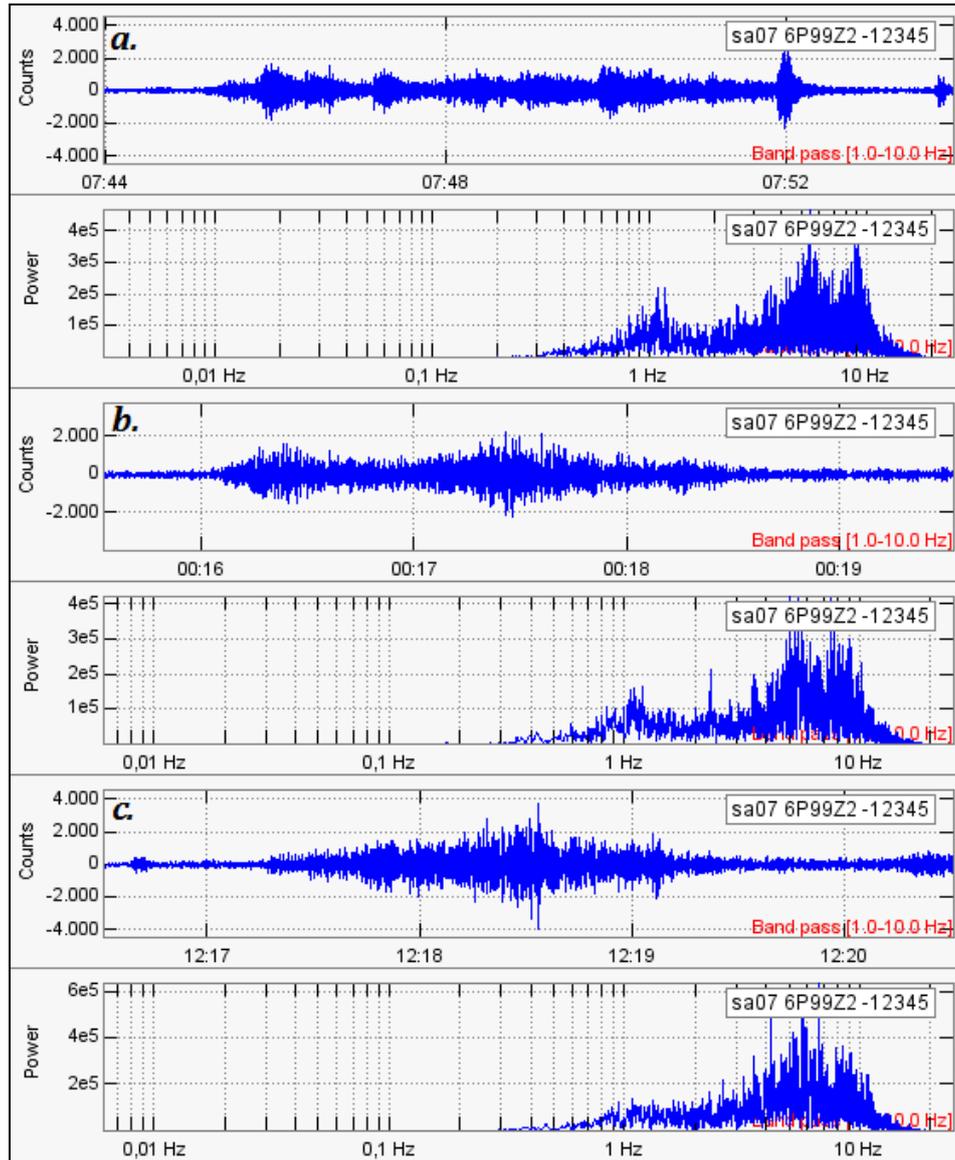


Figura 2.16. Señales sísmicas tipo tremor volcánico asociadas a emisiones de gases y vapor de agua, registradas el día 31 de diciembre del 2015.

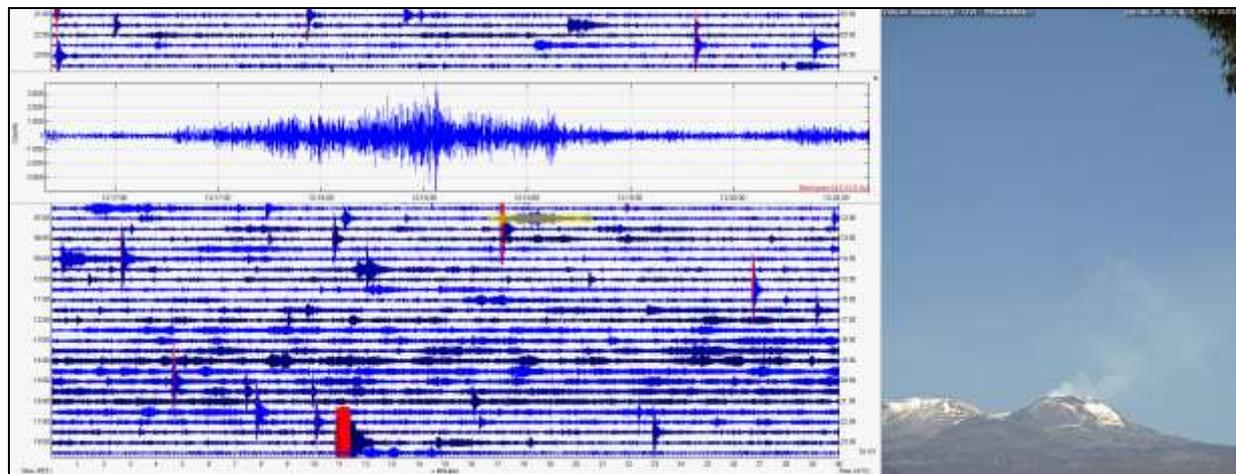


Figura 2.17. Registro de la señal tremor ocurrida el día 31 de diciembre del 2015 a las 12:30 hora UTC (franja amarilla) y al igual que en la fotografía, se observa el momento de la emisión en superficie.

3.0 MONITOREO VISUAL

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), inició el monitoreo visual con registros fotográficos de ciertos acontecimientos: fumarolas, lahares, emisiones de gases del fondo del cráter del volcán, etc., y en ciertas ocasiones mediante visitas esporádicas al volcán y sus alrededores. Ante la crisis fumarólica del volcán Sabancaya, iniciada en febrero del 2013, el Gobierno Regional de Arequipa, adquirió y dio en sesión de uso al INGEMMET, una moderna cámara domo, para el monitoreo visual del volcán Sabancaya. Esta cámara estuvo operando en la Municipalidad de Chivay hasta mediados agosto del 2013, dejando de funcionar por problemas técnicos. Posteriormente, después de ser reparada, fue reinstalada en la Municipalidad de Yanque, el 01 de julio del 2014 (Figura 3.1).

Posteriormente, el 07 de agosto del 2014 se instaló una cámara Axis modelo 1765-LE, en la Municipalidad Distrital de Coporaque, cuyas imágenes permiten el registro diario de los parámetros: fecha y hora de inicio, altura, color, densidad, forma y dirección de desplazamiento de la columna eruptiva, además de registrar los acontecimientos volcánicos. Las cámaras registran cada 30 segundo imágenes que son transmitidas en tiempo real vía internet (recurriendo al servicio de internet provisto por las municipalidades) hacia las instalaciones OVI y son publicadas en la página web institucional. Esta información ayuda a cuantificar el grado de actividad volcánica.

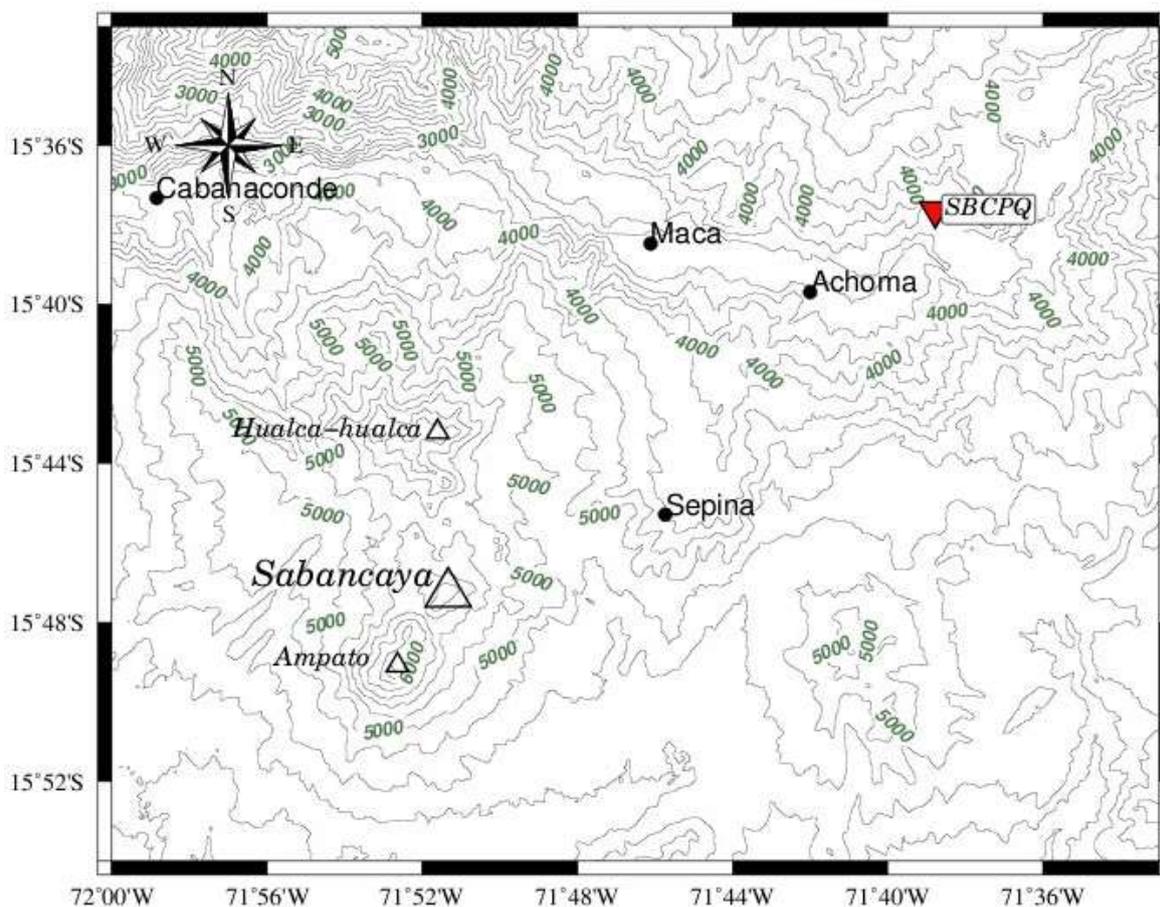


Figura 3.1. Mapa de Ubicación de los puntos de monitoreo visual.

3.1 OPERATIVIDAD DE LA CÁMARA DE VIGILANCIA DEL VOLCÁN SABANCAYA

En la Figura 3.2, se presenta el periodo de operatividad de la cámara ubicada en la Municipalidad de Coporaque, la cual entre enero-diciembre del 2015 viene registrando imágenes del volcán Sabancaya. La barra horizontal de color rojo es el periodo de registro y los espacios en blanco representan los cortes de funcionamiento de la cámara por problemas técnicos (corte de electricidad en la zona) o problemas de comunicación (caída de la señal del proveedor de internet), etc.

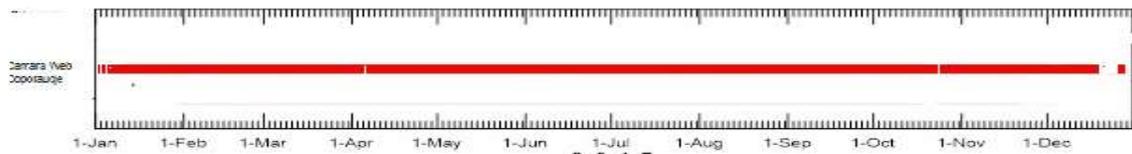


Figura 3.2. Operatividad de las cámaras de monitoreo visual en el volcán Sabancaya durante el 2015.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES

• FORMA Y OCURRENCIA

Los primeros 6 meses del año (enero hasta mediados de junio de 2015), la actividad volcánica estuvo caracterizada por emisiones de gases y vapor de agua principalmente, de color blanquecino, con alturas variables entre los 500 y 1500 msnc (Figura 3.3). Es importante señalar que los primeros meses (enero, febrero y marzo) hubo nubosidad en la zona del volcán Sabancaya, lo cual dificultó la visibilidad de las emisiones.

Durante los meses de junio, julio y agosto las emisiones contenían principalmente gases constituidos de vapor de agua y partículas de azufre. Los gases eran de color azulino y tenían alturas variables entre los 1000 y 2000 m sobre la cima del volcán.

Durante los últimos meses del año las emisiones volvieron a caracterizarse por contener gases y vapor de agua principalmente, estas eran de color blanquecino, con alturas variables entre los 500 y 1500 m sobre la cima del volcán.

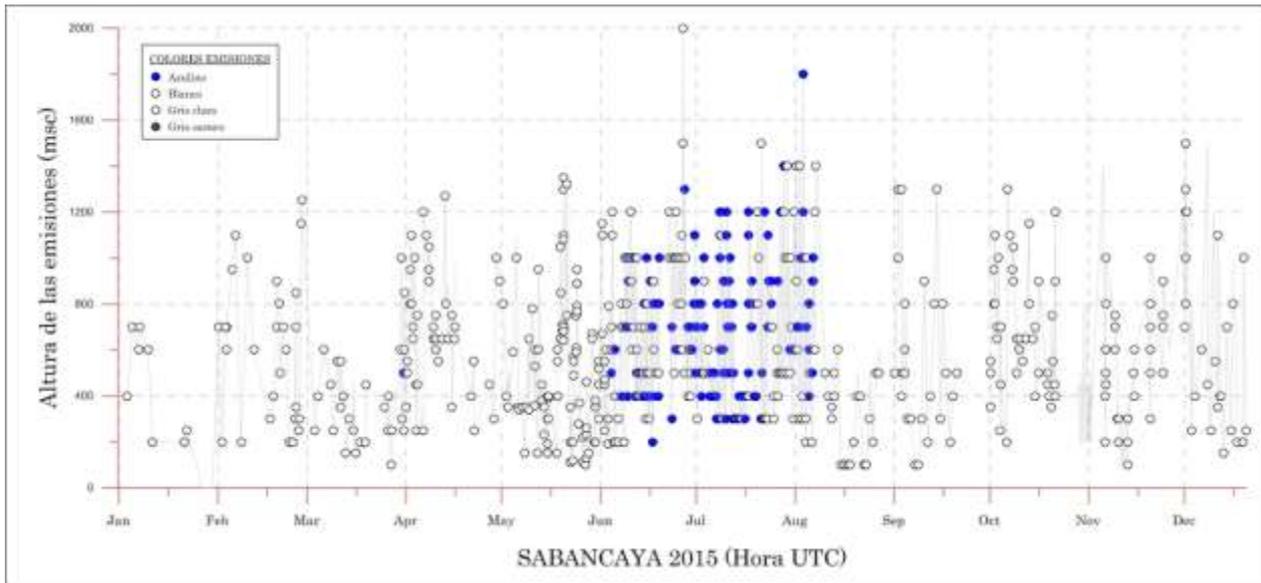


Figura 3.3. Evolución de las emisiones fumarólicas en el volcán Sabancaya, periodo 2015.

- **DIRECCIÓN PREDOMINANTE**

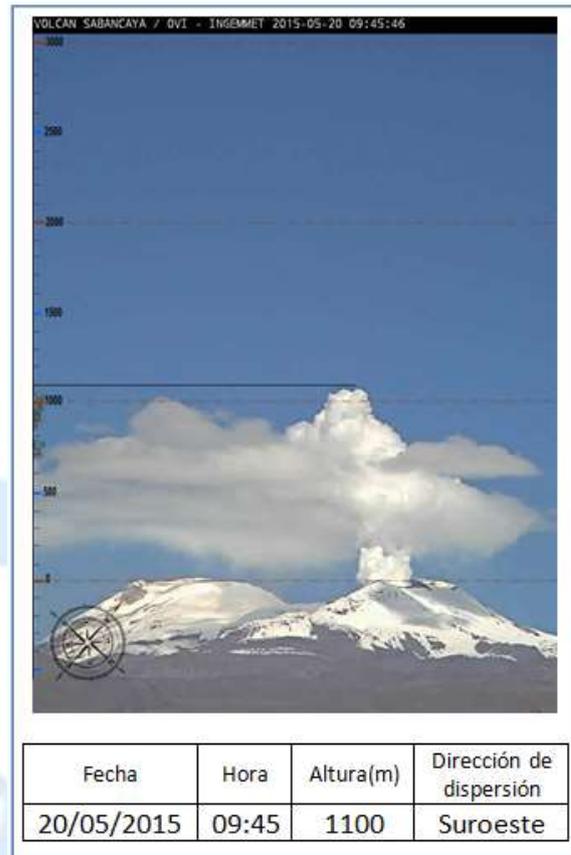
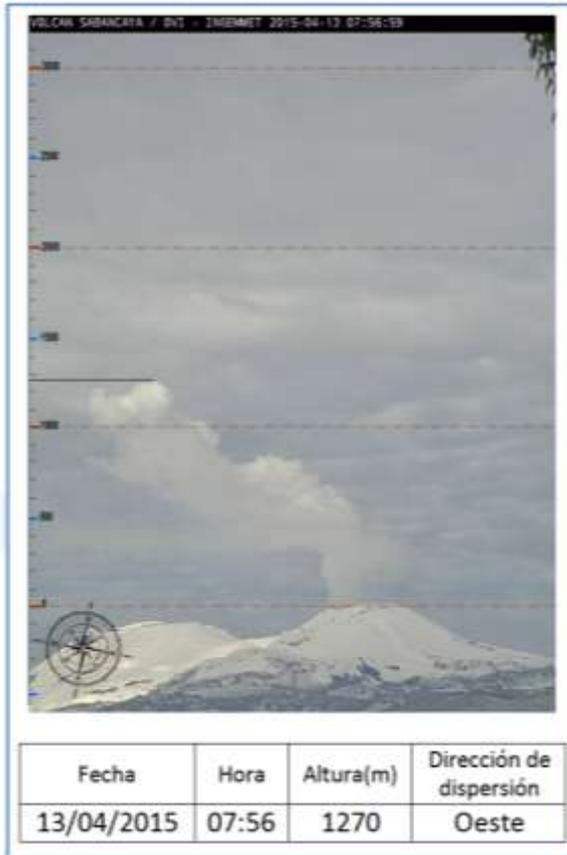
En la Figura 3.4 podemos observar las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas del volcán Sabancaya registradas durante el año 2015. Cabe resaltar que las emisiones fueron preferentemente dispersadas en dirección Suroeste, Noreste y eventualmente hacia el Oeste.



Figura 3.4. Diagrama de rosas de las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas registradas durante el año 2015.

- **IMÁGENES REPRESENTATIVAS DE EMISIONES FUMARÓLICAS**

En la Figura 3.5 podemos observar las imágenes más representativas del volcán Sabancaya, captadas con la cámara Axis instalada en la Municipalidad de Coporaque, a 27 km al NE del cráter del volcán Sabancaya.





Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
26/06/2015	17:18	2000	Sur



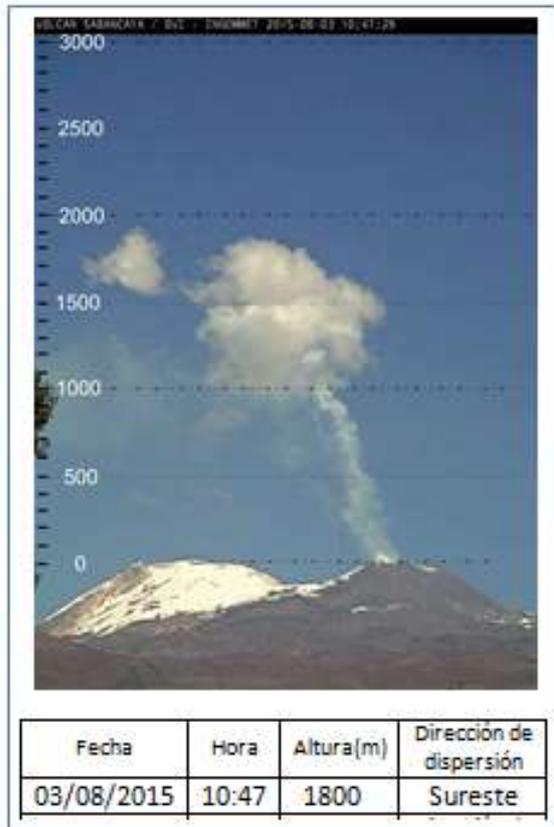
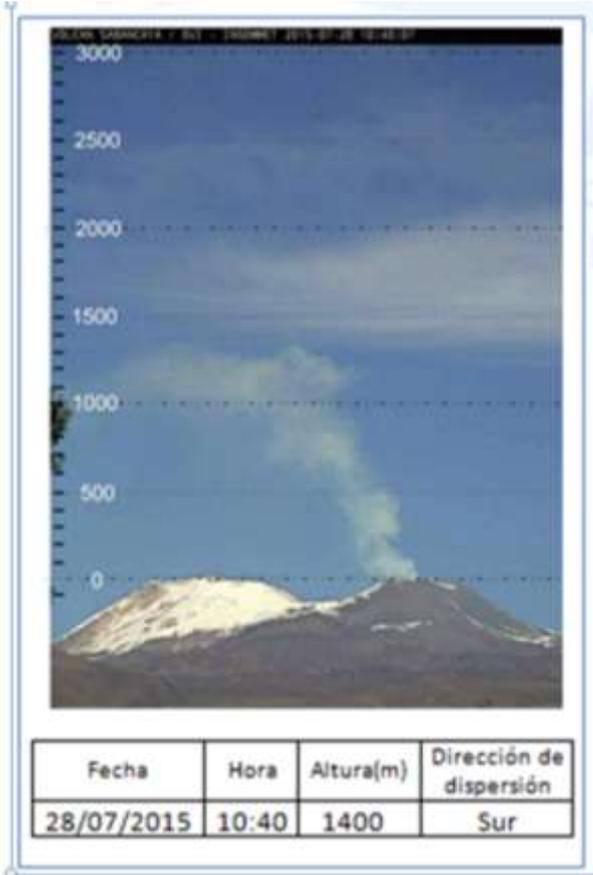
Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
27/06/2015	09:29	1300	Sur

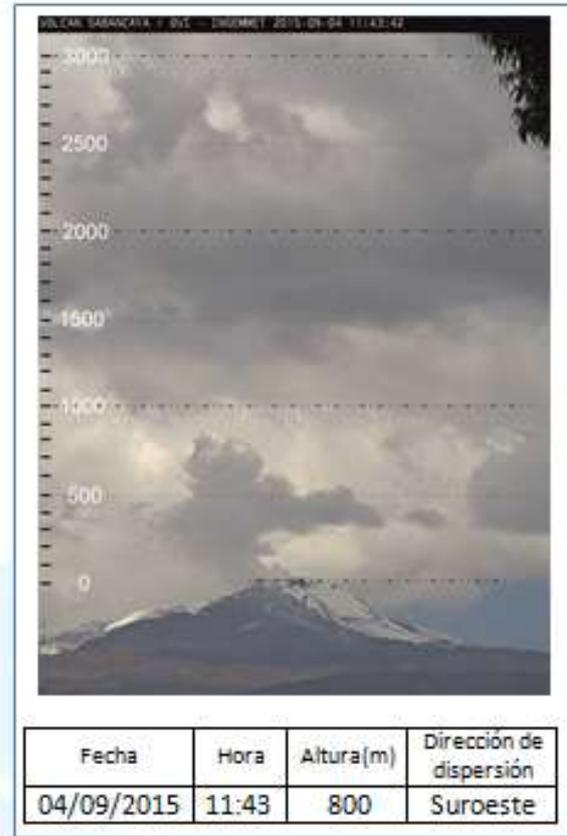
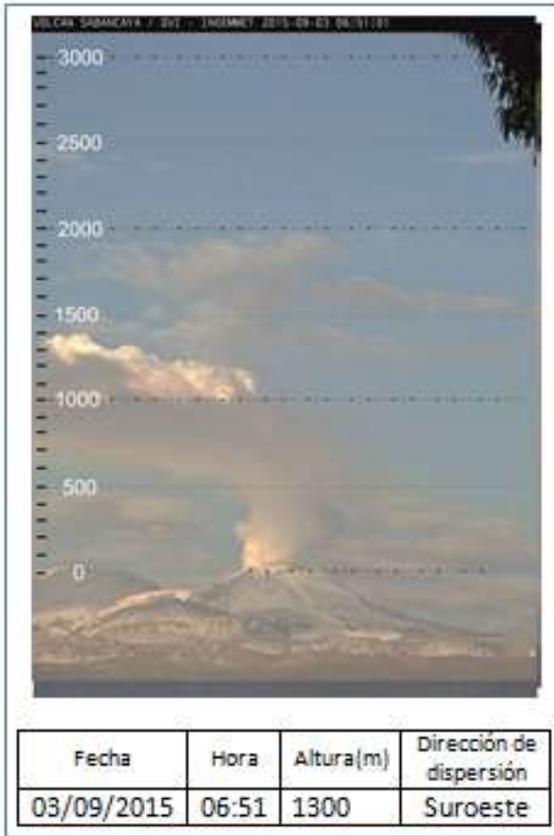


Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
08/07/2015	15:26	1200	Sur

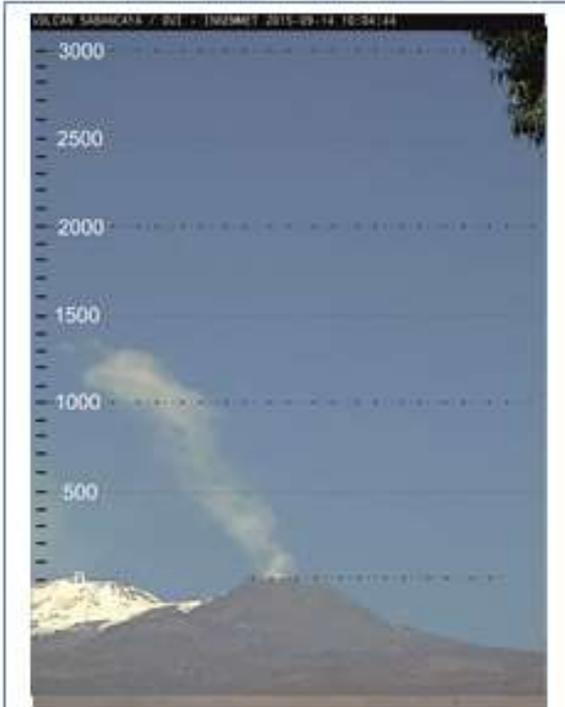


Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
10/07/2015	13:55	1200	Sureste

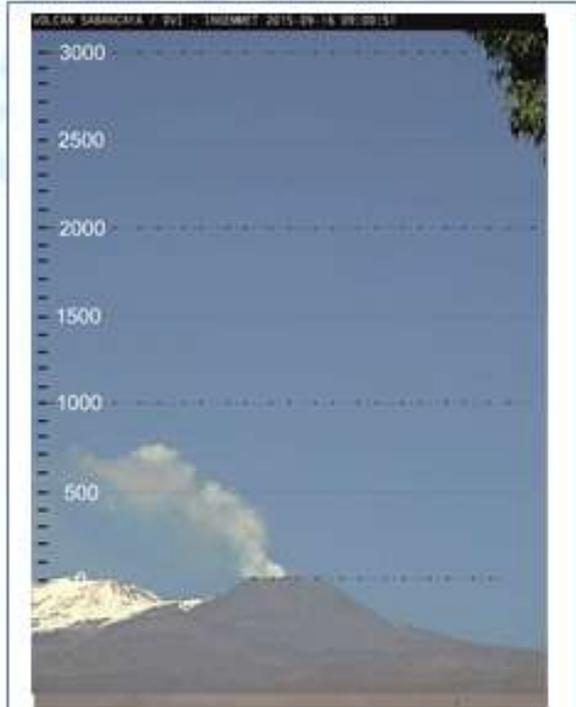




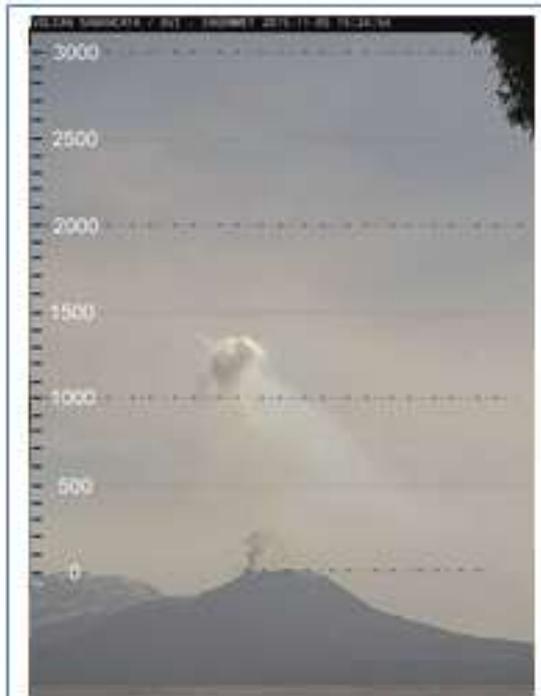
OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO
INGEMMET



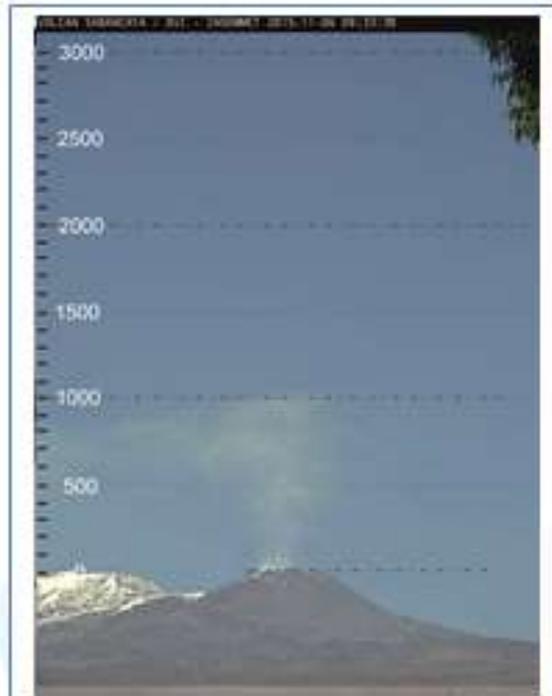
Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
14/09/2015	10:04	1300	Suroeste



Fecha	Hora	Altura(m)	Dirección de dispersión
16/09/2015	09:00	800	Suroeste



Fecha	Hora	Altura(mpp)	Dirección de dispersión
05/11/2015	15:24	1400	Noreste



Fecha	Hora	Altura(mpp)	Dirección de dispersión
06/11/2015	09:33	1000	Noreste

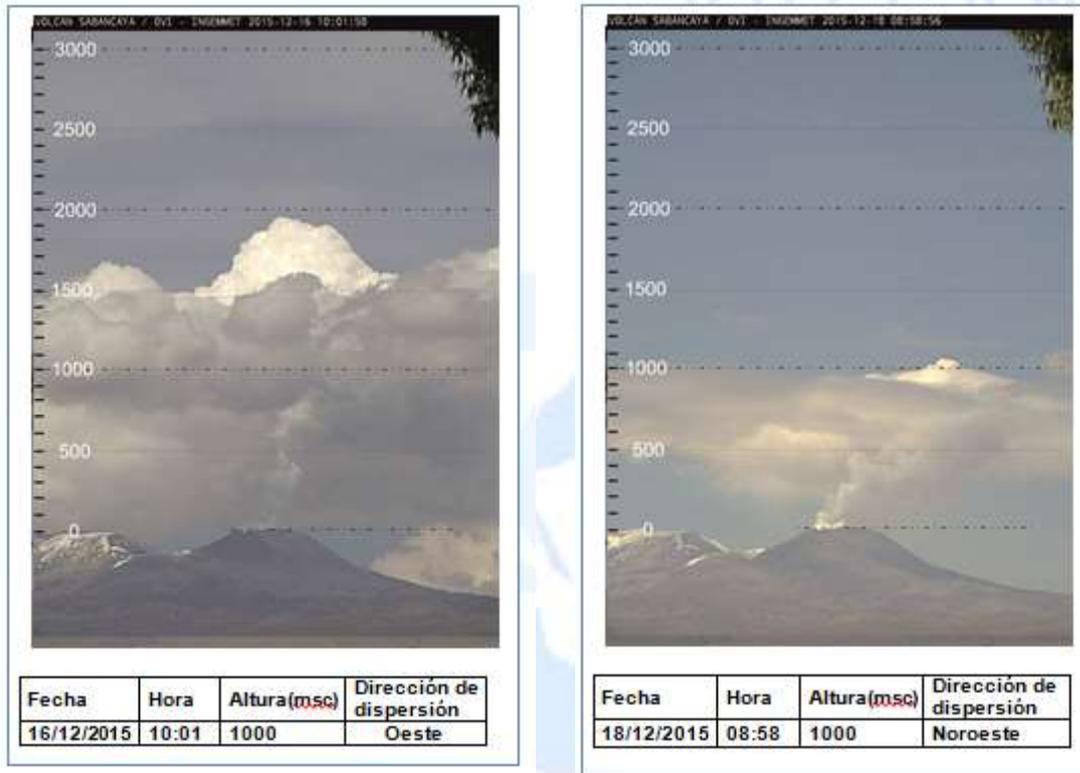


Figura 3.5. Imágenes más representativas del volcán Sabancaya, registradas durante el año 2015.

4.0 MONITOREO GEOQUÍMICO

El monitoreo volcánico mediante el método geoquímico consiste en la medición sistemática de los parámetros físico-químicos de los gases volcánicos emitidos por el volcán Sabancaya, y el análisis de las fuentes termales asociadas a dicho volcán, las cuales están generalmente ligadas a un sistema hidrotermal activo (Hochtein & Broune, 2000). Los gases volcánicos fluyen desde el reservorio magmático hacia la superficie, donde se manifiestan como fumarolas, respiraderos de vapor, fuentes termales, etc., (Figura 4.1).

El presente reporte presenta los resultados obtenidos en los trabajos de monitoreo geoquímico tanto en fumarolas y fuentes termales del volcán Sabancaya, entre enero y diciembre del 2015.

4.1 FUNDAMENTO DEL MONITOREO GEOQUÍMICO

En periodos de baja actividad volcánica existe un equilibrio entre los fluidos de la cámara magmática y las manifestaciones geotermales, sin embargo al ingresar nuevo material o magma a la cámara magmática este equilibrio se rompe y se manifiesta con un aumento de presión, temperatura y/o cambio de concentración de los componentes. Estos parámetros alteran la química “normal” de las manifestaciones geotermales. Estas variaciones se pueden detectar y

monitorear con un registro continuo de parámetros y componentes químicos de estas manifestaciones. Desde el año 2009 el INGEMMET viene realizando el monitoreo geoquímico periódico del volcán Sabancaya, empleando diferentes técnicas para el monitoreo de fuentes termales y fumarolas.

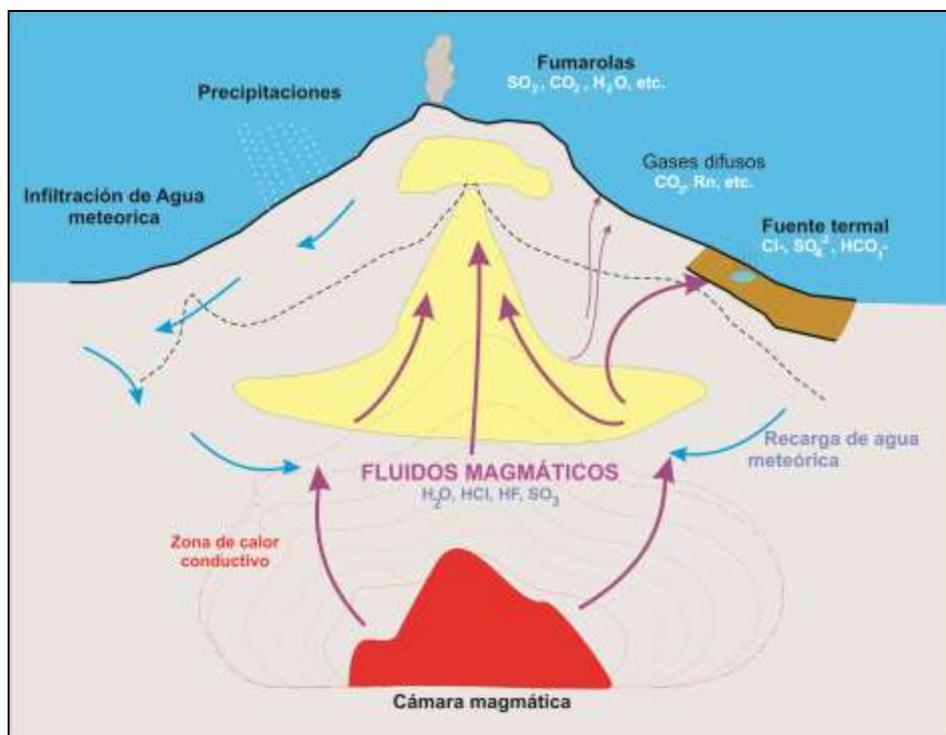


Figura 4.1. Modelo de un sistema hidrotermal y su interacción con los gases volcánicos (modificado de Hochtein & Broune, 2000).

4.2 EL MONITOREO DEL FLUJO DE SO₂ EN FUMAROLAS DEL VOLCÁN SABANCAYA

Desde abril del 2013 el OVI en cooperación con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IG-EPN), el Instituto para la Investigación y Desarrollo de Francia (IRD) y la Universidad Autónoma de México UNAM, realiza mediciones del gas magmático SO₂ empleando una técnica basada en espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy), que trabaja principalmente en las regiones UV/ visible del espectro electromagnético y que funciona mediante la medición de la intensidad de luz radiante del sol, midiendo la diferencia de la luz fuera de la pluma volcánica de gas y luego en la pluma o fumarola volcánica donde se encuentra el SO₂ que cubre el espectro de 280 a 420 nm con una resolución de 0.6 nm.

En octubre del 2015 el INGEMMET adquirió el equipo móvil con el cual se realiza el monitoreo permanente del gas magmático SO₂. El equipo móvil DOAS está compuesto por un mini-espectrómetro tipo USB2000, una fibra óptica, un telescopio y un GPS, conectados a un computador (Figura 4.2). El software de adquisición y procesamiento de datos usado fue el Mobile-DOAS Versión 5.0 desarrollado por el Optical Remote Sensing Group de la Universidad de Chalmers, Suecia. El flujo de SO₂ se expresa en toneladas por día (Tn/d).

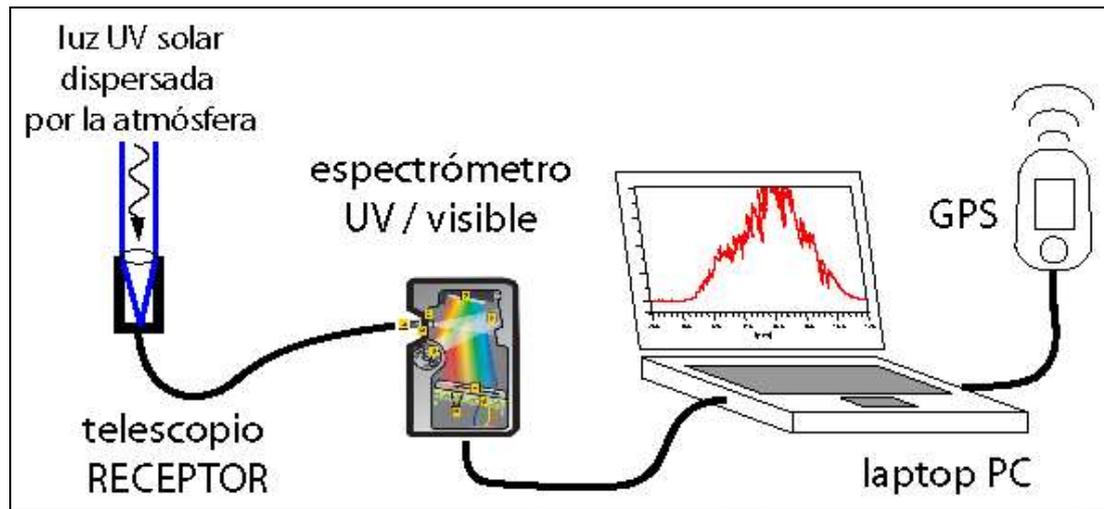


Figura 4.2. Partes del sistema DOAS móvil para el monitoreo de gas de azufre SO₂ en la pluma volcánica.

Las mediciones con el móvil DOAS se realizaron periódicamente con ayuda de un vehículo 4x4, el cual recorre trayectos por debajo de la pluma volcánica, alrededor del volcán (ver figura 4.3). Las condiciones climáticas permitieron realizar mediciones durante el día por la incidencia solar necesaria para el funcionamiento del equipo, en el periodo de monitoreo se obtuvieron resultados del cálculo de los flujos y sus características.

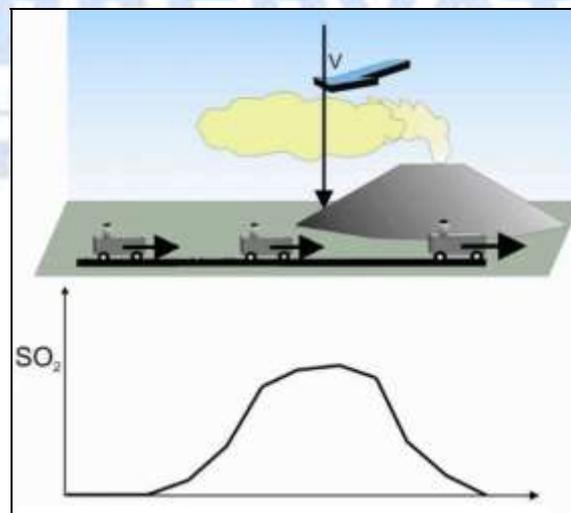


Figura 4.3. Funcionamiento del sistema DOAS móvil para el monitoreo de gas de azufre SO₂ en la pluma volcánica.

Se realizaron varias campañas de medición entre marzo y noviembre del 2015, con el movil-DOAS. Por motivos de accesibilidad, solo se pudo realizar mediciones cuando la pluma volcánica se encontraba por encima de la carretera en las zonas denominadas Cajamarcana y Sallalli, esto representa solo el 13% de la circunferencia del Sabancaya respecto al cráter.

Las mediciones se efectuaron, durante los días: 10 de marzo, 28 y 31 de mayo, 22 de junio; 10 de julio, 10 y 12 de agosto, 18 de septiembre y 06 de noviembre del 2015. Se obtuvieron para el año 2015 un total de 21 lecturas. Para el cálculo de la velocidad del viento se utilizó el dato de Air Laboratory Resources de la NOAA. Los resultados del cálculo de los flujos se encuentran en el Cuadro 4.1.

No	Fecha	Flujo Tn/día
1	10/03/2015	875
2	10/03/2015	239
3	28/05/2015	2658
4	28/05/2015	1405
6	28/05/2015	333
7	31/05/2015	165
8	31/05/2015	199
9	31/05/2015	168
11	31/05/2015	285
12	22/06/2015	467
13	22/06/2015	335
14	10/07/2014	387
15	10/08/2014	930
16	12/08/2014	787
17	12/08/2014	218
18	18/09/2014	116
19	18/09/2014	1311
20	06/11/2014	360
21	06/11/2014	278

Cuadro 4.1. Resultados de las mediciones de SO₂ en la pluma volcánica del Sabancaya entre abril 2014 y julio 2015.

El 10 de marzo de 2015 se realizaron las mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 875 Tn/día de SO₂, considerado como flujo MODERADO, tal como se aprecia en la Figura 4.4.

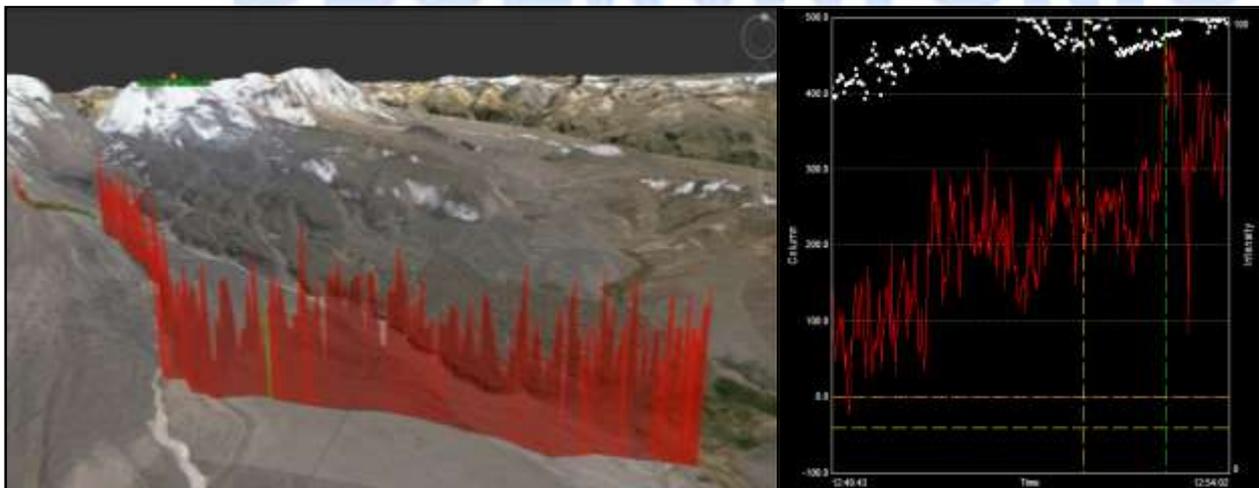


Figura. 4.4. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya, a).graficas de SO₂ medidos desde Sallalli hasta el flanco sur del volcán, b). Grafica visual del comportamiento de emisiones SO₂ en el software de procesamiento.

El día 28 y 31 de mayo se realizaron la mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 2658 Tn/día de SO₂, considerados como flujos GRANDES (Figura 4.5).

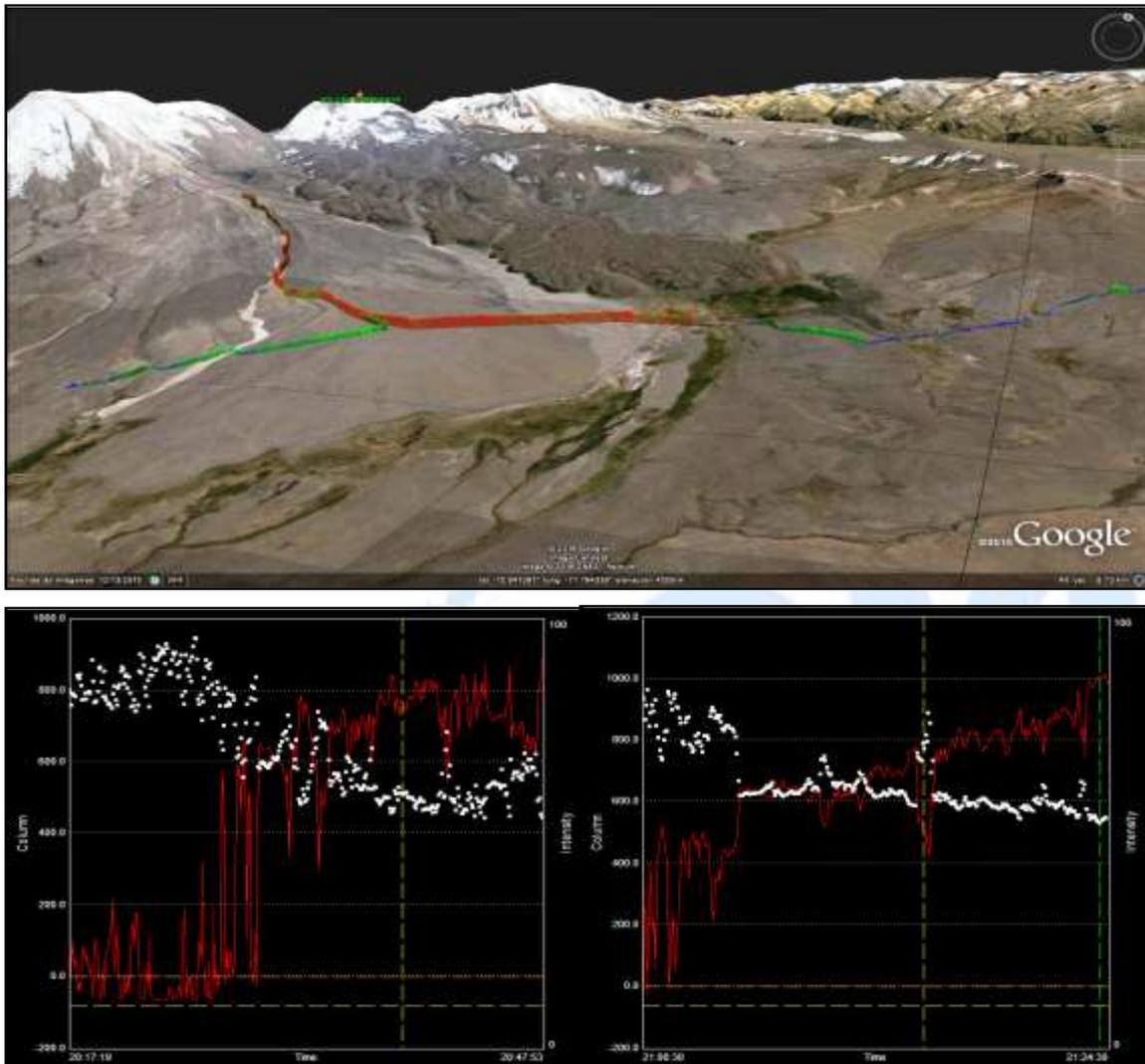


Figura 4.5. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya.

El 22 de junio se realizaron mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 335 Tn/día de SO₂, considerado como flujo MODERADO (Figura 4.6).

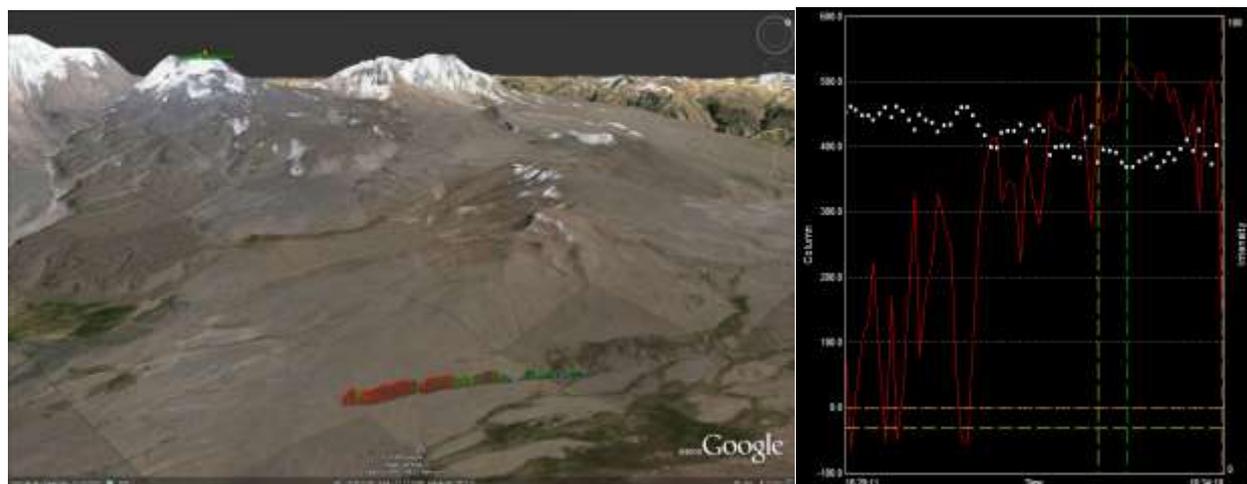


Figura 4.6. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya.

El 10 de julio se realizaron mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 387 Tn/día de SO₂, considerados como flujo MODERADO.



Figura 4.7. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya el día 10 de julio de 2015.

Para los días 10 y 12 de agosto se realizaron mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 930 Tn/día de SO₂, considerados como flujos MODERADOS (Figura 4.8).

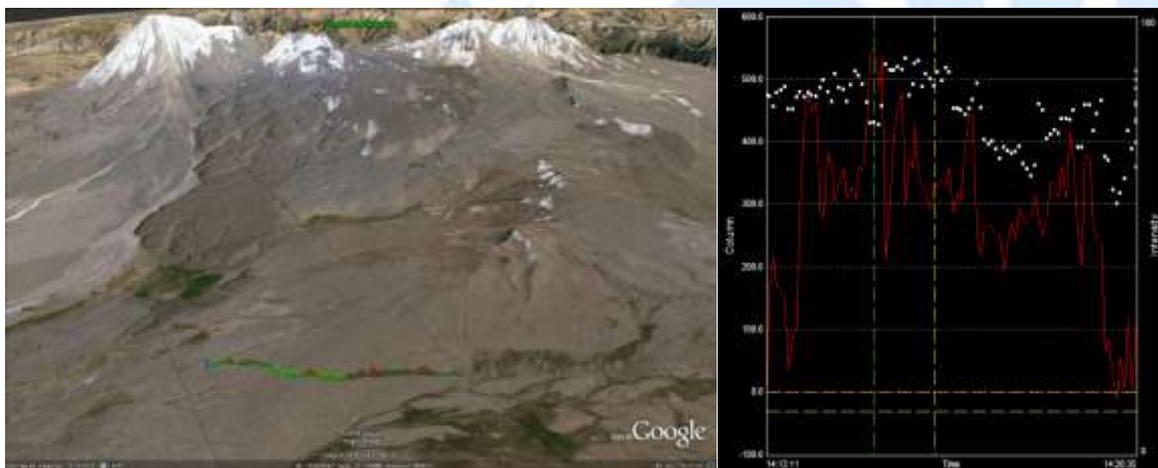


Figura 4.8. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en el Sabancaya.

El 18 de septiembre se realizaron mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 1311 Tn/día de SO₂, considerados como flujo GRANDE (Figura 4.9).

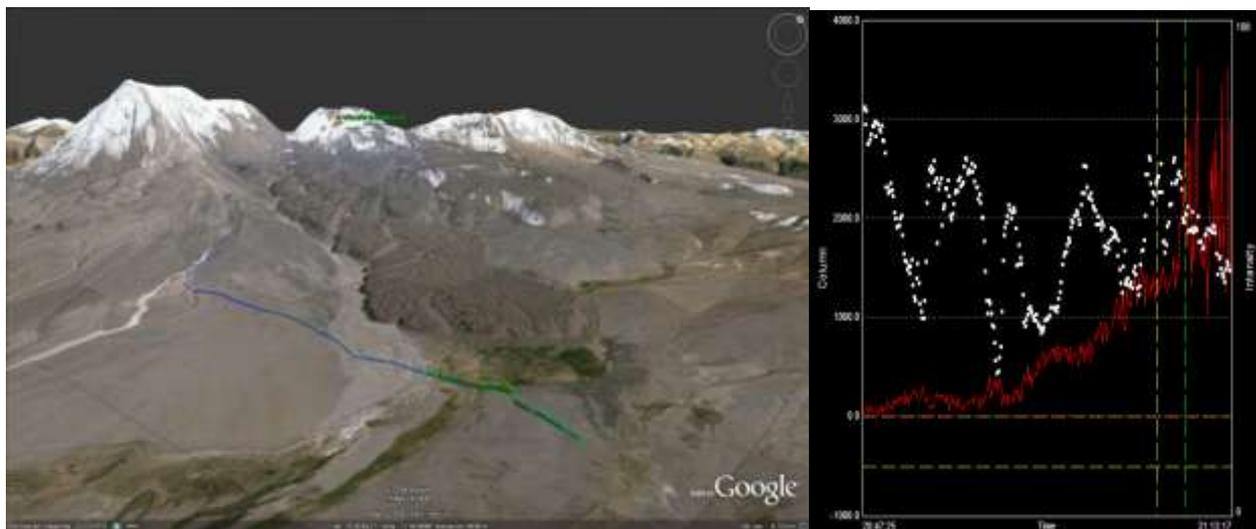


Figura 4.9. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya.

El 06 de noviembre se realizaron mediciones del gas volcánico SO₂ registrándose valores de hasta 360 Tn/día de SO₂, considerado como flujo MODERADO.



Figura 4.10. Registro de la medición del gas dióxido de azufre SO₂ con el móvil DOAS en la pluma volcánica del Sabancaya.

En resumen se realizaron 21 lecturas validas en el año 201,5 las cuales registraron flujos de SO₂ entre 200 y 2600 Tn/día (ver fig. 4.11), clasificados como FLUJOS MODERADOS Y GRANDES, que sugieren una continua desgasificación de magma en el interior del volcán Sabancaya.

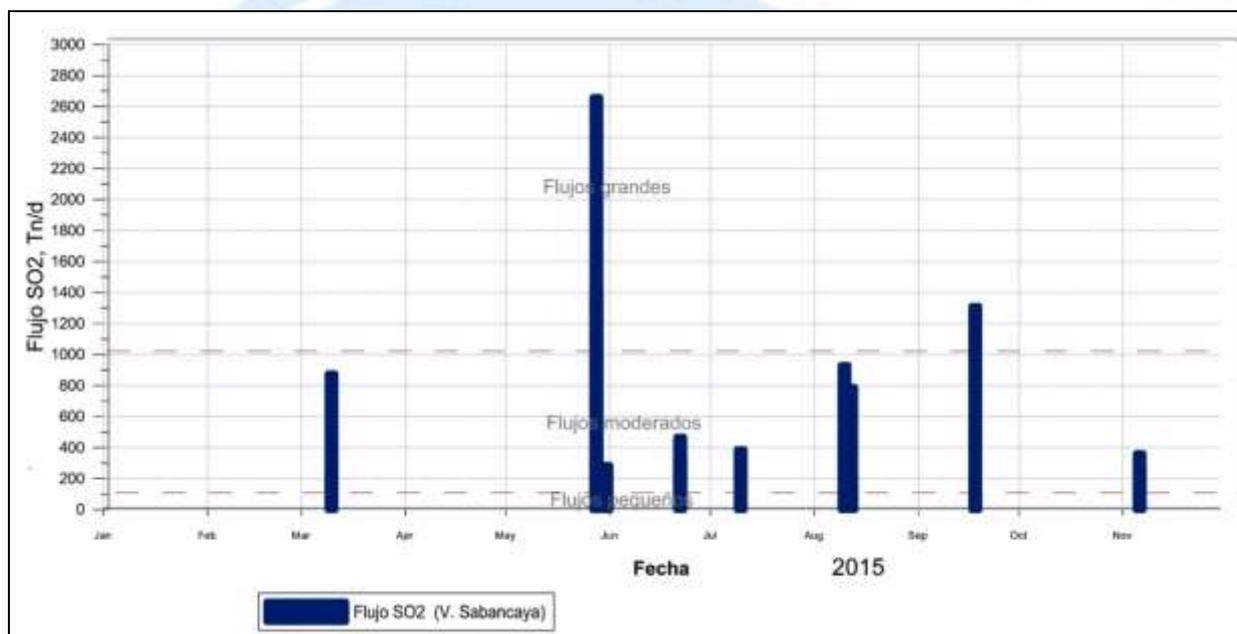


Figura 4.11. Registro de medición del gas dióxido de azufre SO₂ en la pluma volcánica del Sabancaya, medido con el móvil DOAS durante el año 2015.

4.3 MONITOREO GEOQUÍMICO DE FUENTES DE AGUA

El monitoreo de fuentes termales consiste en realizar medidas periódicas de fuentes surgentes de agua caliente que brotan en los alrededores del volcán Sabancaya. Se realizó el monitoreo geoquímico de fuentes termales que están localizadas dentro de un radio de 35 km alrededor del

volcán Sabancaya, en él se ubicaron 08 fuentes termales (Figura 4.12), en las cuales se toman los parámetros físico-químicos y se analizan la composición química de dichas aguas.

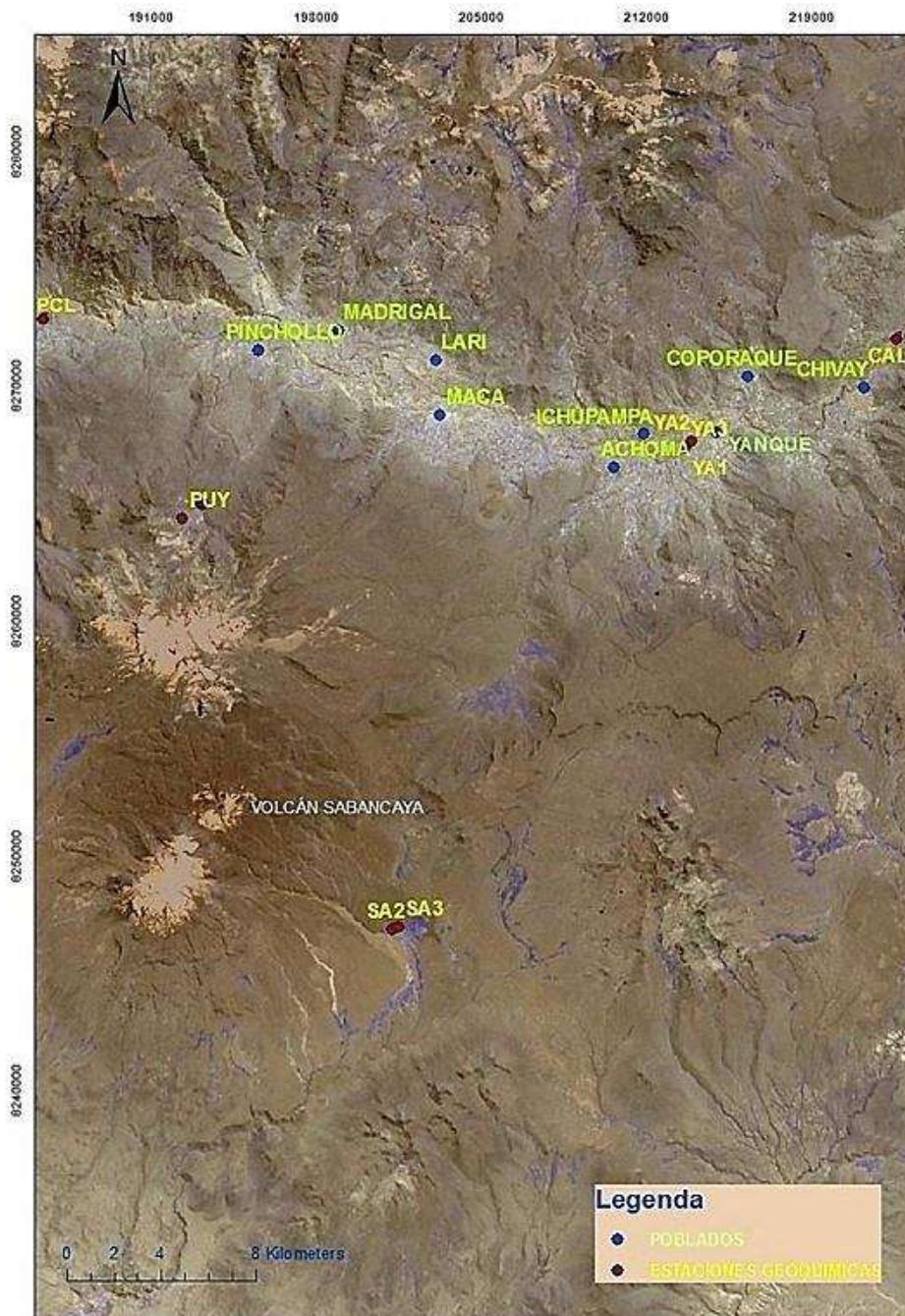


Figura 4.12. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de agua alrededor del volcán Sabancaya.

4.3.1 Métodos de muestreo y análisis del agua

El muestreo de agua de las fuentes se realiza en el punto de surgimiento del agua termal utilizando la técnica de inmersión simple, llenando 2 botellas de plástico para el análisis los aniones y para metales disueltos, esta última es previamente filtrada (0,45 μm) y preservada con

ácido nítrico (HNO₃ 1:1) hasta pH =2. Adicionalmente, se miden los parámetros fisicoquímicos en el agua de la fuente termal, como la Temperatura (T°) con un termómetro electrónico, el potencial de hidrogeno (pH) con un pH-metro electrónico, Conductividad eléctrica y Solidos totales disueltos (TDS) con un Conductímetro. Los detalles de los equipos se pueden observar en el Cuadro 4.2.

Además, se mide la temperatura de manera continua utilizando registradores de temperatura. Una vez recolectadas las muestras son enfriadas hasta los 4 °C y almacenadas en cajas (coolers) y trasladadas al Laboratorio de Química Analítica del INGEMMET, ubicada en la ciudad de Lima para su respectivo análisis.

Los análisis de las muestras recolectadas se realizaron en el laboratorio de Química INGEMMET, la metodología de dichos análisis se detallan en el Cuadro 4.2.

Equipo	Parámetro	Marca	Modelo	Precisión
Termómetro	Temperatura	AA	Precisión	±0,1
Termómetro (*)	Temperatura	TECPEL	318	±0.1
pH-metro	pH	Cyberscan	waterproof	±0.01
pH-metro (*)	pH	WTW	3210	±0.001
Conductímetro	CE	HACH	sensION5	±0.5%
Conductímetro	TDS	HACH	sensION5	±0.1

(*) Usado desde enero del 2012

Cuadro 4.2. Características de los equipos de medición de los parámetros fisicoquímicos.

Analíto	Formula	M. análisis	LDM	Analíto	Formula	M. análisis	LDM
Carbonato	CO ₃ ⁻²	Titrimétrico	1,0	Cadmio	Cd	ICP-AES	0,001
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	Titrimétrico	1,0	Cobalto	Co	ICP-AES	0,001
Fluoruro	F ⁻	C. I.	0,5	Cromo	Cr	ICP-AES	0,02
Cloruro	Cl ⁻	C. I.	0,5	Cobre	Cu	ICP-AES	0,003
Nitrato	NO ₃ ⁻	C. I.	1,0	Hierro	Fe	ICP-AES	0,01
Sulfato	SO ₄ ⁻²	C. I.	2,0	Manganeso	Mg	ICP-AES	0,001
Sodio	Na	ICP-AES	0,1	Molibdeno	Mo	ICP-AES	0,005
Magnesio	Mg	ICP-AES	0,1	Níquel	Ni	ICP-AES	0,005
Potasio	K	ICP-AES	0,2	Plomo	Pb	ICP-AES	0,01
Calcio	Ca	ICP-AES	0,3	Antimonio	Sb	ICP-AES	0,006
Estroncio	Sr	ICP-AES	0,02	Selenio	Se	ICP-AES	0,05
Litio	Li	ICP-AES	0,02	Estaño	Sn	ICP-AES	0,005
Aluminio	Al	ICP-AES	0,02	Titanio	Ti	ICP-AES	0,003
Arsénico	As	ICP-AES	0,01	Talio	Tl	ICP-AES	0,02
Bario	Ba	ICP-AES	0,003	Vanadio	V	ICP-AES	0,02
Bismuto	Bi	ICP-AES	0,1	Zinc	Zn	ICP-AES	0,003
O. de silicio	SiO ₂	ICP-AES	0,5				

C. I.: Cromatografía Iónica

ICP - AES: Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente

Cuadro 4.3. *Métodos de análisis de agua efectuados en el laboratorio de química de INGEMMET.*

4.3.2 Características de las fuentes termales y resultados de análisis químicos de aguas

Durante el año 2015 se realizó el muestreo de 08 fuentes de agua, que tienen temperatura que varían entre 10 y 86 °C. La ubicación de estos lugares se presenta en el Cuadro 4.5, así como los resultados de la composición química de 40 muestras y los respectivos parámetros físico-químicos.

La mayoría de las fuentes termales: CAL, YA1, YA2 y YA3 se ubican al Noreste, junto al río Colca, cerca de los poblados de Chivay y Yanque. Otras, como la fuente PUY, se ubica al norte del Sabancaya, cerca del poblado de Pinchollo. La fuente PCL se ubica, al Noroeste en el río Colca, en la parte profunda del cañón, mientras que las fuentes más cercanas al cráter se encuentran al Sureste, al pie de una colada de lava cerca a la estancia de Sallalli (SA2, SA3). Los resultados de los parámetros físico-químicos y análisis químicos se presentan en el Cuadro 4.6 y 4.7.

Nombre Fuente	Codigo	Zona	UTM	Latitud	Longitud	Altura
La Calera	CAL	Chivay	19 L	222624	8271984	3611
Yanque 1	YA1	Chivay	19 L	222877	8272421	3671
Puyi	YA2	Yanque	19 L	213920	8267663	3330
Chacapi	YA3	Yanque	19 L	213682	8267402	3447
Puye Puye	PUY	Pinchollo	19 L	192358	8264374	4686
Sallali2	SA2	Sallali	19 L	201235	8246850	4497
Sallali3	SA3	Sallali	19 L	201534	8246980	4487
Pacclla	PCL	Pacclla	18 L	206715	8050599	4516

Cuadro 4.5. Ubicación de las 08 fuentes de agua que fueron muestreadas

Los parámetros fisicoquímicos y composición química de las 40 muestras son detalladas en el cuadro 4.6 y 4.7, y los gráficos en función del tiempo son presentadas en la figura 4.13. Cabe señalar que para este periodo se encontró algunas variaciones en la concentración de aniones mayoritarios y principales cationes.

N°	Fuente	Fecha	CO ₃ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	F mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Sr mg/l	Li mg/l	SiO ₂ mg/l	Ag mg/l	Al mg/l	As mg/l	B mg/l	Ba mg/l
1	CAL	01/02/2015	<1	883.00	1.30	1480.00	<1	270.00	<1	1278.50	10.50	70.30	102.90	3.72	2.21	60.60	<0.005	<0.02	0.78	13.86	0.18
2	CAL	09/03/2015	<1	840.53	1.37	1694.91	<1	285.41	<1	1386.04	9.84	65.90	101.48	4.08	3.06	50.84	<0.005	<0.02	0.75	16.87	0.12
3	CAL	29/05/2015	<1	851.00	6.00	1664.90	2.00	282.00	<1	1275.90	11.00	75.40	108.90	4.20	2.78	54.70	<0.005	<0.02	0.70	20.07	0.12
4	CAL	26/06/2015	<1	862.35	5.91	1608.28	<1	306.57	<1	1355.56	10.63	70.47	108.82	4.64	4.11	61.20	<0.005	<0.02	1.05	28.42	0.10
5	CAL	09/07/2015	<1	844.41	5.60	1616.71	<1	312.65	<1	1213.57	10.02	63.23	78.19	4.08	2.86	55.71	<0.005	<0.02	0.66	16.61	0.12
6	CAL	11/08/2015	<1	771.00	2.00	1582.00	<1	252.00	<1	1173.80	12.70	72.30	115.70	4.46	3.17	55.40	<0.005	<0.02	0.65	20.10	0.10
7	CAL	13/08/2015	<1	778.00	2.10	1594.90	<1	283.00	<1	1229.3	12.00	75.40	117.90	4.45	3.21	57.10	<0.005	<0.02	0.88	20.04	0.10
8	CAL	19/09/2015	<1	802.08	1.78	1666.93	<0.5	286.05	<0.5	1358.97	10.26	63.58	97.87	3.84	3.32	57.04	<0.0003	0.01	0.73	21.56	0.10
9	CAL	20/09/2015	<1	792.11	1.49	1734.38	<0.5	283.53	<0.5	1319.41	9.95	65.19	99.55	3.91	3.27	57.65	<0.0003	0.01	0.73	21.74	0.10
10	CAL	07/11/2015	8.00	666.00	2.30	1690.80	3.00	288.00	<0.5	1255.90	11.90	70.00	111.80	4.43	3.29	52.80	<0.0003	0.01	1.37	19.49	0.11
11	CAL	25/11/2015	11.26	689.49	2.07	1693.62	<0.5	301.36	<0.5	1130.71	11.01	75.64	109.69	5.00	3.91	62.35	<0.0003	0.02	0.91	18.01	0.12
12	YA1	29/05/2015	<1	863.00	7.00	1231.80	3.00	337.00	<1	1028.90	7.30	79.60	79.00	2.88	5.36	82.80	<0.005	<0.02	0.01	13.29	0.11
13	YA1	23/06/2015	<1	882.79	3.83	1188.70	<1	347.77	<1	1003.01	6.75	75.62	78.73	2.95	6.37	91.44	<0.005	<0.02	0.02	18.03	0.10
14	YA2	29/05/2015	<1	862.00	3.40	1099.50	<1	307.00	<1	953.90	8.40	71.30	74.00	2.73	5.53	76.30	<0.005	<0.02	0.01	11.96	0.11
15	YA2	23/06/2015	<1	865.33	3.53	1078.16	<1	311.33	<1	1038.89	7.19	66.23	71.54	2.73	5.29	83.74	<0.005	<0.02	0.02	14.70	0.09
16	YA3	01/02/2015	5.00	402.00	1.20	86.00	<1	257.00	<1	258.00	2.40	15.50	25.80	0.57	0.94	136.40	<0.005	<0.02	0.05	1.28	0.05
17	YA3	09/03/2015	24.40	363.55	1.22	89.23	<1	231.21	<1	266.80	1.73	14.58	26.08	0.59	1.22	120.45	<0.005	<0.02	0.06	1.55	0.04
18	YA3	29/05/2015	<1	403.05	1.79	87.25	2.00	224.40	<1	264.58	2.11	20.28	25.16	0.54	1.02	123.39	<0.005	<0.02	0.05	0.83	0.03
19	YA3	23/06/2015	<1	403.52	1.74	94.90	1.90	236.69	<1	255.96	2.83	16.16	27.23	0.59	1.29	137.32	<0.005	<0.02	0.06	1.41	0.03
20	YA3	07/11/2015	5.00	314.00	1.40	93.80	1.00	239.00	<0.5	254.10	3.70	15.70	27.00	0.61	1.33	125.90	<0.0003	0.03	0.07	1.48	0.03
21	PUY	30/05/2015	<1	9.00	0.50	4.30	<1	922.00	<1	26.50	18.50	8.50	57.90	0.63	<0.02	130.10	<0.005	0.07	<0.01	<0.05	0.10
22	SA2	30/01/2015	<1	250.00	0.70	56.00	<1	726.00	<1	135.90	111.30	27.70	56.80	0.29	0.20	97.80	<0.005	0.08	0.07	0.78	0.03
23	SA2	10/03/2015	<1	248.20	0.61	53.51	<1	582.16	<1	117.92	100.69	24.38	53.17	0.32	0.27	84.74	<0.005	0.08	0.08	0.93	0.03
24	SA2	31/05/2015	<1	241.00	1.10	63.90	1.00	634.00	<1	141.50	118.00	29.00	59.60	0.30	0.24	89.90	<0.005	0.05	0.07	0.25	0.03
25	SA2	22/06/2015	<1	251.57	1.19	63.48	<1	635.08	<1	131.54	112.24	27.08	59.92	0.28	0.28	98.23	<0.005	0.05	0.08	0.84	0.02
26	SA2	09/07/2015	<1	250.98	1.07	66.49	<1	662.32	<1	138.03	98.28	27.00	55.21	0.27	0.25	93.21	<0.005	0.07	0.06	0.84	0.03
27	SA2	12/08/2015	<1	230.00	1.10	55.70	<1	603.00	<1	143.70	106.20	27.30	58.30	0.30	0.31	92.40	<0.005	0.06	0.06	1.18	0.02
28	SA2	18/09/2015	<1	223.32	0.67	58.53	<0.5	590.03	<0.5	113.35	97.02	23.14	50.67	0.28	0.26	94.28	<0.0003	0.08	0.06	0.83	0.02
29	SA2	06/11/2015	2.00	189.00	0.60	56.30	<0.5	596.00	<0.5	118.10	108.60	25.10	57.70	0.32	0.29	89.20	<0.0003	0.19	0.09	0.77	0.02
30	SA2	27/11/2015	2.53	194.88	0.92	60.37	<0.5	634.39	<0.5	125.90	109.29	27.05	57.07	0.33	0.22	100.84	<0.0003	0.08	0.07	0.71	0.02
31	SA3	30/01/2015	<1	296.00	0.70	103.00	<1	1316.00	<1	235.90	202.30	47.70	87.20	0.42	0.36	107.40	<0.005	0.06	0.10	1.21	0.00
32	SA3	10/03/2015	<1	317.00	0.60	116.40	<1	1197.00	<1	233.20	198.80	45.80	87.20	0.48	0.45	91.80	<0.005	<0.02	0.11	1.42	0.16
33	SA3	31/05/2015	<1	304.00	1.50	124.10	1.00	1186.00	<1	241.40	211.10	49.40	91.00	0.45	0.40	95.00	<0.005	0.04	0.09	0.73	0.01
34	SA3	22/06/2015	<1	308.49	1.29	123.34	<1	1217.51	<1	231.41	205.16	47.44	93.57	0.43	0.46	103.96	<0.005	0.04	0.10	1.18	0.01
35	SA3	10/07/2015	<1	310.73	1.74	123.94	1.03	1224.44	<1	237.49	183.98	45.58	82.64	0.42	0.41	95.45	<0.005	0.05	0.08	1.29	0.01
36	SA3	12/08/2015	<1	284.00	1.90	114.80	<1	1185.00	<1	222.70	196.10	45.90	88.60	0.44	0.47	96.90	<0.005	0.03	0.08	1.30	0.01
37	SA3	18/09/2015	<1	318.05	1.93	126.93	<1	1222.27	<1	236.11	199.86	46.20	93.67	0.40	0.43	103.24	<0.005	0.04	0.09	1.37	0.01
38	SA3	06/11/2015	<1	250.00	1.00	122.70	<0.5	1290.00	<0.5	230.70	219.00	47.50	96.80	0.54	0.64	97.40	<0.0003	0.09	0.13	1.32	0.01
39	SA3	27/11/2015	3.20	252.20	1.25	124.64	<0.5	1292.08	<0.5	239.23	213.84	50.15	94.39	0.50	0.41	107.77	<0.0003	0.05	0.10	1.20	0.01
40	PCL	30/05/2015	<1	82.00	5.80	893.70	<1	317.00	<1	592.80	2.60	87.20	43.70	1.00	4.27	177.20	<0.005	<0.02	1.36	15.75	0.13

Cuadro 4.6. Resultados de la composición química de las fuentes de agua del volcán Sabancaya, entre enero y diciembre del 2015.

N°	Fuente	Fecha	Be mg/l	Bi mg/l	Cd mg/l	Ce mg/l	Co mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	La mg/l	Mn mg/l	Mo mg/l	Ni mg/l	Pb mg/l	S mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	Sn mg/l	Th mg/l	Ti mg/l
1	CAL	01/02/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	1.02	<0.003	0.06	<0.005	0.75	<0.005	<0.005	<0.005	126.10	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
2	CAL	09/03/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.32	<0.005	0.70	<0.005	<0.005	<0.005	105.59	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
3	CAL	29/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.02	<0.005	0.82	<0.005	<0.005	<0.005	96.00	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
4	CAL	26/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.11	<0.005	1.04	<0.005	<0.005	<0.005	109.27	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
5	CAL	09/07/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.03	<0.005	0.72	<0.005	<0.005	<0.005	109.90	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
6	CAL	11/08/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.03	<0.005	0.91	<0.005	<0.005	<0.005	100.20	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
7	CAL	13/08/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.01	<0.005	0.89	<0.005	<0.005	<0.005	104.60	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
8	CAL	19/09/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.00	<0.01	<0.0002	0.79	<0.0002	0.00	<0.0005	96.29	0.00	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.00
9	CAL	20/09/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.00	<0.01	<0.0002	0.76	<0.0002	0.00	<0.0005	100.61	0.00	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.00
10	CAL	07/11/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.00	<0.01	<0.0002	0.54	<0.0002	<0.0007	<0.0005	108.90	0.00	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.00
11	CAL	25/11/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.00	<0.001	0.00	<0.01	<0.0002	0.83	<0.0002	<0.0007	<0.0005	113.79	0.00	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.00
12	YA1	29/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.04	<0.005	0.22	<0.005	<0.005	<0.005	113.10	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
13	YA1	23/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.02	<0.005	0.28	<0.005	<0.005	<0.005	122.65	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
14	YA2	29/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.21	<0.005	0.18	<0.005	<0.005	<0.005	103.30	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
15	YA2	23/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.09	<0.005	0.20	<0.005	<0.005	<0.005	108.05	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
16	YA3	01/02/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	<0.01	<0.005	0.02	0.01	<0.005	<0.005	97.60	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
17	YA3	09/03/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.07	<0.005	0.02	0.01	<0.005	<0.005	77.43	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
18	YA3	29/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.03	<0.005	0.01	0.01	<0.005	<0.005	76.88	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
19	YA3	23/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.01	<0.005	0.02	0.01	<0.005	<0.005	86.81	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
20	YA3	07/11/2015	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.00	0.02	<0.0002	0.02	0.01	<0.0007	0.00	87.20	0.00	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.00
21	PUY	30/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	0.47	<0.005	0.72	<0.005	<0.005	<0.005	307.60	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
22	SA2	30/01/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	<0.01	<0.005	0.00	0.01	<0.005	<0.005	256.10	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
23	SA2	10/03/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.15	<0.005	0.00	0.01	<0.005	<0.005	194.69	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005
24	SA2	31/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.00	0.14	<0.005	<0.001	0.01	<0.005	<0.005	211.90	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
25	SA2	22/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.18	<0.005	0.00	0.01	<0.005	<0.005	222.37	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
26	SA2	09/07/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.12	<0.005	0.00	<0.005	<0.005	<0.005	246.93	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
27	SA2	12/08/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	<0.01	<0.005	<0.001	0.01	<0.005	<0.005	211.90	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
28	SA2	18/09/2015	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.01	0.01	<0.0002	0.00	0.01	0.00	<0.0005	196.89	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.01
29	SA2	06/11/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.01	<0.01	<0.0002	0.00	0.01	0.00	<0.0005	205.70	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.01
30	SA2	27/11/2015	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.01	<0.01	<0.0002	0.00	0.01	0.00	<0.0005	213.50	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.01
31	SA3	30/01/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	<0.01	<0.005	0.00	0.01	<0.005	<0.005	498.20	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
32	SA3	10/03/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.03	<0.001	0.01	0.25	<0.005	<0.001	0.01	<0.005	<0.005	400.20	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
33	SA3	31/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.23	<0.005	<0.001	0.01	<0.005	<0.005	395.70	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.02
34	SA3	22/06/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.30	<0.005	0.00	<0.005	<0.005	<0.005	418.50	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
35	SA3	10/07/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	0.19	<0.005	0.00	<0.005	<0.005	<0.005	429.77	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
36	SA3	12/08/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	<0.01	<0.005	<0.001	0.01	<0.005	<0.005	401.10	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
37	SA3	18/09/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	0.01	<0.01	<0.005	<0.001	<0.005	<0.005	<0.005	408.67	<0.005	<0.03	<0.005	<0.05	0.01
38	SA3	06/11/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.01	0.01	<0.0002	0.00	0.01	0.00	<0.0005	436.10	<0.0008	0.00	<0.0005	<0.0002	0.01
39	SA3	27/11/2015	0.00	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.01	<0.01	<0.0002	0.00	0.00	0.00	<0.0005	441.32	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.01
40	PCL	30/05/2015	<0.001	<0.005	<0.001	<0.03	<0.001	<0.01	<0.002	<0.01	<0.005	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	106.50	0.19	<0.03	<0.005	<0.05	<0.005

Cuadro 4.7. Resultados de la composición química de las fuentes de agua del volcán Sabancaya, entre enero y diciembre del 2015

4.3.3. Características de los iones solubles en el agua

Los resultados obtenidos sobre de la composición de aniones y metales disueltos en el agua de las fuentes termales son presentados en la Figura 4.13.

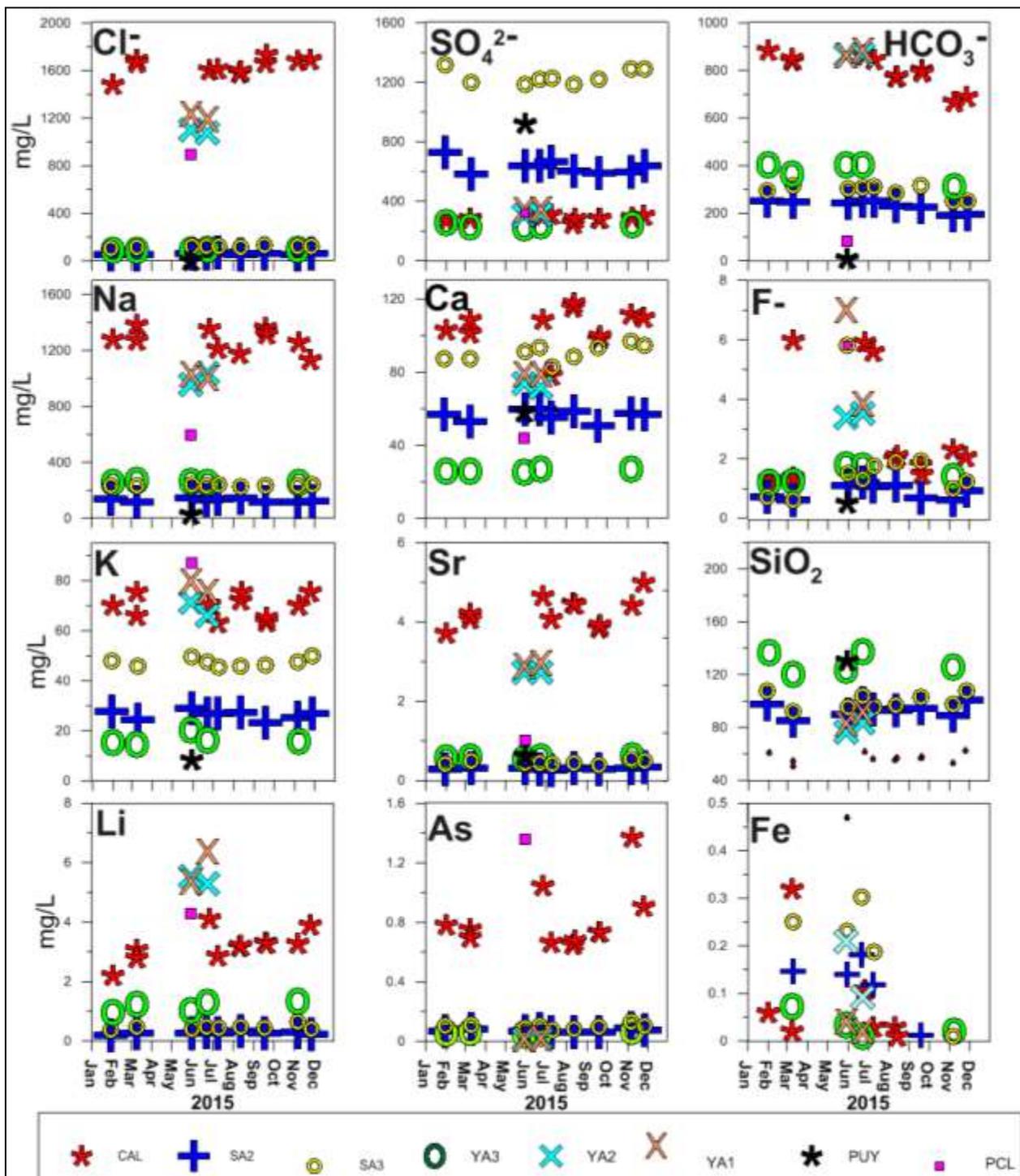


Figura 4.13. Gráfica de los resultados de la composición química de iones y metales pesado entre enero a noviembre del 2015, en las fuentes termales del alrededor del volcán.

De la gráfica anterior se realizaron las siguientes observaciones.

- **Cloruros** – Las fuentes con mayor contenido de cloruros son: CAL (~1600 mg/L), PCL (~800 mg/L), YA1 y YA2 (~1100 mg/L). Cabe resaltar que la cantidad de cloruros no presentan mayores variaciones a lo largo del año 2015.

- **Sulfatos** – La fuente con mayor contenido es SA3 (~1100 mg/L), seguido de la fuente PUY (~900 mg/L), y SA2 (~600 mg/L), en las cuales se presentan ligeras variaciones en sus valores en el periodo de estudio. En el resto de las fuentes la concentración de los sulfatos se mantiene por debajo de los 350 mg/L.
- **Bicarbonatos** – Las fuente con mayor contenido es CAL (~800 mg/L), seguida de YA1 y YA2 (~850 mg/L). La fuente CAL presento grandes variaciones reflejadas en variaciones del pH. El resto de fuentes se mantiene por debajo de los 400 mg/L.
- **Sodio** – La fuente con mayor contenido en sodio es CAL (~1100 mg/L), seguida de YA1 y YA2 (~1000 mg/L) y PCL (~590 mg/L). El resto de fuentes se mantiene por debajo de los 300 mg/L.
- **Calcio** – La fuente con mayor contenido es CAL (~100 mg/L), la mayoría de las demás fuentes se mantienen por debajo de 100 mg/L.
- **Potasio** – La fuente con mayor contenido es PCL (~ 80 mg/L), seguida de CAL (~70 mg/L), luego las fuentes de YA1 y YA2 (~ 70 mg/L), el resto de fuentes se encuentra por debajo de (~50 mg/L).
- **Flúor** – La fuente con mayor contenido es CAL (~ 5 mg/L), sin embargo la fuente SA3 (~ 1,5 mg/L) presento importantes variaciones en este periodo reflejados en la actividad del volcán.
- **Estroncio** – La fuente con mayor contenido de estroncio es CAL (~ 4 mg/L), seguida de YA1 y YA2 (~ 2 mg/L), las demás fuentes se encuentran por debajo de 1 mg/L.
- **Sílice** – La fuente con mayor contenido es PCL (~ 170 mg/L), seguida de PUY (~ 130 mg/L). Las fuentes SA3 y SA2 (~ 100 mg/L) presentaron variaciones importantes en este parámetro relacionados a la actividad del volcán.
- **Litio** – La fuentes con mayor contenido son YA1 y YA2 (~ 6 mg/L), seguido por CAL (~ 3,5 mg/L) y PCL (~ 4 mg/L). El resto de fuentes están por debajo de 1,3 mg/L.
- **Arsénico** – La fuente con mayor contenido en promedio es PCL (~ 1,3 mg/L), seguido de CAL (~ 0,7 mg/L). El resto de fuentes están por debajo de 0,15 mg/L.
- **Hierro** – Es un elemento que alguna veces se encuentra por debajo del límite de detección (>0.01), pero en algunas muestras se detecta, por lo general se ha medido por debajo de 0,4 mg/L.

4.3.4 Resultados de la Fuente Termal SA3

La fuente SA3 (Sallalli 3) ubicada a 9 km al SE del volcán Sabancaya fue la principal estación de monitoreo, debido a cercanía al volcán y por qué probablemente, según su composición química, este asociada al sistema magmático del volcán Sabancaya. Esta fuente durante el periodo enero a diciembre del 2015 ha presentado ligeras variaciones en los parámetros fisicoquímicos y la composición química del agua, con un marcado descenso de la relación de sulfatos/cloruros. En cuanto a los demás iones como sodio, potasio, calcio, entre otros, presentaron ligeras variaciones en su composición. Sin embargo, las variaciones más importantes se observan en el ion flúor, uno de los principales indicadores de actividad magmática que presenta incrementos entre los meses

julio a septiembre de 2015 para luego decaer en noviembre. Por otro lado, el ion bicarbonato presentó también variaciones desde septiembre a noviembre (Figura 4.15).

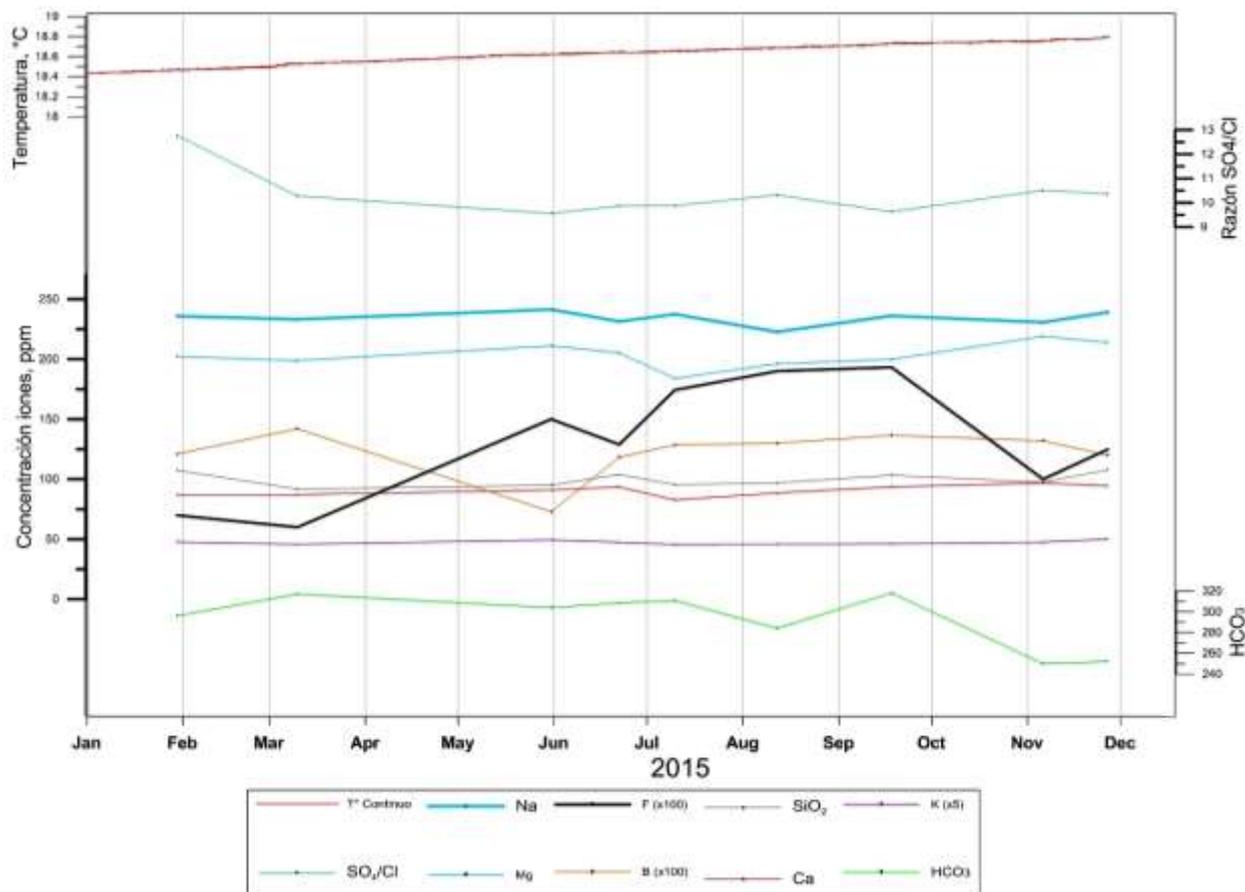


Figura 4.15. Resultados de la composición química de la fuente “SA3” entre enero y noviembre del 2015.

4.4 MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE FUENTES DE AGUA

Para realizar el monitoreo de la temperatura en las fuentes termales se instalaron registradores de temperatura Marca Tinytag, Modelo Aquatic 2 que registran la temperatura en un intervalo de cada 5 minutos, buscando observar variaciones de la misma por influencia de la actividad volcánica. En el 2015 se instalaron 2 registradores en las fuente Sallalli 3 (SA3) por los resultados obtenidos en el año anterior 2014, se concluyó que la mejor fuente para el monitoreo es **SA3** en la cual se mantuvo operando un registrador de temperatura durante el 2015. En general, se aprecia que las fuentes de agua asociadas al **volcán Sabancaya presentan temperaturas que varían entre 9,7 °C y 94.3 °C.**

4.4.1 Resultados de la Temperatura en la Fuente SA3.

La medición de la temperatura en la fuente SA3 se inició el 8 de marzo de 2013. Al observar la clara tendencia a incrementarse, el 22 de octubre de 2013 se instaló una estación más robusta, con un registrador Tinytag Acuatic2, con un paso de muestreo de 5 minutos. Este equipo se

mantuvo durante los años 2014 y 2015. Después de este periodo de registro se ha calculado que existe un incremento sostenido de la temperatura de aproximadamente 0.03 °C por mes, (Figura 4.16).

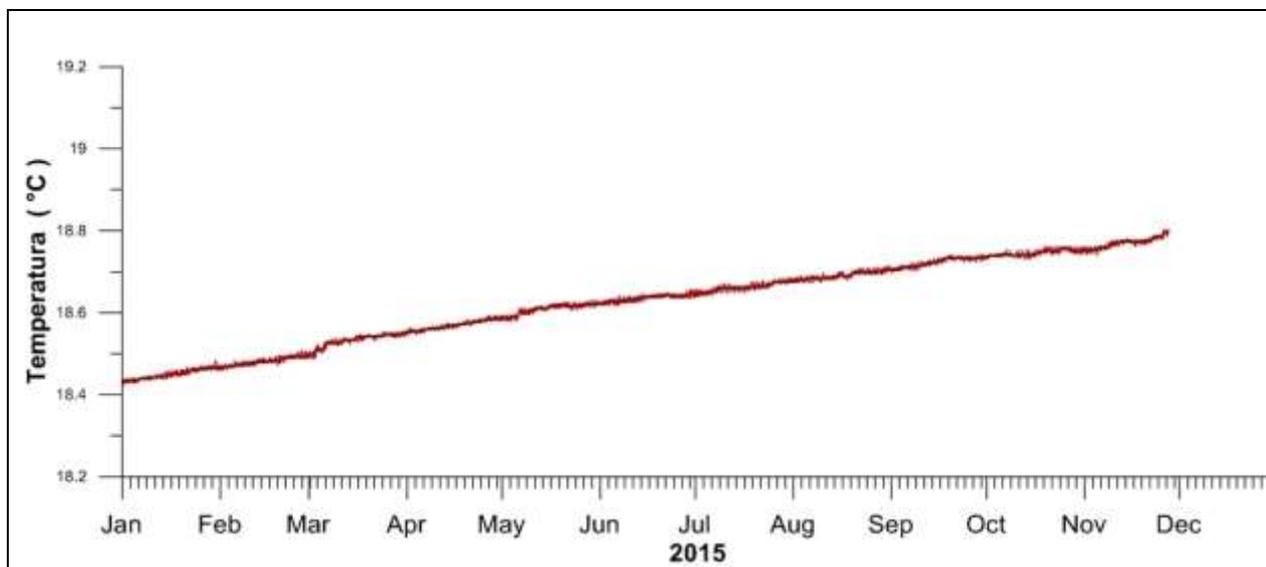


Figura 4.16. Gráfica de la temperatura registrada en la fuente termal SA3, entre enero y noviembre del 2015.

5.0 MONITOREO DE DEFORMACIÓN

La deformación en superficie de una estructura volcánica, es un fenómeno común en respuesta a la dinámica interna del sistema volcánico (intrusión magmática por ejemplo). El OVI emplea en la actualidad tres métodos de monitoreo geodésico en el volcán Sabancaya: EDM (Electronic Distance Measurement), GNSS (Global Navigation Satellite System) e InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), la red de monitoreo es visualizada en la Figura 1.2.

5.1 MONITOREO CON EQUIPOS EDM

Este método consta de una red constituida de una base EDM denominado SBAM (Ampato), cinco prismas de observación, ubicados a diferentes altitudes en el flanco sur y sureste del volcán Sabancaya que vienen operando desde febrero de 2013 hasta la actualidad.

- **Resultado de mediciones EDM**

Los resultados de monitoreo correspondiente al año 2015 (enero – diciembre), se muestran en la Figura 5.1. En este gráfico se observan variaciones de distancia entre cada una de las mediciones realizadas (mensualmente), que expresan la deformación mediante curvas para el flanco sur y sureste. Estas curvas mantienen una tendencia horizontal y fluctúan dentro del rango del error del instrumento, durante el periodo de monitoreo. Se interpreta que la actividad volcánica (sísmica y

emisiones de ceniza) del Sabancaya no estaría generando suficiente presión en el interior que pudiera manifestarse como cambio o deformación en la superficie del volcán.

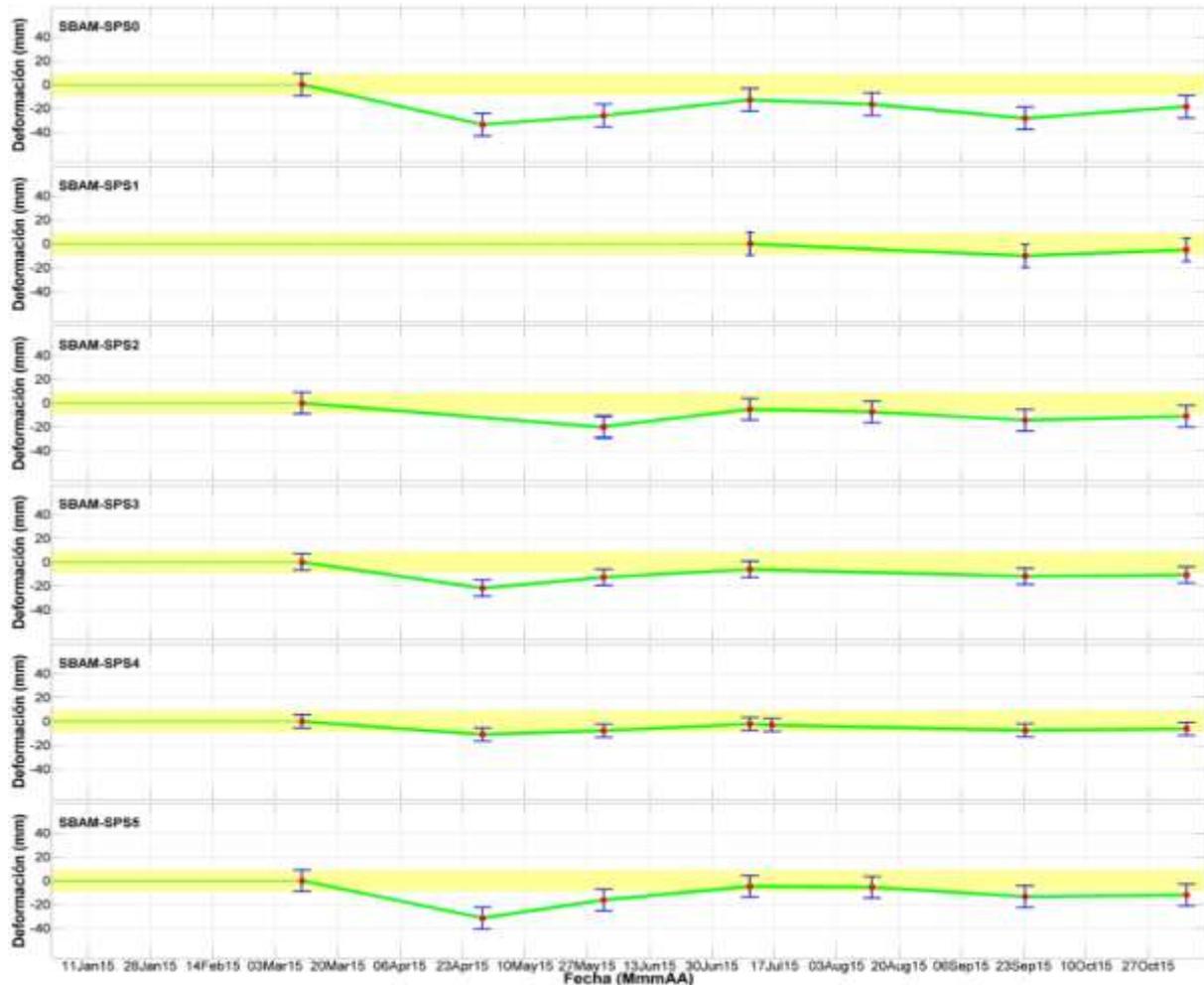


Figura 5.1. Comportamiento de mediciones EDM observado de la estación SBAM, periodo de registro enero – diciembre de 2015.

5.2 MONITOREO CON EQUIPOS GPS

Con ayuda de los equipos GPS el OVI monitorea los fenómenos de deformación asociados a la actividad interna del volcán, para ello el OVI ha implementado una red de estaciones GPS de registro permanente que opera desde septiembre de 2014, conocidos como estación Mucurca (SBMU, flanco noroeste), estación Hornillos (SBHO, flanco noreste) y la estación Volcán (SBVO, sureste) que registran las 24 horas a través de un receptor marca TRIMBLE modelo R7. En noviembre de 2015 la estación SBVO paso a transmitir su data en tiempo real denominado desde esta fecha Base Sur Este (SBSE). Además se realiza el monitoreo temporal desde una red de hitos geodésicos ubicados en el flanco sureste que son reocupados periódicamente y vienen operando desde octubre de 2013, denominados estación Ampato (SBAM), estación Sallalli (SBSA) y estación Parjo (SBPJ), ver Figura 1.2 (ítem 1.0).

• Resultado de mediciones GPS

En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4, se muestran los resultados obtenidos durante el año 2015 por cada estación de monitoreo. Los gráficos representan la variación de cada una de las componentes de las coordenadas (latitud = X, longitud = Y, altura = Z) en función de tiempo para cada estación de monitoreo, y se les denomina series temporales y estas nos permiten ver la tendencia de los desplazamientos. En la tabla 5.1 se observan los desplazamientos calculados para cada una de las estaciones, así como la dirección de desplazamiento. La componente X presenta tendencia negativa para la estación SBMU, mientras las estaciones SBHO y SBSE presentan tendencia positiva. Así mismo, la componente Y presenta en las tres estaciones tendencia negativa manteniendo una misma dirección de desplazamiento (Figuras 5.2 a 5.3, línea color azul, representa mejor ajuste mediante mínimos cuadrados). A su vez la componente Z que analiza la variación y cambios en la superficie del volcán, muestran un comportamiento continuo con tendencia positiva evaluada en las tres estaciones de monitoreo (Figura 5.2, 5.3 y 5.4, ver línea azul). El análisis de estos resultados, indican que los desplazamientos registrados probablemente no evidencian una deformación de la superficie ligada a la actividad interna del volcán o a un ascenso magma de considerable volumen.

ESTACION MONITOREO	VALORES CALCULADOS PARA LAS SERIES TEMPORALES					
	X (mm)	DIRECCION	Y (mm)	DIRECCION	Z (mm)	TENDENCIA
MUCURCA	17.36	OESTE	8.33	SUR	12.25	POSITIVA
HORNILLOS	9.12	ESTE	7.00	SUR	17.78	POSITIVO
BASE SURESTE	6.05	ESTE	20.59	SUR	10.67	POSITIVO

Tabla 5.1. Desplazamientos calculados para las series temporales durante el período de monitoreo correspondiente al año 2015, obtenido de tres estaciones GPS de registro permanente.



Figura 5.2. Comportamiento de las coordenadas de la estación SBMU para un periodo comprendido entre enero a diciembre de 2015.

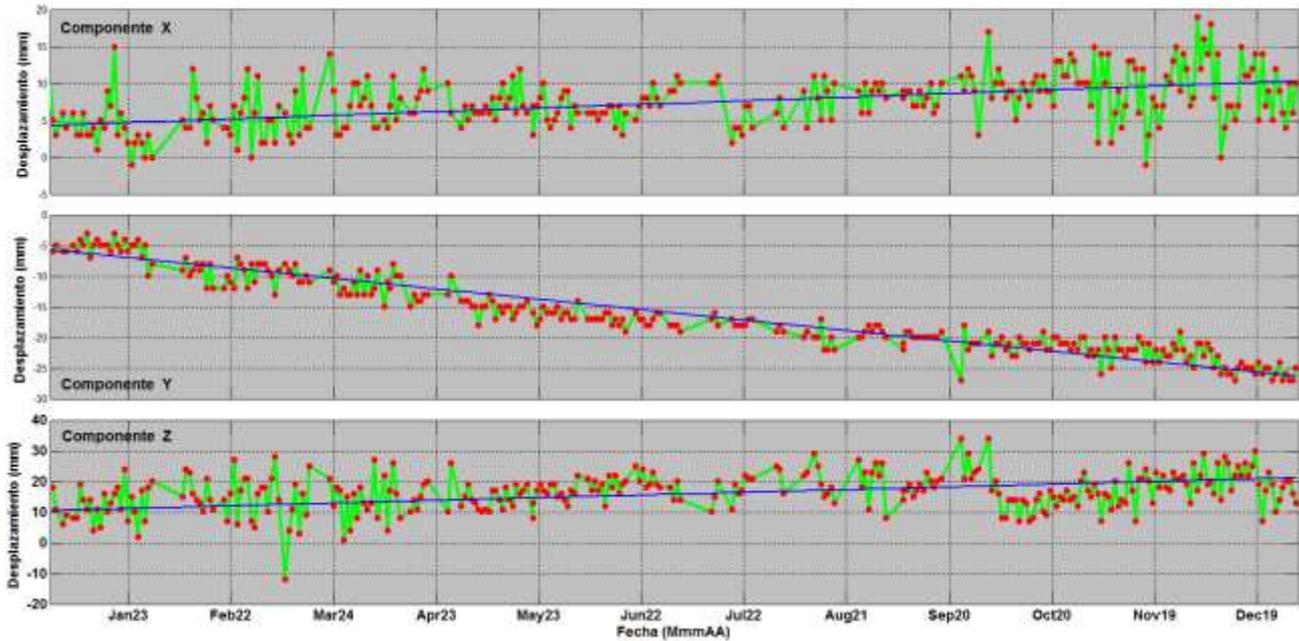


Figura 5.3. Comportamiento de las coordenadas de la estación SBHO para un periodo comprendido entre enero a diciembre de 2015.



Figura 5.4. Comportamiento de las coordenadas de la estación SBSE para un periodo comprendido entre enero a diciembre de 2015.

Estas tendencias se pueden ver mejor en el mapa de campo de desplazamiento (Figura 5.5), donde se observan que las estaciones de monitoreo se desplazan con diferentes direcciones y magnitudes. En la tabla 5.2 se detallan los valores calculados de los desplazamientos horizontales y verticales. En base a estos datos, se puede mencionar que la componente VERTICAL de las seis estaciones GPS (permanente y temporal) muestran que el complejo volcánico de Sabancaya estaría experimentando un probable proceso tectónico de levantamiento, asociado a la actividad de las fallas geológicas que limitan el volcán. Desde luego la actividad de las fallas estarían asociadas al efecto del movimiento continuo de la placa de Nazca.

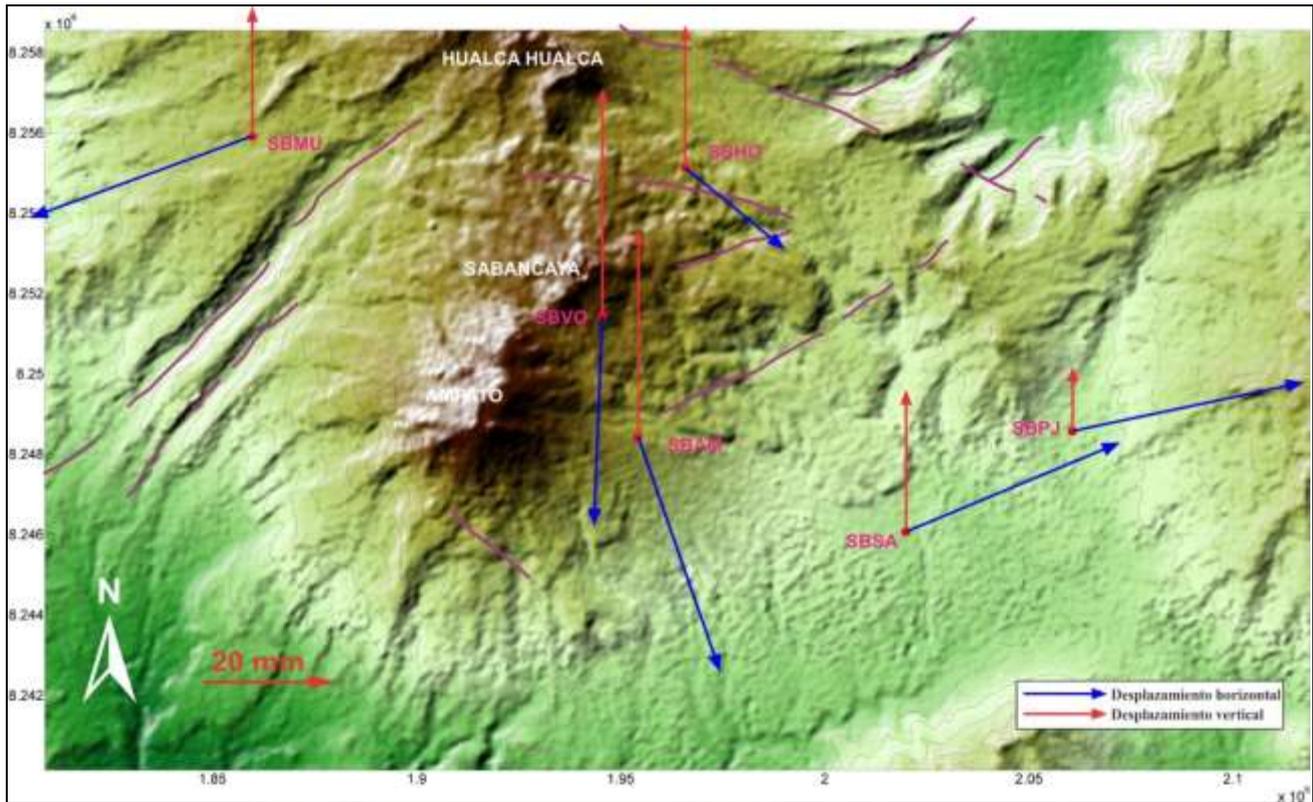


Figura 5.5. Vectores de desplazamiento de las estaciones de monitoreo, para un periodo entre enero a diciembre de 2015.

TIPO DE MONITOREO	ESTACIONES DE MONITOREO	VECTORES DE DESPLAZAMIENTO			
		HORIZONTAL (mm)	DIRECCION DESPLAZAMIENTO	VERTICAL (mm)	TENDENCIA
PERMANENTE	SBMU	20.00	SUROESTE	28.80	POSITIVO
	SBHO	22.00	SURESTE	15.60	POSITIVO
TIEMPO REAL	SBSE	35.00	SUR	26.00	POSITIVO
TEMPORAL	SBAM	32.00	SURESTE	30.70	POSITIVO
	SBSA	22.00	NORESTE	28.20	POSITIVO
	SBPJ	10.00	NORESTE	28.60	POSITIVO

Tabla 5.2. Valores calculados de los vectores de desplazamiento para el volcán Sabancaya.

6.0 MONITOREO TÉRMICO

Otro método de monitoreo empleado por el OVI es el monitoreo térmico, que a través del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer) instalado al interior del satélite TERRA; y operado por MIROVA (Universidad de Torino – Italia) detecta, localiza, mide la radiación y puntos calientes procedentes de la actividad volcánica en tiempo casi real, muestrea todos los días en sesiones de cada seis horas, a través de la web. Es así que el OVI (Observatorio Vulcanológico del INGEMMET) analiza las anomalías térmicas en el volcán Sabancaya como energía volcánica irradiada (VRP).

6.1 ANOMALÍAS TÉRMICAS MIROVA

Durante el periodo comprendido entre enero a diciembre de 2015, el sistema de monitoreo térmico MIROVA, de la Universidad de Torino - Italia, NO ha detectado puntos calientes sobre el cráter del volcán Sabancaya.

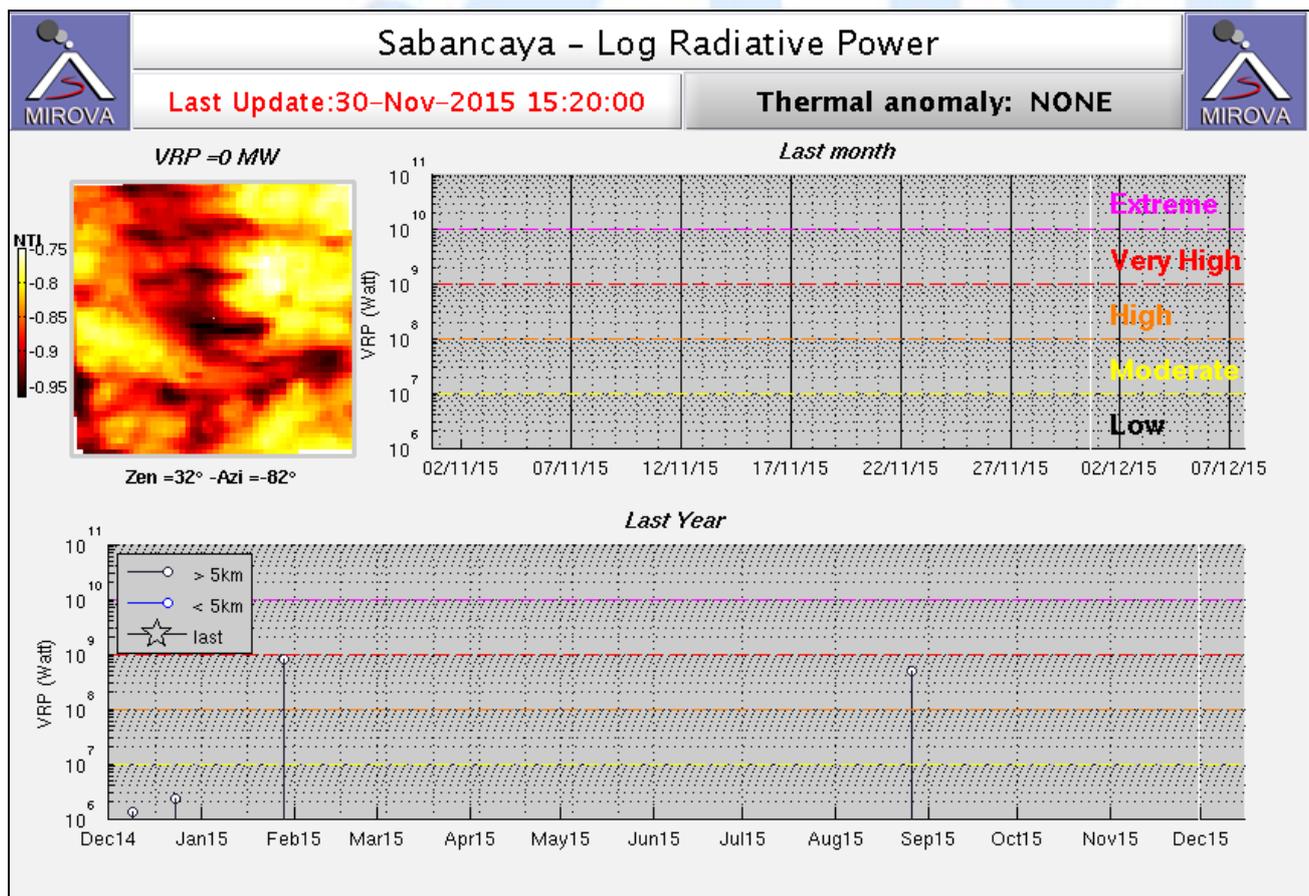


Figura 6.1. Registro de anomalías térmicas detectadas mediante el sistema MIROVA, para el volcán Sabancaya durante el año 2015.

7.0 EL PROYECTO UBINAS SABANCAYA MISTI (USM) 2015

El Proyecto USM comprende la implementación de la red telemétrica de monitoreo volcánico en tiempo real de los volcanes Ubinas, Sabancaya y Misti. La visión general que se tiene del proyecto consiste realizar la implementación en fases, el proyecto completo tiene el aspecto que se muestra en la Figura 7.1.

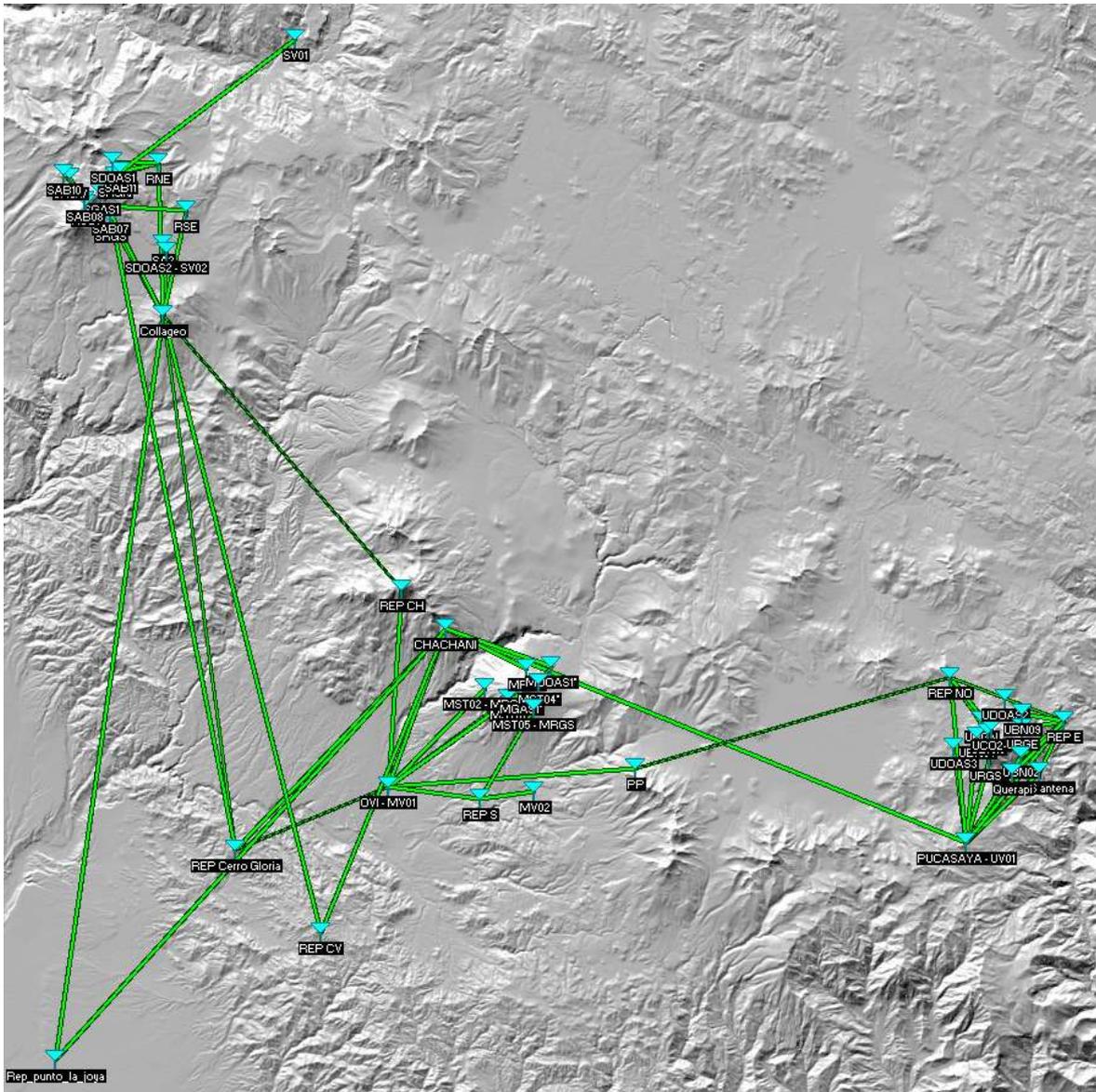


Figura 7.1. Red telemétrica del proyecto Ubinas, Sabancaya y Misti, implementado durante el 2015, se observan las alternativas de transmisión para tres volcanes.

7.1 La red telemétrica Sabancaya 2015

Dentro del contexto general del proyecto para el año 2015, se propusieron dos enlaces con equipos de radio y un sistema de transmisión por telemetría indirecta (por internet), como se aprecia en la Figura 7.2.

- Enlace de telemetría directa OVI – Cerro Gloria – SAB07 (Estación Sísmica 07)
- Enlace de telemetría indirecta SAB11 – Coporaque

- Transmisión por telemetría indirecta de la cámara de video en Coporaque.

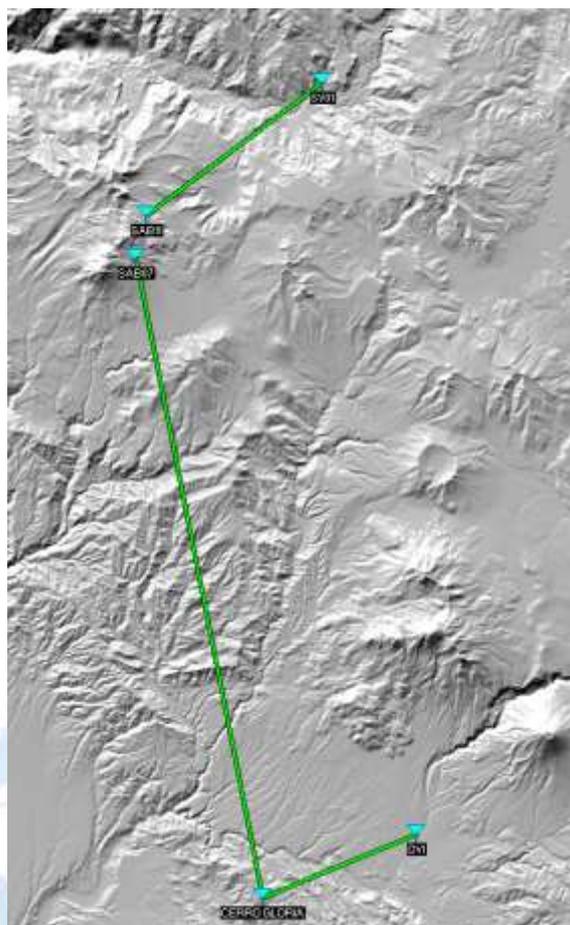


Figura 7.2. Enlaces del proyecto de telemetría para el volcán Sabancaya 2015.

Para esta red, se tiene un repetidor en el lugar denominado Cerro Gloria y de Cerro Gloria se envía hacia el OVI. Cada estación terminal, tiene la siguiente instrumentación, como se indica la tabla líneas abajo:

Código ET	Instrumento	Tipo de Telemetría
SAB07	Sensor Sísmico	Directa
SAB11	Sensor Sísmico	Indirecta
SBSE	GPS	Directa
UV01	Cámara de video	Indirecta

Para la planificación de cada enlace se realiza, un estudio detallado de los parámetros (Figura 7.3, 7.4 y 7.5) empleados y/o involucrados en la transmisión, como la distancia, pérdidas en el espacio libre, nivel de referencia de recepción, y orientación de las antenas (azimut y elevación). Este tipo de simulación se utiliza para cada enlace punto a punto, pero si requerimos una mayor zona de cobertura y necesitamos más flexibilidad, para este tipo de planificación se utiliza los mapas de cobertura que básicamente son zonas en donde la señal de radiofrecuencia tiene un nivel de campo eléctrico detectable para un receptor móvil alrededor de un transmisor fijo, como se observa en la Figura 7.6. Para el volcán Sabancaya el principal punto para planificar las zonas de cobertura es el repetidor de Cerro Gloria (Véase Figura 7.6).

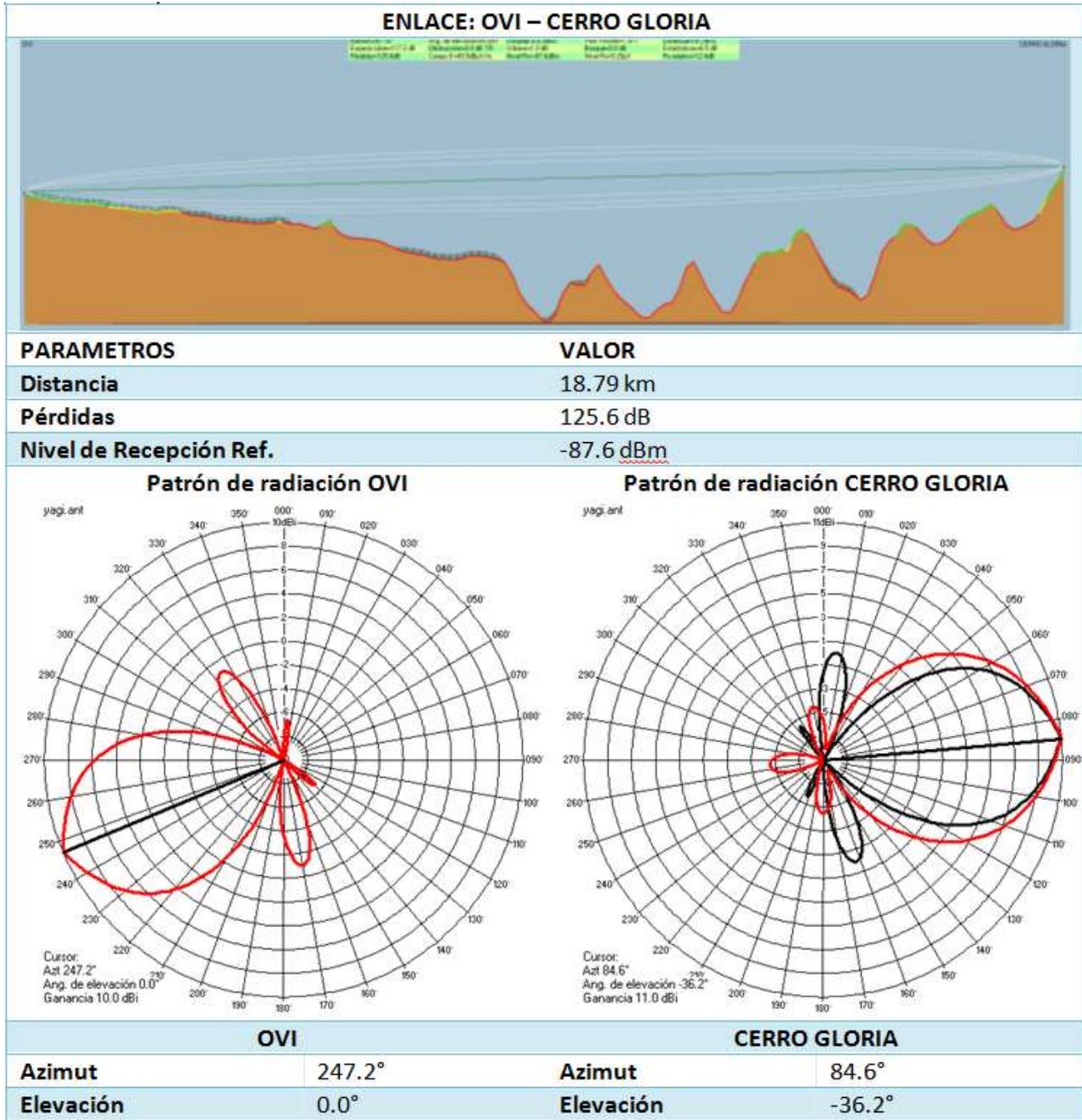


Figura 7.3. Principales parámetros empleados para la transmisión entre el OVI y el Cerro Gloria.

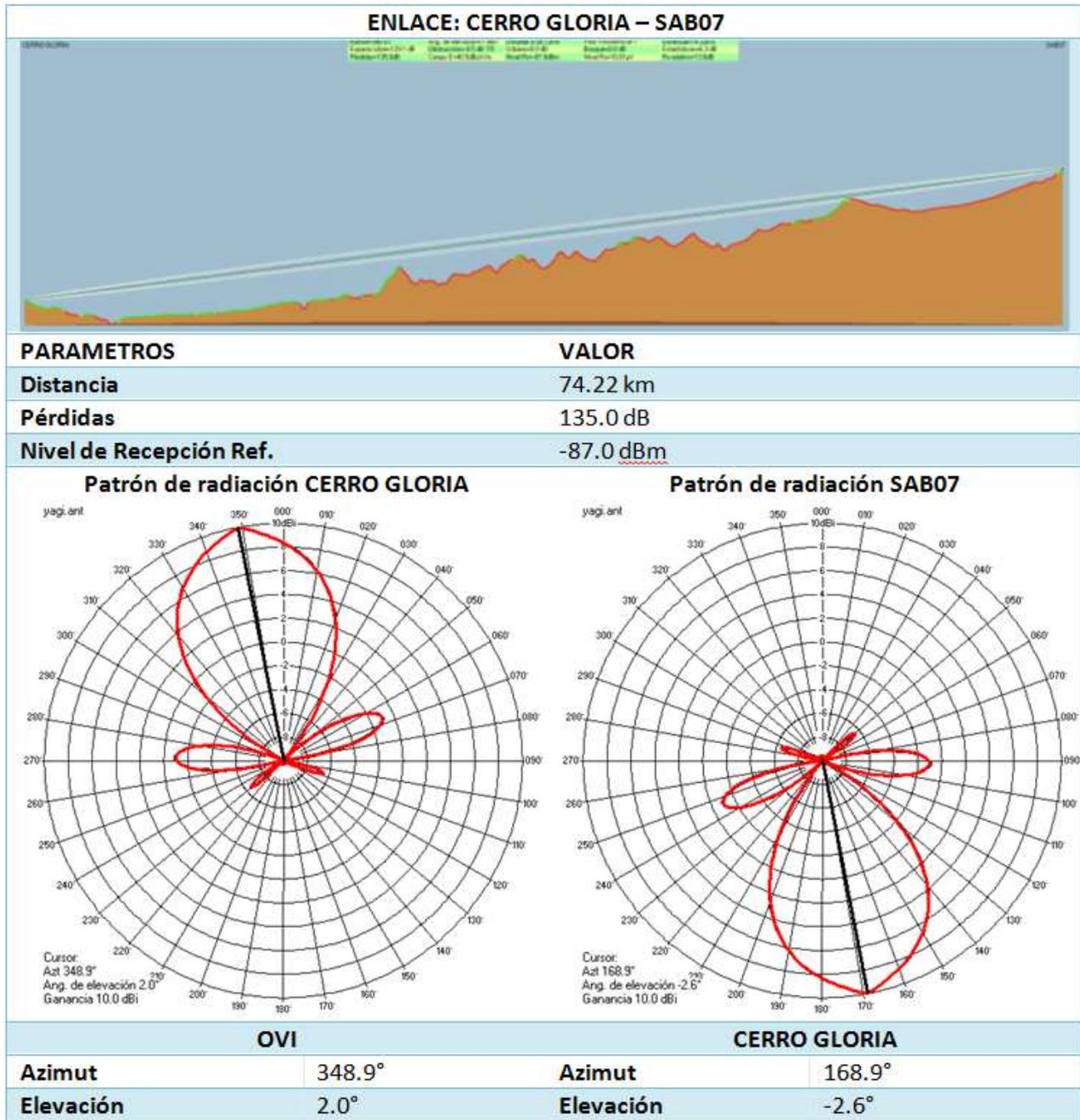


Figura 7.4. Principales parámetros empleados para la transmisión entre el Cerro Gloria y la SAB07, los parámetros de simulación muestran un enlace es crítico.

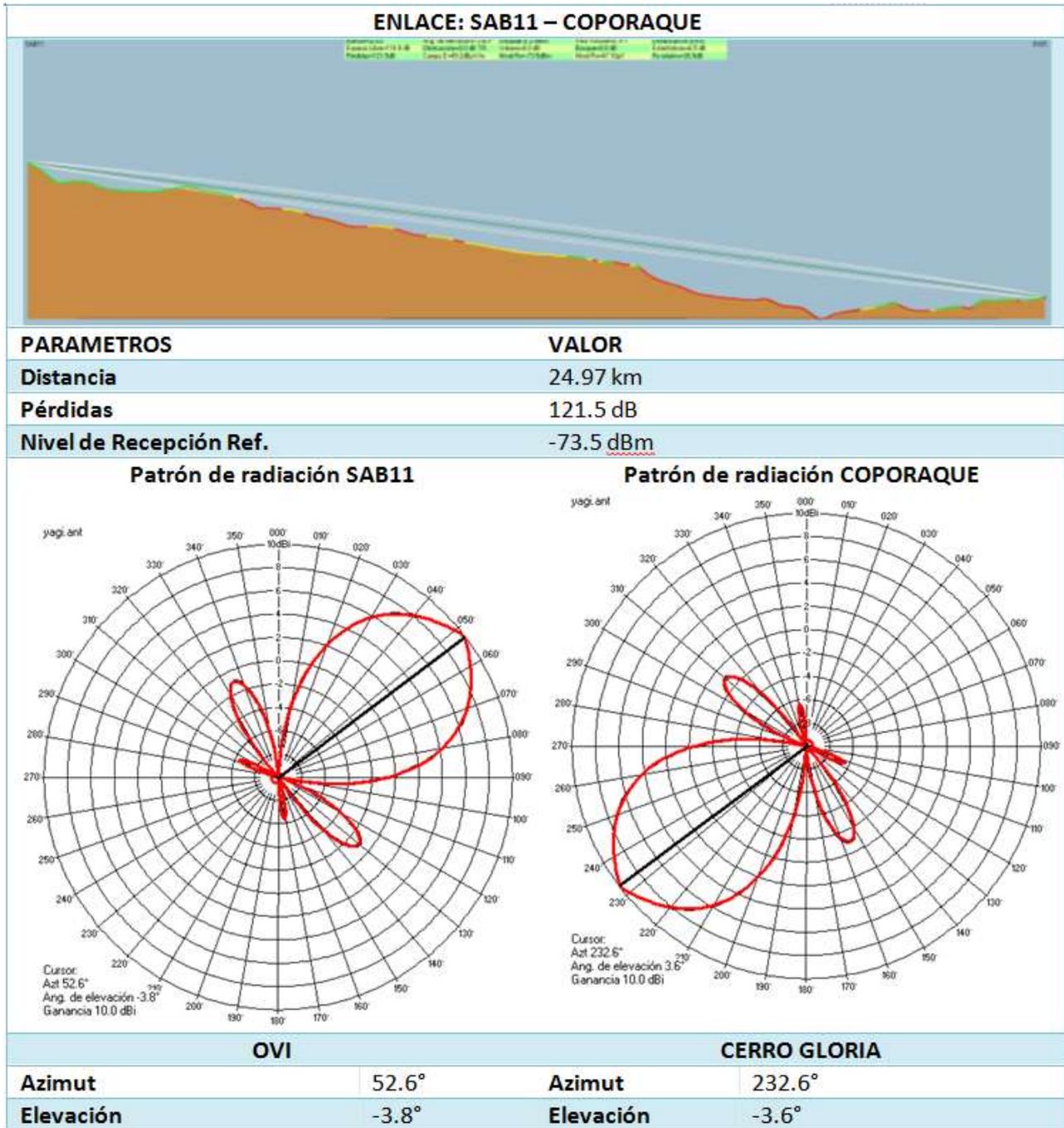


Figura 7.5. Principales parámetros empleados para la transmisión entre la SAB11 y Coporaque.

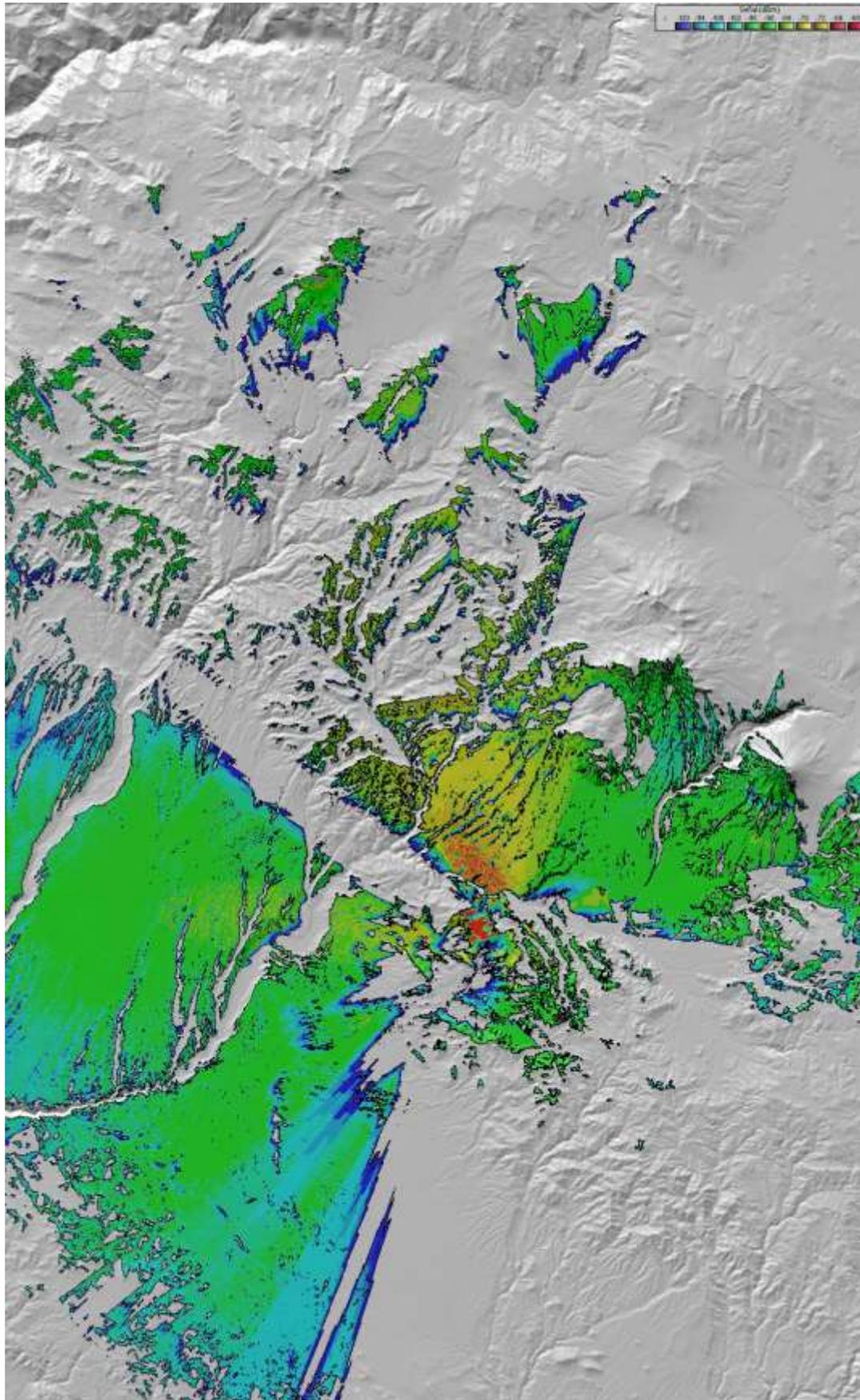


Figura 7.6. Mapa de cobertura del repetidor de Cerro Gloria.

Durante la planificación también se ha considerado el plan de frecuencias que en nuestro caso está dentro del rango de **916MHz a 928MHz**.

7.2 Implementación de la Red Telemétrica Sabancaya 2015

En el 2015 la implementación de la red se centralizó en el enlace de telemetría directa SAB07 – Cerro Gloria – OVI y el enlace de telemetría SAB11 – Coporaque. Para la implementación de esta red se realizó la coordinación con la SUNAT para los permisos de la utilización de la torre, y previa coordinación con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, para la utilización de las bandas de frecuencia no licenciadas. Durante la implementación del enlace SAB07 – Cerro Gloria, se ha requerido bastante precisión en la orientación de las antenas, además, de una buena instalación de los conectores, cables de protección, etc. Este enlace, se realizó utilizando las radios de la marca Xetawave, y antenas de ganancia de 14dBi, para asegurar un enlace óptimo.

Durante el 2015, también como primer paso se realizó el reconocimiento de campo para la instalación del DOAS, y una visita al cráter del volcán para una futura instalación de un equipo multigas del grupo de Trail by Fire, quien apoyó en la elección del punto y además sugirió algunos criterios para la orientación del DOAS, con respecto al multigas, se sugirió instalarlo en la cima del cráter.



Figura 7.7. Reconocimiento de campo para la implementación y diseño de la red telemétrica en el Sabancaya.



Figura 7.8. Instalación y simulación del enlace entre la SAB11 y Coporaque.

8.0 CONCLUSIONES

El monitoreo implementado por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET en el volcán Sabancaya, para el periodo entre enero a diciembre de 2015, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Durante el año 2015 la sismicidad del volcán Sabancaya mostró un predominio y ligero incremento en la actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico VT (asociada al fracturamiento de rocas en el interior de la estructura volcánica), asimismo se registró la ocurrencia de actividad sísmica relacionada al movimiento de fluidos al interior de los conductos del volcán, representada por eventos de Largo Periodo (LP), híbridos (HYB), tornillos (TOR) y tremor volcánico de baja energía (TRE).
- La estimación de la energía sísmica acumulada fue de 205049 MJ; los incrementos abruptos de la energía principalmente se debió a la ocurrencia de sismos distales, localizados en áreas aledañas y lejanas al volcán, los cuales fueron asociados a la actividad de fallas activas localizadas en inmediaciones del volcán, por ejemplo actividad del sistema de fallas Huambo - Cabanaconde.

- Se registraron un total de 640 eventos sísmicos; durante la primera mitad del año (enero – junio: 515 eventos) los eventos se localizaron principalmente en dos fuentes sismogénicas al NW y NE del volcán Hualca – Hualca y las profundidades de los mismos fueron menores a los 13 km. Posteriormente entre julio y diciembre se localizaron 125 eventos más, cierta parte de estos eventos se localizaron al NE del volcán Sabancaya (a 4 km de distancia del cráter aproximadamente) y a profundidades menores a los 6 km. La mayoría de estos eventos se ha asociado a una sismicidad distal debido a la distancia respecto al edificio volcánico.
- El cálculo del periodo de los eventos de baja frecuencia (LP's y TOR's) mostraron valores constantes para este periodo, lo cual, posiblemente indiquen que no existe un cambio relevante en el sistema-fuente que está generando dichos eventos. Por otro lado, los bajos periodos podrían asociarse a fuentes pequeñas con fluidos ricos en material gaseoso (vapor de agua y gases), es decir, el sistema del volcán tiene un mayor dominio de una componente hidrotermal que magmática.
- Durante el año 2015 se realizaron 21 lecturas válidas de gases de SO₂ emitidos por el volcán Sabancaya, las cuales registraron flujos entre 200 Tn/día y 2600 Tn/día clasificados en la escala de mediciones de gases volcánicos como MODERADOS y GRANDES, que sugiere una continua desgasificación de un cuerpo magmático, quizás de poco volumen, localizado en el interior del volcán Sabancaya.
- El monitoreo de las fuentes de aguas termales fuente SA2 y SA3 localizados en inmediaciones del volcán Sabancaya presentaron importantes variaciones en el contenido de FLOUR entre 5 y 1.5 mg/L, probablemente debido a variaciones en el ascenso de material magmático. Mientras los demás parámetros físico químicos se mantuvieron dentro de los límites.
- Durante este periodo (año 2015) se ha implementado y puesto en operatividad el sistema de monitoreo GPS de transmisión en tiempo real ubicado en el flanco Sur-este del Sabancaya que permitirá observar de manera continua las variaciones en la deformación.
- Las mediciones de distancia electrónica EDM medidos en el flanco sureste del volcán Sabancaya no han registrado deformación asociado a la actividad volcánica o por lo menos no fueron observados mediante este método.
- Los registros con equipos GPS, indican que las estaciones de monitoreo instalados en el volcán Sabancaya vienen experimentando un desplazamiento a razón de 7.00 y 20.59 mm para la componente X, así como un levantamiento para la componente Z, a razón de 10.67 mm a 17.78 mm.
- El registro GPS de seis estaciones de monitoreo permanente y temporal evidencian un probable proceso tectónico de levantamiento del volcán Sabancaya, atribuido a la actividad de las fallas geológicas activas que limitan el volcán y están asociadas al efecto del movimiento de las placas tectónicas.
- Para el periodo 2015 el sistema de monitoreo térmico MIROVA de la Universidad de Torino NO ha detectado anomalías en el volcán Sabancaya.

- Durante las pruebas de simulación realizada en campo y gabinete se ha visto que el enlace entre los puntos de transmisión y recepción o punto a punto y que mejor resultado ha dado es el repetidor Cerro Gloria Sabancaya.
- Las frecuencias consideradas para la transmisión de datos GPS, Sísmico y DOAS son las bandas que se encuentran entre el rango de 916MHz a 928MHz.
- Para optimizar una mejor transmisión de datos es de vital importancia contar con equipos de radio transmisión de alta ganancia para un óptimo enlace y así garantizar la llegada de datos de los tres métodos hacia el observatorio.

9.0 RECOMENDACIONES

- Es necesario seguir complementando las redes de monitoreo geodésico, sísmico, geoquímico y visual en el volcán Sabancaya con transmisión de datos en tiempo real. Así mismo priorizar los trabajos de vigilancia temporal y diaria.
- Implementar sistemas de seguridad y protección de equipos en campo con la construcción de casetas de concreto.
- A las autoridades y pobladores que habitan en áreas aledañas al volcán Sabancaya se les recomienda implementar acciones recomendadas en el Comunicado Conjunto Nro. 09-2015, emitido el día 07 de octubre del 2015 por el Comité Científico que monitorea la actividad del volcán Sabancaya.

OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO
INGEMMET

10.0 BIBLIOGRAFÍA

1. Servicio Geológico Colombiano (2012). Informe de Actividad Volcánica Segmento Norte de Colombia, Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín, 2012. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, Manizales, Colombia, 90 pág.
2. Dzurisin D. (2007). Volcano Deformation, Geodetic Monitoring Techniques. United States Geological Survey. 441 p.
3. Gonzales, K., (2014). Procesamiento de Imágenes TERRASAR-X Para Análisis InSAR de Deformación Asociada a la Actividad del volcán Sabancaya, Periodo 14/01/2012 – 01/06/2014, Informe Técnico N° 01-2014 – INGEMMET – DL. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
4. Huamán, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B., Guillande, R. y Rudant, J. (1993). Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Pérou): Bull. Soc. Géol. France, t.164, no 6, p. 807-818.
5. Ibáñez, J. (1997) – Apuntes de Sismología Volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, 58 p.
6. Ibáñez, J. & Carmona, E. (2000) – Sismicidad Volcánica. Serie: Casa de los volcanes n° 7. Editores: Astiz M. Y García A. 269-282 p.
7. Pitchard, M. (2003). Recent crustal deformation in west-central South America. Tesis de grado para optar el grado de Doctor de Filosofía. California Institute of Technology, Pasadena, California. 251 p.
8. Ramos D., Antayhua Y., 2010. Sismicidad en la Región del volcán Sabancaya (Arequipa), periodo 2009-2010. Informe Técnico N° A6567. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. 1-50 p.

Link de enlace:

<http://www.ingemmet.gob.pe/>

<http://ovi.ingemmet.gob.pe/>

<http://www.senamhi.gob.pe/site/volcan/>

<http://www.mirovaweb.it/?action=volcanoes>

ANEXO I

HELLICORDERS ESTACION SISMICA SAB07 Y SAB11:

Algunos hellicorders con actividad sísmica resaltante
registrado durante el año 2015

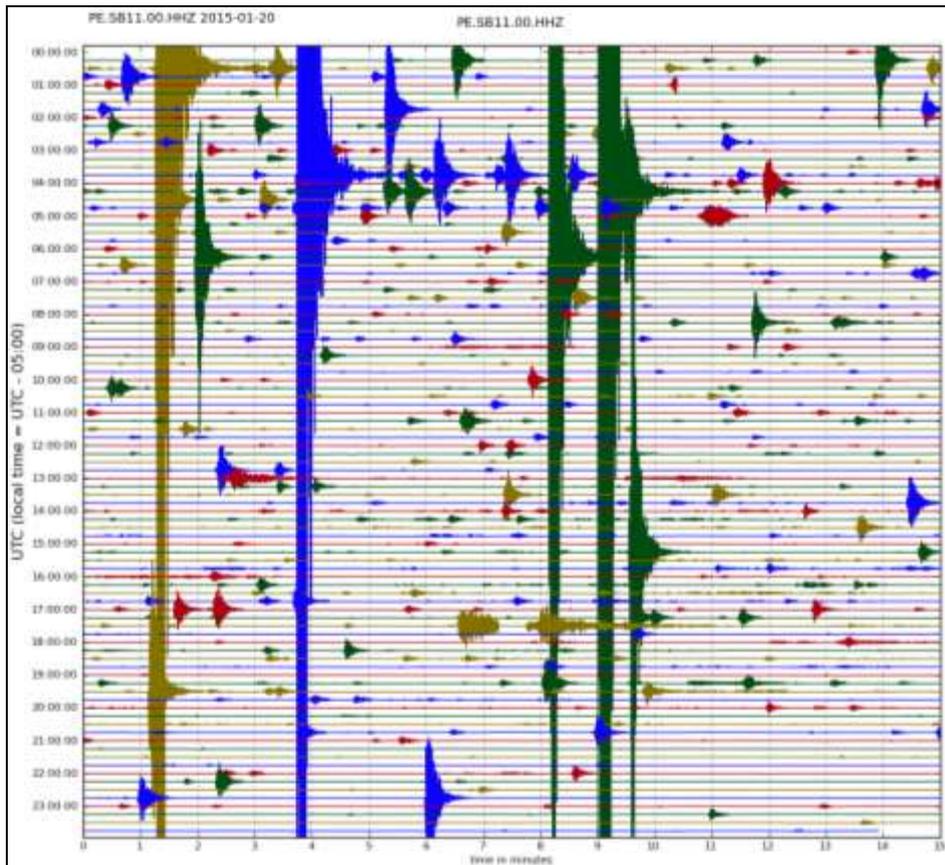


Figura 1.1. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 20 de enero del 2015 (tiempo UTC).

OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO
INGEMMET

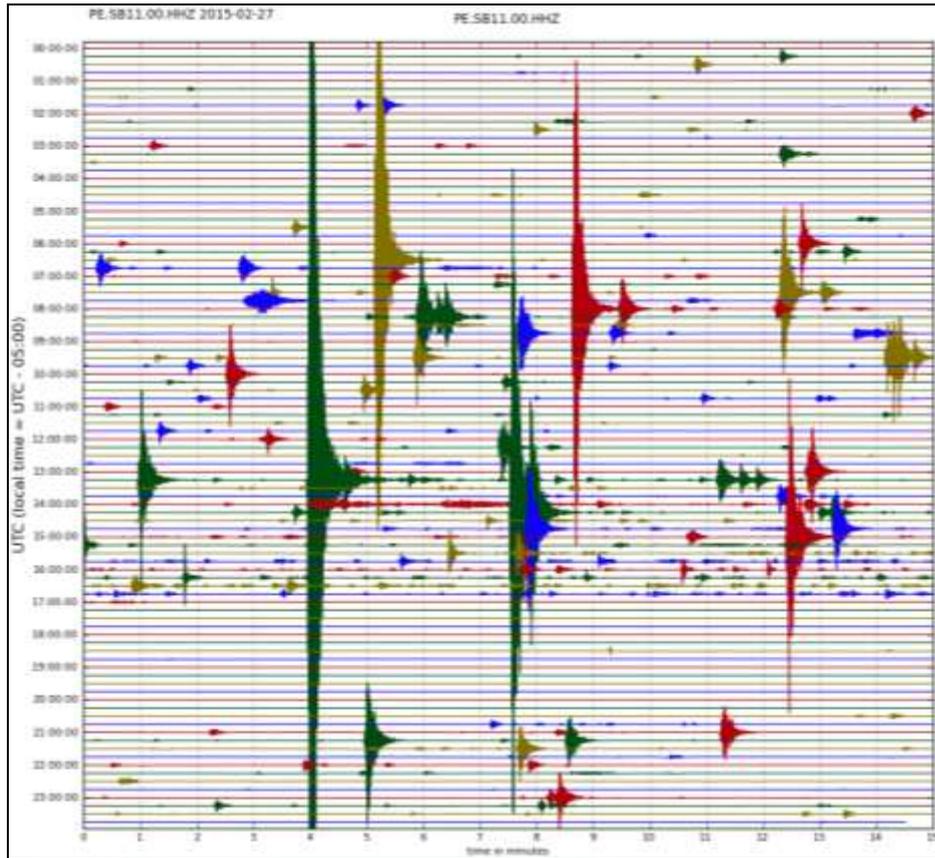


Figura 1.2. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 27 de febrero del 2015 (tiempo UTC).

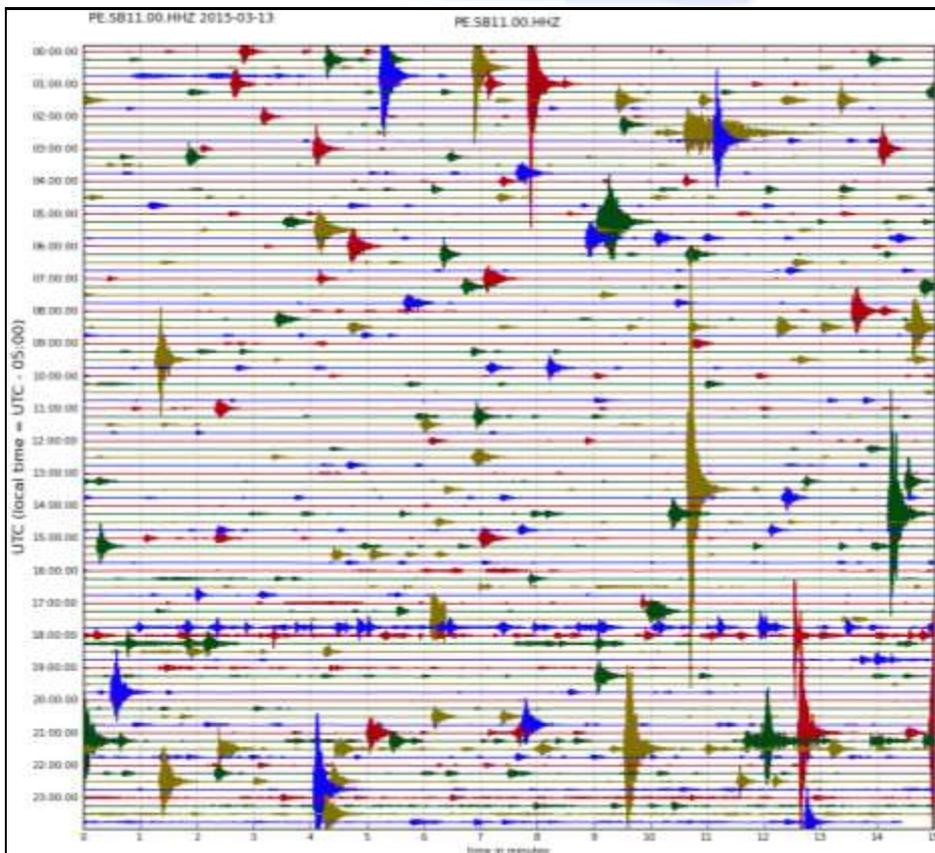


Figura 1.3. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 13 de marzo del 2015 (tiempo UTC).

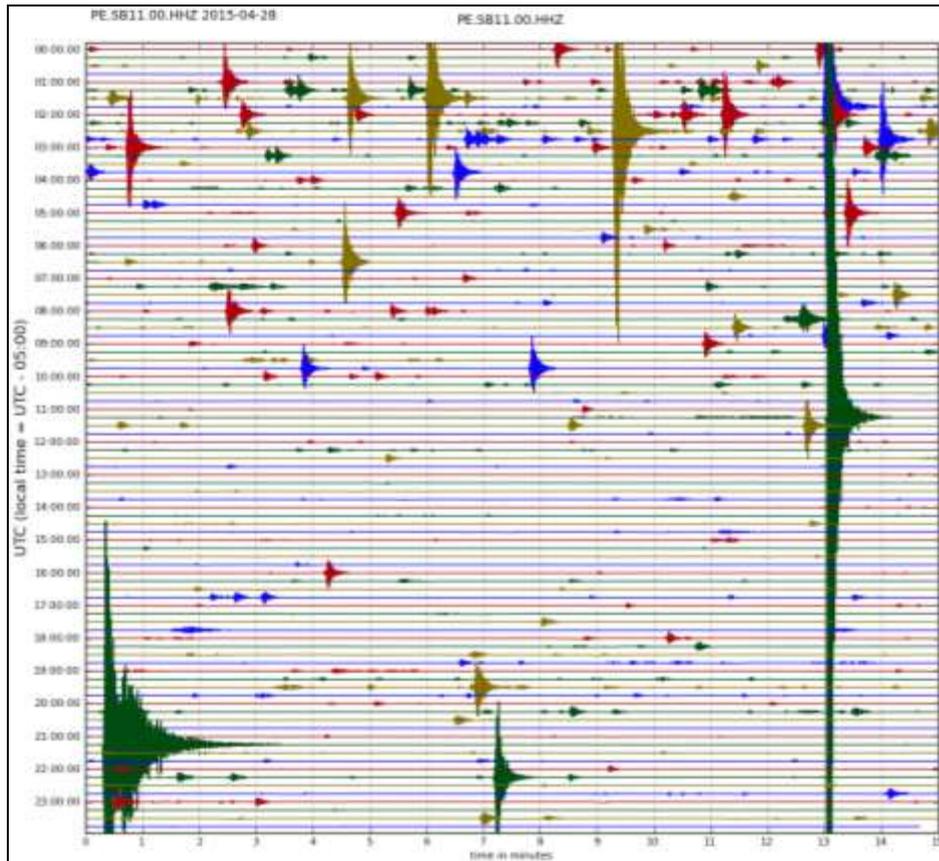


Figura 1.4. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 28 de abril del 2015 (tiempo UTC).

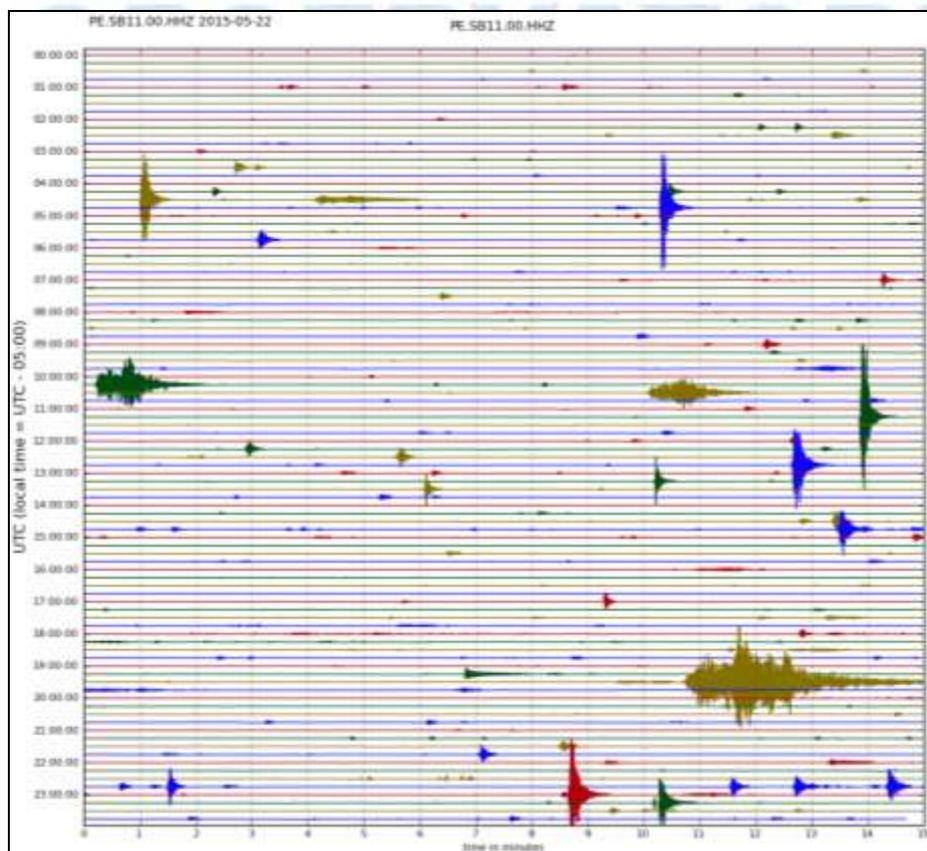


Figura 1.5. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 22 de mayo del 2015 (tiempo UTC).

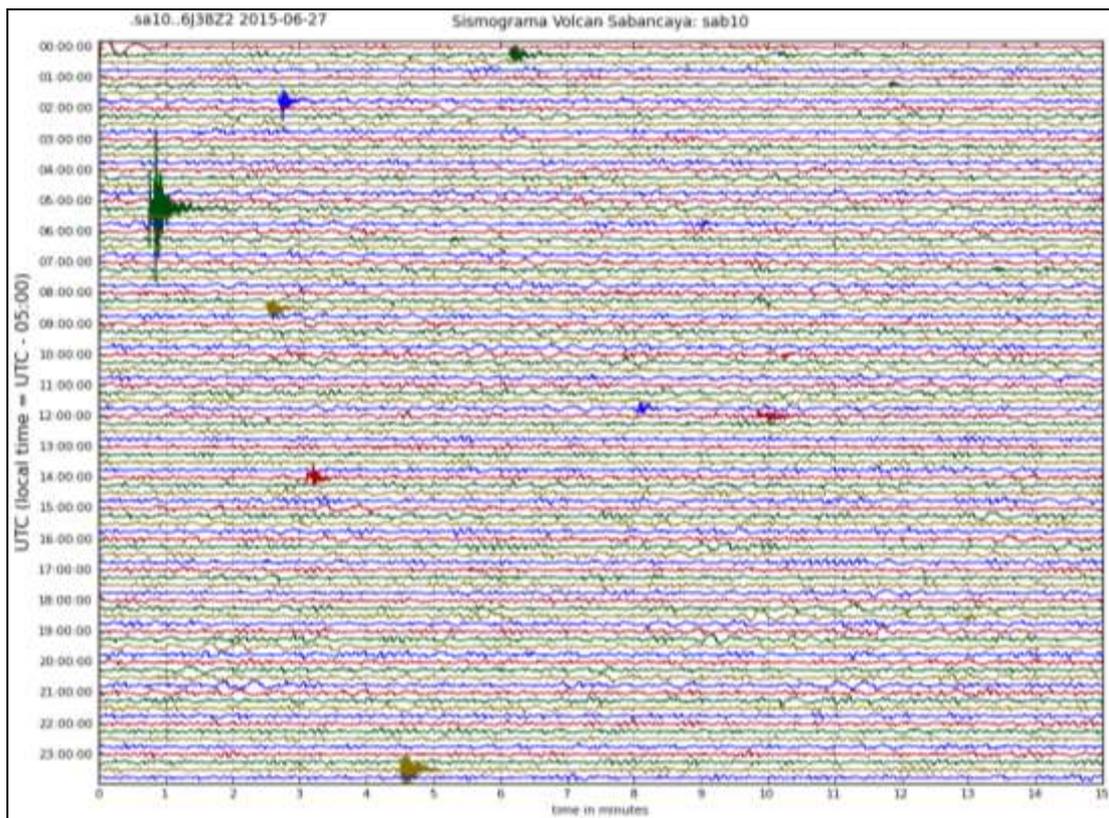


Figura 1.6. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 27 de junio del 2015 (tiempo UTC).

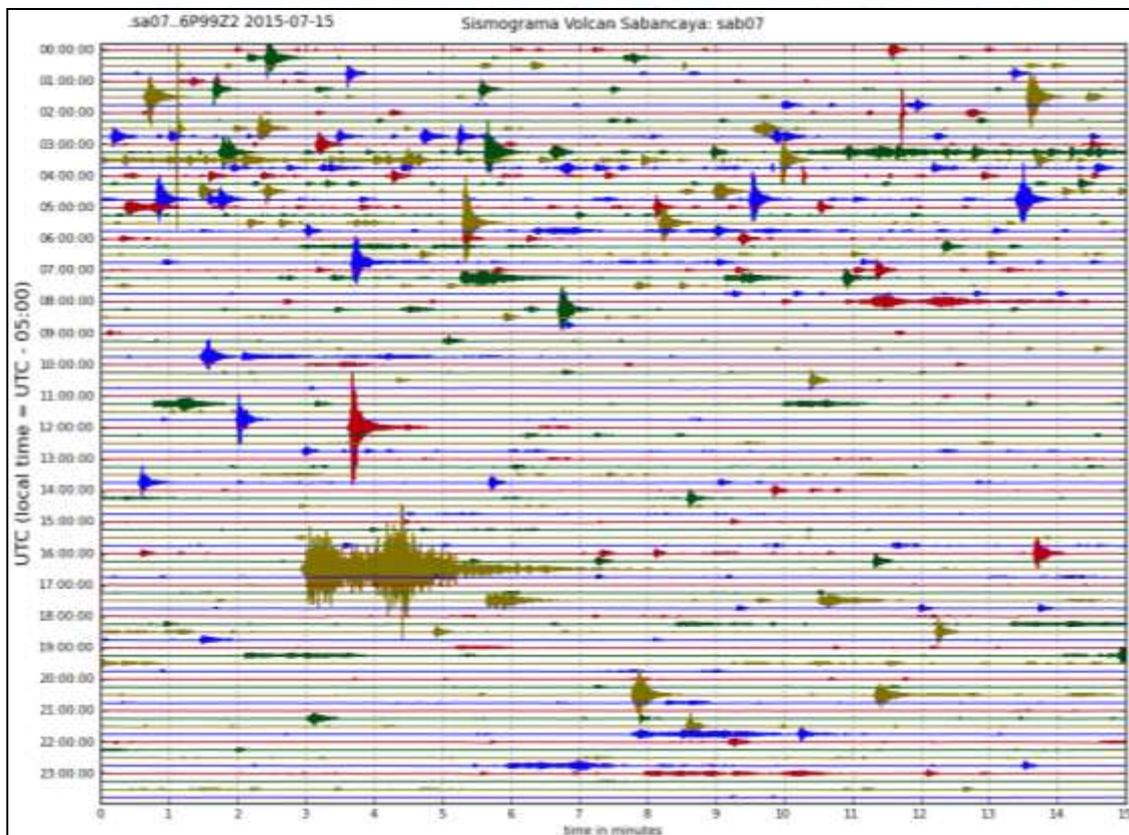


Figura 1.7. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 15 de julio del 2015 (tiempo UTC).

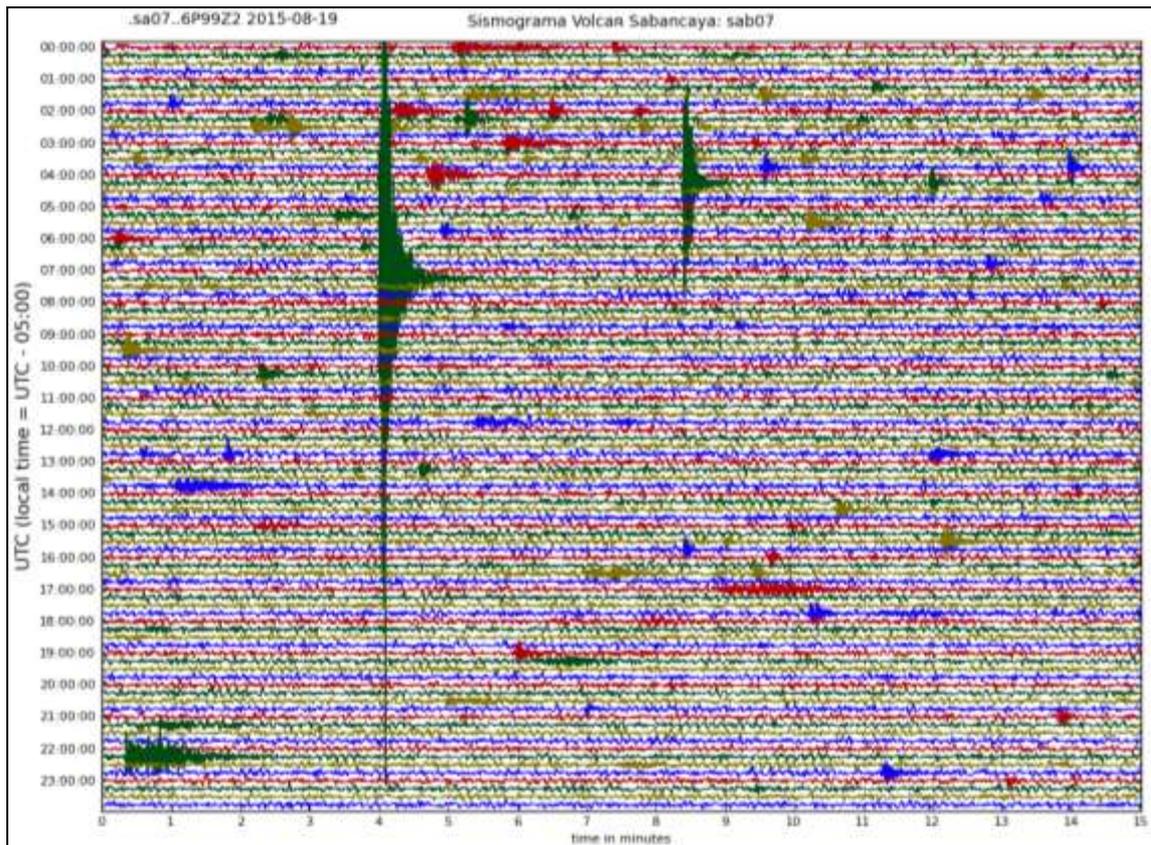


Figura 1.8. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 19 de agosto del 2015 (tiempo UTC).

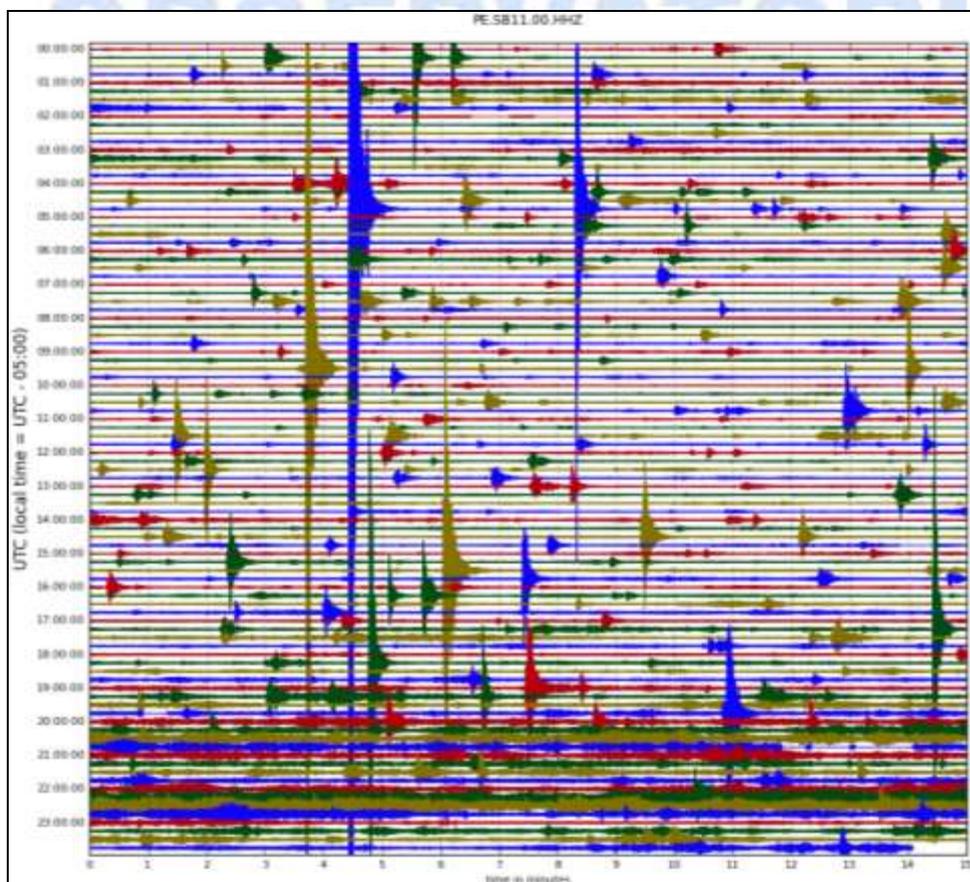


Figura 1.9. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 11 de septiembre del 2015 (tiempo UTC).

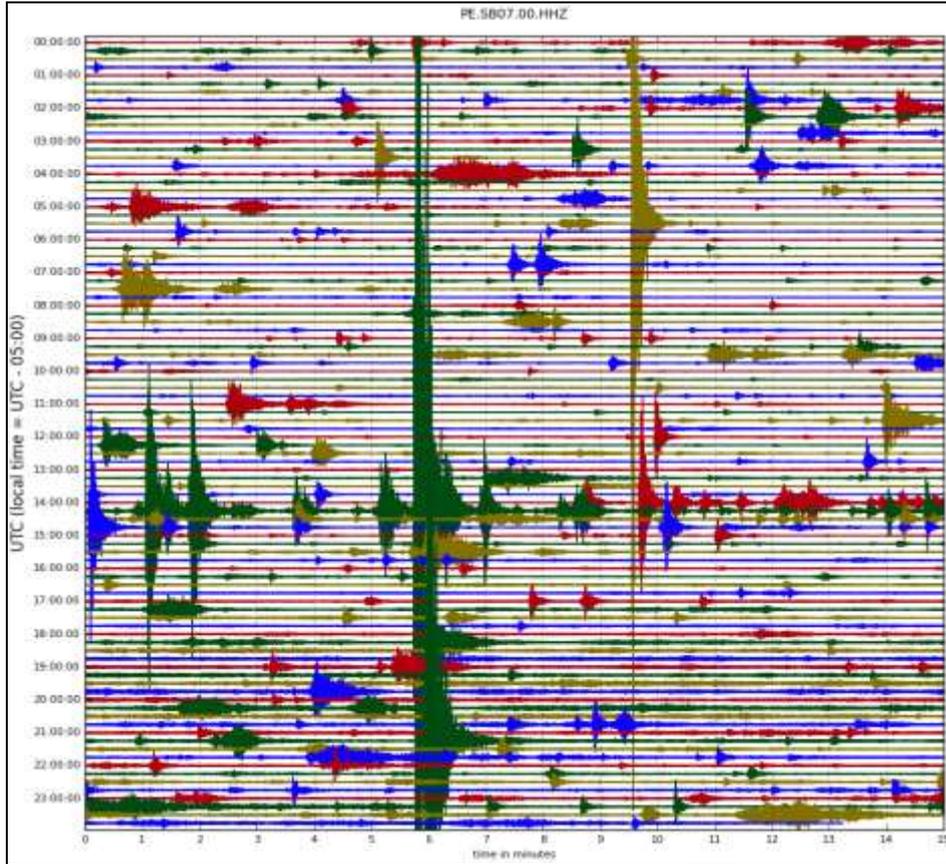


Figura 1.10 Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 29 de octubre del 2015 (tiempo UTC).

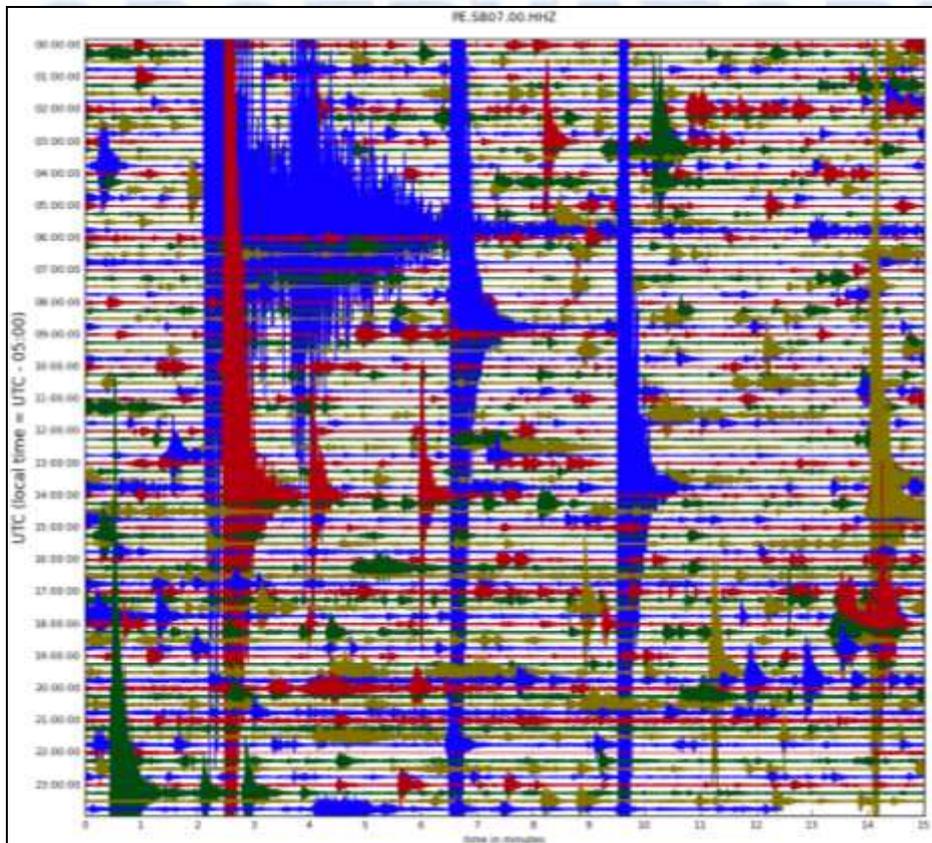


Figura 1.11. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 26 de noviembre del 2015 (tiempo UTC).

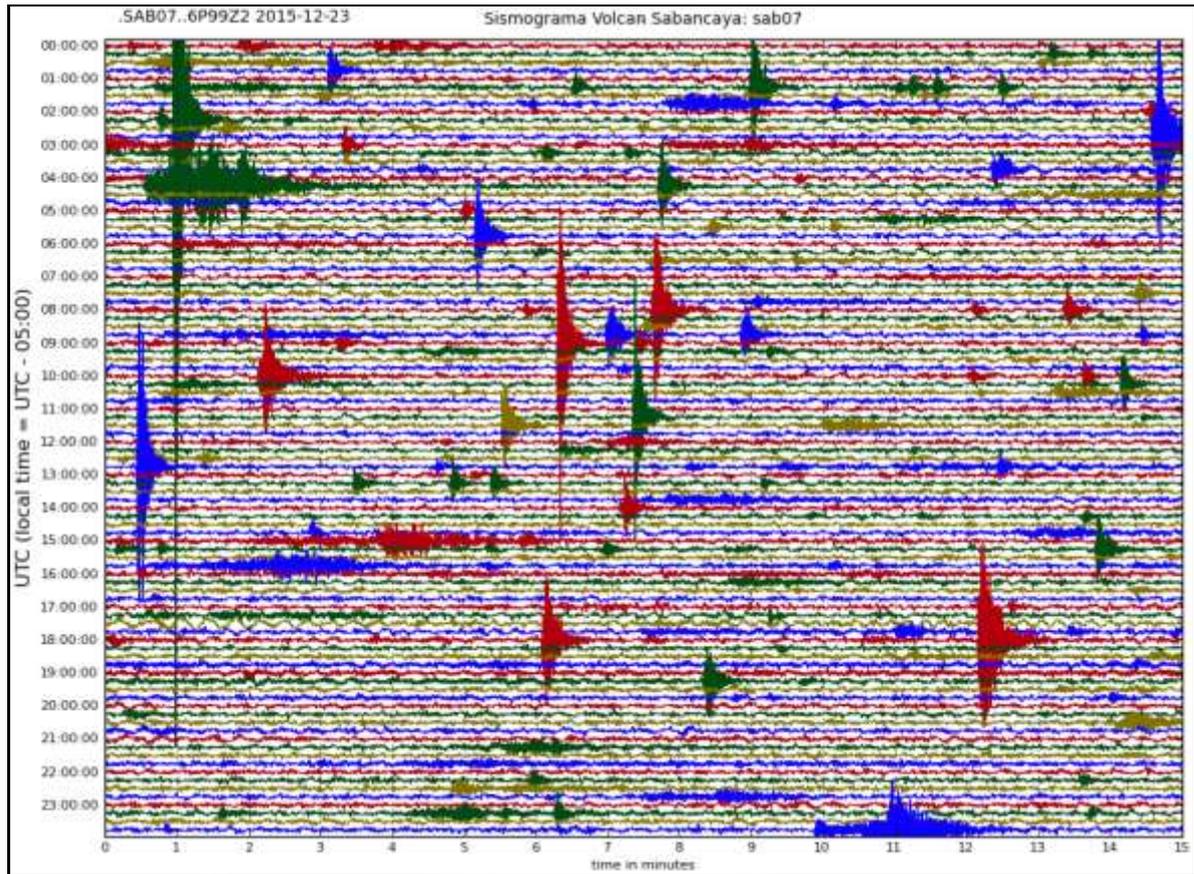


Figura 1.12. Actividad sísmica del volcán Sabancaya registrada el día 23 de diciembre del 2015 (tiempo UTC).

OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO
INGEMMET