

Informe Técnico N° 6576

**Monitoreo Sísmico Temporal y Caracterización
Geoquímica de Fumarolas y Fuentes Termales del
volcán Huaynaputina**



POR:

**YANET ANTAYHUA VERA
DOMINGO RAMOS PALOMINO
PABLO MASÍAS ALVAREZ**

 **INGEMMET**

CONTENIDO

RESUMEN	4
1.0 INTRODUCCIÓN	5
2.0 ASPECTOS GENERALES	7
2.1 ANTECEDENTES	7
2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	7
2.3 GEOMORFOLOGÍA, VULCANOLOGÍA Y RIESGOS GEOLÓGICOS	8
2.4 MARCO TECTÓNICO	8
2.5 TRABAJOS ANTERIORES	9
2.5 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	9
3.0 MONITOREO SÍSMICO TEMPORAL DEL VOLCÁN HUAYNAPUTINA	11
3.1 RED SÍSMICA TEMPORAL DEL HUAYNAPUTINA (RSTH)	11
3.1.1 ESTACIONES SÍSMICAS DE BANDA ANCHA	11
3.1.2 ESTACIONES SÍSMICAS DE PERIODO CORTO	11
3.1.3 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS	13
3.1.4 OPERATIVIDAD DE LA RSTH	14
3.2 TRABAJOS DE CAMPO	14
3.2.1 LOGÍSTICA	15
3.2.2 RECUPERACIÓN DE DATOS	15
A: RECUPERACIÓN DE DATOS SÍSMICOS DESDE ESTACIONES SARA	15
B: RECUPERACIÓN DE DATOS SÍSMICOS DESDE ESTACIONES GURALP	16
3.3 TRABAJOS DE GABINETE	16
3.3.1 ANÁLISIS DE DATOS SÍSMICOS	16
A: ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	17
B: ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS	17
3.3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA	18
3.4 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS	20
3.4.1 CLASIFICACIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS	20
A: SISMOS CON $T(S-P) < 2,5S$	21
B: SISMOS CON $2,6 < T(S-P) < 5,0 S$	21
C: SISMOS CON $5,1 < T(S-P) < 10,0 S$	21
D: SISMOS CON $10,1 < T(S-P) < 20,0 S$	21
E: SISMOS CON $T(S-P) > 20,1 S$	21
F: OTRO TIPO DE SEÑALES SÍSMICAS	22
3.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA Y LA ENERGÍA ACUMULADA	24
3.5 LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE SISMOS	24
3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS	24
3.5.2 PROGRAMA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL	27
3.5.3 MODELO DE VELOCIDAD	27
3.5.4 RELACIÓN DE VELOCIDAD VP/VS	28

3.5.5	CÁLCULO DE LA MAGNITUD	29
3.6	RESULTADOS DE LA LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL	29
3.6.1	DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN SUPERFICIE	34
3.6.2	DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN PROFUNDIDAD	35
3.7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
4.0	CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LAS FUMAROLAS Y FUENTES TERMALES	41
4.1	FUMAROLAS	41
4.1.1	UBICACIÓN DE LAS FUMAROLAS	41
4.1.2	ADQUISICIÓN DE DATOS	43
4.1.3	CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE LAS FUMAROLAS	45
4.1.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	46
4.2	FUENTES TERMALES	47
4.2.1	UBICACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES	47
4.2.2	ADQUISICIÓN DE DATOS	49
4.2.3	CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE LAS FUENTES TERMALES	50
4.2.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
	A: TEMPERATURA (T°)	51
	B: CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) Y SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS	51
	C: TIPOS DE AGUA	51
	D: ANIONES MAYORITARIOS Y POSIBLE ORIGEN DEL AGUA	53
	E: ANIONES MAYORITARIOS Y POSIBLE ORIGEN DEL AGUA	54
	F: GEOTERMÓMETRO	54
	CONCLUSIONES	56
	RECOMENDACIONES	58
	AGRADECIMIENTOS	
	BIBLIOGRAFÍA	59
	ANEXO 1	63

RESUMEN

Este informe presenta los resultados del análisis y localización de señales sísmicas obtenidas mediante una red sísmica temporal entre el 15 de abril y el 30 de octubre de 2010 en el volcán Huaynaputina ($16^{\circ}45'S$; $70^{\circ}51'O$; 4850 msnm); asimismo, se presenta la caracterización geoquímica de las fumarolas y fuentes termales localizadas en el cráter y alrededores de este volcán.

La sismicidad registrada por la Red Sísmica Temporal del Huaynaputina (RSTH), ha sido clasificada en cinco rangos por diferencias de tiempos de arribo T(S-P): $< 2,5$ s; $2,6$ s $< 5,0$ s; $5,1$ s $< 10,0$ s; $10,1$ s $< 20,0$ s y $> 20,0$ s. Así, de un total de 4561 señales sísmicas analizadas, la mayor concentración se presenta entre los rangos de T(S-P) $> 20,1$ s, con el 30,5%, seguidamente, se encuentra la sismicidad con T(S-P) entre 10,1 y 20,0 s con el 26%, y la sismicidad con T(S-P) de 5,1 a 10,0 s, con el 16%. La menor cantidad de señales sísmicas se concentran entre los rangos con T(S-P) de 2,6 a 5,0 s y T(S-P) $< 2,5$ s con el 15% y $< 12,5\%$ respectivamente. En este estudio, se asume que la sismicidad que podría estar asociada al volcán Huaynaputina comprende los rangos de T(S-P) inferiores a 5,0 s.

Asimismo, se ha estimado valores de la energía sísmica emitida por el Huaynaputina durante el periodo 12 de mayo al 27 de octubre de 2010. La solución matemática de estos cálculos se ha aplicado considerando ventanas de 10 s de duración. Estos valores de energía, generalmente se encuentran por debajo de 0,1 MJ. Además, se ha estimado el valor de la energía total acumulada al final de este periodo de estudio. La energía acumulada es de 9765 MJ, a razón de 58 MJ por día.

La localización hipocentral de 107 sismos locales, muestran que estos sismos ocurrieron a profundidades superficiales, menores a 6 km y con magnitudes pequeñas entre 0,9 y 2,7 Md. En superficie, esta sismicidad se distribuye en dos agrupamientos: el primero, al NO y el segundo al S y SO del cráter del volcán Huaynaputina en un área aproximada de 270 km². Por su distribución en superficie y en profundidad, el primer agrupamiento podría estar asociado al lineamiento NO-SE que corta el cráter del Huaynaputina y se extiende hasta el Cerro El Volcán. El segundo agrupamiento, por su dispersión, no puede ser asociado a algún fallamiento o lineamiento particular en la zona. Mientras tanto, en el anfiteatro del volcán no se ha registrado sismicidad, aun cuando la red estuvo instalada rodeando y dentro de la misma, lo que podría indicar una relativa estabilidad de la actividad sísmo-volcánica del Huaynaputina.

Por otro lado, la caracterización geoquímica de las fumarolas y de las fuentes termales circundantes al volcán Huaynaputina muestran que las fumarolas son de naturaleza ácida (pH=5), con temperaturas de 78,7 °C, presencia de gases de CO₂ y de S, en una matriz de vapor de agua ($> 90\%$). Con respecto a las fuentes termales, estas son aguas de tipo Clorurada-Sulfatada Alcalina y Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Terrea, que alcanzan temperaturas de hasta 75,4 °C, además presentan pH que va de ligeramente ácidas a ligeramente básicas. Por sus características, estas fuentes de agua podrían tener su origen en fluidos volcánicos; por tanto, el volcán Huaynaputina presentaría un sistema volcánico-hidrotermal.

1.0 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los resultados de los análisis aplicados a la data sísmica y geoquímica, obtenidos de una campaña al volcán Huaynaputina del 15 de abril al 27 de octubre de 2010. Este trabajo se realizó a solicitud de la Municipalidad Provincial General Sánchez Cerro – MPGSC, mediante Oficio N° 095-2010-A/MPGSC-O del 24 de febrero de 2010 (ver Anexo1). Luego de las respectivas coordinaciones, la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET, designo a los profesionales Msc. Yanet Antayhua, Ing. Domingo Ramos y Lic. Pablo Macías del Grupo de Vulcanología – Monitoreo Volcánico de la O.D. Arequipa, para prestar apoyo técnico en la instrumentación sísmica y evaluación del volcán Huaynaputina.

Bajo estas circunstancias y con el apoyo logístico proporcionado por la MPGSC, se efectuó un plan de trabajo dividido en cuatro etapas:

- 1) Reconocimiento de campo e instalación de instrumentación sísmica y geoquímica en el volcán Huaynaputina.
- 2) Recuperación de datos sísmicos.
- 3) Recuperación de datos sísmicos y geoquímicos.
- 4) Desinstalación de instrumentación del volcán Huaynaputina.

Bajo este contexto, se ha elaborado este informe que está dividido en 4 títulos los cuales se describen de la siguiente manera:

- El primer título denominado aspectos generales presenta los antecedentes que condujeron a la ejecución de este trabajo, la ubicación de la zona de estudio, la geomorfología, vulcanología y riesgos geológicos; asimismo, se describe el marco tectónico, los trabajos anteriores y se menciona los objetivos que se pretende alcanzar con este estudio.
- El segundo título llamado, monitoreo sísmico temporal del volcán Huaynaputina, describe los siguientes temas: a) La red sísmica temporal del Huaynaputina (RSTH), que explica las características de las estaciones de banda ancha y de periodo corto, así como su distribución y operatividad; b) El trabajo de campo, que describe el trabajo logístico y la recuperación de data sísmica tanto desde las estaciones Sara y Guralp; c) El trabajo de gabinete, que detalla el análisis en el dominio del tiempo, en el dominio de las frecuencias y la estimación de la energía; d) Resultados de los análisis aplicados a la data sísmica obtenida por la RSTH; donde se describe la clasificación de la sismicidad en función de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas primarias y secundarias (P y S). Esta sismicidad fue distribuida en cinco rangos: T(S-P): < 2,5 s; 2,6 s < 5,0 s; 5,1 s < 10,0 s; 10,1 s < 20,0 s y >20,0 s. Asimismo, se mencionan otros tipos de señales sísmicas que fueron registrados por la RSTH, y se describe la distribución de la energía y la energía acumulada en este periodo de estudio; d) La localización hipocentral de sismos comprende temas como: la construcción de una base de datos hipocentrales;

asimismo, se provee de una dirección, para descolgar de internet, el software empleado para la localización hipocentral. Se explica el modelo de velocidad, la relación V_p/V_s (V_p =Velocidad de la onda P, V_s =velocidad de la onda S) y el cálculo de magnitud; e) Resultados de la localización hipocentral. Aquí, se presenta la distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad; y f) Discusión de los resultados obtenidos en el monitoreo sísmico.

- En el tercer título denominado, caracterización geoquímica de fumarolas y fuentes termales, se describen los siguientes subtítulos: a) Fumarolas, se describe la identificación de puntos de emisión de fumarolas en el cráter del volcán Huaynaputina, medición de parámetros fisicoquímicos, la instalación de una estación de monitoreo de temperatura en la fumarola más caliente, la toma de muestra de gases respectivo y se discute los resultados obtenidos de los mismos; b) Fuentes de agua termales, se describe la medición de parámetros fisicoquímicos y toma de muestras en 3 fuentes de agua termales ubicados alrededor del volcán Huaynaputina; además, se presenta y discute los resultados obtenidos
- En el cuarto título, se mencionan las conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo.

Finalmente, se mencionan las recomendaciones, agradecimientos a quienes hicieron posible la realización del presente estudio y las fuentes bibliográficas utilizadas. El anexo es adjuntado al final de este informe.

2.0 ASPECTOS GENERALES

2.1 ANTECEDENTES

Este trabajo se realizó a solicitud de la Municipalidad Provincial General Sánchez Cerro – MPGSC (Oficio N° 095-2010-A/MPGSC-O del 24 de febrero de 2010) cuyo tenor manifiesta la preocupación general de los habitantes próximos al volcán Huaynaputina quienes han sentido ruidos y sismos de regular intensidad. Asimismo, el temor generalizado de una posible reactivación del Huaynaputina de quien se conoce su reciente historia eruptiva y la magnitud de los daños provocados, motivó la ejecución del presente estudio.

2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Huaynaputina, geográficamente está localizado en las coordenadas: 16°45'S, 70°51'O y forma parte de la Zona Volcánica Central (ZVC). Geopolíticamente, este volcán se encuentra ubicado en la región Mariátegui, subregión Moquegua, en la Provincia General Sánchez Cerro, con su capital Omate (Figura 1).

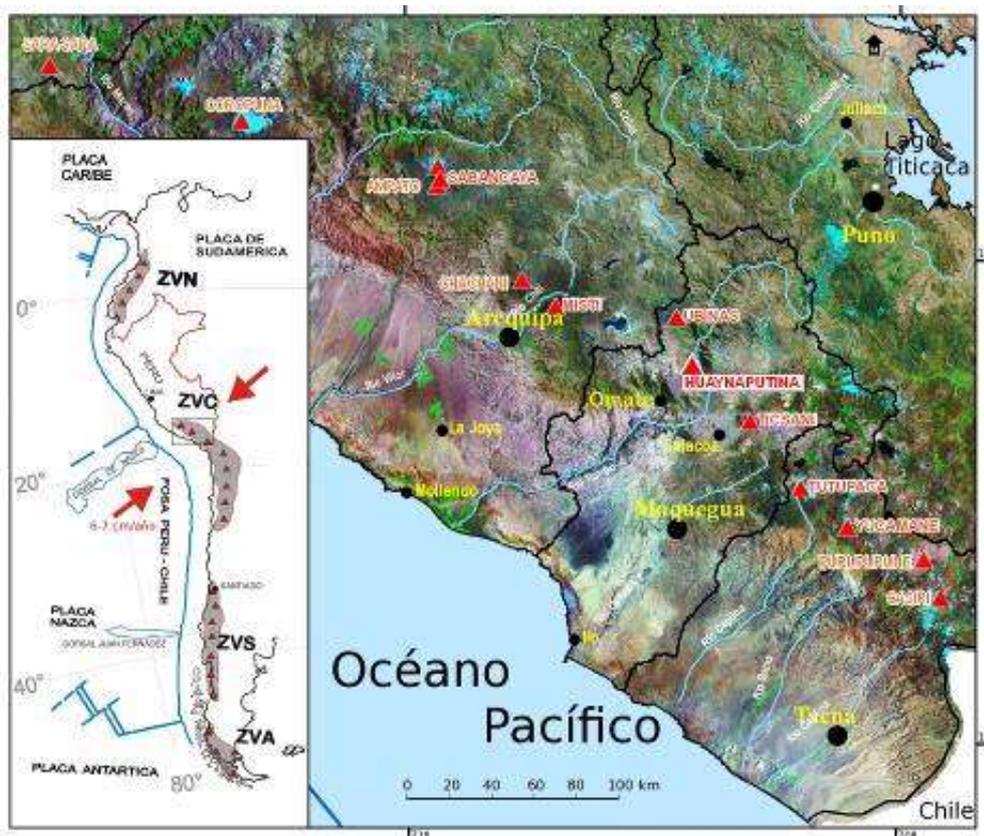


Figura 1. Ubicación del volcán Huaynaputina en la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes de Sudamérica.

2.3 GEOMORFOLOGÍA, VULCANOLOGÍA Y RIESGOS GEOLÓGICOS

El estrato-volcán Huaynaputina, presenta un espectacular anfiteatro en forma de herradura a ~4400 msnm, seccionado hacia el Este, por donde discurre el río Tambo, a ~2000 m de desnivel; dentro del anfiteatro, existen 3 cráteres, dos diques y un domo de lava parcialmente disectado (Lavallée et al., 2006). Un cuarto cráter, un “mar”, se localiza fuera del anfiteatro hacia el sector Sur (De Silva et al., 2000).

Entre el 19 de febrero y 6 de marzo de 1600 D.C., presentó una de las erupciones más grandes registradas en tiempos históricos, con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 6 (Thouret et al., 1999, 2002; De Silva and Zielinski, 1998); expulsando ~11 km³ de magma (Adams et al., 2001). Durante esta erupción se registró, localmente, más de 1000 fallecidos, más de 10 poblados sepultados y pérdidas considerables en la agricultura y ganadería. Los depósitos, también, afectaron la infraestructura y la economía a nivel regional, siendo Arequipa y Moquegua las ciudades más afectadas. A nivel global, las cenizas suspendidas como consecuencia de esta gran erupción habría alcanzado hasta los países de Bolivia y Chile (De Silva et al., 2000), además habría afectado la temperatura del planeta, ocasionado en el hemisferio norte, uno de los veranos más fríos de los últimos seis siglos (De Silva and Zielinski, 1998; Thamban et al., 2006).

2.4 MARCO TECTÓNICO

Los estudios realizados por Adams et al. (2001), De Silva and Francis (1990), Lavallée et al. (2006) remarcan que la actividad de los volcanes Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (UHTVG) se desarrolló, aproximadamente a 30 km del arco de la ZVC y en dirección oblicua del mismo (Isacks, 1988; McNulty et al., 1998; Thouret et al., 2005; Lavallée et al., 2006). Asimismo, estos volcanes estarían controlados por estructuras más complejas que la principal falla de rumbo, que controla el arco volcánico del sur del Perú.

El análisis de estructuras realizadas por Lavallée et al. (2006; 2009), a escala regional y local, mediante imágenes satelitales Landsat, trabajos de campo in situ y la información obtenida de los cuadrángulos de Omate e Ichuña (INGEMMET 2000a,b), muestran que en el volcán Huaynaputina, existen cuatro sistemas de fallas y lineamientos importantes, orientados en dirección 1) N-S, 2) NO-SO, 3) E-O y 4) NO-SE (Figura 2-A). Los dos primeros sistemas están asociados al graben del río Tambo, el tercero es minoritario y el cuarto consiste de una serie de fallas de rumbo, paralelos a la ZVC. La longitud de estas fallas de rumbo varía entre 2-3 km hasta 25 km. Las observaciones realizadas en la caldera del volcán Huaynaputina y sus alrededores, muestran la influencia de las fracturas NO-SE y E-O en el emplazamiento de un domo, diques y la localización de los 3 cráteres en el anfiteatro del volcán (Figura 2-B).

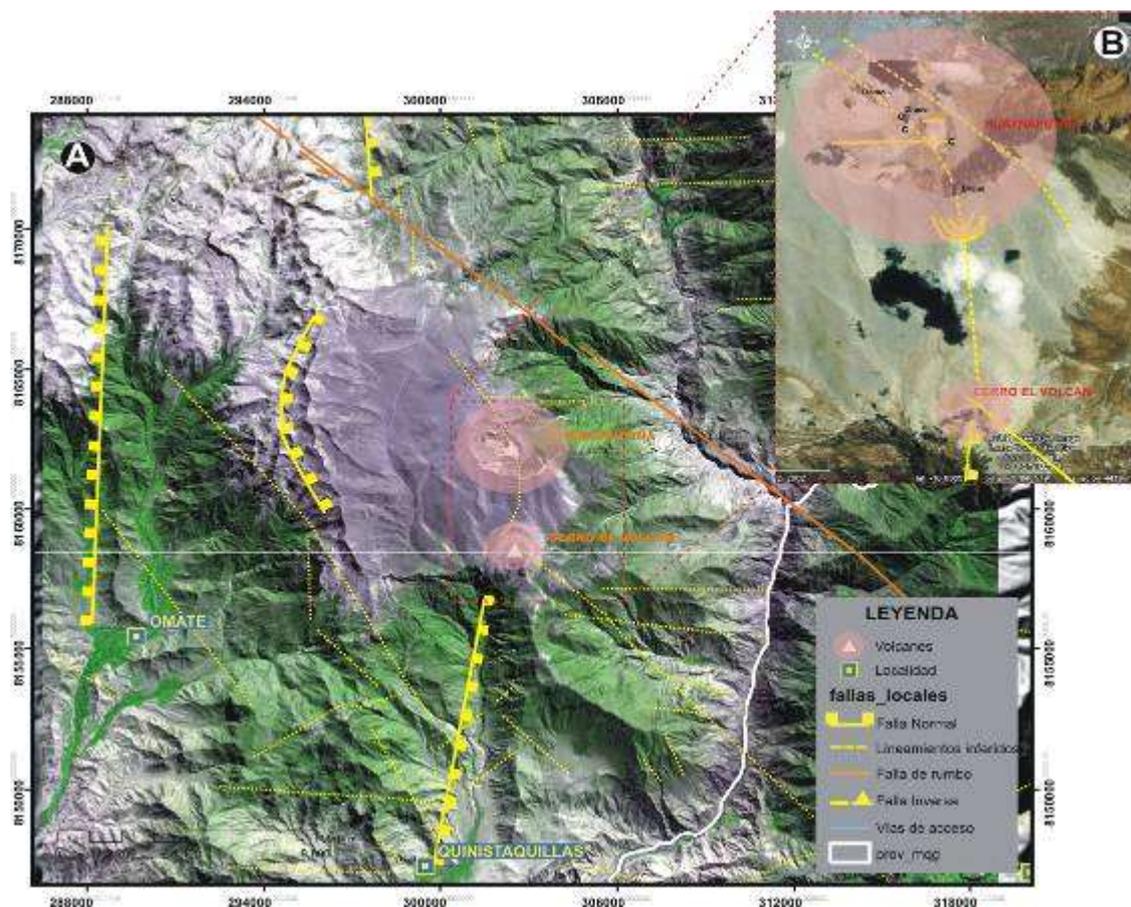


Figura 2. A). Distribución de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados en la zona del volcán Huaynaputina. B). Estructuras identificadas en el anfiteatro del volcán Huaynaputina; c=cráteres (Modificado de Lavallée et al., 2006; 2009).

2.5 TRABAJOS ANTERIORES

Los trabajos realizados en la zona de estudio se centran en descripciones detalladas de la geología, geomorfología, tectonismo asociado y evolución de la erupción del volcán Huaynaputina. Al cierre de este informe, no se tuvo conocimiento de algún trabajo sísmico y/o geoquímico que contemple la descripción de los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales y fumarolas en éste volcán. Sin duda, éste informe representa un gran aporte al conocimiento de éste volcán.

2.6 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos que se desean alcanzar con este estudio son:

- Determinar si el volcán Huaynaputina está sísmicamente activo.
- Conocer el tipo de sismicidad que se presenta en el volcán Huaynaputina y/o sus inmediaciones.
- Caracterizar la sismicidad volcánica del Huaynaputina.

- Identificar puntos de emisión de fumarolas en el cráter del volcán Huaynaputina.
- Identificar fuentes termales alrededor del volcán y realizar el muestreo respectivo.
- Realizar la caracterización geoquímica de fumarolas y fuentes termales.
- Establecer una línea base de comparación para la realización de futuros trabajos de caracterización y monitoreo geoquímico del volcán Huaynaputina.

3.0 MONITOREO SÍSMICO TEMPORAL DEL HUAYNAPUTINA

El monitoreo sísmico efectuado en el volcán Huaynaputina se inició el 15 de abril de 2010 y se extendió hasta el 27 de Octubre de 2010. Este estudio se realizó en base al análisis y localización hipocentral de la información sísmica registrada por una red sísmica denominada Red Sísmica Temporal del Huaynaputina (RSTH).

3.1 RED SÍSMICA TEMPORAL DEL HUAYNAPUTINA (RSTH)

La Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina (RSTH) estuvo compuesta por 6 sismógrafos sísmicos digitales, de los cuales, 2 son de banda ancha y 4 de periodo corto.

3.1.1 ESTACIONES SÍSMICAS DE BANDA ANCHA

Los sismógrafos de banda ancha que se instalaron en el volcán Huaynaputina son marca GURALP, modelo 6TD (Figura 3-A). Este tipo de estaciones están compuestas por tres sensores triaxiales (Z, N-S y E-O), un digitalizador y un disco de almacenamiento integrados dentro de un “cilindro” de 15,5 cm de diámetro x 16 cm de alto. El rango de sensibilidad de estos sensores va desde 0,033 Hz (30 s) hasta 100 Hz. La calibración del tiempo de registro se realiza con un GPS tipo CMG, cuya antena se extiende varios metros desde la estación. Además posee un disco externo para la recuperación de la data sísmica (back up). En total tiene un peso de 3.0 kg lo que permite su fácil transporte en zonas de topografía difícil como los volcanes. La configuración y procesamiento de estas estaciones se puede realizar desde plataforma Windows mediante los programas propios del sistema GURALP.

3.1.2 ESTACIONES SÍSMICAS DE PERIODO CORTO

Las estaciones sísmicas de periodo corto que operaron en el volcán Huaynaputina son de marca SARA, modelo SL06 (Figura 3-B). Este tipo de estaciones están compuestas por tres sensores triaxiales (Z, N-S y E-O), un digitalizador y una memoria USB de almacenamiento de data, todos integrados en una “cajita” de 19 cm x 16,5 cm x 8 cm. La sensibilidad de estos sensores va desde 4,5 Hz. La configuración de estas estaciones se realiza bajo comandos telnet y ftp, y/o bajo dominio del sistema operativo ARM Linux. La principal ventaja de este tipo de estaciones es el poco consumo de energía (< 3 Wats) y su fácil transporte e instalación.

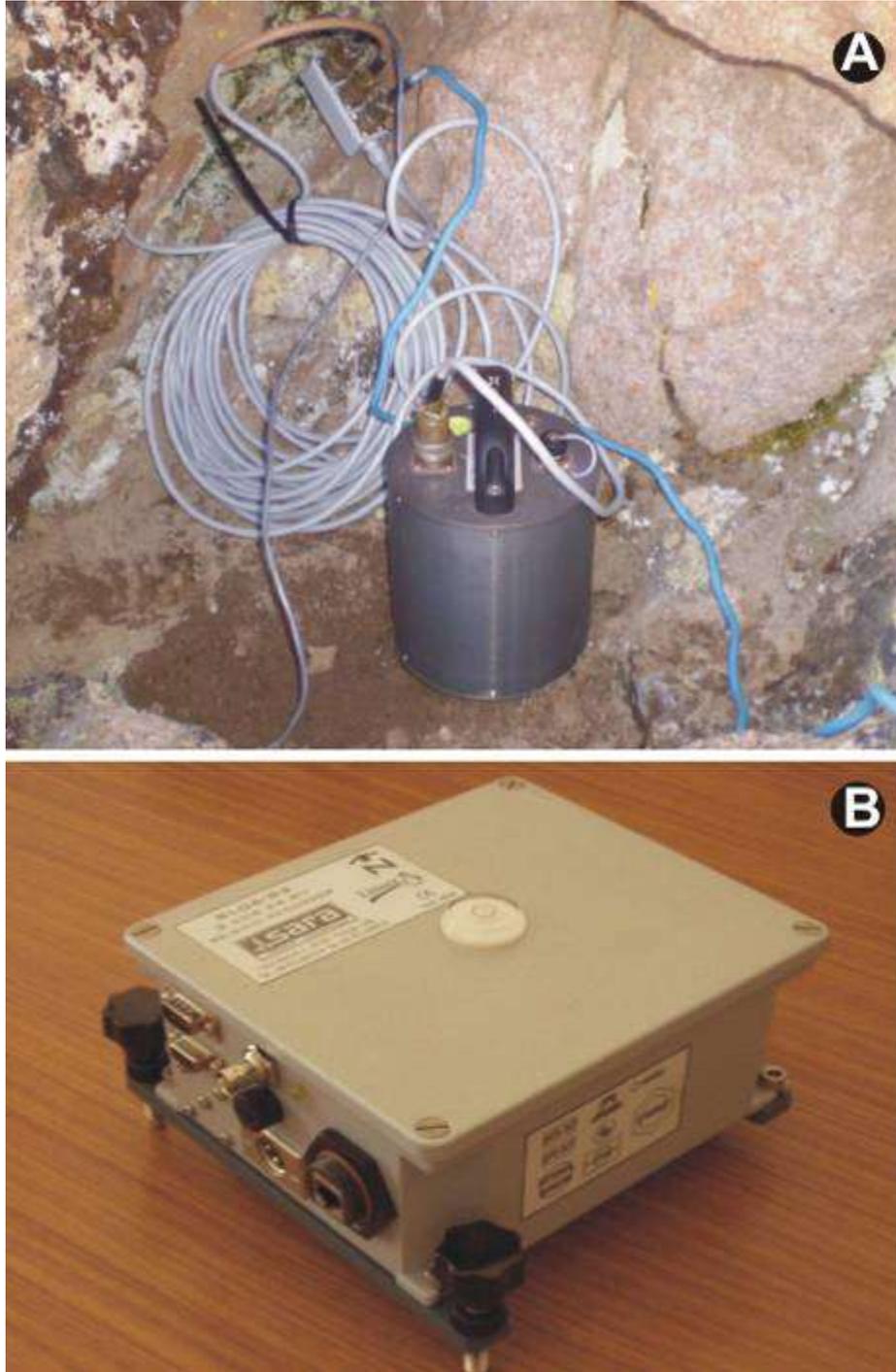


Figura 3. Tipos de estaciones sísmicas instaladas en el volcán Huaynaputina. A). Estación de banda ancha Guralp. B). Estación de periodo corto Sara.

3.1.3 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS

El Cuadro 1, muestra las coordenadas de cada una de las estaciones que conformaron la RSTH, así como el tipo de sensor y su respectiva codificación. En la Figura 4, se muestra, con triángulos en color negro y flechas, la ubicación geográfica de la RSTH.

Cuadro 1. Coordenadas del emplazamiento de las estaciones sísmicas de la RSTH.

Estación	Coordenadas WGS84		Elevación (msnm)	Tipo sismógrafo
	Longitud	Latitud		
HPN1	303177	8161234	4650	Sara
HPN2	302686	8161047	4672	Sara
HPN3	301461	8161452	4652	Sara
HPN4	301494	8162547	4692	Guralp
HPN5	302644	8162207	4235	Guralp
HPN6	301732	8162752	4701	Sara

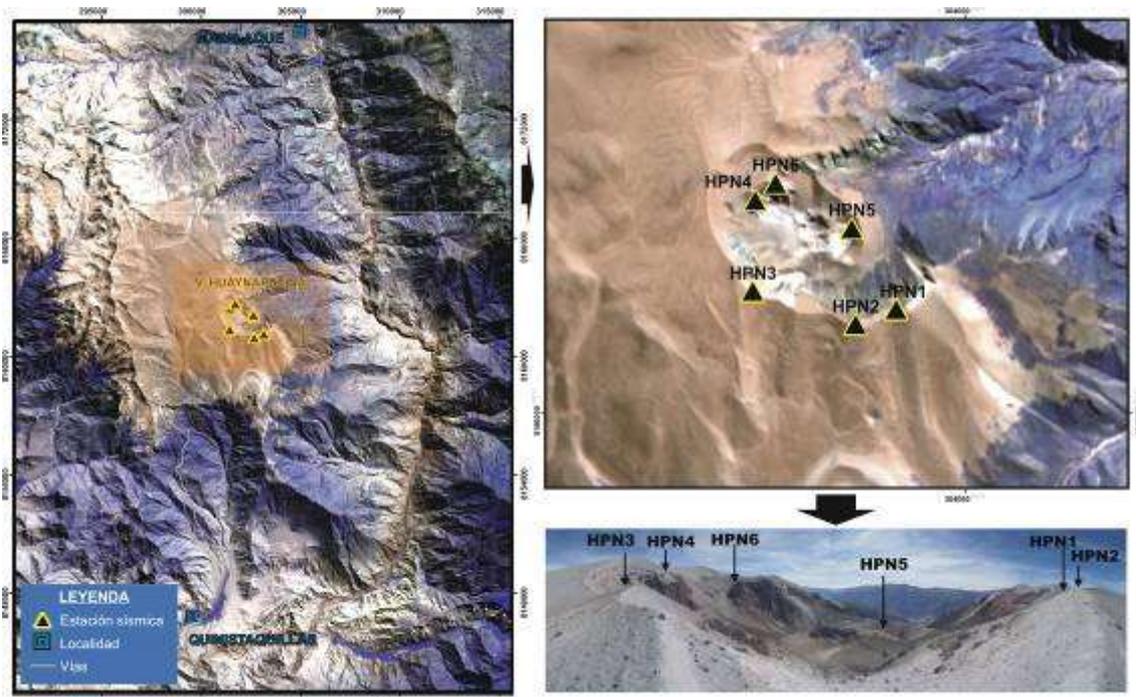


Figura 4. Distribución geográfica de las estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina (RSTH). Estas estaciones fueron emplazadas alrededor y dentro del anfiteatro del volcán Huaynaputina.

3.1.4 OPERATIVIDAD DE LA RSTH

La Figura 5, muestra el periodo de operatividad de la RSTH. El color rojo representa a las estaciones de banda ancha y el color verde a las estaciones de periodo corto. En esta figura, se observa que la estación HNA1 estuvo operativa durante todo el periodo de monitoreo; sin embargo, esta estación presentó problemas con la sincronización del tiempo hasta los primeros días de septiembre. Otros problemas de carácter electrónico se presentaron, también, en las estaciones HNA3, HNA4 y HNA5, los cuales fueron resueltos parcialmente.

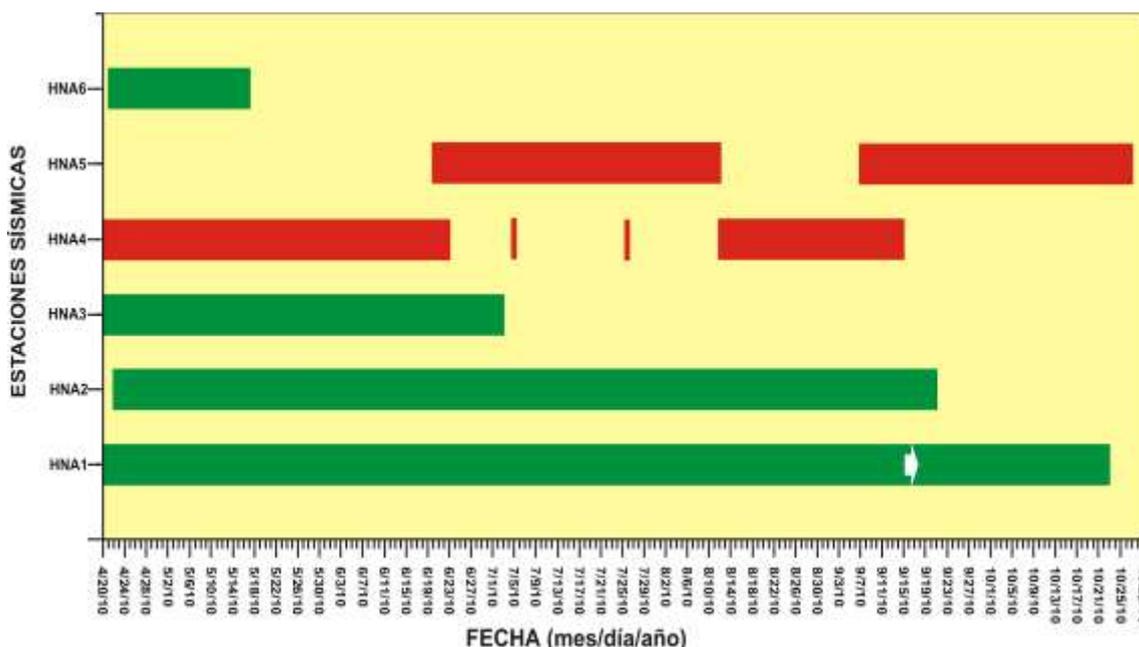


Figura 5. Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RSTH. Los rectángulos en color rojo representan a las estaciones de banda ancha Guralp y en color verde a las de periodo corto Sara.

3.2 TRABAJOS DE CAMPO

El trabajo de campo se desarrolló en coordinación con el secretario técnico de Defensa Civil de la Municipalidad provincial General Sánchez Cerro - MPGSC, Lic. José Peralta. Para el desarrollo de este trabajo se efectuaron 6 comisiones las cuales se describen brevemente de la siguiente manera:

- 1) Primera comisión (15-25 de abril de 2010), instalación de la Red Sísmica Temporal del Huaynaputina (RSTH).
- 2) Segunda comisión (14-21 de mayo de 2010), back-up de los datos sísmicos y conformación de una base de datos para el Huaynaputina. Asimismo, se tomaron muestras de agua y de fumarolas, se midió la temperatura del suelo en el interior del anfiteatro del Huaynaputina y sus alrededores.
- 3) Tercera comisión (21-26 de junio de 2010), back-up de los datos sísmicos y actualización de la base de datos.

- 4) Cuarta comisión (9-14 de agosto de 2010), back-up de los datos sísmicos y actualización de la base de datos.
- 5) Quinta comisión (13-18 de septiembre de 2010), back-up de los datos sísmicos y actualización de base de datos.
- 6) Sexta comisión (25-30 de octubre de 2010), back-up de los datos sísmicos y actualización de la base de datos. Recuperación de las estaciones que conformaron la RSTH.

3.2.1 LOGÍSTICA

De igual forma, el trabajo logístico fue coordinado con el Licenciado José Peralta - Secretario Técnico de Defensa Civil de la MPGSC. La distribución del trabajo logístico se desarrolló de la siguiente manera:

- Primer día: traslado de Arequipa a Quinistaquillas.
- Segundo día: traslado de Quinistaquillas al campamento en el Cerro Chen.
- Tercer y cuarto día: ascenso desde el campamento hasta el volcán Huaynaputina, trabajo de campo (recuperación de data, observaciones y muestreo de gases y agua), y retorno al campamento.
- Quinto día: descenso desde el campamento a Quinistaquillas.
- Sexto día: retorno a Arequipa.

3.2.2 RECUPERACIÓN DE DATOS

Para evitar mayores pérdidas de tiempo de registro, la recuperación de data sísmica se realiza generalmente en el campo. Para este fin, estos procedimientos se efectúan según normas y tareas propias para cada tipo de estación.

A: RECUPERACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS DESDE ESTACIONES

SARA: Estas estaciones tienen muy poca capacidad de almacenamiento (2 Gb a 24 bits de resolución); por tanto, requieren necesariamente de un backup mensual, de lo contrario, sobrescribe los registros y se perdería información.

Para este proceso se emplean comandos Telnet y FTP mediante el siguiente procedimiento:

Se conecta una Lap Top a la caja SARA mediante cable serial.

Empleando consolas DOS y mediante comandos telnet y ftp se accede a la estación sísmica para detener el sistema de registro y evitar dañar la configuración del sistema durante la operación.

```
telnet 164.16.121.150  
root  
/SLG/PRO>./stp
```

Mediante consola ftp, se accede al directorio de almacenamiento y se descarga la data sísmica.

```
ftp 164.16.121.150
root
/mnt/cf/SLG/EVT>mget 2009*
```

Finalmente, desde la consola telnet, se reinicia el sistema de adquisición de datos

```
/SLG/PRO>./srt -d DIG_SA2 -c CHA_SA2 -tag -t /root -u 2 &
```

B. RECUPERACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS DESDE ESTACIONES

GURALP: Estas estaciones poseen una capacidad de almacenamiento de 8 Gb, cubriendo cerca de dos meses de registro. Para la recuperación de data sísmica, se emplean un disco externo con el cual se procede de la siguiente manera:

- Se apaga la estación sísmica.
- Se conecta el disco externo a la estación y a la fuente de alimentación.
- Se enciende la estación sísmica. Las estaciones GURALP 6TD poseen un sistema automático de descarga.
- Finalizada la descarga, se apaga tanto la estación como el disco externo.
- Se desconecta el disco externo y se enciende la estación sísmica.

3.3 TRABAJOS DE GABINETE

En gabinete se realizaron los análisis de datos sísmicos así como la elaboración de cuadros estadísticos para conocer la recurrencia de la sismicidad del Huaynaputina.

3.3.1 ANÁLISIS DE DATOS SÍSMICOS

El procesamiento y análisis de los datos sísmicos fue desarrollado por el personal técnico del INGEMMET en Arequipa. Asimismo, el software y hardware empleados en estas tareas son de propiedad del INGEMMET.

El análisis aplicado a los datos sísmicos de la RSTH fue realizado en los dominios del tiempo y de las frecuencias. Para este fin, se ha empleado una versión modificada del programa llamado VOLCANALISIS (Lesage, 2009). Este programa que se desarrolla bajo plataforma Matlab, permite analizar gráficamente las ondas sísmicas (dominio del tiempo) y sus espectros frecuenciales (dominio de las frecuencias).

Para la realización del análisis de este informe, se ha revisado un total de 3922 archivos de una hora de duración cada uno.

A. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO: Para efectuar este análisis, se grafica las señales amplitud de la onda sísmica vs el tiempo de registro, se identificaron las señales sísmicas y las ondas de cuerpo: ondas primarias (fase P), ondas secundarias (fase S) y coda sísmica (C). La figura 6, muestra un ejemplo de la secuencia de identificación y marcado de fases sísmicas en el dominio del tiempo.

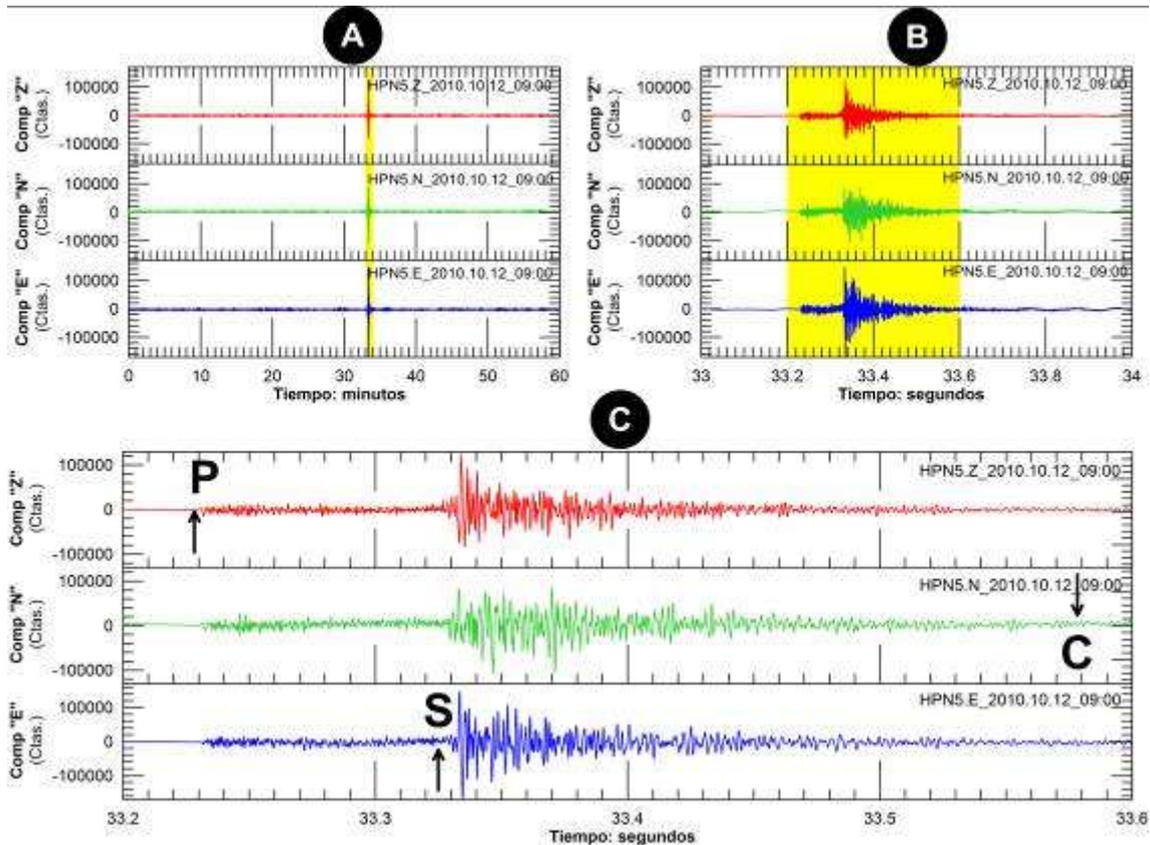


Figura 6. Secuencia de identificación y marcado de fases sísmicas: A) sismograma de 60 minutos de duración. B) Zoom e identificación de evento sísmico. C) Identificación y marcado de fases primaria (P), secundaria (S), y coda sísmica (C).

B. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS: Para efectuar este análisis, se transforma la onda sísmica del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. Este proceso se efectúa mediante el empleo del algoritmo matemático llamado “Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT)”. El resultado de esta operación es graficada en una relación Amplitud vs Frecuencia (Figura 7). En éste gráfico se identifican las frecuencias: Frecuencia inicial (F_i), Frecuencia pico (F_p) y Frecuencia final (F_f) de cada señal sísmica analizada (Figura 7-C). También, se efectúan cálculos de frecuencias para ventanas pequeñas de menos de 1 segundo. Este resultado, al graficarse en función del tiempo, se genera espectrogramas, las cuales permiten estimar la variación de las frecuencias conforme se produce la señal sísmica (Figura 7-B).

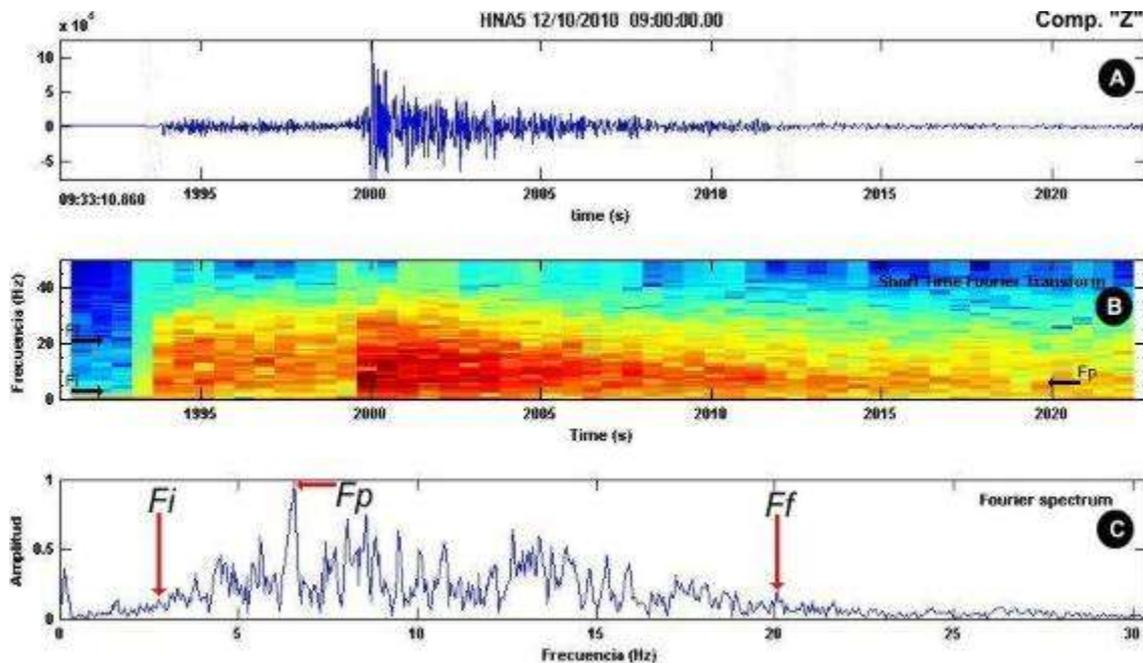


Figura 7. Ejemplo de identificación de frecuencias (F_i , F_p y F_f). A) Gráfico de la señal sísmica en el dominio del tiempo. B) Espectrograma de frecuencias en el dominio de las frecuencias. C) Espectro de frecuencias en el dominio de las frecuencias.

3.3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA

Con la finalidad de establecer una línea de comparación de la energía sísmica emitida por el Huaynaputina en este periodo de estudio (12 de mayo al 27 de octubre de 2010) con futuras campañas sísmicas, se ha efectuado la estimación de la energía emitida por éste volcán. Para este propósito, se ha discriminado las ondas sísmicas correspondientes a sismos con $T(s-p) > 10$ s. Asimismo, se ha discriminado señales sísmicas que corresponden a ruido sísmico (caída de rocas, pasos de animales, pulsos de calibración, pulsos por baja alimentación de corriente, etc.).

Como se ha observado en la operatividad de la RSTH, algunas estaciones no funcionaron continuamente por problemas técnicos, por ello para este cálculo, se rellenó los vacíos de la estación HNA4 con datos de la estación HNA5 (componente vertical), ambas de banda ancha. En la figura 8 se muestra los periodos de relleno.

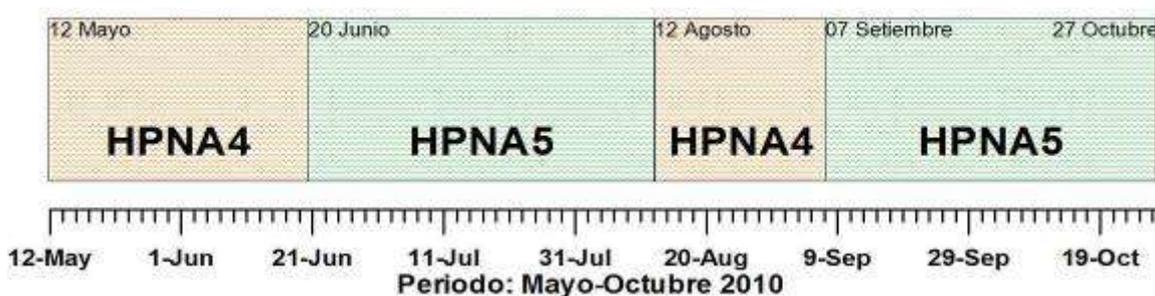


Figura 8. Periodo de registro de las estaciones HNA4 y HNA5 que fueron empleados para el cálculo de energía y energía acumulada.

Para la estimación de la energía, se ha empleado un programa confeccionado y compilado bajo plataforma Fortran 77. Este programa desarrolla el siguiente proceso:

- Lee un archivo en formato SAC de 3600 segundos de duración (1 hora).
- Divide este periodo de registro en ventanas de 10 segundos (360 ventanas).
- Genera un archivo con los resultados del cálculo de la energía por cada ventana de 10 s (360 valores de energía).
- Genera un archivo con la sumatoria progresiva de los valores de energía calculados.

La ecuación matemática empleada para el cálculo de la energía sísmica, considerando una fuente isotrópica y un semiespacio homogéneo (Boatwright, 1980) es la siguiente:

$$E_{sismica} = 2\pi r^2 \rho_{tierra} C_{tierra} 1/A \int S^2 U(t)^2 dt$$

Dónde: ρ_{tierra} , es la densidad del volcán. C_{tierra} , es la velocidad de onda P ; U , es la velocidad de la partícula; S , es la corrección por respuesta de sitio, y A , es la corrección por atenuación. Por simplicidad, tanto S como A fueron igualadas a 1 (Johnson, 2005). Debido a que el instrumento utilizado en la estación HNA4 fue una Guralp 6TD, se empleó la sensibilidad de 800 V/m/s.

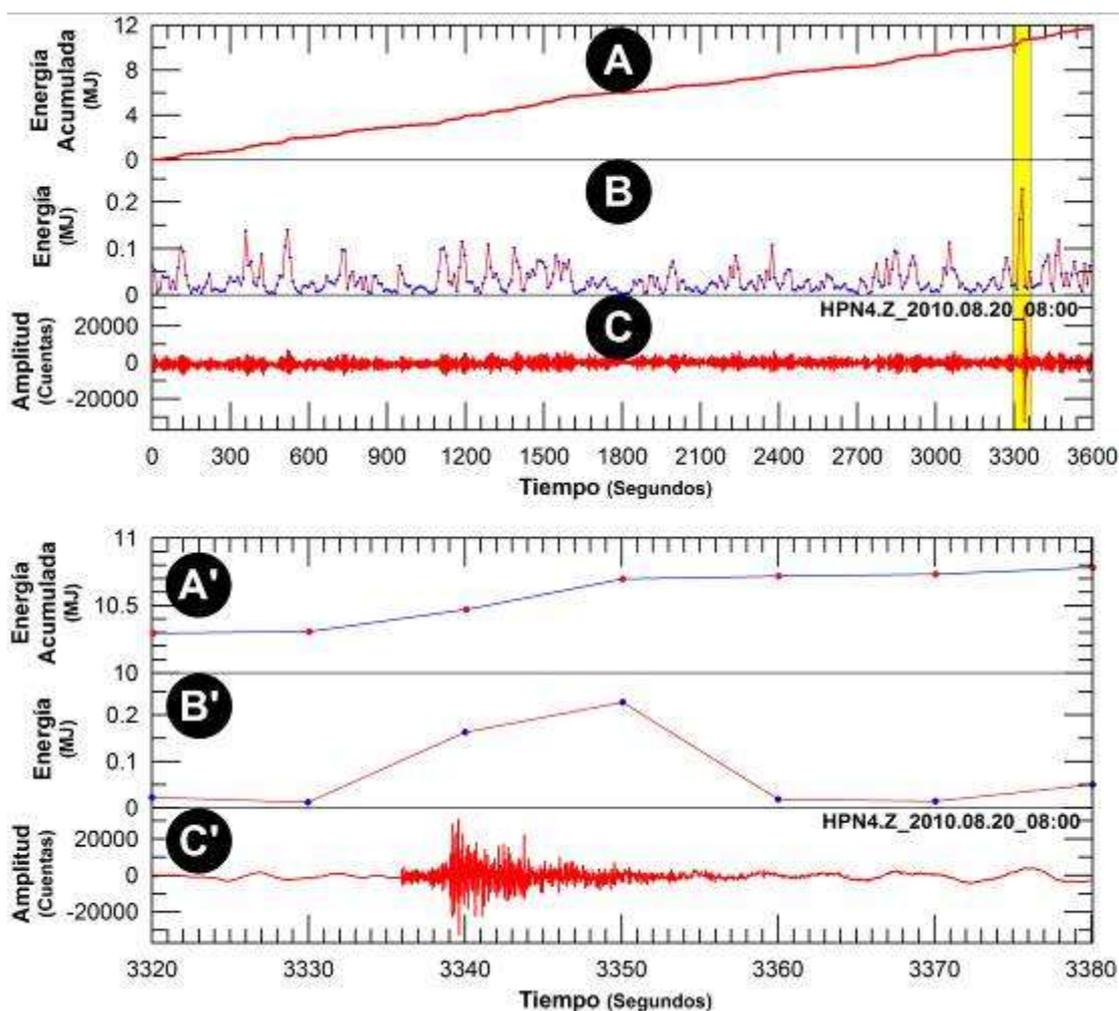


Figura 9. Ejemplo de la estimación de la energía sísmica para un archivo del 20 de agosto de 2010, registrado en la estación HNA4 a las 08:00 GMT. A) Energía sísmica acumulada. B) Energía sísmica por ventanas de 10 segundos. C) Sismograma de 3600 segundos (1 hora). A') Energía sísmica acumulada del zoom. C') Zoom a 60 segundos del sismograma. B') Energía sísmica por ventanas de 10 s.

3.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

3.4.1 CLASIFICACIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS

Las señales sísmicas registradas por la RSTH, fueron clasificadas en función de la diferencia de tiempos de llegada de las ondas de cuerpo (TS-P). Para este propósito, se ha considerado 5 rangos: T(S-P): < 2.5 s; T(S-P): 2.6 s < 5.0 s; T(S-P): 5.1 s < 10.0 s; T(S-P): 10.1 s < 20.0 s y T(S-P): > 20.0 s. El producto de estos 5 rangos con la constante 5,2 que representa la velocidad de las ondas P para capas superficiales (Dorbath et al., 1991), da como resultado la estimación de 5 radios (13 km, 26 km, 52 km, 104 km, y > 104 km) de la estación analizada (HNA4) a las fuentes sísmicas.

Durante este periodo de estudio (mayo-octubre de 2010) se han contabilizado un total de 4561 eventos sísmicos, los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

A. SISMOS CON $T(S-P) < 2.5$ s: Este rango cubre un área aproximada de 13 km alrededor de la estación HNA4. En total, se ha contabilizado 570 señales sísmicas en este rango de $T(S-P)$, esto representa el 12.5% de la sismicidad analizada y a razón de 1,7 sismos por día. Sin embargo, del 12 al 18 de agosto se ha observado un incremento importante de esta sismicidad a razón de 42,3 sismos por día, llegando a registrarse hasta 66 sismos el 15 de agosto de 2010 (Figura 10-A).

B. SISMOS CON $2.6 \text{ s} < T(S-P) < 5.0$ s: La zona cubierta por esta $T(S-P)$ está comprendida entre los 13 km y 26 km de radio en torno a la estación HNA4. En esta distribución se ha inventariado un total de 685 señales sísmicas (15% de la sismicidad total; Figura 10-B). La sismicidad comprendida en este rango se presenta a razón de 4 sismos por día, sin embargo el 31 de julio se registró 110 sismos lo que redujo el promedio diario a 3,4 sismos por día.

C. SISMOS CON $5.1 \text{ s} < T(S-P) < 10.0$ s: El área involucrada por esta $T(S-P)$ está comprendida entre 26 km a 52 km alrededor de la estación HNA4. Durante este periodo de estudio (mayo-octubre 2011), se han contabilizado 732 señales sísmicas con esta $T(S-P)$, esto representa el 16% de la sismicidad total registrada por la RSTH (Figura 10-C) y se desarrolla a razón de 4,3 sismos por día.

D. SISMOS CON $10.1 \text{ s} < T(S-P) < 20.0$ s: Éste rango considera un área comprendida entre los 52 km y 104 km alrededor de la estación HNA4. Se han inventariado un total de 1185 señales sísmicas que representa el 26% de la sismicidad total (Figura 10-D). Este tipo de señales se presentan con una recurrencia de 6,9 eventos por día.

E. SISMOS CON $T(S-P) > 20.1$ s: Este rango de $T(S-P)$ comprende un área por encima de los 104 km. En ésta distribución se han contabilizado un total de 1399 señales sísmicas (30,5% de la sismicidad total). Este tipo de sismicidad se presenta a razón de 8,1 eventos por día. Asimismo, este rango de $T(S-P)$ involucra la mayor cantidad de sismicidad registrada por la RSTH (Figura 10-E).

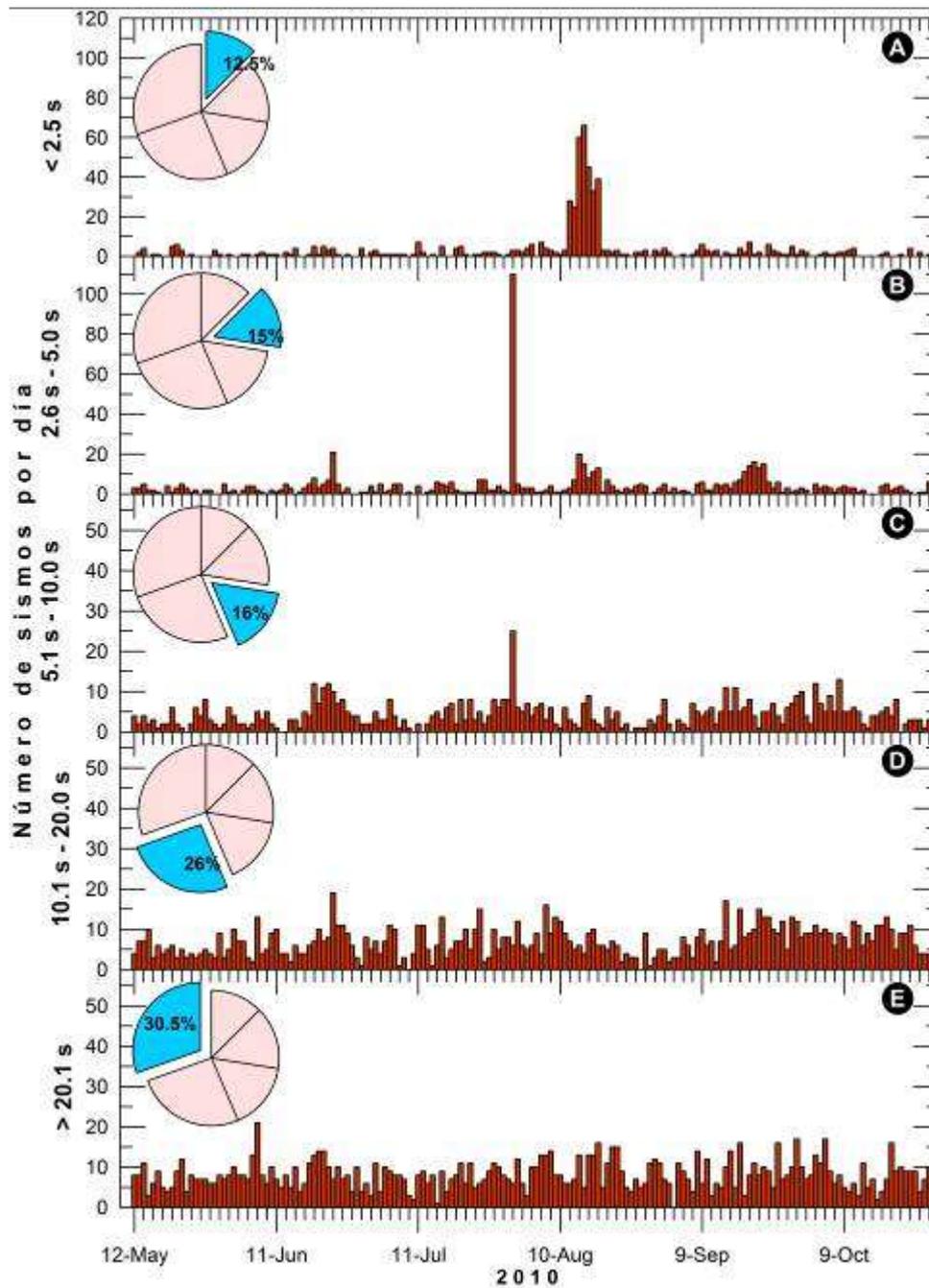


Figura 10. Número de sismos por día identificado por rangos de $T(S-P)$

F. OTRO TIPO DE SEÑALES SÍSMICAS: Además de las señales sísmicas correspondientes a sismos tectónicos descritos anteriormente, también se han registrado oscilaciones verticales de muy baja frecuencia (Figura 11), que estarían asociadas a las fluctuaciones de la marea terrestre. Asimismo, se ha registrado una señal sísmica con frecuencia característica de 10 Hz (Figura 12). Esta señal tiene la particularidad de presentarse entre las 17:00 y 20:00 horas GMT; razón por la cual se la asocia a algún tipo de actividad antrópica.

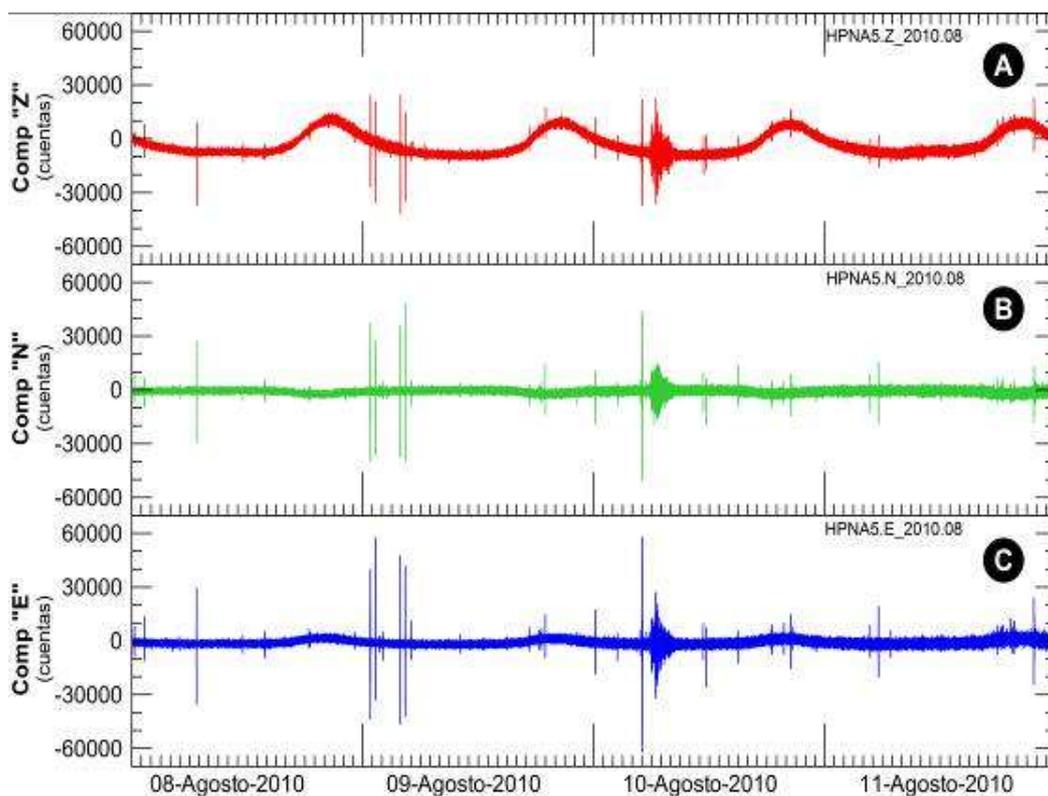


Figura 11. Sismograma de los días 08 al 11 de agosto de 2010, registrado por la estación HNA5.

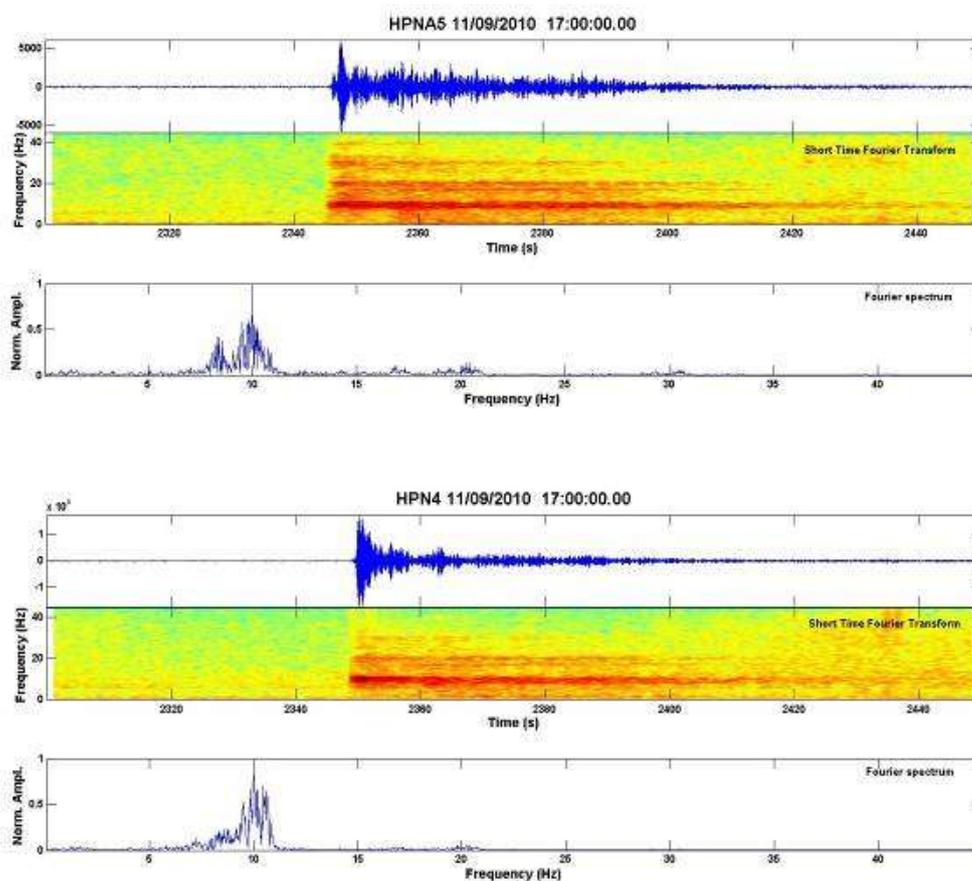


Figura 12. Ejemplos de sismos asociados a actividad antrópica.

3.4.2. DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA Y LA ENERGÍA ACUMULADA

En la Figura 13-B, se presenta los resultados del cálculo de energía desde el 12 de mayo al 27 de octubre de 2010. Se observa que la mayor cantidad de energía estimada se encuentra por debajo de 0,1 MJ, con algunos pulsos en agosto e inicios de octubre.

La Figura 13-A, muestra los resultados de la energía acumulada para el mismo periodo de estudio. El valor final de la energía acumulada al término de este periodo de estudio, es de 9765 MJ, esto es, a razón de 58 MJ por día. Además, se observa un ligero incremento de la energía en el mes de agosto 2010, esto, debido a un incremento de la sismicidad durante este mes.

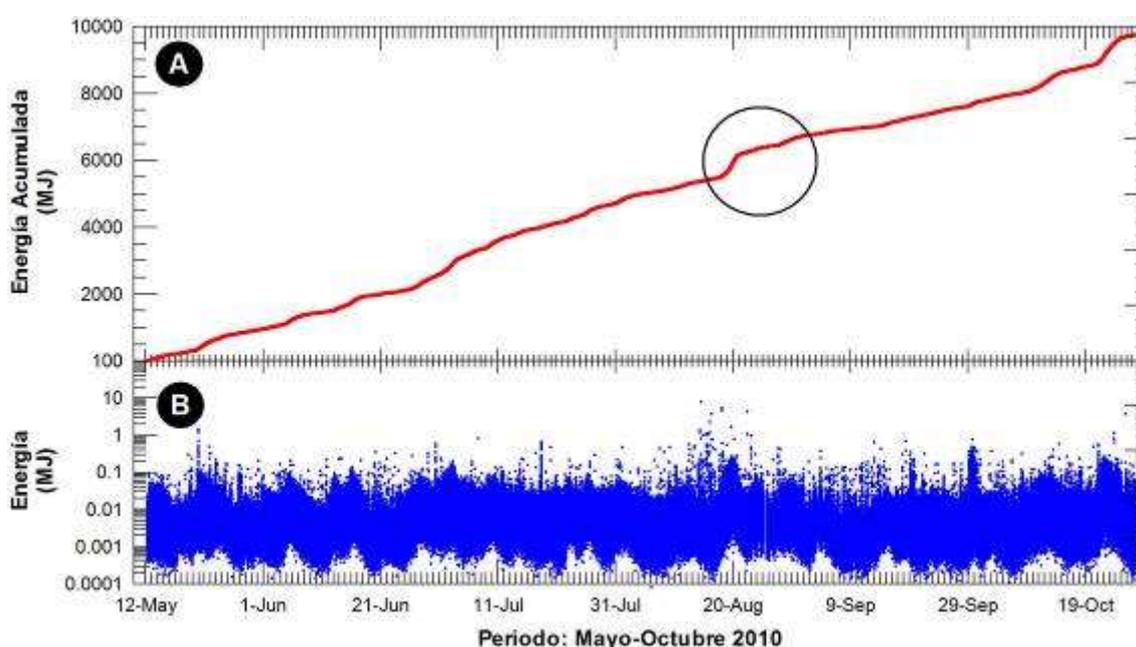


Figura 13. A) La energía acumulada y B) Distribución de la energía calculados para los registros de la estación HNA4 y HNA5

3.5. LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE SISMOS

3.5.1. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para realizar la localización hipocentral de los sismos se ha elaborado una base de datos del volcán Huaynaputina, considerando básicamente, los registros simultáneos de señales sísmicas en 3 o más estaciones en el periodo mayo a octubre de 2010. Con este fin, se ha tomado las siguientes consideraciones:

- Recopilar las señales sísmicas registradas en tres o más estaciones que conformaron la RSTH, tomando como base la estación de banda ancha HNA4. En la Figura 14, se muestra ejemplos de los registros de 24 horas de duración, correspondientes a los días 5 de mayo (Figura

14-A) y 14 de agosto de 2010 (Figura 14-B). En estos registros se pueden observar numerosos sismos regionales (R) y locales (L).

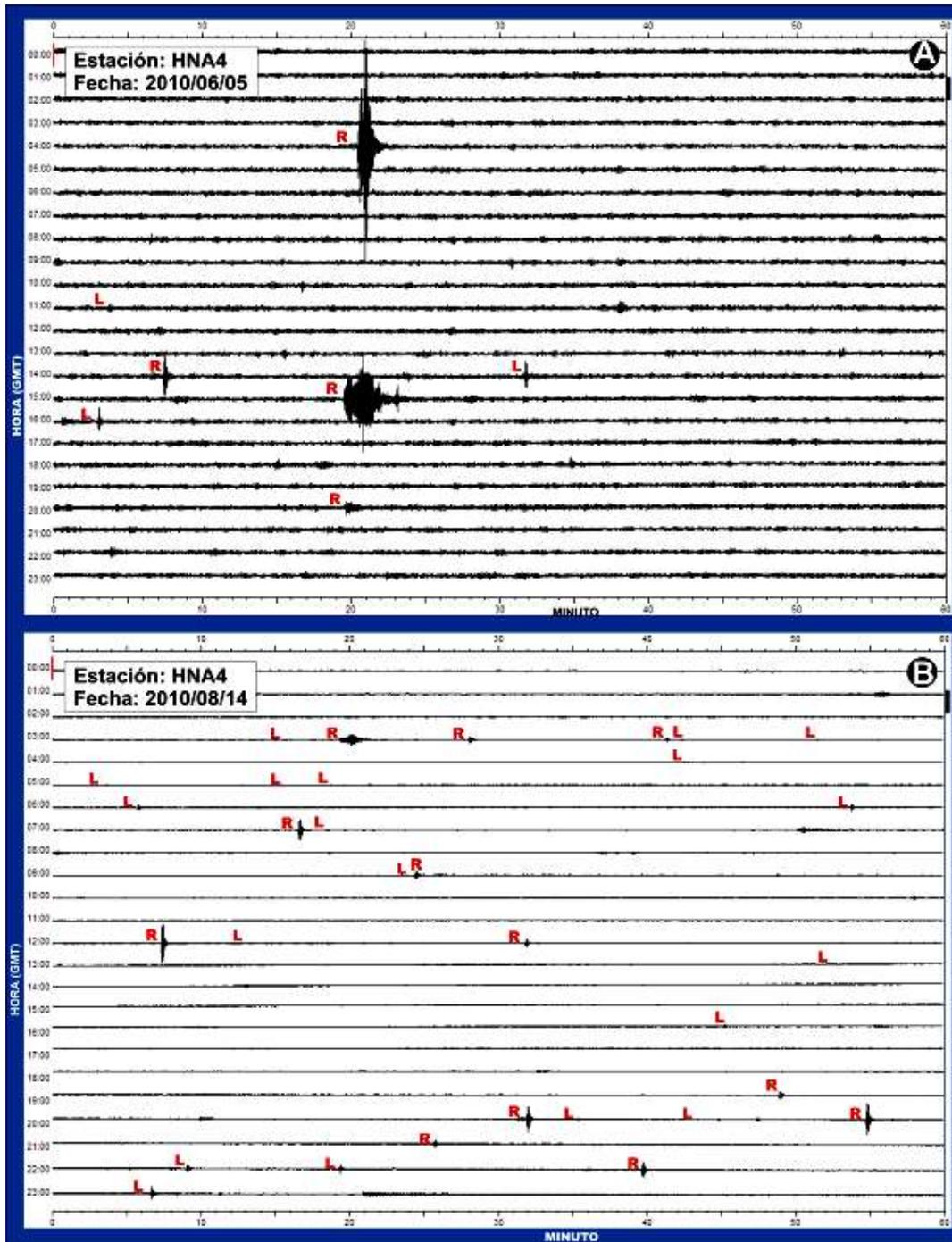


Figura 14. Ejemplos de registros sísmicos de 24 horas provenientes de la estación Huaynaputina 4 (HNA4). A) Registro del 5 de junio. B) Registro del 14 de agosto de 2010. R=sismos regionales, L=sismos locales.

- Seleccionar únicamente sismos locales (L), y con tiempos de arribo de las ondas P y S menores e iguales a 5,0 segundos ($T(s-p) \leq 5,0$ s). En la Figura 15, se muestra ejemplos de sismos locales registrados en 3 estaciones con sus respectivas lecturas de tiempos de arribo de las

ondas P y S, y la duración total del sismo (C). Estos sismos se registraron el 13 de junio, a las 10:24 (Figura 15-A.); 1 de julio, a las 09:58 (Figura 15-B); el 14 de agosto de 2010, a las 08:14 (Figura 15-C) y 10:57 hora GMT (Figura 15-D).

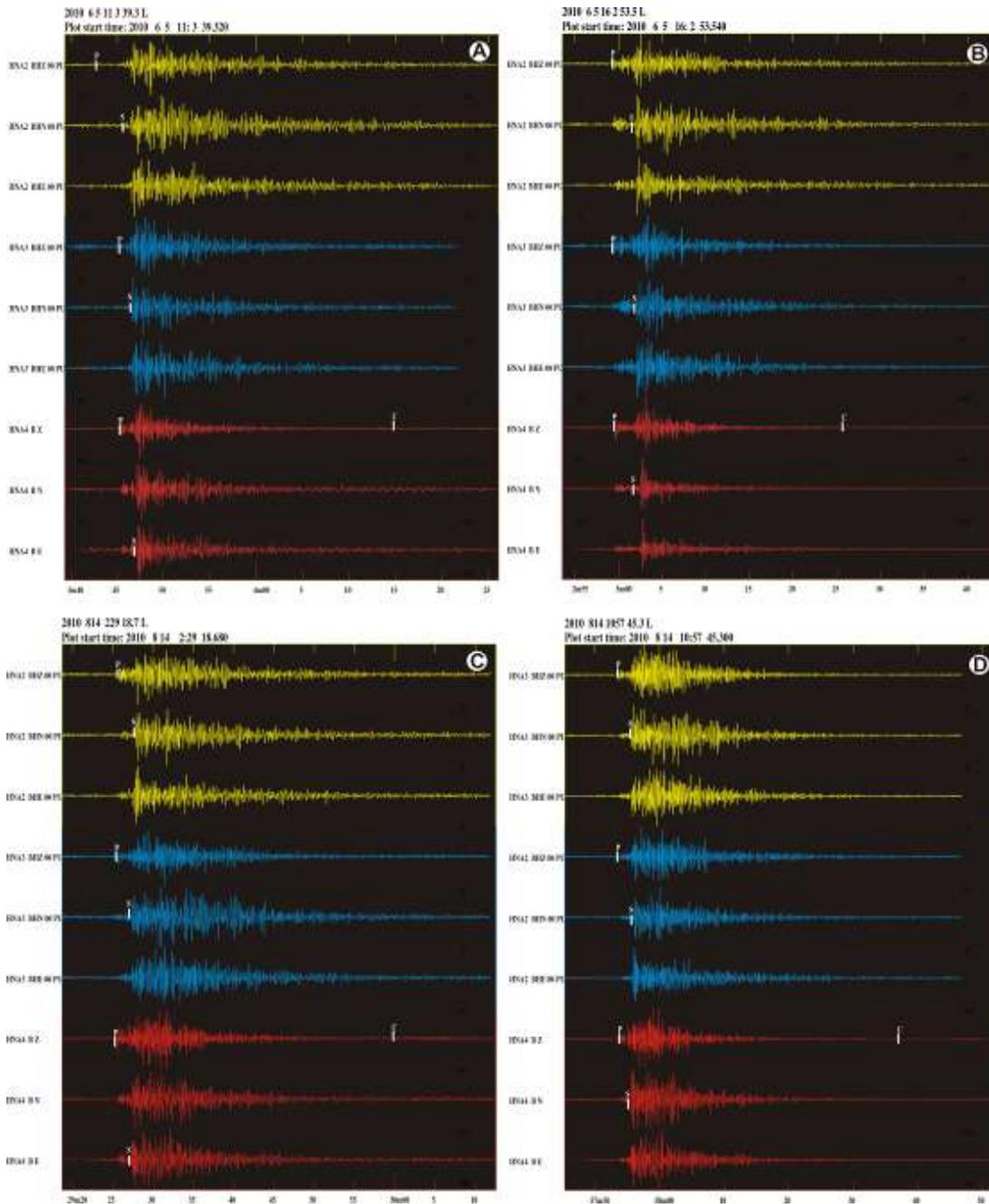


Figura 15. Ejemplos de sismos locales registrados en 3 estaciones de la RSTH. A). Sismo registrado el 13 de junio; B) el 1 de julio; C y D). El 14 de agosto de 2010. P y S=tiempos de arribo de las ondas en segundos, C=coda en segundos.

- Se confeccionó la base de datos HPNA1 compuesta por las señales seleccionadas (107 sismos locales).
- Se hizo lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S y la duración del registro sísmico (C) en todas las estaciones en las que

fueron registradas. Asimismo, se realizó algunas correcciones y ajustes en los tiempos de arribo de las fases sísmicas.

- Finalmente, con ayuda de los programas SEISAN (Ottemoller et al., 2010) y HYPOCENTER (Lienert, 1994), se realizó la localización hipocentral.

3.5.2 PROGRAMAS DE LOCALIZACIÓN HYPOCENTRAL

Los programas empleados para la localización hipocentral en el presente estudio son el SEISAN versión 8.2.1 (Ottemoller et al., 2010) y Hypocenter (Lienert, 1994). Ambos programas son de distribución gratuita y se pueden descargar de la red en la siguiente dirección:

<http://seis.geus.net/software/software.html>

El Hypocenter, es un programa que se encuentra integrado al SEISAN. Para su ejecución, utiliza como datos de entrada: el nombre, coordenadas geográficas (latitud y longitud) y elevación de las estaciones sísmicas; además de la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S (Figura 15), la duración total del sismo (C), una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y la ecuación para el cálculo de la magnitud de duración (Md).

3.5.3 MODELO DE VELOCIDAD

En la actualidad, en el Perú no se han realizado modelos reales que permitan conocer la distribución de la velocidad de las ondas en el interior de la corteza a nivel local y mucho menos en zonas volcánicas, es por ello que se opta por evaluar diferentes modelos a fin de seleccionar el que resuelva mejor los parámetros hipocentrales de los sismos, los mismos que pueden reflejarse con errores mínimos en la estimación de estos parámetros.

Debido a la buena resolución obtenida en los parámetros hipocentrales de los sismos registrados en los volcanes Sabancaya (Antayhua, 2002; Ramos y Antayhua, 2010) y Ticsani (Tavera, 2006; Antayhua, 2008), se ha optado por utilizar el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al. (1991) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al. (1991).
Donde Prof.= profundidad en kilómetros y Vp=velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.

Prof. (km)	Vp (km/s)
0.0	5.2
15.0	6.2
30.0	6.8
50.0	8.0

3.5.4 RELACIÓN DE VELOCIDAD VP/VS

Para obtener la relación de velocidad (V_p/V_s) se ha construido la curva de Wadati considerando para ello, la diferencia en tiempos de arribo (máximo y mínimo) de las ondas P y S de los 107 sismos seleccionados (Figura 16). Sin embargo, aún cuando la regresión muestra una tendencia, el valor del coeficiente de correlación ($R^2=0,463$) es muy bajo; por tanto, el valor de la relación $V_p/V_s=1,473$ podría no ser un valor representativo de la zona de estudio. Por esta razón y porque no existen otros estudios sísmicos en la zona, para este estudio, se ha considerado utilizar el valor teórico de $V_p/V_s=1,73$.

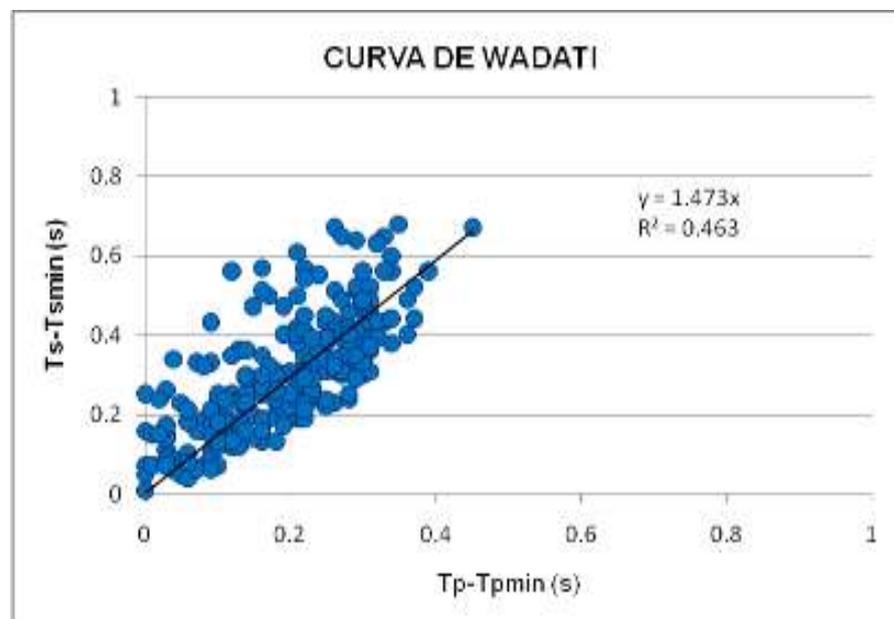


Figura 16. Curva de Wadati calculada con la diferencia de los tiempos de arribo de las ondas. T_p y T_s =tiempos de arribo de las ondas P y S; T_{pmin} y T_{smin} = tiempos de arribo mínimos de las ondas P y S; R^2 = coeficiente de correlación.

3.5.5 CÁLCULO DE MAGNITUD

Para el cálculo de magnitud de las 107 señales sísmicas seleccionadas, se ha utilizado la ecuación propuesta por Klein (1978), cuyo requisito principal es tomar la duración total del sismo.

$$M_d = -1.1 + 2 \log (T) + 0.007 D + 0.0035 (Z)$$

Dónde: **M_d** es la magnitud de duración en grados, **T** es la duración total del sismo en segundos, **D** la distancia epicentral y **Z** la profundidad del hipocentro, ambos expresados en kilómetros.

Cabe señalar que la duración total del sismo no permite medir el tamaño real del sismo; sin embargo, por lo menos permite estimar, la cantidad de energía liberada por los sismos locales registrados en la zona del volcán Huaynaputina.

3.6 RESULTADOS DE LA LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL

En el Cuadro 3, se presenta los parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados, en cada uno de ellos se consigna la fecha, hora origen de la ocurrencia del sismo en GMT (Greenwich Mean Time), latitud y longitud en coordenadas WGS84, profundidad del hipocentro, magnitud de duración (M_d) y la raíz media cuadrática (RMS).

Cuadro 3. Parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados. La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT=Greenwich Mean Time) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad del hipocentro en kilómetros y RMS la raíz media cuadrática en segundos.

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (Km)	M _d (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
1	2010/05/03	18:15:29.1	303568.303	8155491.26	5.7	2.3	0.02
2	2010/05/10	14:21:56.2	305447.975	8159935.63	4.4	1.7	0.03
3	2010/05/10	14:22: 35.5	303891.354	8166783.42	2.5	2.1	0.01
4	2010/05/13	07:42:58.1	299251.391	8160763.687	5.9	1.7	0.02
5	2010/05/14	17:02:58.8	304341.473	8152620.734	5.9	1.9	0.02
6	2010/0520	02:59:23.8	301407.014	8158459.569	2.2	1.5	0.01
7	2010/05/20	05:21:44.8	300237.598	8158005.922	0.7	1.6	0.02

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
8	2010/05/21	09:40:38.0	300652.960	8159227.295	0.0	1.0	0.02
9	2010/06/05	10:16:37.5	305139.0170	8158715.357	3.7	1.8	0.03
10	2010/06/05	11:03:43.6	303219.670	8158587.053	2.3	1.7	0.03
11	2010/06/05	16:02:57.8	305130.929	8159600.705	2.3	1.9	0.02
12	2010/06/05	19:23:22.1	306200.854	8159278.418	2.3	1.7	0.04
13	2010/06/09	03:24:39.8	304299.747	8157158.175	1.0	1.7	0.03
14	2010/06/13	02:42:21.6	300185.819	8163539.46	4.8	1.7	0.00
15	2010/06/13	14:03:11.6	305044.476	8157386.358	1.8	1.6	0.02
16	2010/06/18	00:41:51.9	300088.419	8162542.428	2.7	2.0	0.02
17	2010/06/19	18:07:23.3	300335.993	8158892.289	1.5	1.3	0.02
18	2010/06/23	08:57:11.2	295062.456	8163601.659	4.8	2.0	0.03
19	2010/06/23	14:18:57.4	293805.349	8161154.524	0.0	2.0	0.04
20	2010/06/24	08:27:49.0	295464.324	8155082.88	2.2	2.2	0.06
21	2010/06/29	07:09:59.0	302816.477	8156037.706	0.0	2.2	0.02
22	2010/07/01	08:10:05.8	305298.937	8164582.718	5.9	1.4	0.02
23	2010/07/02	06:42:48.0	301318.899	8156466.506	1.5	1.2	0.02
24	2010/07/03	07:09:05.1	304026.607	8152064.438	3.2	2.2	0.01
25	2010/07/05	23:41:04.3	300816.594	8153141.393	2.3	1.3	0.01
26	2010/07/06	23:03:16.9	302726.217	8154265.997	3.2	2.2	0.01
27	2010/07/07	10:21:01.2	303371.326	8153718.574	4.4	2.7	0.01
28	2010/07/08	02:32:22.1	298751.308	8157217.171	0.8	2.0	0.03
29	2010/07/12	04:26:50.0	301750.760	8155917.13	2.2	1.1	0.01
30	2010/07/12	09:21:54.0	299949.771	8154572.11	0.9	0.9	0.02
31	2010/07/12	15:08:30.6	294187.448	8154738.516	2.4	1.5	0.02
32	2010/07/13	09:50:41.4	296219.518	8154204.657	3.1	1.7	0.03
33	2010/07/18	08:17:47.5	304130.200	8152397.43	3.6	1.5	0.01
34	2010/07/19	20:07:40.7	302104.767	8152267.983	1.2	0.9	0.00
35	2010/07/27	14:49:08.9	302820.577	8155595.026	1.3	0.9	0.03
36	2010/08/04	02:22:33.5	299717.692	8156562.19	4.4	1.5	0.04
37	2010/08/04	16:24:22.4	298462.697	8153893.982	2.8	1.3	0.01
38	2010/08/06	13:48:23.8	297256.695	8157313.685	0.5	1.8	0.02
39	2010/08/08/	01:10:30.5	300640.683	8149155.222	4.5	2.6	0.02
40	2010/08/12	05:19:32.7	297047.544	8156868.963	2.3	1.7	0.04
41	2010/08/12	23:33:08.8	298773.568	8166182.56	2.0	2.3	0.03
42	2010/08/13	03:31:16.8	301346.304	8164989.105	4.3	1.6	0.02

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
43	2010/08/13	11:42:35.1	297937.508	8164293.105	2.6	2.2	0.04
44	2010/08/13	18:16:60.0	300301.836	8162544.423	3.6	1.4	0.01
45	2010/08/13	21:16:14.6	297613.166	8164732.766	2.0	2.4	0.02
46	2010/08/13	22:08:28.0	300609.576	8163875.455	4.1	1.6	0.01
47	2010/08/14	02:29:23.9	300382.726	8165312.179	2.9	1.8	0.03
48	2010/08/14	03:15:31.0	299533.093	8164861.518	2.8	1.8	0.04
49	2010/08/14	03:42:08.4	301001.969	8156131.506	1.9	1.5	0.01
50	2010/08/14	03:51:20.7	299963.078	8164533.501	1.7	1.9	0.06
51	2010/08/14	06:43:52.2	301346.304	8164989.105	1.3	1.7	0.03
52	2010/08/14	07:16:33.7	298913.582	8162642.087	1.4	2.4	0.05
53	2010/08/14	07:18:22.5	299483.511	8158773.61	2.3	1.8	0.03
54	2010/08/14	09:24:23.8	297174.749	8165946.115	0.5	2.1	0.01
55	2010/08/14	10:57:52.6	300171.348	8165088.847	0.4	2.3	0.05
56	2010/08/14	12:13:10.6	300844.661	8161553.368	2.9	1.7	0.02
57	2010/08/14	12:52:57.4	297918.703	8166285.192	0.5	1.4	0.01
58	2010/08/14	20:35:18.6	299968.251	8163980.148	1.3	2.0	0.04
59	2010/08/14	20:36:54.9	299580.844	8159770.654	2.5	2.1	0.04
60	2010/08/14	20:44:45.1	298256.619	8164406.798	2.2	1.9	0.03
61	2010/08/14	22:09:00.4	298808.956	8162419.741	2.7	1.8	0.03
62	2010/08/14	23:06:35.5	300297.700	8162987.105	3.9	2.1	0.04
63	2010/08/15	10:25:05.0	297620.494	8163958.064	1.3	2.1	0.02
64	2010/08/15	15:01:30.0	299853.254	8164864.514	1.8	2.0	0.00
65	2010/08/15	15:27:18.7	299110.367	8164414.831	1.4	1.7	0.04
66	2010/08/15	15:49:16.7	302184.727	8166657.052	1.3	1.4	0.03
67	2010/08/15	16:12:01.7	299540.351	8164086.822	1.3	1.9	0.04
68	2010/08/15	17:46:29.3	298771.488	8166403.902	1.1	1.7	0.02
69	2010/08/15	17:47:30.6	299947.565	8166193.558	1.8	2.2	0.02
70	2010/08/16	00:19:30.2	298686.618	8164078.805	0.9	2.2	0.03
71	2010/08/16	08:16:45.4	299410.822	8166520.579	0.6	2.1	0.03
72	2010/08/16	08:49:14.6	297719.886	8164733.775	0.7	1.9	0.03
73	2010/08/16	08:49:49.5	300603.387	8164539.477	1.9	1.5	0.01
74	2010/08/16	10:03:41.0	303688.042	8165674.779	2.0	1.7	0.03
75	2010/08/16	11:08:17.3	298905.254	8163527.457	2.1	2.3	0.05
76	2010/08/16	19:15:29.4	299300.983	8166851.591	0.9	2.2	0.02
77	2010/08/17	05:00:07.5	302413.501	8164998.983	2.1	2.3	0.03

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
78	2010/08/17	08:05:23.8	299523.766	8165857.554	2.1	2.3	0.01
79	2010/08/17	18:39:09.9	298886.532	8165519.536	0.8	2	0.03
80	2010/08/17	19:55:55.5	297407.060	8163956.043	1.4	2.2	0.03
81	2010/08/17	21:56:38.3	301890.151	8163887.355	2.6	1.9	0.01
82	2010/08/17	22:23:56.8	299315.502	8165302.201	0.8	2.3	0.03
83	2010/08/18	01:58:10.8	299736.181	8165970.222	1.0	1.9	0.04
84	2010/08/18	02:28:02.0	298470.057	8164408.81	1.8	2.0	0.02
85	2010/08/18	02:46:50.1	302417.589	8164556.306	1.4	2.2	0.01
86	2010/08/18	02:51:08.8	298990.139	8165852.551	0.4	1.8	0.02
87	2010/08/18	03:44:11.8	300693.621	8166311.193	1.6	1.9	0.03
88	2010/08/18	03:45:17.0	298700.163	8162640.078	1.4	1.8	0.05
89	2010/08/18	05:20:41.3	300380.662	8165533.52	0.7	1.3	0.03
90	2010/08/18	05:51:22.8	299429.485	8164528.505	1.0	1.1	0.02
91	2010/08/18	06:01:32.0	299097.902	8165742.882	1.2	2.0	0.02
92	2010/08/18	07:14:23.6	299314.464	8165412.871	1.6	1.7	0.03
93	2010/08/18	09:29:29.8	297935.418	8164514.448	0.7	1.8	0.02
94	2010/08/20	07:14:27.3	299653.288	8163423.798	2.8	1.4	0.03
95	2010/08/21	00:10:52.7	303350.871	8155931.969	0.7	1.9	0.01
96	2010/08/22	12:19:39.5	301942.506	8158243.190	0.8	1.1	0.01
97	2010/08/23	19:53:49.5	302812.378	8156480.385	4.1	2.2	0.03
98	2010/08/25	23:01:48.6	306288.461	8161382.076	3.4	1.4	0.01
99	2010/08/26	00:08:39.9	302894.494	8159137.445	3.1	1.1	0.02
100	2010/08/26	18:00:36.4	304829.089	8157605.742	2.6	2.1	0.01
101	2010/08/27	16:04:13.8	298905.254	8163527.457	2.9	1.9	0.01
102	2010/08/31	17:24:06.4	299098.941	8165632.211	0.4	2.4	0.03
103	2010/09/01	05:51:38.8	301868.767	8154700.748	9.9	2.2	0.01
104	2010/09/08	05:57:45.9	302383.617	8156697.770	2.3	1.6	0.04
105	2010/09/09	06:04:20.9	296058.827	8159847.967	4.0	2.0	0.01
106	2010/09/09	06:46:59.5	298641.489	8157548.179	4.9	1.2	0.03
107	2010/09/09	07:07:06.4	294353.800	8159610.236	0.9	1.5	0.01

Los resultados numéricos del Cuadro 3 muestran:

- Errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 5 km. Estos errores podrían deberse a que el mayor número de sismos se localizan fuera de la cobertura acimutal de las estaciones sísmicas.
- La profundidad de los hipocentros son menores a 6 km, con excepción de un sismo que se localiza a 9,9 km. Sin embargo, el mayor número de sismos ocurren entre 0 y 5 km (Figura 17-A). Los sismos que

presentan el valor 0 km, refieren a la baja resolución en el cálculo de la profundidad hipocentral del sismo.

- En cuanto a la magnitud de los sismos, éstas varían entre 0,9 a 2,7 Md, siendo recurrentes, los sismos con magnitudes entre 1,0 y 2,5 Md (Figura 17-B).
- Del total de sismos localizados, 8 corresponden al mes de mayo, 13 a junio, 14 a julio, 67 a agosto y 5 a septiembre de 2010 (Figura 18).

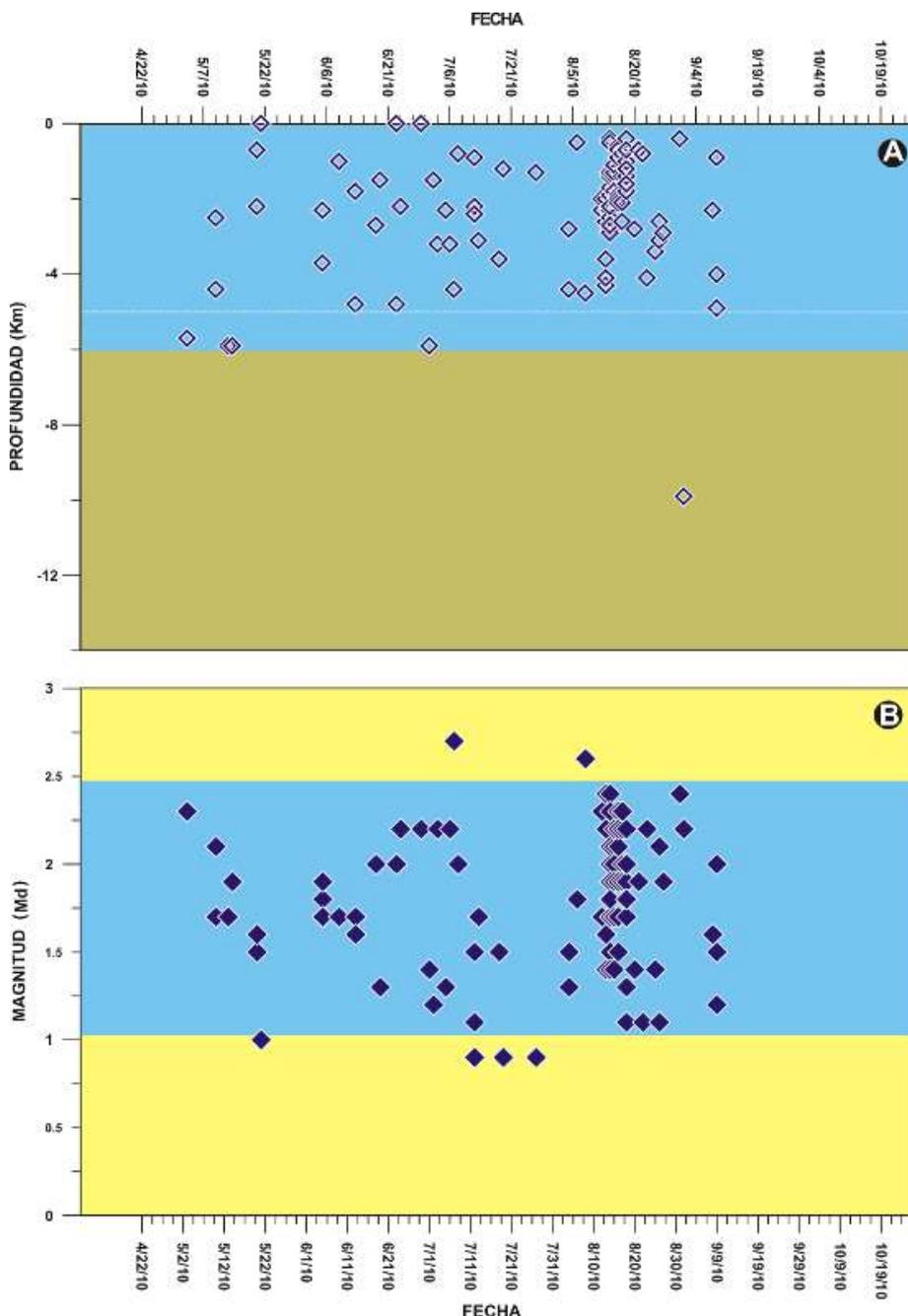


Figura 17. Distribución de los 107 sismos según: A). Profundidad en kilómetros vs fecha y B). Magnitud de duración Md vs fecha.

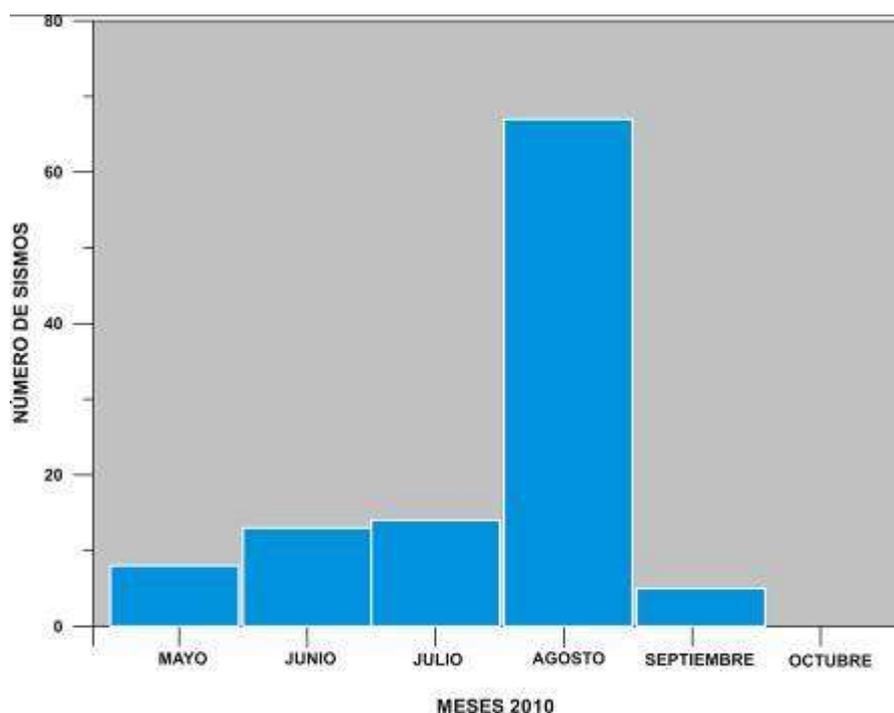


Figura 18. Número de sismos registrados en 3 a más estaciones por mes. Obsérvese que el mayor número de registros corresponde al mes de agosto de 2010.

3.6.1. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN SUPERFICIE

En la Figura 19, se presenta la distribución de los 107 sismos localizados para el periodo mayo a octubre de 2010, asimismo, se muestran los principales sistemas de fallas, lineamientos y fracturas reconocidas por Lavallée et al (2006, 2009), en la zona del volcán Huaynaputina. La sismicidad localizada se distribuye hacia el NO, S y SO del anfiteatro del volcán, en un área aproximada de 270 km² (Figura 19-A). El mayor agrupamiento de sismos localizado al NO, parece estar correlacionado al lineamiento NO-SE que corta el cráter del volcán Huaynaputina y se extiende hasta el Cerro El Volcán. Este agrupamiento de sismos corresponde, básicamente, a los registrados en el mes de agosto de 2010 (Figura 19-B).

Otro agrupamiento importante, aunque más disperso, se localiza al S y SO del cráter del volcán Huaynaputina, entre fallas y lineamientos orientados en direcciones NO-SE y NE-SO respectivamente. Por su gran dispersión, es difícil correlacionarlo con alguna falla en particular (Figura 19-A).

Contrariamente a lo observado en los alrededores del Huaynaputina, no se ha localizado ningún sismo en el interior del anfiteatro, que pudiera evidenciar fracturamiento en esta zona del volcán.

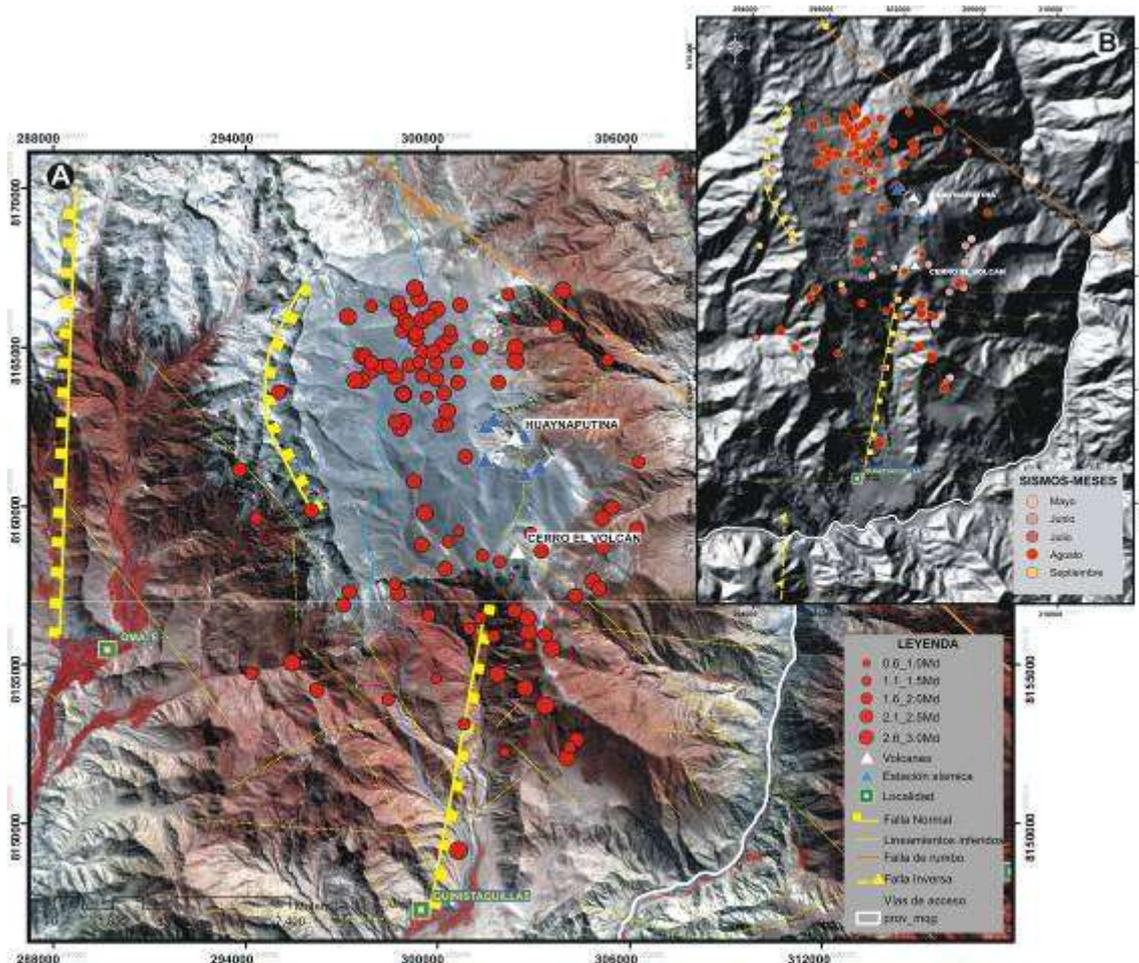


Figura 19. Distribución en superficie de los 107 sismos registrados y localizados en la zona del volcán Huaynaputina. A). Distribución considerando la magnitud de los sismos y B). Considerando la distribución de los sismos por meses.

3.6.2. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN PROFUNDIDAD

En la Figura 20, se presenta la distribución de los sismos en profundidad. Durante el periodo de monitoreo del Huaynaputina, la profundidad hipocentral de los sismos varía entre 0 y 6 km (recuadro en color azul) y solamente se registró un sismo con una profundidad de 9,9 km. También, puede observarse que los hipocentros de los sismos registrados en el mes de agosto (círculos de color rojo y amarillo) varían entre 0,4 y 4,5 km, éstos son más superficiales con respecto al total de hipocentros.

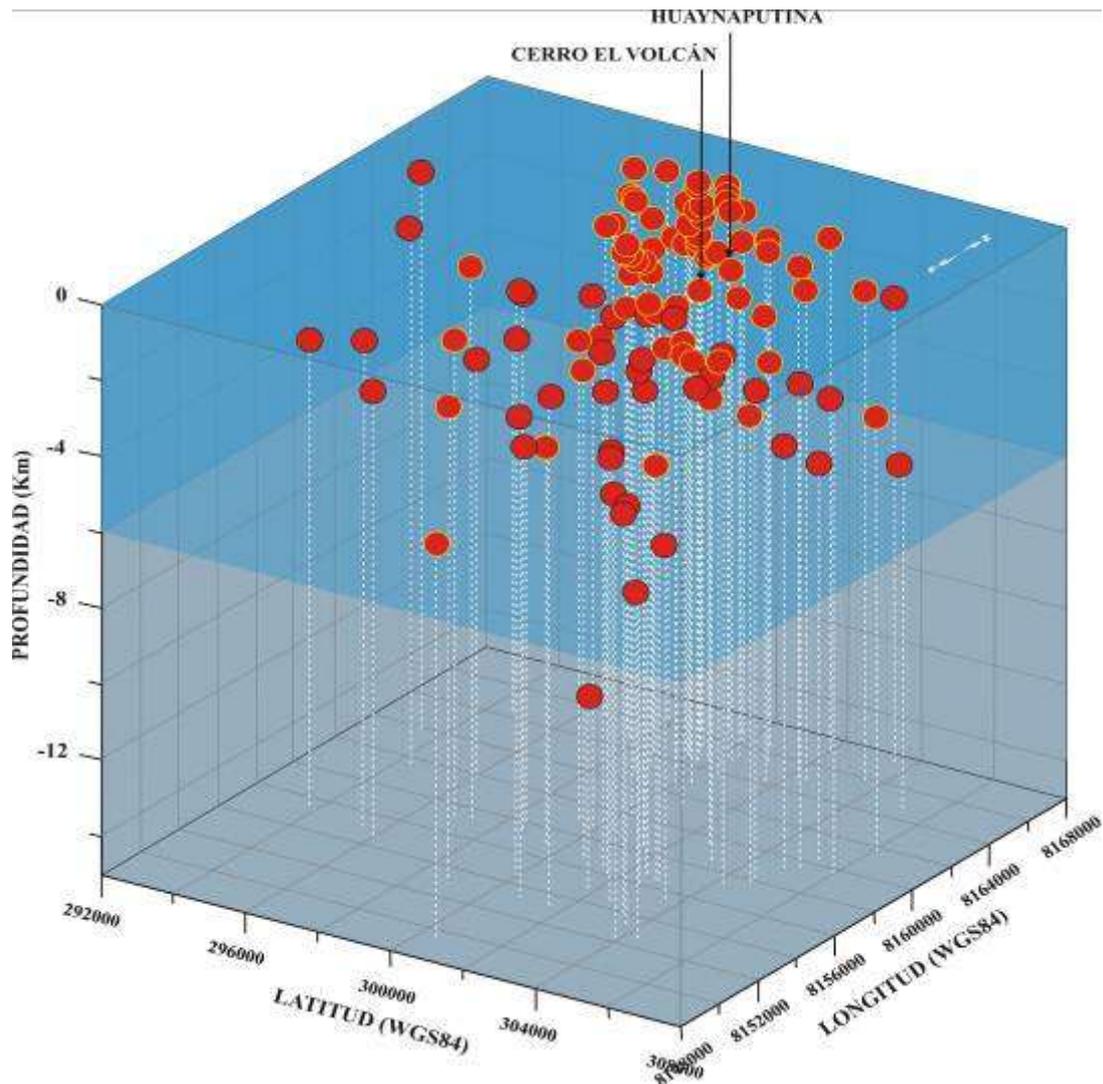


Figura 20. Distribución de los 107 sismos en profundidad. El mayor número de sismos se localizan entre 0.4 y 6 km (recuadro azul). Los círculos rojos con amarillo corresponden a los registrados en el mes de agosto de 2010.

3.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se tiene conocimiento de la sismicidad asociada al volcán Huaynaputina y alrededores desde la erupción de 1600 D.C., en base a crónicas y relatos, y el catálogo sísmico de Ceresis (1985). Los sismos habrían ocurrido entre el 14 de febrero y los primeros días de marzo de 1600. Sin embargo, los sismos más grandes, sentidos a nivel regional ocurrieron los días 18, 19, 20 y 28 de febrero de 1600. Según el Cuadro 4 (modificado de Lavallée et al., 2009) y la Figura 21. Estos sismos habrían ocurrido a profundidades superficiales, menores a 20 km.

Cuadro 4. Parámetros hipocentrales de los sismos registrados en 1600 D.C., recopilados por Ceresis (1985). Cuadro modificado de Lavallée et al. (2009). AA/MM/DD=año/mes/día; la hora origen (GMT) HH:MM= en hora y minuto; Prof.=profundidad en kilómetros.

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM	Coordenadas WGS84		Prof. Aprox. (km)
			Longitud	Latitud	
1	1600/02/14	02:00	308073,423	8152765,443	6
2	1600/02/19	02:00	308073,423	8152765,443	6
3	1600/02/19	10:00	335862,199	8145251,860	20
4	1600/02/19	16:00	308073,423	8152765,443	6
5	1600/02/19	22:00	308073,423	8152765,443	6
6	1600/02/20	02:00	308073,423	8152765,443	---
7	1600/02/28	20.00	307973,773	8163832,161	20

La ocurrencia de numerosos sismos superficiales en zonas del Grupo Volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (UHTVG), han sido recurrentes en el tiempo, registrándose hasta 38 sismos entre 1945 y 2006 (Ceresis, 1985; Lavallée et al., 2009). Estos sismos, estarían relacionados a sistemas de fallas regionales, locales y en menor número a la actividad netamente volcánica. El análisis de la sismicidad a nivel local, proviene de redes sísmicas temporales, instalados en los volcanes Sabancaya (Antayhua et al., 2002), Ticsani (Aguilar et al., 2001; Tavera, 2006; Antayhua, 2008) y Misti (Llerena, 2002; Centeno et al., 2009).

A pesar de los estragos económicos provocados por la última erupción del Huaynaputina en el año 1600 y que son ampliamente detallados por De Silva et al., (2000), en éste volcán, nunca antes se instaló un equipo sísmico para conocer su estado sismo-volcánico actual. así, el sismógrafo de la Red Sísmica Nacional más próxima al Huaynaputina se encuentra a 30 km al Norte, en el volcán Ubinas. Por esta razón, este informe representa un gran aporte al conocimiento volcánico del Huaynaputina.

El análisis aplicado a los datos sísmicos registrados por la RSTH durante el periodo abril-octubre del 2010, ha permitido inventariar 4561 ondas sísmicas. Todas estas señales sísmicas pertenecen a sismos de origen tectónico ya sea local o regional. En éste análisis, no se ha reconocido ninguna señal de tipo LP (periodo largo), ni tipo tremor, mucho menos tipo explosión, generadas por transporte de fluidos, típico en volcanes activos en proceso de erupción, tal es el caso de los registros obtenidos en el volcán Santa Elena por Scott et al., (2008) entre el 23 de septiembre y 5 de octubre de 2004 (Figura 22). Por otro lado, el 72,5% de la sismicidad registrada por la RSTH en este periodo de estudio, corresponde a $T(S-P) > 5,1$ s (> 52 km de radio epicentral), y solo el 27,5% de la sismicidad estaría

asociado directa o indirectamente al volcán Huaynaputina y al tectonismo circundante.

Con la data registrada por la RSTH, se ha logrado localizar 107 sismos tectónicos locales. La distribución en superficie (Figura 21-A), en profundidad (Figuras 21-B y 21-C) y las magnitudes pequeñas de estos sismos (0,9 a 2,7 Md), podrían estar asociados a la distribución de fallas y/o lineamientos identificados por Lavallée et al. (2006; 2009).

No obstante la dispersión sísmica y la escasa cantidad de hipocentros localizados en el Huaynaputina, se puede apreciar una distribución concéntrica al anfiteatro del volcán y una ausencia de hipocentros en el interior del anfiteatro (Figura 21). Esta distribución, podría estar asociado a procesos de colapso del edificio volcánico descritos ampliamente por Lavallée et al., (2006).

Si bien, durante la operación de la RSTH no se ha sentido ni registrado algún sismo de intensidad importante en la zona de estudio, se presume que los sismos sentidos por los pobladores de Omate, Quinistaquillas y poblados aledaños estarían asociados a la activación y/o reactivación de los sistemas de fallas y lineamientos presentes y circundantes a la zona del volcán Huaynaputina. En tal caso, es necesario ampliar la cobertura de la red sísmica e incrementar el número de estaciones para cubrir completamente la zona de mayor actividad sísmica, con el fin de mejorar la localización hipocentral de los sismos y definir mejor el origen de los mismos.

El agrupamiento 67 sismos localizados al N del anfiteatro del volcán (registrados en agosto de 2010), con profundidades menores a 4 km y magnitudes entre 1.0 y 2.5 Md, estarían asociados al lineamiento NO-SE; mientras que la sismicidad que se presenta al Sur es más dispersa y se localizan entre varias fallas y lineamientos.

Con el propósito de monitorear permanentemente la evolución sísmica del Huaynaputina y del tectonismo adyacente, es imperativo instalar al menos una estación sísmica telemétrica con recepción en la oficina del INGEMMET-Arequipa. Además, la información recabada por esta estación aportaría a la red sísmica nacional que no tiene cobertura en esta zona.

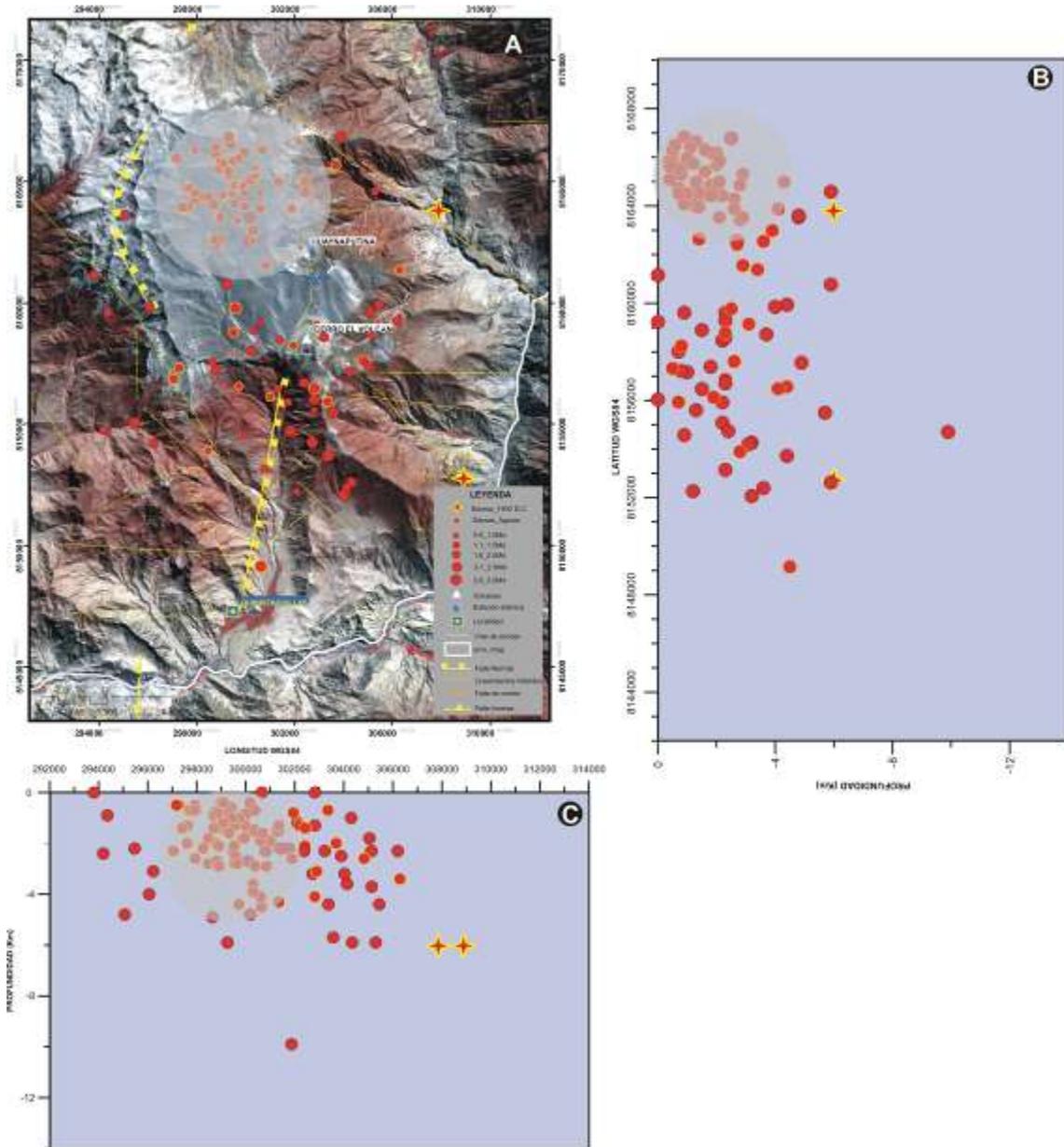


Figura 21. Distribución de la sismicidad del volcán Huaynaputina correspondiente al periodo abril-octubre de 2010 y los registrados durante el proceso de erupción de 1600 D.C.(cruces en color rojo) A). Distribución en superficie; B y C). En profundidad respecto a la latitud y longitud respectivamente. En el círculo con transparencia se presenta a los sismos registrados en agosto de 2010.

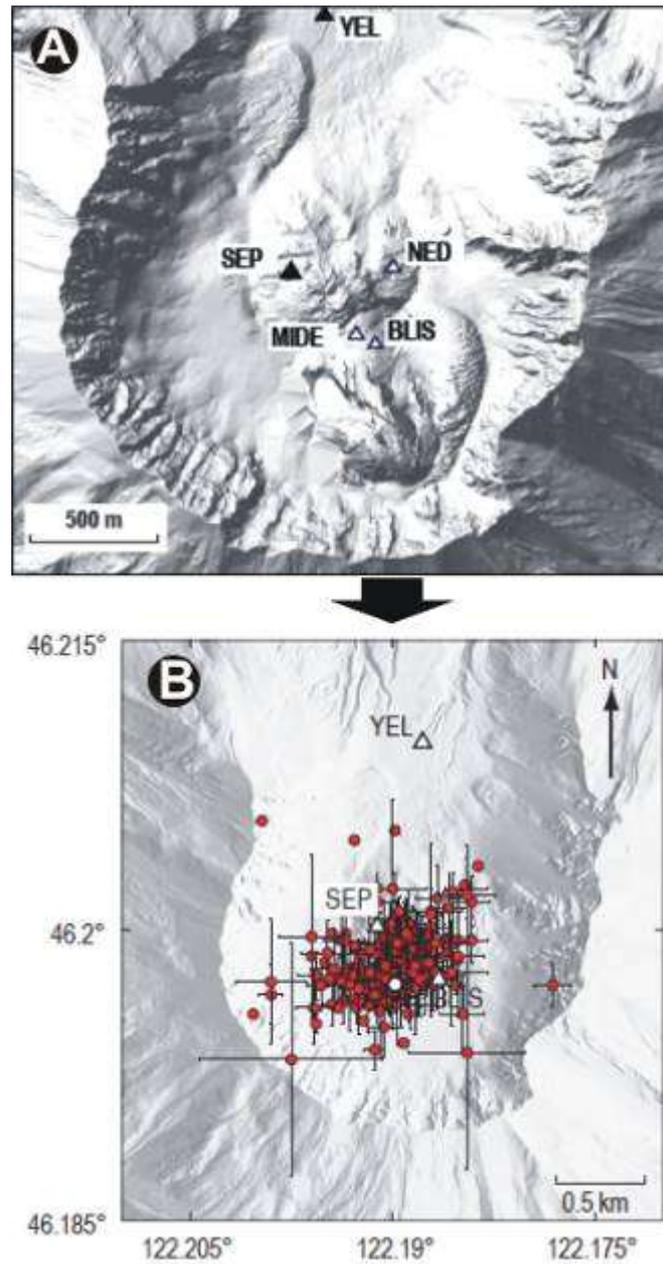


Figura 22. A) Distribución de estaciones sísmicas y B) Sismicidad localizada en el cráter del volcán Santa Elena, entre el 25 de septiembre y el 1 de octubre de 2004.

4.0 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUMAROLAS Y FUENTES TERMALES

Numerosos volcanes han sido estudiados utilizando técnicas geoquímicas, para determinar tanto el origen de los fluidos, los procesos por los cuales son afectados y bajo la influencia de los cuales su circulación y dinámica son controladas. Esta información, permite generar modelos de circulación de los fluidos, por ejemplo, Marini et al., (1991) en Guagua Pichincha-Ecuador, Brombach et al., (2000) en La Soufrière – Guadalupe. De igual forma, permiten apreciar que los sistemas magmáticos e hidrotermales son muchas veces influenciados por controles estructurales, por ejemplo Italiano et al., 1998 en Vulcano; Finizola et al., 2000 en el Estromboli, etc.

Para efectos del monitoreo volcánico, cambios en ciertos elementos químicos han sido observados y correlacionados con cambios en la actividad volcánica (Italiano et al., 1998), como el ocurrido en el volcán Sakurajima donde se observó el aumento de las proporciones SO_4^{2-}/Cl^- antes de la erupción (Hirabayashi et al., 1982). Los gases volcánicos son una parte fundamental de la actividad volcánica y es muy común encontrar emisiones ácidas a altas temperaturas en un cráter activo, donde el componente principal es el vapor de agua con más del 90%, además de gases de Carbono, Azufre, Cloro y otros (Delmelle et al., 2000).

Frecuentemente, en áreas volcánicas activas o en zonas en las cuales la actividad eruptiva ha disminuido o cesado, se pueden observar numerosas fuentes termales, evidenciando así la presencia de los sistemas hidrotermales asociados a la actividad volcánica (Hochstein et al., 2000).

4.1 FUMAROLAS

4.1.1 UBICACIÓN DE LAS FUMAROLAS

En el trayecto Quinistaquillas- Huaynaputina (dos días a lomo de bestia), no se observó ninguna fumarola (Figura 23-A). Sin embargo, desde el borde del anfiteatro (Figura 23-B), se pudo divisar algunas fumarolas en las proximidades del cráter más moderno (Figura 24-A), in situ, junto a las fumarolas, se observó la presencia de vegetación (Figura 24-B). Las fumarolas que desprendían fuertes olores a huevos podridos, emanaban de entre los intersticios de las rocas y presentaban colores blanquecinos (Figura 24-C).



Figura 23. A). Vista del flanco sur del volcán Huaynaputina. B). Vista del interior del anfiteatro del volcán Huaynaputina.



Figura 24. A). La flecha indica la ubicación de las fumarolas en el borde sur del cráter del volcán Huaynaputina. B). Fotografía de la vegetación encontrada en la zona de emisión de las fumarolas, en el borde del cráter. C) Fumarolas encontradas en el volcán Huaynaputina.

4.1.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se realizó el 17 de mayo del 2010. Una vez ubicadas las fumarolas en el interior del anfiteatro, se procedió a medir la temperatura a fin de localizar el punto de emisión más caliente. Para este fin, se utilizó un moderno termómetro digital de propiedad del INGEMMET (Figura 25-A), el cual, se introdujo en los intersticios por donde emanaban los gases fumarólicos (Figura 25-B).

Se realizó diversas mediciones de temperatura en diferentes lugares a lo largo de las fumarolas. Las temperaturas medidas comprenden valores entre 51,8 °C a 78,7 °C. Se localizó el punto de emisión de mayor temperatura (78,7°C) y se le denominó Huaynaputina-Fumarola 1 (HPT-F1) en las coordenadas UTM 19K, 8161940N; 352324E; 4351 msnm (Figura 26-A).



Figura 25. A). Termómetro utilizado para la medición de la temperatura. B). Proceso de medición de la temperatura en las grietas en la roca por donde emanaban los gases fumarólicos del volcán Huaynaputina.

En el punto HPT-F1 se realizó el muestreo de gases fumarólicos mediante el método directo (Fahlquist et al., 1992); para ello, se empleó una botella de Giggenbach al vacío con doble entrada, una solución de NaOH4N y una llave de paso.

El procedimiento de muestreo es ampliamente descrito por Fahlquist and Janik (1992) y Lowenstern et al.(1999). Así, la muestra se tomó captando

el gas con ayuda de un embudo de vidrio, conectado a la botella mediante una manguera de silicona o TYGON (Figura 26-B). El gas introducido en la botella burbujea en la solución de NaOH hasta cubrir el vacío, los gases ácidos reaccionan con la solución y los gases inertes quedan en la botella.



Figura 26. A). Fotografía de la estación de muestreo de gases HPT-F1. B). Fotografía del proceso de muestreo de gases en HPT-F1.

A 12 m. al sur del punto HPT-F1 se instaló una estación de medición continua de la temperatura. Por la proximidad, a este punto también se le denominó HPT-F1. En este lugar, se enterró parcialmente, un tubo de PVC de 1,2 m de largo x 2" de diámetro (Figura 27-A). En esta estación se colocó, inicialmente, un registrador de temperatura HOBO modelo UTL-1, a 1 m de profundidad (Figura 27-B). Este registrador tiene una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y un paso de registro de 30 minutos, posteriormente se cambió por un registrador HOBO modelo UA002-64 con una precisión de $\pm 0,47^{\circ}\text{C}$ y un paso de registro de 15 minutos.



Figura 27. A) Instalación de la estación de medición continua de la temperatura HPT-F1 en el volcán Huaynaputina. B) Foto del momento en que se introduce el registrador HOBO UTL-1 en la estación HPT-F1.

4.1.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS FUMAROLAS

Los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el muestreo y análisis de los gases de las fumarolas en la estación HPT-F1 son presentados en el Cuadro 5. En mayor proporción se encuentra el vapor de agua (H₂O), seguido en menor cantidad el dióxido de carbono (CO₂) y gases de azufre (S).

Cuadro 5. Resultados del análisis de gases muestreados en la estación HPT-F1 en las fumarolas del volcán Huaynaputina.

PARAMETRO	HPT-F1
Fecha	17/05/2010
Temperatura (°C)	78,7
pH (condensado)	5,0
CO ₂ (ppm)	1193
S (ppm)	3,8
H ₂ O (ppm)	991000

La Figura 28, muestra los resultados del registro de temperatura en la estación HPT-F1 durante el periodo mayo a octubre de 2010. En esta figura, se observa que el rango de variación de la temperatura está entre 27,5 °C y 33,2 °C; asimismo, se pueden distinguir dos periodos con tendencias de temperatura claramente definidas: el primer periodo corresponde a una tendencia decreciente de 29,7 °C a 27,5 °C, comprendido entre los meses de mayo a julio; el segundo periodo presenta una tendencia creciente de 27,5 °C a 33,7 °C entre julio y octubre de 2010.

Además, en esta misma figura se observan pequeños aumentos y descensos en casi 2 °C, entre los cuales resaltan los registrados durante la tercera semana de mayo, esta anomalía, probablemente se inició antes de la instalación del registrador; mientras estuvo el registrador UTL-1 no se observó otra variación significativa. Durante el registro del equipo UA002-64 se observaron algunas pequeñas anomalías, destacando los registrados en la segunda y tercera semana de octubre con un descenso y posterior recuperación de 1 °C.

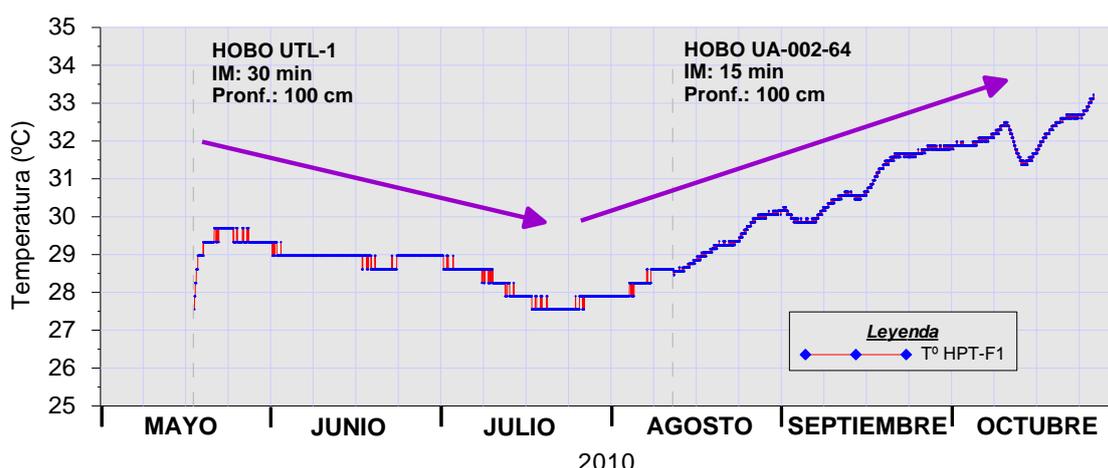


Figura 28. Temperatura registrada entre mayo y octubre del 2010 en la estación HPT-F1 ubicada en el cráter del volcán Huaynaputina.

4.1.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis de gases de las fumarolas del volcán Huaynaputina, son los que se esperarían encontrar en un volcán activo; esto es, gases ácidos a alta temperatura emanado de un cráter, con un alto contenido de agua (más del 99%), seguido de CO₂ y gases de azufre (Delmelle et al., 2000). Los gases poseen un pH=5 a una temperatura de 78,7°C. Características similares fueron encontradas en las fumarolas del volcán Ticsani, que presenta un pH ácido (pH=4) a una temperatura de 82,3 °C (Masías et al., 2010a).

Debido al método de muestreo aplicado, no fue posible diferenciar mayores concentraciones de azufre (S), según lo señalado por Hochstein

and Bruwne (2000), cuando el sistema es dominado por componentes magmáticos, el S se encuentra como dióxido de azufre (SO₂) pero esto ocurre a temperaturas > 130 °C. En el caso del Huaynaputina la temperatura es < 130°C, por lo tanto, es posible que el sistema este dominado por componentes hidrotermales y el S se encuentre, en su mayoría, como sulfuro de hidrogeno H₂S. Esta es una característica de un sistema volcánico-hidrotermal.

La temperatura registrada en la estación HPT-F1 entre el 18 de mayo al 27 de octubre del 2010, presentó el efecto de la estacionalidad, similar a lo observado en el volcán Misti (MST-F1; Masías et al., 2010b), donde las temperaturas más bajas se encontraron entre los meses de julio y agosto y las más altas entre diciembre y enero del mismo año.

4.2 FUENTES TERMALES

4.2.1 UBICACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES

Para la ubicación de las fuentes termales asociadas al volcán Huaynaputina, se ha considerado un área de influencia volcánica de 20 km de radio alrededor del anfiteatro de este volcán (Figura 29). En algunos volcanes como el Popocatépetl se ha encontrado influencia de la actividad volcánica hasta poco más de 40 km. (Martin-Del Pozzo et al., 2001; Inguaggiato et al., 2005). Para este estudio estamos considerando un radio de 20 Km porque se tenía conocimiento previo de la existencia de fuentes termales en esa zona. Sin embargo, es importante remarcar que para este trabajo no se están considerando las fuentes termales del distrito de Matalaque (MAT y HUA) ubicadas a orillas del río Tambo, ya que estas fuentes están asociadas al volcán Ubinas (Comunicado N° 10, 2006; Cruz et al., 2009).

Las fuentes termales muestreadas en este estudio son: Ullucán (ULU) ubicada a 19,7 km al E del Huaynaputina, un afluente del río Tambo es el río Agua Blanca (AGB) cuyo origen se encuentra a 11,3 km al ESE del anfiteatro y otra fuente termal se ubica a la orilla del río Tambo, a 13,4 km al SE del anfiteatro, en la zona denominada Cerro Reventado (CER). El Cuadro 6 y la Figura 29 muestran las ubicaciones y nomenclaturas de estas fuentes termales.

Cuadro 6. Ubicación en UTM de las fuentes termales muestreadas alrededor de volcán Huaynaputina.

Fuente	Codigo	X	Y	Z
Ullucan	ULU	282617	8163127	2808
Cerro Reventado	CER	310302	8151115	1794
Agua Blanca	AGB	310506	8154039	1904

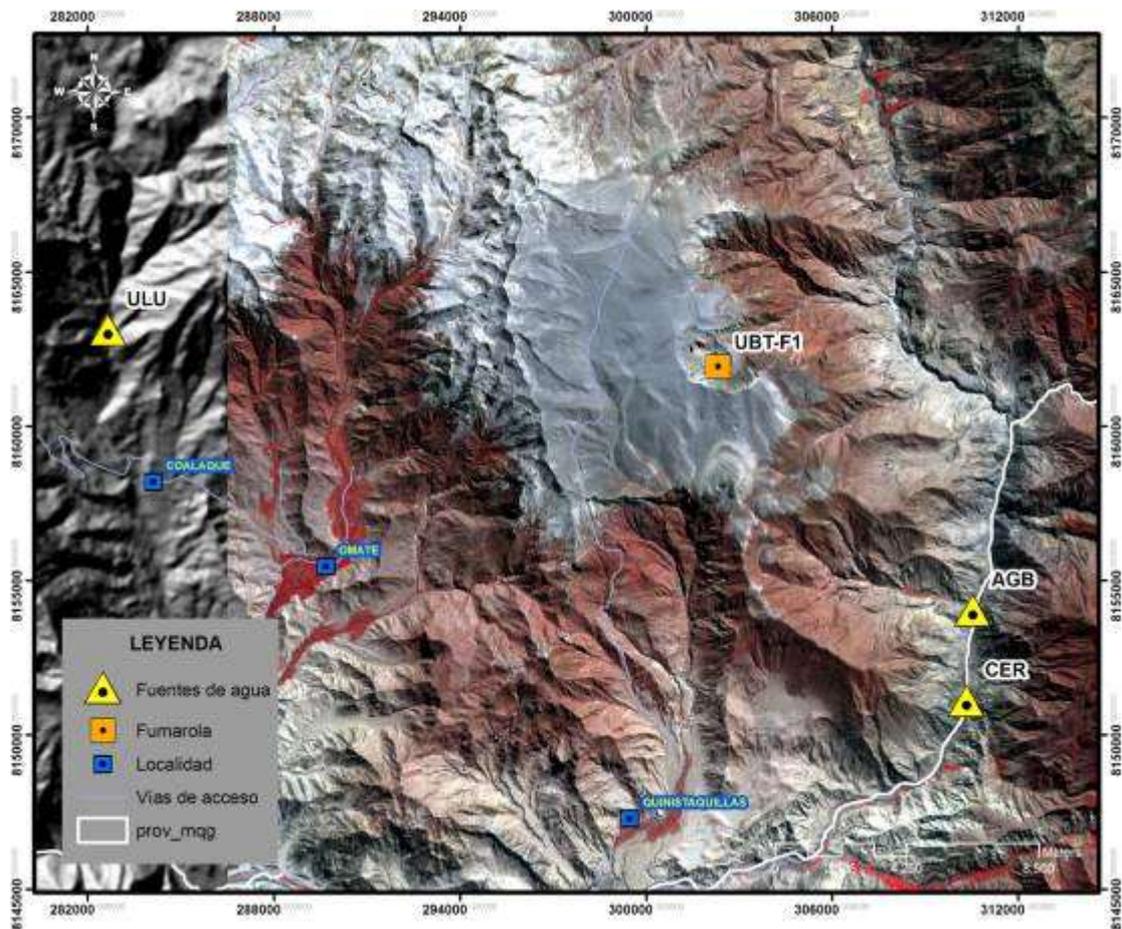


Figura 29. Ubicación de las fuentes termales muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina (ULU, AGB, CER) además se encuentra señalada la ubicación de la estación HPT-F1 en las fumarolas del cráter del Huaynaputina.

4.2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

El muestreo de las fuentes termales se realizó el 20 de mayo y 13 de julio de 2010. Se tomaron 3 muestras de aguas en las fuentes termales CER (Figura 30-A), ULU (Figura 30-B) y el río AGB (Figura 30-C).



Figura 30. A) Fuente termal ULU ubicada a 19,7 km del volcán. B). Fuente CER a 13,4 km del volcán. C) Foto del riachuelo AGB a 11,3 km del volcán.

El muestreo de aguas se realizó tomando el agua directamente del punto de surgimiento de la fuente por inmersión simple, para lo cual se emplearon 2 botellas de plástico, con un volumen de 1L cada una. La primera botella se llenó con la muestra de agua, se tapó y rotuló para los análisis de aniones, la segunda botella se llenó con la muestra de agua previamente filtrada con poro de 45 μm y preservada con HNO_3 1:1 hasta llevarla a $\text{pH}=2$, esta muestra se utilizó para el análisis de cationes.

Los métodos de análisis realizados en el laboratorio se describen en el Cuadro 7. Adicionalmente al muestreo de las aguas, también se realizó la medición de parámetros químicos como el Potencial de Hidrogeno (pH) y físicos como la Temperatura (T°) y la Conductividad Eléctrica (CE), para ello se utilizaron los equipos descritos en la Cuadro 8. La medición fue

directa en el agua surgente, esperando un tiempo prudente para que la lectura sea estable y representativa.

Cuadro 7. Métodos de análisis de las aguas, en el laboratorio INSPECTORATE.

Analito	Metodo y/o Norma de Referencia
Cloruros	EPA 325,3 Chloride, Titrimetric, Mercuric Nitrate; "Methods for Chemical Analysis of Water and Waste; Document 20460; EPA 621-C-99-004, June 1999"
Sulfatos	EPA 374,4 Sulfate (Turbidimetric) "Methods for Chemical Analysis of Water and Waste; Document 20460; EPA 621-C-99-004, June 1999"
Bicarbonatos	SMEWW 21st Ed. 2005.Part-2320 B. Pág 2-27. APHA-AWWA-WEF. Titration Method - Alkalinity.
Metales Disueltos	EPA 200.8 Determination of trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma mass spectrometry. Revisión 5.4, 1994.
Calcio	EPA 215.1 Calcium, Atomic Absorption, Direct Aspiration Sample Preparation Procedure for Spectrochemical Determination of Total Recoverable Elements. "Methods for Chemical Analysis of Water and Waste; Document 20460; EPA 621-C-99-004, June 1999"
Magnesio	EPA 243.1 Magnesium, Atomic Absorption, Direct Aspiration Sample Preparation Procedure for Spectrochemical Determination of Total Recoverable Elements. "Methods for Chemical Analysis of Water and Waste; Document 20460; EPA 621-C-99-004, June 1999"
Sodio	APHA AWWA WEF, Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 21 TH Ed. 2005. Part 3050-Na-B :Sodium Flame Emission Photometric Method; Pag. 3-98.
Potasio	APHA AWWA WEF, Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 21 TH Ed. 2005. Part 3050-K-B :Sodium Flame Emission Photometric Method; Pag. 3-87.

Cuadro 8. Equipos utilizados para la medición de los parámetros fisicoquímicos en las aguas muestreadas.

Ensayo	Equipo	Marca/Modelo	Precisión
T°	Termómetro	AA Precision	±0.1 °C
pH	pH - metro	CyberScan/waterproof	±0.01
CE	Conductímetro	HACH/sensiON5	±0.5%

4.2.3 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS FUENTES TERMALES

Los resultados de los análisis químicos de las fuentes de agua muestreadas en las 3 fuentes termales se encuentran consignados en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Resultados de los análisis químicos de las muestras de aguas termales. DN: no detectado

Fuente	Fecha dd/mm/aa	T° °C	pH	CE μS/cm	TDS mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ⁻ mg/L	SiO ₂ mg/L
ULU	13/07/2010	75.4	5.61	14810	7710	669.5	4346.7	302.0	124.2482
CER	20/05/2010	51.1	6.6	5110	2680	419.5	1302.4	498.6	88.8916
AGB	20/05/2010	22.8	7.83	3660	1893	443.5	680.6	753.6	63.4079
	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Sr mg/l	Li mg/l	Ba mg/L	B mg/L	Mn mg/L
ULU	303.64	50.82	2314.81	438.44	5.4879	20.396	0.2529	251.101	0.7492
CER	272.65	46.62	929.39	55.29	4.3770	3.8318	0.0477	26.5153	0.0206
AGB	330.93	123.2	436.03	22.72	4.6498	1.369	0.0597	14.5571	0.0910
	Al mg/l	Cu mg/L	Zn mg/L	Fe mg/L	Ni mg/L	Cr mg/L	As mg/L	Hg mg/L	Co mg/L
ULU	0.0087	0.039	0.0055	0.8609	0.0069	0.0269	40.679	ND	0.0016
CER	0.0022	0.016	0.0047	ND	0.0048	0.0054	1.4665	0.0006	0.0002
AGB	0.0046	0.01	0.0051	0.0567	0.0063	ND	0.0614	0.0004	0.0002

4.2.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A. TEMPERATURA (T°): Las fuentes muestreadas en el volcán Huaynaputina, presentaron temperaturas entre 22,8 °C y 75,4 °C. Estas temperaturas son similares a los registrados en las fuentes termales del volcán Ticsani, donde se midieron hasta 95 °C (Masías et al., 2010a); sin embargo, éstas resultan ser relativamente altas al compararlos con las temperaturas medidas en las fuentes termales asociadas a los volcanes Misti y Ubinas, los mismos que se encuentran por debajo de 40 °C (Masías et al., 2010b, Masías et al., 2008),

B. POTENCIAL DE IÓN HIDROGENO (pH): El pH de las fuentes termales ULU y CER presentaron aguas ligeramente ácidas, mientras que la del río AGB, es ligeramente básica, esta diferencia, podría estar sujeto a la presencia de gran cantidad de materia orgánica en el agua.

C. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) y SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS TDS: La CE y el TDS, por lo general, se encuentran estrechamente vinculados entre sí, por ello, al compararlos en la Figura 31, se puede observar la proporcionalidad entre ambos. Las 3 fuentes presentaron una alta CE, lo que se puede interpretar como una alta cantidad de sales disueltas y su origen podría estar asociada a la interacción agua-roca (Inguaggiato et al., 2005).

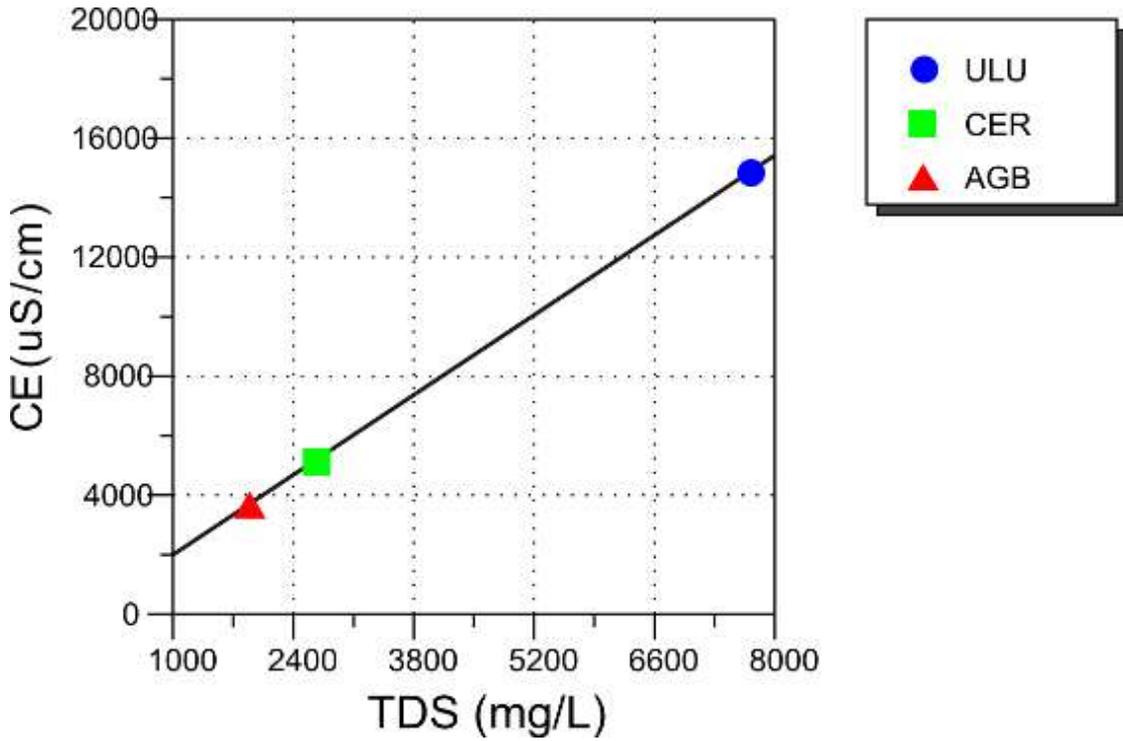


Figura 31. Gráfica donde se compara la conductividad eléctrica (CE) con los sólidos totales disueltos (TDS).

Al comparar los resultados de la CE y la temperatura de las tres fuentes, no se alinearon, indicando que no hay una relación entre temperatura y las sales disueltas en las 3 fuentes (Figura 32).

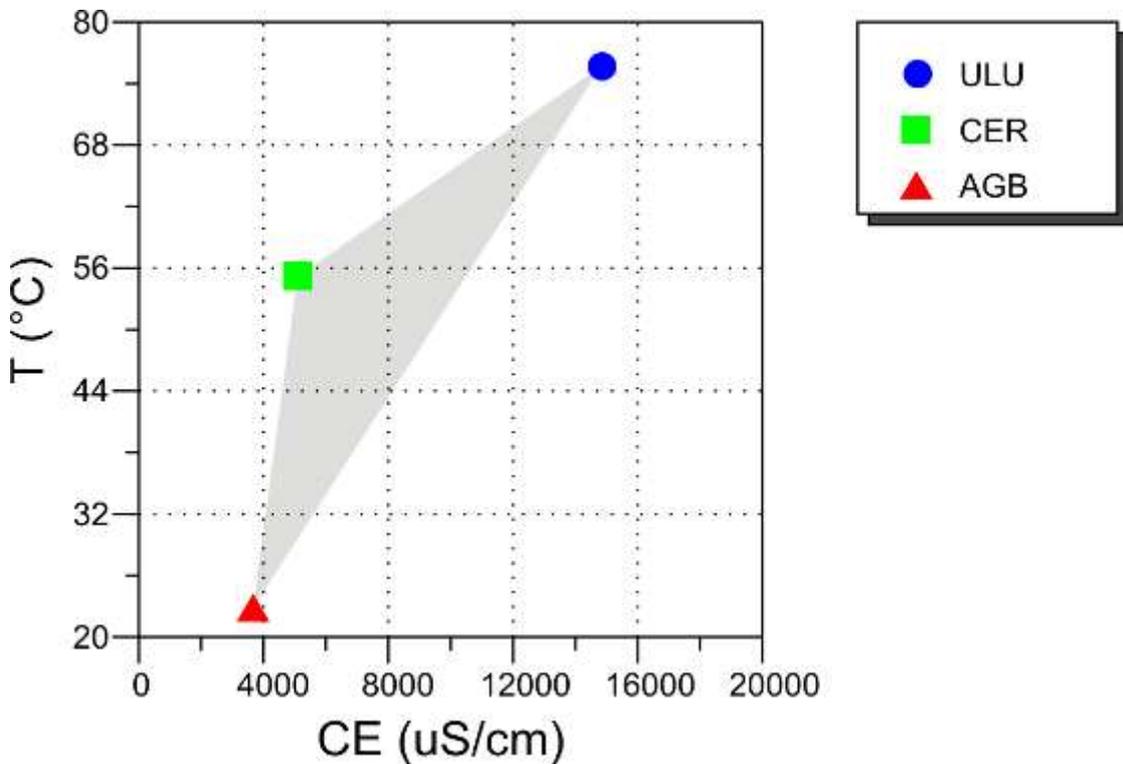


Figura 32. Gráfica donde se compara la temperatura (T) con la CE de las fuentes.

D. TIPOS DE AGUAS: Los tipos de aguas se determinan utilizando el diagrama de Piper-Hill-Langelier (Figura 33), la cual consta de 2 diagramas ternarios: uno de aniones mayoritarios (cloruros, sulfatos, bicarbonatos) y otro de cationes mayoritarios (magnesio, calcio, sodio + potasio).

Los datos de ambos diagramas se extrapolan a un tercer diagrama en forma de rombo, los que se encuentran separadas en 4 cuadrantes, donde se representan los 4 tipos de aguas, según su composición mayoritaria.

Las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina son de los siguientes tipos:

Clorurada-Sulfatada Alcalina: ULU y CER

Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Terrea: AGB

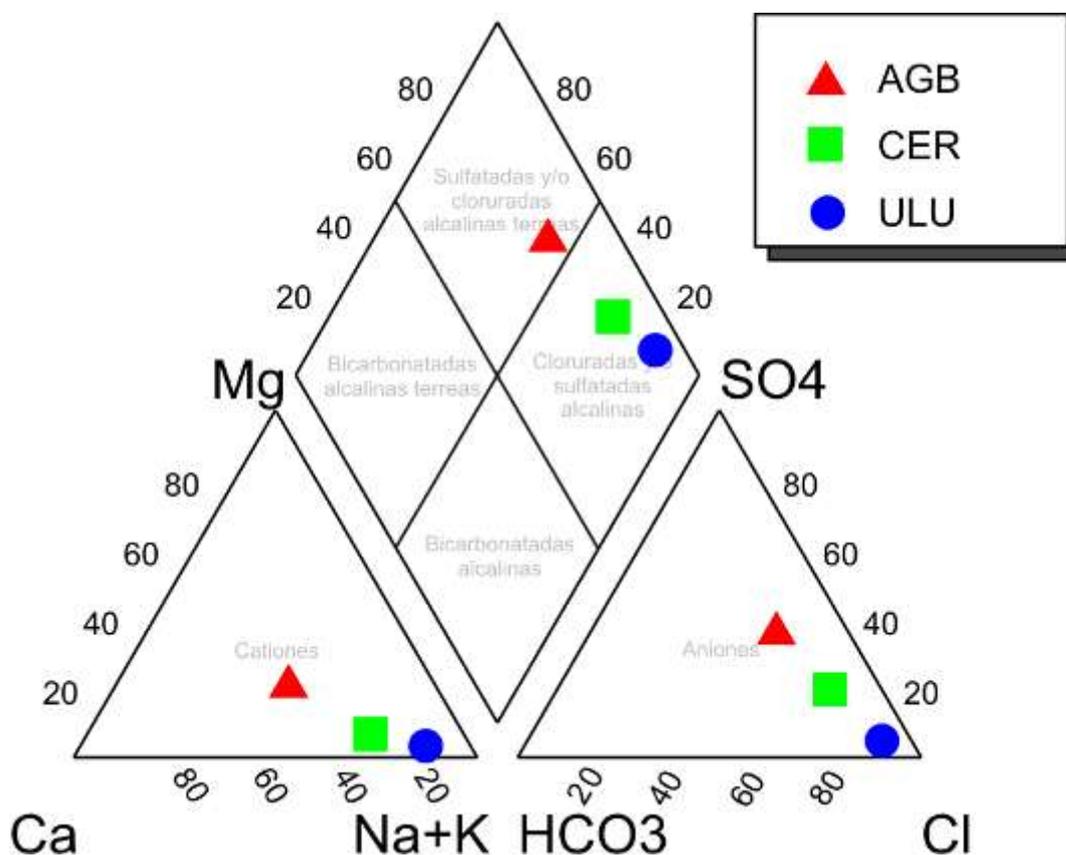


Figura 33. Diagrama de Piper-Hill-Langelier, donde se pueden observar que las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran graficadas en 2 de los cuadrantes: Clorurada-Sulfatada Alcalina, las fuentes ULU y CER, Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Terrea, el agua del río AGB.

E. ANIONES MAYORITARIOS Y POSIBLE ORIGEN DEL AGUA: Al graficar en el Diagrama Ternario $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ (Figura 34), se puede observar que la fuente ULU, se ubica en la zona de aguas cloruradas, con un posible origen profundo. Las fuentes CER y AGB se ubican cerca de la zona de mezcla de aguas cloruradas sulfatadas con un posible origen en condensados volcánicos y ligeramente orientadas hacia las aguas diluidas. En el caso de CER, esta fuente se encuentra cerca de la zona de aguas cloruradas profundas.

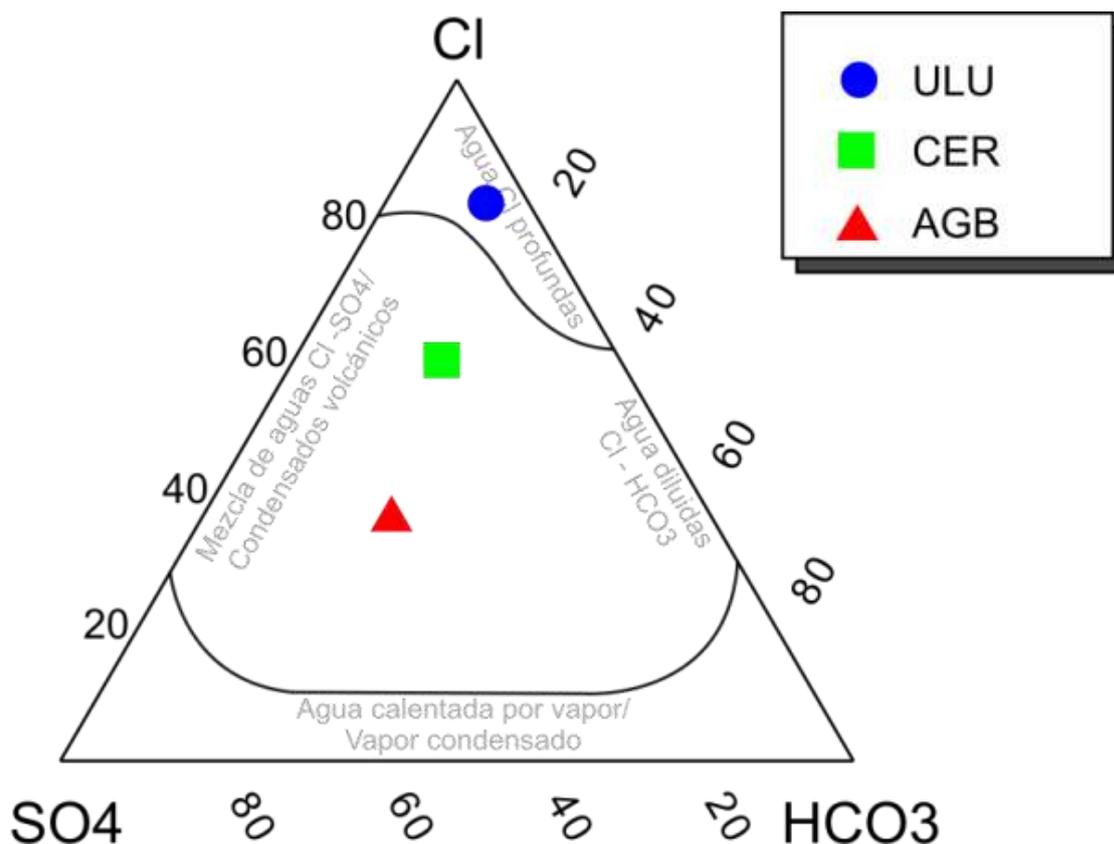


Figura 34. Diagrama ternario de aniones mayoritarios $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ donde las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran en los cuadrantes de aguas cloruradas profundas (ULU) y aguas cloruradas sulfatadas con un posible origen en condensados volcánicos, ligeramente orientadas hacia las aguas diluidas (CER y AGB).

F. GEOTERMÓMETRO: El Diagrama Ternario del Geotermómetro (Giggenbach, 2008), muestra en sus diferentes campos la posible temperatura del agua en el reservorio, esto a partir de proporciones de los elementos disueltos de calcio, sodio y magnesio, los que tienen origen en la roca encajante del reservorio del acuífero termal, y que se disolvieron, gracias a la acidez y temperatura del agua.

Al realizar el diagrama del geotermómetro (Figura 35), se pudo observar que la fuente ULU se encuentra cerca de la zona de equilibrio parcial

correspondiente a una temperatura mayor a los 200 °C. Igualmente, la fuente CER, se encuentra cerca de la zona de equilibrio parcial; esta fuente termal, podría presentar una temperatura ≥ 100 °C en el reservorio, mientras que el agua del río AGB, presentaría una temperatura < 100 °C y por tanto, una mayor dilución con aguas superficiales.

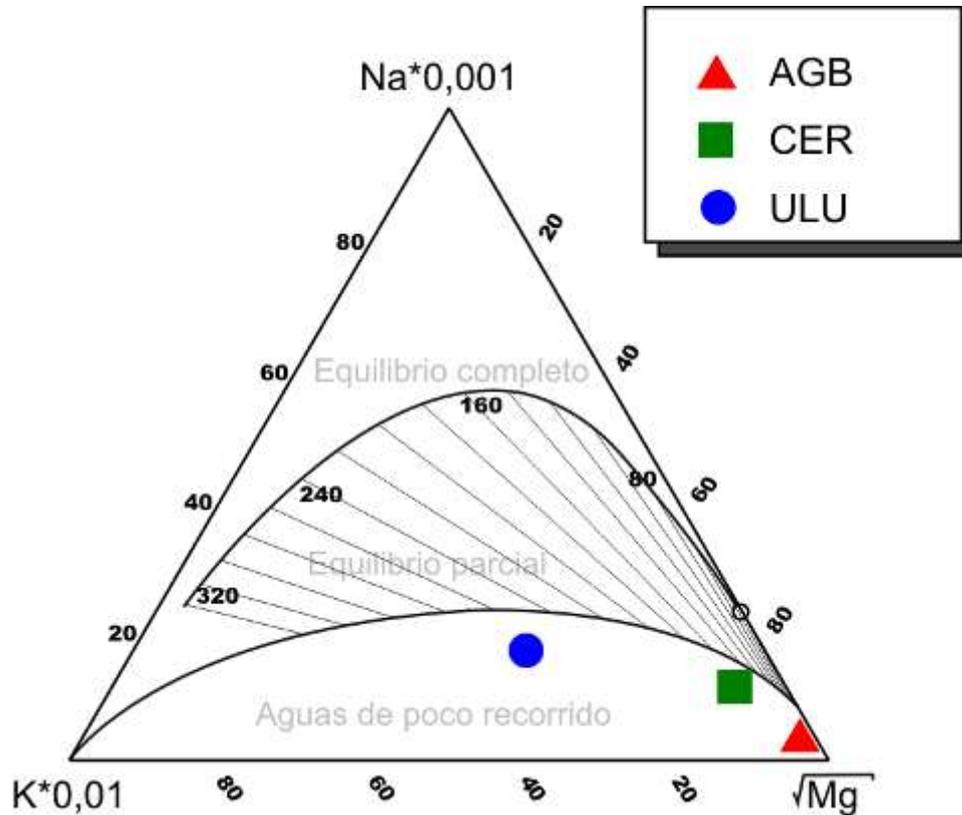


Figura 35. Diagrama del geotermómetro (Giggenbach, 2008), donde se encuentran graficadas las fuentes de agua muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina y la temperatura aproximada en el reservorio.

CONCLUSIONES

Del monitoreo sísmico temporal del volcán Huaynaputina, se concluye lo siguiente:

- 1) El volcán Huaynaputina ($16^{\circ}45'S$; $70^{\circ}51'O$; 4850 msnm), fue estudiado mediante la Red Sísmica Temporal (RSTH) que operó entre abril y octubre del 2010. Esta red estuvo compuesta por seis sensores sísmicos digitales: dos de banda ancha marca Guralp y modelo 6TD y, cuatro sensores de periodo corto, marca Sara y modelo SL06.
- 2) Los típicos análisis que el INGEMMET aplica a los datos sísmicos (análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias), permitieron inventariar un total de 4561 ondas sísmicas. Esta sismicidad fue clasificada por rangos T(S-P): $< 2,5$ s; $2,6$ s $< 5,0$ s; $5,1$ s $< 10,0$ s; $10,1$ s $< 20,0$ s y $> 20,0$ s. En ésta distribución, la mayor concentración sísmica se presenta entre los rangos de T(S-P) $> 20,1$ s, con el 30.5% de la sismicidad total y con una frecuencia de 8,1 sismos diarios; seguidamente, se encuentra la sismicidad con T(S-P) entre 10,1 y 20,0 s con el 26% y con una recurrencia de 6,9 eventos por día; y la sismicidad con T(S-P) de 5,1 a 10,0 s, con el 16% y una recurrencia de 4,3 sismos diarios. La menor cantidad de señales sísmicas se concentran entre los rangos con T(S-P) de 2,6 a 5,0 s (15%) y T(S-P) $< 2,5$ s (12,5%) con 4 y 1,7 sismos por día respectivamente.
- 3) Adicionalmente, se ha realizado la estimación de la energía sísmica de los datos compuestos por las estaciones HNA4 y HNA5 para el periodo mayo-octubre de 2010. Los resultados de éstos cálculos indican que la energía emitida por los sismos asociados al Huaynaputina y su entorno tienen valores inferiores a 0,1 Megajoule (MJ). Asimismo, el valor de la energía acumulada al final de este periodo es de 9765 MJ (58 MJ por día).

De la localización hipocentral se concluye lo siguiente:

- 4) La Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina permitió construir una base de datos HPNA1 compuesta por 107 sismos tectónicos locales, registrados en 3 a más estaciones.
- 5) La localización hipocentral de estos sismos, presentan errores menores a 5 km en sus parámetros hipocentrales: latitud, longitud y profundidad focal.
- 6) La profundidad de los hipocentros son menores a 9,9 km, sin embargo el mayor número de ellos ocurren entre 0,4 y 5 km.
- 7) La magnitud de los sismos oscilan entre 0,9 y 2,7 Md, siendo los más recurrentes los sismos con magnitudes entre 1,0 y 2,5 Md
- 8) La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad, muestra un agrupamiento importante al NO, S y SO del cráter del volcán Huaynaputina.

- 9) La sismicidad registrada al NO del volcán Huaynaputina, corresponden a los registrados en el mes de agosto de 2010, por su ubicación y profundidad, estaría correlacionado con el lineamiento NO-SE.
- 10) La sismicidad registrada al Sur del volcán Huaynaputina se registró en los diferentes meses de monitoreo y su distribución es más dispersa, localizándose entre sistemas de fallas y lineamientos, sin una tendencia clara.
- 11) No hay sismicidad local en el anfiteatro del volcán, aún cuando la red estuvo instalada rodeando y dentro de la misma, lo que podría indicar una relativa estabilidad de la actividad volcánica del Huaynaputina.

De la caracterización geoquímica de fumarolas y fuentes termales, se concluye lo siguiente:

- 12) El volcán Huaynaputina presenta manifestaciones geotermales propias de un volcán activo, como son, las fumarolas en el cráter y fuentes termales alrededor del edificio volcánico.
- 13) Las fumarolas del cráter son de naturaleza ácida ($\text{pH}=5$), con una temperatura máxima de $78,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con presencia de gases de CO_2 y de S, en un matriz de vapor de agua ($> 90\%$).
- 14) La medición continua de la temperatura en las fumarolas del cráter (HPT-F1) entre mayo y octubre del 2010 varió entre $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $33,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrándose la menor temperatura en invierno (julio) y la máxima en primavera (octubre) como efecto de la estacionalidad. Además se distinguieron algunas anomalías como la de mayo ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y octubre ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$), que podrían estar asociados con la actividad del sistema volcánico-hidrotermal.
- 15) Las fuentes termales ULU y CER presentan temperaturas que alcanzan los $75,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y corresponden a aguas Clorurada-Sulfatada Alcalina con un posible origen en componentes magmáticos, en el caso de ULU con un reservorio profundo; mientras que el río AGB, presenta aguas Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Terrea, posiblemente alimentadas por fuentes termales.
- 16) Las temperaturas estimadas en el reservorio para la fuentes son: $\text{CER} \geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{ULU} > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para $\text{AGB} < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las dos primeras fuentes se encuentran cerca al equilibrio parcial mientras que la tercera podría estar contaminada con aguas superficiales.
- 17) Estos resultados obtenidos en las fumarolas y fuentes termales hacen presumir que el volcán Huaynaputina presente un sistema volcánico – hidrotermal.

RECOMENDACIONES

- 1) Con la distribución sísmica observada en la zona del volcán Huaynaputina, durante este periodo de estudio, se recomienda ampliar la cobertura de las estaciones sísmicas, con el fin de optimizar la localización hipocentral de los sismos y conocer con detalle su origen.
- 2) Considerando la historia eruptiva del Huaynaputina, se recomienda instalar al menos una estación sísmica con transmisión por telemetría a la oficina del INGEMMET-Arequipa a fin de monitorear la evolución sismo-volcánica de este volcán.
- 3) A fin de incrementar el conocimiento tecto-volcánico del Huaynaputina, se recomienda efectuar mediciones de Potencial Espontáneo y georradar en todo el edificio volcánico.
- 4) Considerar el muestreo periódico de las fumarolas del cráter del volcán Huaynaputina y de las fuentes termales ULU y CER respectivamente; asimismo, continuar con la medición continua de la temperatura en la estación HPT-F1 ubicada en las fumarolas del cráter del volcán Huaynaputina, a fin de contar con una base de datos óptima que permitiría identificar posibles anomalías asociadas a una posible erupción del volcán Huaynaputina.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Municipalidad Provincial de Sánchez Cerro por el apoyo brindado durante todo el periodo de monitoreo temporal del volcán Huaynaputina. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a las autoridades y personal de apoyo de la localidad de Quinistaquillas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, N. De Silva, S.L., Self, S., Salas, G., Permenter, J., and Schubring, S. (2001). The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bull. of Vul.* 62, 8: 493-518.
- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., y Palza, H. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate-Moquegua) del 6 de mayo de 1999. *Bol. Soc. Geol. Perú*, v. 91: 69-80.
- Antayhua (2002). Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991) Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa). Tesis de Ingeniero. 146 pp.
- Antayhua, Y., Ramos, D. (2008). Análisis de la sismicidad registrada en el volcán Ticsani (Moquegua), periodos abril y agosto-noviembre de 2008. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Informe Técnico. 31 pp.
- Boatwright, J. (1980). A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70 (1), 1– 27.
- Brombach, T., Marini, L. & Hunziker, J.C. (2000). Geochemistry of the thermal springs and fumaroles of Basse-Terre Island, Guadalupe, Lesser Antilles. *Bull. Volcanol*, 61, p 477-490.
- Centeno, R., y Macedo, O. (2009). Análisis preliminar de la actividad sísmica del volcán Misti. XVIII Simposio Peruano de Física. 11 pp.
- Ceresis (1985). Catalogue of earthquakes for South America: description of the catalog and national reports. Asociación de Publicaciones Educativas, Perú, Lima. 191 pp.
- Comunicado N°10 (18 de agosto 2006). Comisión científica y Técnica Ad –Hoc, en relación a la situación del volcán Ubinas. 1p.
http://www.ingemmet.gob.pe/web/webubinas/images/comunicados/Comunicado_Ubinas_19_08_06_800x600.gif
- Cruz V., Gonzales, K., Macedo, O., Fournier, N. (2009) Caracterización Geoquímica de las Fuentes Termales y Frías Asociadas al Volcán Ubinas en el Sur del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú* 103: p. 265-281
- Delmelle P., Stix, J. (2000). Volcanic Gases. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. USA. P. 804.
- De Silva, L. and Francis, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes*. Springer-Verlag, New York.

De Silva, S.L. and Zielinski, G (1998). The global impact of the 1600 AD eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Nature*, 293: 455-458.

De Silva S., Alzueta, J. and Salas G. (2000). The socioeconomic consequence of the 1600 AD eruption of Huaynaputina, in Heiken, G., and McCoy, F., eds., *Volcanic hazards and human antiquity: Geological Society of America Special Paper 345*, p. 15–24.

Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonic deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Jour. Of South American Earth Sciences*, v. 4, p. 13-24.

Fahlquist, L., Janik, C. (1992). *Procedures for Collecting and Analyzing Gas Samples from Geothermal Systems U.S. Department of Interior. USGS. 19 p.*

Finizola, A., Sortino F., Lénat J-F., Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and soil gas surveys. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 116, p. 1-2, 1-18.

Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca-geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, p 2749-2765.

Hirabayashi, T., Ohsaka, K., Ozawa, T. (1982). Relationship between volcanic activity and chemical composition of volcanic gases: a case study on Sakurajima Volcano. *Geochem. J.* 16: pp 11 – 2.

Hochstein, M., Browne, P. (2000). *Surface Manifestations of Geothermal Systems With Volcanic Heat Sources. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press. USA. p 837.*

INGEMMET 2000a. Mapa geológico del cuadrángulo de Ichuna (33-u); escala 1:100,000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú.

INGEMMET 2000b. Mapa geológico del cuadrángulo de Omate (34-u); 1:100,000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú.

Isacks, B.L. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Jour. of Geo. Res.* 93: 3211-3231.

Inguaggiato S., Martin-Del Pozzo A.L., Aguayo A., Capasso G., Favara R. (2005). Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl volcano (Mexico): evidence of gas-water interaction between magmatic component and shallow fluids. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141, p 93.

Italiano, F., Pecoraino, G., & Nuccio, P.M. (1998).- Steam output from fumaroles of an active volcano: Tectonic and magmatic-hydrothermal controls on the degassing system at Vulcano (Aeolian arc). *Journal of Geophysical Res.* 103, B-12, 29,829-29,842.

Johnson J. B. and Aster R. C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during strombolian eruptions.- *JVGR*, 148, 334-354.

Klein, F. (1978). Hypocenter location program Hypoinverse. U.S. Geological Survey. Open Field Report, 78-694.

Lazo, M., Kosaka, R., Minaya, A., Gonzales, E., y Soto, J. (1991). Evaluación de la actividad sísmica del volcán Sabancaya: VII Congreso Peruano de Geología, Lima: volumen de resúmenes extendidos, p. 19-21.

Lavallée, Y., de Silva, S.L., Salas G., Byrnes, J-M. (2006). Explosive Volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru. *Bull of Vul.* 68, 4: 333-348.

Lavallée Y., L. de Silva S.L., Salas G., Byrnes J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (THTVG), southern Peru. *Jour. Vol. and Geoth. Res.* 186:253-264.

Lesage, P. (2009). ELSEVIER. Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signal. *Computer & Geociencias*, 35: 2137-2144.

Liener, B. (1994). Hypocenter 3.2. A computer Program for Locating Earthquakes Locally, Regionally and Globally. Hawaii Institute of Geophysics and Planetology. 23 p.

Llerena, P. (2000). Características de la sismicidad observada en octubre 2001 en el volcán Misti (Sur del Perú). Universidad Nacional de San Agustín. Tesis de Ingeniero. 151 p.

Marini, L., Agostini, A., Cioni, R., Guidi, M., & Leon, O. (1991).- GuaguaPichincha volcano, Ecuador: fluid geochemistry in volcanicsurveillance. *Journal of Volcanology and Geothermal Res.*, 46, pp21-35.

Martin-Del Pozzo A.L., Aceves, Espinasa R., Aguayo A., Inguaggiato S., Morales P., Cienfuegos E. (2002). Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical GEOLOGY* 190, p 211.

Masías, P., Antayhua, Y., Ramos, D. (2010a). Monitoreo Geoquímico de las Fumarolas y Fuentes Termales Alrededor del Volcán Ticsani 2005 -2009 (Moquegua). XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp. N° 9. Cusco. P. 1132 – 1135.

Masías, P., Antayhua, Y., Ramos, D. (2010b). Monitoreo de las Fuentes Termales y Fumarolas del Volcán Misti (Arequipa 2005 – 2010). XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp. N° 9. Cusco p. 1136 – 1139.

Masías P., Antayhua Y., Cruz V., Rivera M. & Mariño J. (2008). Vigilancia Geoquímica y Visual del Volcán Ubinas Periodo 2005 – 2008, Presentación oral, Congreso Latino Americano de Geología, Lima, CD resúmenes 4p.

McNulty, B.A., Farber, D., Wallace, G., Lopez, R., Palacios, O. (1998). Role of plate kinematics and plate-slip vector partitioning in continental magmatic arcs: evidence from the Cordillera Blanca, Perú. *Geology* 26, 9: 827-830.

Norabuena, E., Dixon, T., Stein, S. (1999). Deceleration Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geoph. Res. Lett.* 26: 3405-3408.

Ottmoller, L., Voss, P. and Havskov, J. (2010). SEISAN. Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and Macosx. Versión 8.3. Departamente Earth Science. University of Bergen, Bergen, Norway. 348 p.

Ramos D., Antayhua, Y. (2010). Sismicidad de la región del volcán Sabancaya, periodo 2009-2010. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Informe técnico. 49 p.

Smol F, L., Morche, W., y Núñez S. (1997). Boletín N° 16 Serie C: Geodinámica e ingeniería geológica. Proyecto: Album de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del Suroeste del Perú. Riesgo volcánico en el Sur del Perú. Lima-Perú. Mayo, 1997. 100 p.

Simkin, T. and Siebert, L. (1994). *Volcanoes of the world*, Geoscience, Press, Tucson.

Tamban, M., Chaturvedi, A., Rajakumar, A., Naik, S.S., D'Zousa, W., Singh, A., Rajan, S., Ravindra, R. (2006). Aerosol perturbation related to volcanic eruption during the past few centuries as recorded in an ice core from the Central Dronning Maud Land, Antarctica. *Current Science*, v. 91, 9: 1200-1207.

Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre de 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú. Informe técnico. 77 p.

Thouret, J-C., Dávila, J., Eissen, J-P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano A.D. 1600, southern Peru. *Geology* 27: p. 435-438.

Thouret, J-C., Juvigne, E., Gourgaud, A., Boivin, P., and Davila, J. (2002). Reconstruction of the AD 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles: *Jour. Vol. and Geoth. Res*, v. 115: 529-570.

ANEXO 1

Solicitud de la Municipalidad Provincial General Sánchez Cerro – MPGSC (Oficio N° 095-2010-A/MPGSC-O del 24 de febrero de 2010).

