



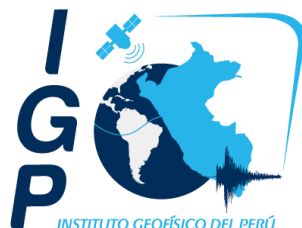
PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Área
Vulcanología

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



Observatorio Vulcanológico de Sur

INFORME TÉCNICO

ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) PARA EL PERIODO JULIO-SETIEMBRE DEL 2015

PRESENTADO POR:

Bach. John Edward Cruz Igme

FECHA: SETIEMBRE 2015



INDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES	3
1.1 Ubicación	3
1.2 Contexto geomorfológico y estructural	4
1.3 Objetivos	5
2. ANÁLISIS DE SEÑALES SISMO-VOLCANICAS	5
2.1 Espectro de frecuencias	6
2.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma)	7
3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS	8
3.1 Red sísmica	8
3.2 Características de las estaciones e instrumentos utilizados	10
3.2.1 Estación TCN1	10
3.3 Estación HCO	11
4. TRABAJOS EN CAMPO	12
5. ACTIVIDAD SÍSMICA	16
5.1 Sismos de fractura	17
5.2 Sismos de baja frecuencia	17
5.3 Eventos tipo Tremor	18
6. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS	22
CONCLUSIONES	25
RECOMENDACIONES	26
BIBLIOGRAFIA	27



INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Mapa de Ubicación del área de estudio, en el departamento de Moquegua. El triángulo rojo representa al volcán Ticsani.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2 Caldera de destrucción, domos D1, D2 y D3 del volcán Ticsani</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3 estructuras locales de la región del volcán Ticsani (Lavallé et al., 2009).</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 Representación de una señal $x(t)$ bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.3 Análisis tiempo-frecuencia.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3.1 Red telemétrica Ticsani y estación temporal HCO instaladas en la región del volcán Ticsani.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.2 Periodo de funcionamiento de la red Ticsani Julio- Setiembre 2015. La Barra azul, representa el correcto funcionamiento de las estaciones.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.3 Registrador Guralp DM 24.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.4 Registrador REFTEK 130S -01/03.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.5 un sismómetro de banda ancha de marca Trillium Compact Nanometrics 120s.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.6 Sismómetro Lennartz LE-3D.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4.1 Registros fotográficos de los trabajos en campo durante la instalación de la estación telemétrica TCN1. Esta estación está ubicada sobre el domo D3.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4.2 Ascenso al volcán Ticsani, Se observa el domo D3, este domo es el mas reciente emplazado en este macizo.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4.3 Toma de temperaturas en los centros fumarólicos del volcán Ticsani.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.4 Registro de temperaturas tomadas en el volcán Ticsani. La mayor temperatura alcanzo los 82 °C.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.5 Registro fotográfico de la extracción de datos sísmicos en la estación HCO</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5.1 Proporción de sismos registrados de julio a setiembre 2015 por las estaciones TCN1 y HCO.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5.2 Ejemplo de sismo de fractura registrado por la estación TCN1 el 27 de setiembre a las 05:32hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5.3 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación HCO el 07 de julio a las 19:29hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5.4 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación TCN1 el 11 de agosto a las 11:21hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5.5 Histograma de ocurrencia de eventos relacionados a fractura de rocas. Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.6 Histograma de ocurrencia de eventos de periodo bajo relacionados al paso de fluidos. Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.7 Histograma de ocurrencia de eventos de tipo tremor .Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.8 Incremento de actividad registrado por la estación TCN1 en el volcán Ticsani. Los eventos del sismograma se produjeron entre el 22 y 23 de setiembre y corresponden a eventos de tipo Volcano-Tectónicos.....</i>	<i>21</i>



Figura 5.9 Análisis de diferencia de tiempo de arribo de ondas sísmicas P y S. En el periodo Julio-Setiembre 2015 se registraron sismos con tiempos t_{s-p} menores a 1.5s..... 22

Figura 6.1 Distribución en superficie de la sismicidad registrada entre julio y setiembre de 2015. Se observa una mayor concentración de sismos en el lado oeste del volcán Ticsani. 23

Figura 6.2 Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad de la región del volcán Ticsani. Periodo Julio – setiembre 2015..... 24



INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Ubicación de cada una de las estaciones en coordenadas geográficas y UTM.....10

Tabla 4.2 Características de las estaciones sísmicas de la red Ticsani 2014. ¡Error! Marcador no definido.



RESUMEN

El volcán Ticsani ($16^{\circ}45'3''S$, $70^{\circ}36'1''O$ 5133msnm) presenta una importante actividad sísmica relacionada a fractura de rocas. En el periodo de análisis que comprende los meses de julio, agosto y setiembre de 2015 se ha observado un incremento de sismicidad importante desde el día 06 de setiembre, llegando a registrarse hasta 733 sismos el día 15 de setiembre. Durante estos meses se registraron un total de 9871 eventos sísmicos de los cuales el 98% corresponden a sismos relacionados a Fractura de Rocas, 1% relacionado a sismos de Baja Frecuencia y 1% a eventos tipo Tremor.

También fueron localizados un total de 16 eventos energéticos registrados por las redes telemétricas del OVS, La ubicación de estos eventos se sitúa a 3km al lado Oeste del volcán Ticsani y a proximidades del domo D1, con profundidades entre 1km y 5km y magnitudes que varían de 2.8ML y 3.8ML.

Por otro lado el OVS-IGP ya cuenta con el funcionamiento de una estación telemétrica que viene transmitiendo datos en tiempo real desde el 07 de agosto de 2015 y continúan los trabajos en campo para completar esta red. El OVS realiza visitas periódicas al volcán Ticsani, en este periodo se realizó un salida a campo para la extracción de datos de la estación HCO y la toma de temperaturas de los centros fumarólicos. La máxima temperatura registrada fue de $82^{\circ}C$.



INTRODUCCIÓN

El volcán Ticsani (3297000 N, 8146400 E Zona 19K 5133 msnm) es un estrato volcán que pertenece a la Zona Volcánica Central de los Andes, constituido por un complejo de domos de lavas andesíticas a dacíticas y una caldera de destrucción. Se encuentra ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, considerado parte del grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée et al., 2009). La más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un IEV entre 2 y 3 de tipo freatomagmática (Mariño y Thouret, 2003), actualmente existen fumarolas de manera restringida.

La zona del volcán Ticsani ha presentado una sismicidad importante en los últimos años, asociados a la tectónica local (Aguilar et al., 1999; Tavera, 2006). Desde mayo del 2014 el OVS viene monitoreando este volcán de manera continua mediante la instalación de estaciones temporales y visitas programadas de manera periódica para la extracción de datos sísmicos así como el mantenimiento de las estaciones. Actualmente se cuenta con una estación telemétrica TCN1, la cual permite la obtención de datos en tiempo real en la sede OVS para el monitoreo constante de este macizo.

El presente informe describe de la actividad del volcán Ticsani mediante el procesamiento y análisis de datos obtenidos en un monitoreo sismovolcánica haciendo uso de una estación temporal y otra telemétrica, realizado entre julio y setiembre de 2015. Los resultados obtenidos darán muestra de cuál es el tipo de actividad principal en el volcán Ticsani.

1. GENERALIDADES

1.1 Ubicación

El volcán poligenético Ticsani se encuentra ubicado en el segmento sur de la cordillera occidental de los andes peruanos, de coordenadas 16°45' de Latitud Sur y 70° 36' de Longitud Oeste. Se encuentra a una distancia de 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua con una altitud máxima de 5408 m.s.n.m. (*fig. 1.1*)

Este volcán pertenece a la jurisdicción del distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto del departamento de Moquegua. En el flanco oeste del volcán Ticsani y dentro de un radio de 11 km se encuentran los centros poblados: Soquesane, Quebaya, Calacoa, San cristobal, Carumas, Cambrune como los más resaltantes cercanos al volcán, siendo Soquesane el más cercano a 7.5km del domo reciente.

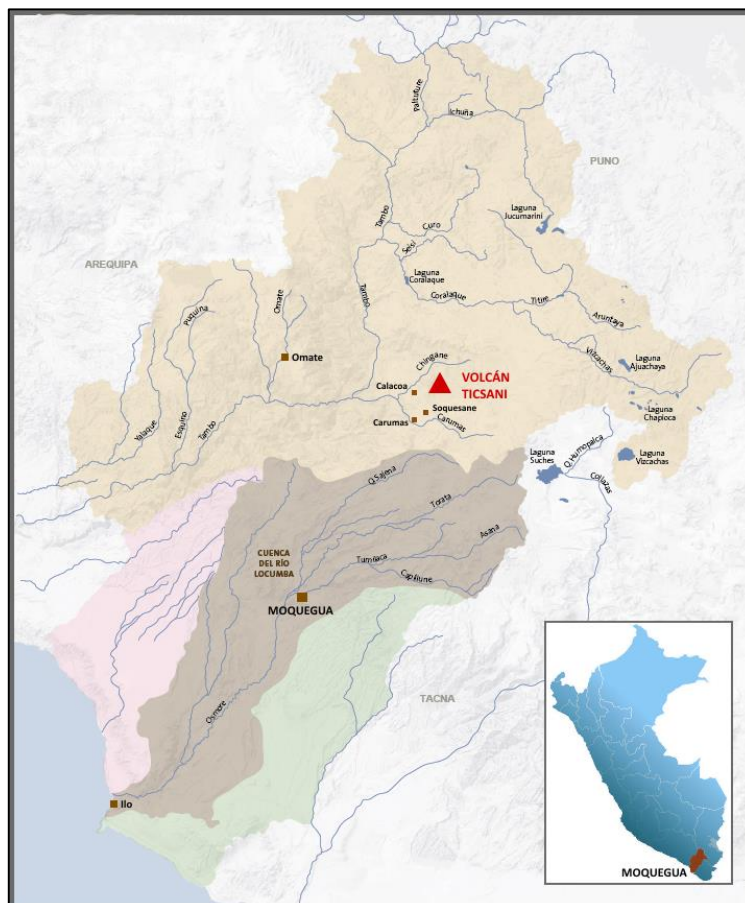


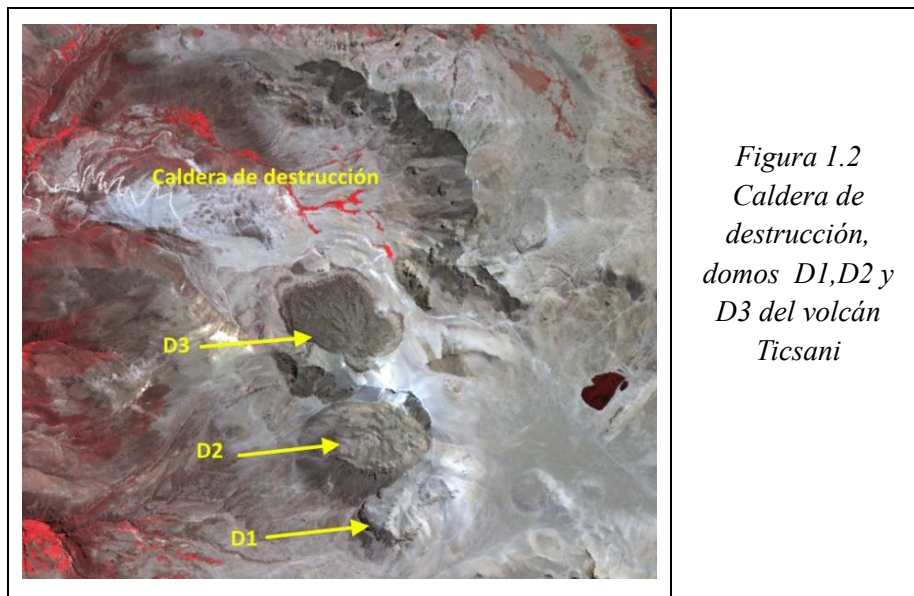
Figura 1.1 Mapa de Ubicación del área de estudio, en el departamento de Moquegua.

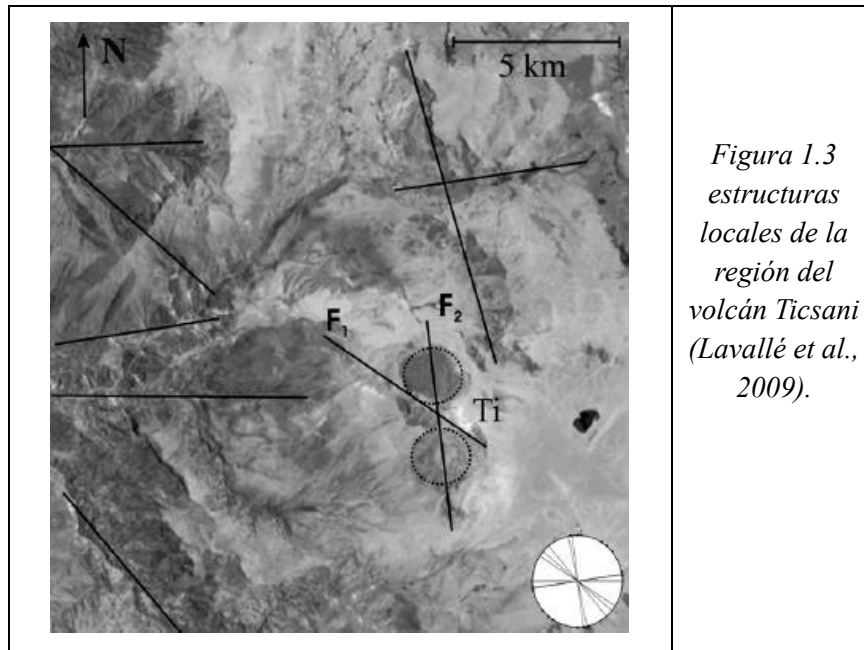
El triángulo rojo representa al volcán Ticsani.

1.2 Contexto geomorfológico y estructural

Las características geomorfológicas de este macizo son propias de la puna o altiplanicie de la cordillera occidental, presentando pendientes fuertes, áreas de flujos de lavas y de avalanchas de escombros. El volcán Ticsani está conformado estructuras volcánicas de destrucción como la caldera de avalancha, cráteres y el afloramiento de tres domos denominados D1, D2 y D3 (domo reciente), cuya característica es que se encuentran alineados de Norte a Sur (*figura 1.2*)

Los esfuerzos predominantes para la región del volcán Ticsani están caracterizados por fallas NW-SE, N-S. Este macizo presenta escarpas de fallas con dirección N-S visibles desde el NE como es el caso de la falla F2 (*figura 1.3*). Se encuentran también fallas antiguas con orientación NO-SE al oeste del volcán Ticsani (Lavallé et al., 2009).





*Figura 1.3
estructuras
locales de la
región del
volcán Ticsani
(Lavallé et al.,
2009).*

1.3 Objetivos

- ✓ Identificar y clasificar el tipo las señales que generan la actividad sismo-volcánica en la región del volcán Ticsani, mediante el análisis espectral y formas de ondas.
- ✓ Describir la actividad sísmica del volcán durante el periodo julio a setiembre de 2015
- ✓ Monitorear la actividad del volcán Ticsani para este periodo.
- ✓ Determinar la distribución en superficie y en profundidad, así como la elaboración de un mapa de sismicidad y perfiles de los sismos localizados..

2. ANÁLISIS DE SEÑALES SISMO-VOLCANICAS

En esta sección se revisara algunas técnicas básicas para el análisis de una señal sísmica, actualmente las señales que se procesan son digitales y a su vez las herramientas computacionales cada vez son más eficientes lo que facilita el trabajo de análisis. El análisis de datos sísmicos no se limita al estudio de la forma de onda, puesto que los ambientes volcánicos se presentan de manera heterogénea en su constitución así como los mecanismos de fuente de estas señales. Debido a esta realidad es necesario un análisis más profundo pasando del dominio del tiempo al dominio de frecuencias.

2.1 Espectro de frecuencias

Analizar una señal mediante su espectro de frecuencias se ha convertido en una herramienta muy importante al momento de caracterizar eventos sísmicos, dentro de las diferentes técnicas para el cálculo de la amplitud espectral la transformada de Fourier es la herramienta más utilizada debido a su eficacia al momento del procesamiento. En principio una señal expresada en el dominio de tiempo puede expresarse como la suma discreta o continua de sinusoides de distintas frecuencias, quedando determinada como un conjunto discreto o continuo, que forma el espectro de frecuencia de la señal representada en el dominio de frecuencias (*figura 2.1*).

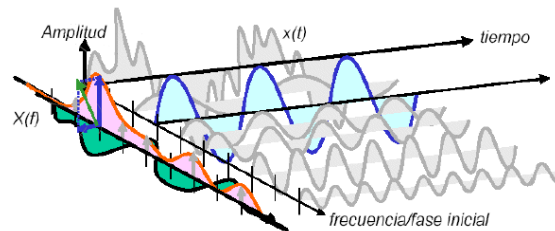


Figura 2.1 Representación de una señal $x(t)$ bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias

Se define la transformada de Fourier de una señal temporal $u(t)$

$$U(\omega) = \int u(t)e^{i\omega t} dt \quad \text{Donde } \omega \text{ es la frecuencia angular}$$

La transformada de Fourier es una función reversible, es decir, dada $U(\omega)$ se puede encontrar $u(t)$ mediante:

$$u(t) = \int U(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Es notorio que de este resultado la transformada de Fourier es la descomposición de una señal continua en una serie de señales armónicas elementales (*Figura 3.2*). Se debe tomar en cuenta que la transformada de Fourier $U(\omega)$ es una función compleja, posee una parte real y otra imaginaria.

$$U(\omega) = U_r(\omega) + iU_i(\omega) \quad \text{Transformada de Fourier}$$

$$U_i(\omega) = \int u(t)\text{sen}(\omega t) dt \quad \text{(Parte imaginaria)}$$

$$U_r(\omega) = \int u(t)\text{cos}(\omega t) dt \quad \text{(Parte real)}$$

Sin embargo en la mayoría de casos resulta más práctico trabajar con la forma polar de este resultado, esto es el modulo y la fase, donde el modulo viene dado por:

$$A(\omega) = [U_r^2(\omega) + U_i^2(\omega)] \quad \text{y la fase por:} \quad \Phi(\omega) = \arctg[U_i(\omega)/U_r(\omega)]$$

La ventaja fundamental de esta transformación de espacios, es que operaciones que en el dominio del tiempo que son muy complejas, se simplifican en el dominio de frecuencia; y así la deconvolucion de una señal en el espacio del tiempo se reduce en el espacio de la frecuencia al cociente entre transformadas de Fourier. Evidentemente en el caso de una señal sísmica estamos tratando con señales discretas en lugar de continuas, por lo que las expresiones anteriores, basadas en integrales deberán ser transformadas en otras basadas en sumatorias. Así la señal en el dominio del tiempo $u(t)$ se puede expresar como:

$$u(t) = \sum U_j \delta(t - j\Delta t)$$

y sustituyéndola en la expresión de la transformada de Fourier se obtiene:

$$U(\omega) = \sum^N u_j e^{-i\omega j\Delta t}$$

Luego se aplican una serie de algoritmos computacionales para determinar el contenido espectral, sin embargo los procesos iterativos computacionales son lentos en su mayoría, sin embargo por los años 60s aparecieron algoritmos que permitían aligerar de manera significativa el tiempo de cálculo, un claro ejemplo de estos algoritmos es FFT (Fast Fourier Transform), utilizados de manera extendida.

2.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma)

El contenido espectral no es constante en el tiempo el espectrograma permite presentar el espectro de frecuencias de la señal a lo largo del tiempo. Las distribuciones de tiempo frecuencia mapean una señal unidimensional (tiempo) en forma bidimensional (tiempo-frecuencia). El principio del espectrograma es dividir la señal en segmentos que se recubren parcialmente, para cada uno de estos segmentos se calcula la Transformada de Fourier, el espectro resultante corresponde entonces al tiempo del centro de la ventana y se representa bajo un código de colores. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de una distribución de tiempo-frecuencia. La función matemática que se emplea en el espectrograma es conocida como la transformada de Fourier de Corto plazo (TFCP).

El alto contenido de frecuencia nos indica que la señal depende de varios factores entre los que están el arribo de las diferentes fases sísmicas (P, S, superficiales), la intensidad del movimiento del suelo, la magnitud del terremoto, los efectos de fuente, la propagación de la señal y las condiciones i/o geometrías del suelo, entre otros.

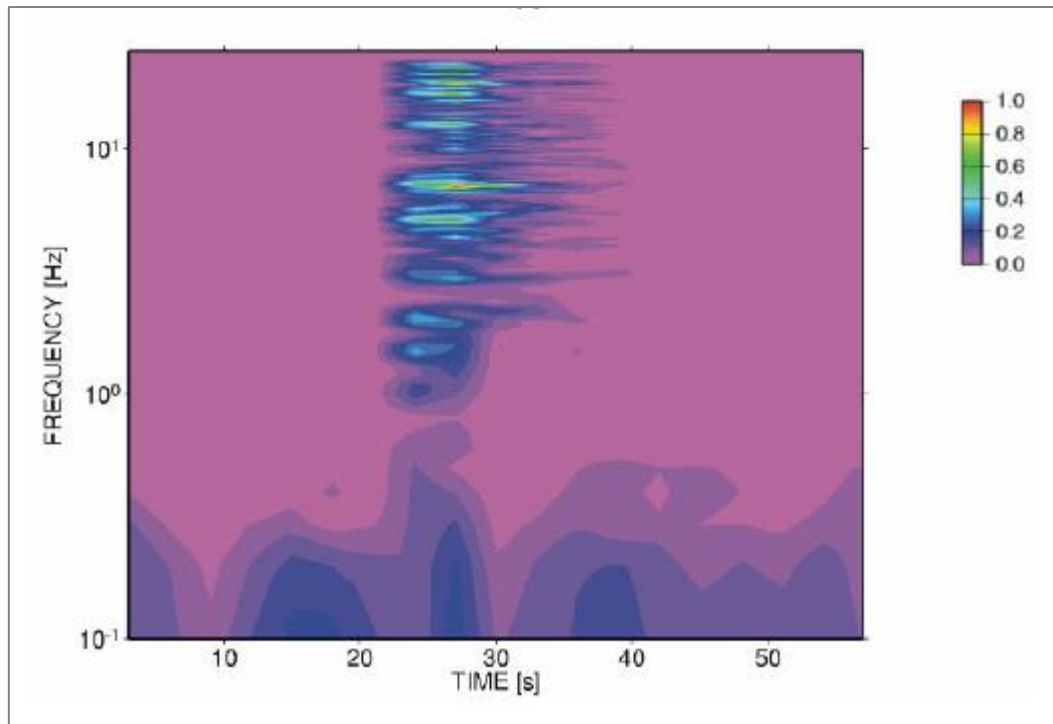


Figura 2.2 Análisis tiempo-frecuencia

3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

3.1 Red sísmica

El OVS-IGP instala estaciones sísmicas sobre la región del volcán Ticsani con el fin de monitorear la actividad de este macizo volcánico y encontrar indicios de intranquilidad que indiquen incremento en su actividad.

En base a conocimientos previos de estaciones instaladas por el OVS-IGP con anterioridad en la zona del volcán Ticsani (campañas 2005, 2006 y 2014) el OVS instala dos estaciones sísmicas temporales: la primera estación denominada TCN1 se encuentra ubicada sobre el domo más reciente (D3) del volcán Ticsani y una segunda estación instalada a 6km al sur de la estación TCN1 a la cual se le denominó HCO (*figura 3.1*). Las

características en cuanto a ubicación, código y altura de estas estaciones se detallan en la tabla 4.1, así mismo cada estación se describe en el acápite siguiente.

Los datos adquiridos corresponden a un periodo de 93 días correspondientes a los meses de julio, agosto y setiembre de 2015. En todo este periodo de análisis siempre estuvo en funcionamiento alguna de las dos estaciones o ambas, de modo que la clasificación de eventos sísmicos presenta algún vacío o falta de datos.

La estación temporal TCN1 viene funcionando desde mayo de 2014, para este periodo de análisis (julio-setiembre 2015) fue desinstalada luego de la primera semana de julio de 2015. Desde el 7 de agosto se instala la nueva estación TCN1 con transición de datos vía telemetría; sin embargo por problemas de retransmisión no registro datos durante las primeras semanas de setiembre reincorporándose el 17 de setiembre nuevamente. La estación temporal HCO fue utilizada como complemento para el registro de datos sísmicos, sin embargo el 17 de setiembre esta estación temporal fue desinstalada (figura 3.2).

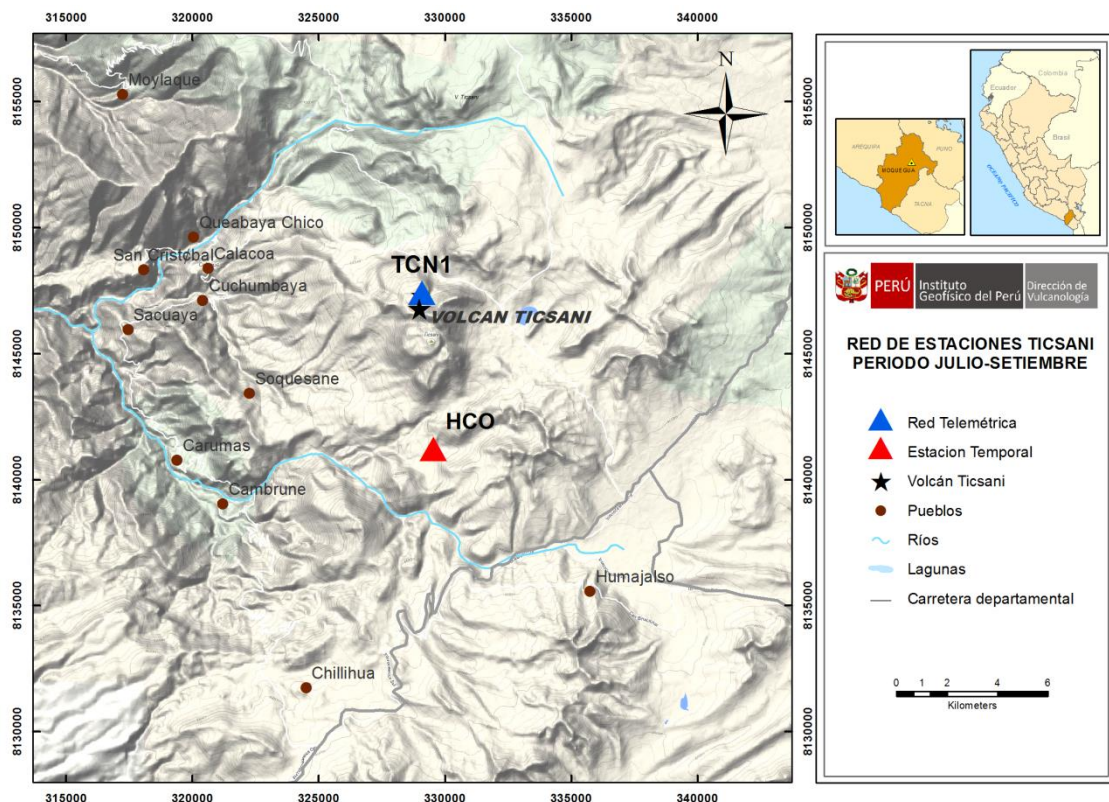


Figura 3.1 Red telemétrica Ticsani y estación temporal HCO instaladas en la región del volcán Ticsani.

RED TICSANI JULIO-SETIEMBRE 2015
Coordenadas (datum WGS-84 Zona 19k)

ESTACION	CODIGO	GEOGRAFICAS		UTM		ALTURA m.s.n.m.
Ticsani	TCN1	-70.605°	-16.753°	8147078.00	328894.00	5132
Hueco	HCO	-70.600°	-16.806°	8141235.55	329546.23	4340

Tabla 3.1 Ubicación de cada una de las estaciones en coordenadas geográficas y UTM.

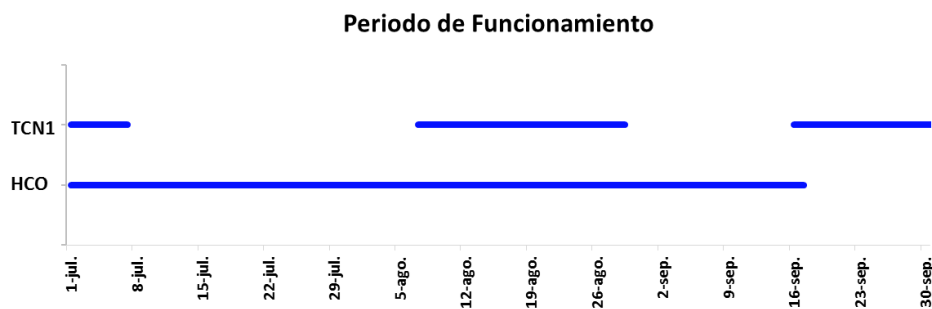


Figura 3.2 Periodo de funcionamiento de la red Ticsani Julio- Setiembre 2015. La Barra azul, representa el correcto funcionamiento de las estaciones.

3.2 Características de las estaciones e instrumentos utilizados

3.2.1 Estación TCN1

La estación TCN1, se encuentra ubicada sobre el domo reciente (D3) del volcán Ticsani. Inicialmente se registró datos hasta el día 07 de julio constituida por un registrador fue un Guralp DM-24 y su sensor un sismómetro de periodo corto de marca Lennartz LE-3D Lite de 1 Hz y 3 Componentes (figura 3.3 y 3.6). A partir del 07 de agosto el IGP-OVS pone en marcha el funcionamiento de la primera estación telemétrica TCN1 en la región del volcán Ticsani, adquiriendo datos en tiempo real en las oficinas del OVS. Los datos adquiridos no presentaron ningún problema al momento de su procesamiento. Esta estación telemétrica utiliza un registrador REFTEK 130S -01/03 y un sismómetro de banda ancha de marca Trillium Compact Nanometrics 120s (figura 3.4 y 3.5).

3.3 Estación HCO

Estación ubicada a 6 km al sur de la estación TCN1, mediante esta estación temporal fue posible completar la clasificación de eventos. El funcionamiento de esta estación concluye con su desinstalación el día 17 de septiembre. Mediante esta estación fue posible registrar sismos de fractura y algunos eventos de baja frecuencia, además estuvo constituida por el registrador y sismómetro utilizados en la estación TCN1 temporal, es decir un sismómetro Guralp DM-24 y un sensor de periodo corto de marca Lennartz LE-3D Lite (1 Hz y 3C).

 A silver, ruggedized electronic device with a black frame. It features a small green LCD screen on the left, two buttons labeled 'STATUS' and 'FIREWIRE' in the center, and the 'GURALP SYSTEMS DM24' logo at the bottom right.	<p><i>Figura 3.3</i> <i>Registrador Guralp</i> <i>DM 24.</i></p>
 A black, ruggedized electronic device with a rectangular shape. It has several knobs and buttons on top, and a large circular lens or sensor on the right side. A black strap is attached to the front.	<p><i>Figura 3.4</i> <i>Registrador REFTEK</i> <i>130S -01/03.</i></p>



*Figura 3.5 un
sismómetro de banda
ancha de marca
Trillium Compact
Nanometrics 120s.*



*Figura 3.6
Sismómetro Lennartz
LE-3D.*

4. TRABAJOS EN CAMPO

El Instituto Geofísico del Perú concluyó con la instalación de la estación telemétrica TCN1 ubicada sobre el domo más joven de este macizo “D3”, así mismo se dio inicio a la adquisición de datos sísmicos en tiempo real desde el 07 de agosto de 2015. En esta red telemétrica actualmente continúan los trabajos de campo los mismos que culminaran con la instalación de 3 estaciones sísmicas más de características similares a la estación TCN1, La distribución de estas nuevas estaciones se realiza de manera estratégica de tal modo que sea posible detectar las señales sismovolcánicas cercanas y distales. En la figura 4.1 es posible apreciar el registro fotográfico de los trabajos en campo para la instalación de la estación TCN1.

El OVS realiza la instalación de estaciones temporales en los diversos volcanes para complementar el monitoreo y análisis de datos sísmicos adquiridos mediante telemetría.



En este periodo se realizaron los trabajos de comisión de servicios los días 15 al 18 de setiembre hacia la región del volcán Ticsani. La finalidad de estos trabajos en campo fue de extraer datos sísmicos de la estación HCO y el ascenso al volcán Ticsani para la toma de temperaturas de los centros fumarólicos.

El día miércoles 16 de setiembre se lleva acabo el ascenso a los domos y los centros fumarólicos de este macizo (*figura 4.2*). Esta actividad se realizó con el propósito de inspeccionar de manera visual el estado actual del macizo. En esta inspección se ascendió al domo reciente D3 y posteriormente a la cota más elevada del volcán (5383msnm) donde se encuentran los centros fumarólicos. Se realizo toma de temperaturas en 5 puntos ubicados entre los domos D2 y D3 del volcán, la temperatura máxima encontrada fue de 82°C (*figura 4.3 y 4.4*), temperatura registrada por el termómetro infrarrojo RAYTEK 3i.

La extracción de datos de la estación HCO se llevó a cabo el día jueves 17 de setiembre y corresponden a un registro que data desde el 07 de julio hasta 17 de setiembre. Estos datos fueron adquiridos en formato GCF propio del registrador Guralp DM24 y entregados al centro de almacenamiento OTIDG (*figura 4.5*).



Figura 4.2 Ascenso al volcán Ticsani, Se observa el domo D3, este domo es el mas reciente emplazado en este macizo.



Figura 4.3 Toma de temperaturas en los centros fumarólicos del volcán Ticsani.

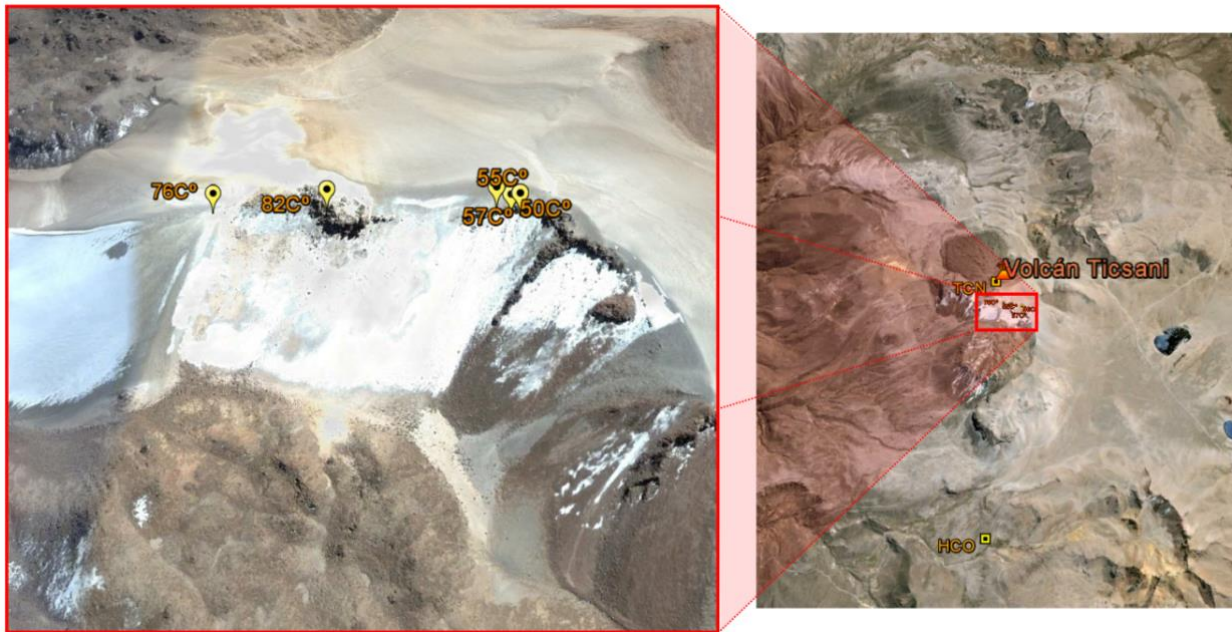


Figura 4.4 Registro de temperaturas tomadas en el volcán Ticsani. La mayor temperatura alcanzó los 82 °C.



Figura 4.5 Registro fotográfico de la extracción de datos sísmicos en la estación HCO

5. ACTIVIDAD SÍSMICA

Durante los 92 días de adquisición de datos (Julio- setiembre 2015), fueron identificados un total 9871 eventos sísmicos entre sismos de fractura, de baja frecuencia y eventos Tremor. La estación tomada como referencia fue TCN1 y en complemento para la caracterización de eventos la estación HCO, de los eventos clasificados, el 98%, es decir la gran mayoría sismos fueron eventos relacionados a fractura de rocas y el resto (2%) a sismos de baja frecuencia y Tremor sísmico (*figura 5.1*).



Figura 5.1 Proporción de sismos registrados de julio a setiembre 2015 por las estaciones TCN1 y HCO.

5.1 Sismos de fractura

La identificación de los 9684 eventos relacionados a fractura de rocas, representa la sismicidad dominante en la región del volcán Ticsani. Los sismos registrados son caracterizados por ser de tipo impulsivo, presentando en la mayoría de casos arribos claros de fases P y S. La duración de estos eventos se encuentra en un rango de 7s hasta los 131s para eventos muy energéticos, el valor promedio de duración para este periodo fue de 19s. El espectro de frecuencias presenta una amplia banda espectral desde frecuencias de 2hz hasta los 18hz, sin embargo una característica de los sismos de fractura en este macizo volcánico el valor promedio de frecuencias dominantes en 5hz.

Un ejemplo característico de sismos de fractura se observa en las figuras 5.2 donde se observa un sismo de fractura registrado por la estación TCN1 en su componente vertical, este evento data del día 22 de setiembre de 2015 y es posible observar la amplia banda espectral.

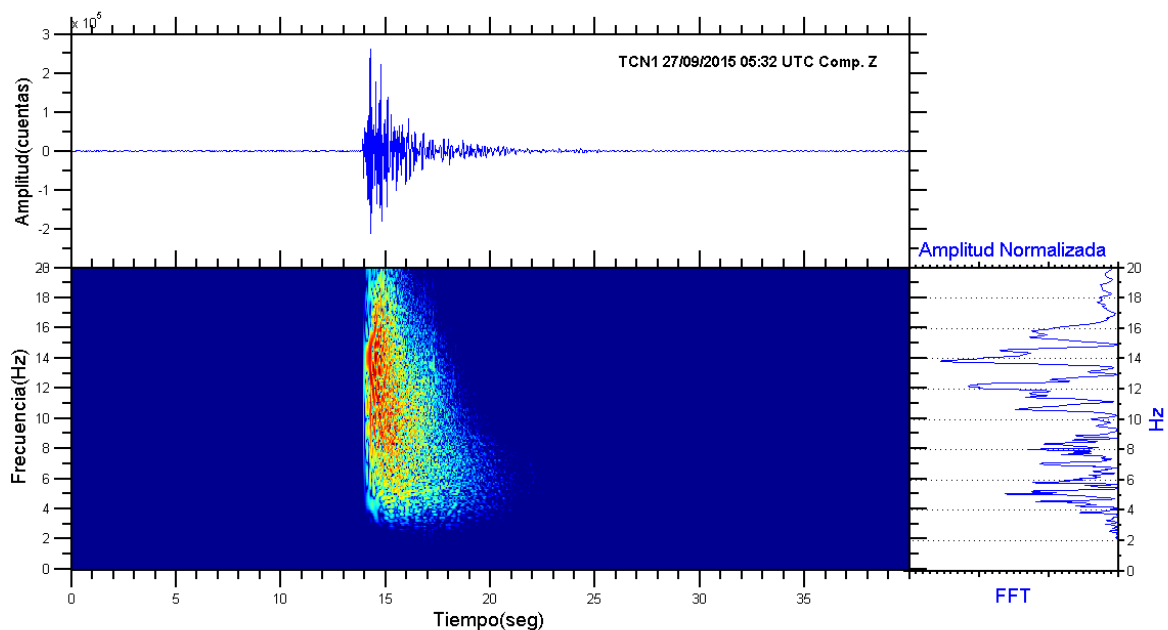


Figura 5.2 Ejemplo de sismo de fractura registrado por la estación TCN1 el 27 de setiembre a las 05:32hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.

5.2 Sismos de baja frecuencia

Los eventos de baja frecuencia fueron registrados un total de 111 sismos, estos valores bajos en comparación a los sismos de fractura representan el 1% del total de eventos

clasificados. Por lo general las formas de onda son de tipo emergente con un decaimiento lento en su coda, no es posible observar el arribo de las ondas P y S, de modo que no son localizables. Los registros muestran una banda espectral reducida entre 1hz y los 7hz, así mismo presenta picos dominantes principalmente en los 3hz.

En la figura 5.3 se muestra un ejemplo típico de un evento de baja frecuencia registrado en la estación HCO el día 07 de julio de 2015, el espectrograma muestra mayor incidencia en las frecuencias por debajo de 5 Hz.

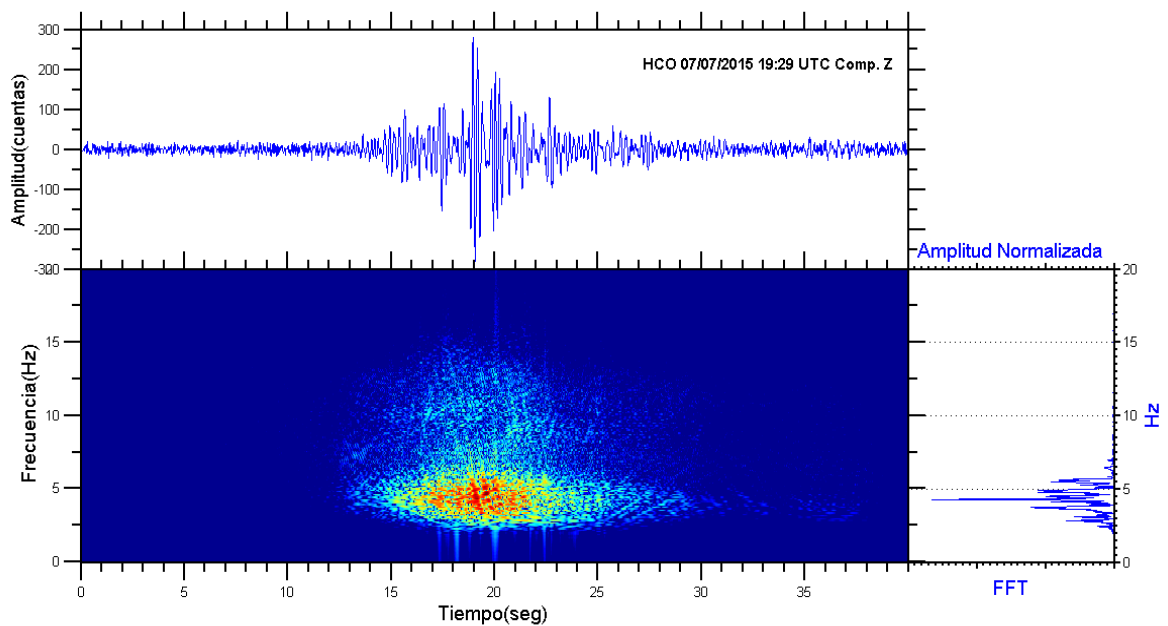


Figura 5.3 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación HCO el 07 de julio a las 19:29hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.

5.3 Eventos tipo Tremor

La actividad sísmica de tipo tremor al igual que los eventos de baja frecuencia presenta valores mínimos, se registraron 69 eventos que representan el 1% del total de sismos clasificados. El tipo de tremor característico en el volcán Ticsani corresponde a eventos tremor espasmódico, no se observaron eventos de tipo pulsante o armónico. En estos eventos se puede observar duraciones entre los 40s y 471s, considerándose eventos de corta duración.

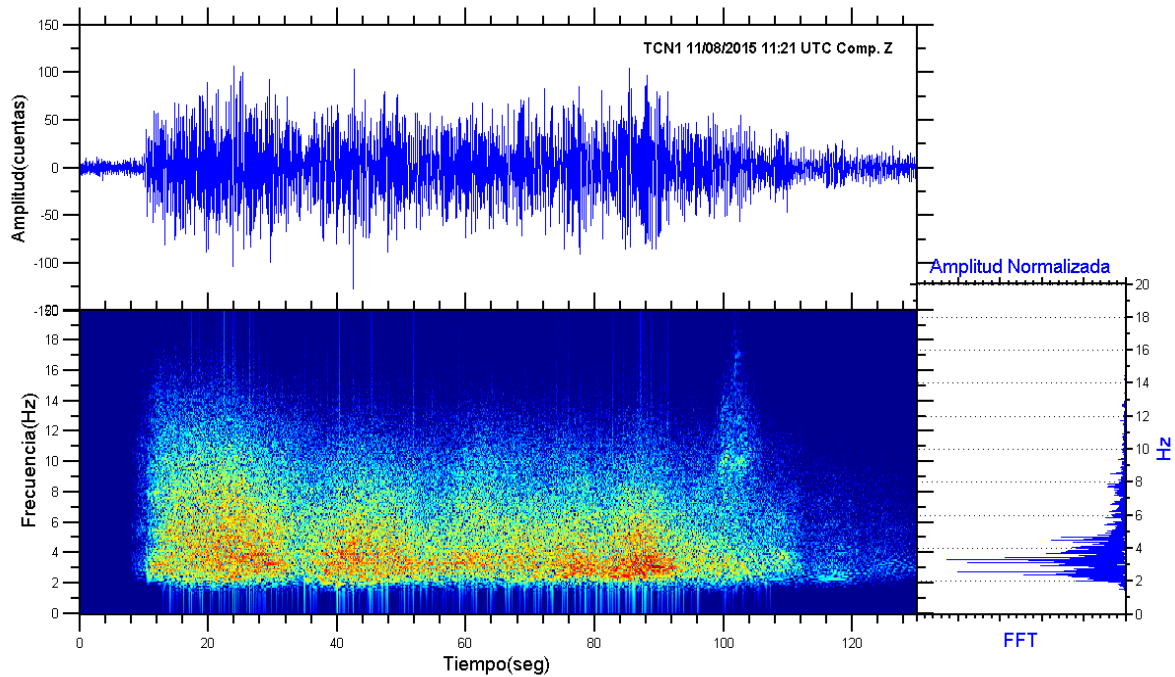


Figura 5.4 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación TCN1 el 11 de agosto a las 11:21hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.

La ocurrencia diaria de los sismos de fractura, eventos de baja frecuencia y tipo tremor permite visualizar la evolución de la actividad durante el periodo de registro por ser continuo. De este modo se analizaron cada tipo de evento registrado en la región del volcán Ticsani, tal es el caso de los sismos de fractura, donde se observa un importante incremento de actividad sísmica a partir del 06 de setiembre. El número de eventos registrados el mes de setiembre alcanzo los 9109 sismos siendo el 15 de setiembre el día de mayor ocurrencia con 733 sismos de fractura (*figura 5.5*).

Los eventos de baja frecuencia se registraron en su mayoría por la estación TCN puesto que esta estuvo ubicada sobre el domo reciente del volcán, se puede observar en la *figura 5.6* que el día 16 de setiembre se registró el mayor número de eventos con 25 sismos, este tipo de actividad presenta valores bajos en comparación con los sismos de fractura. Los eventos tipo tremor registraron duraciones por debajo de los 11 minutos por día, no se observa algún incremento importante, cabe señalar que este tipo de actividad también presenta niveles bajos.

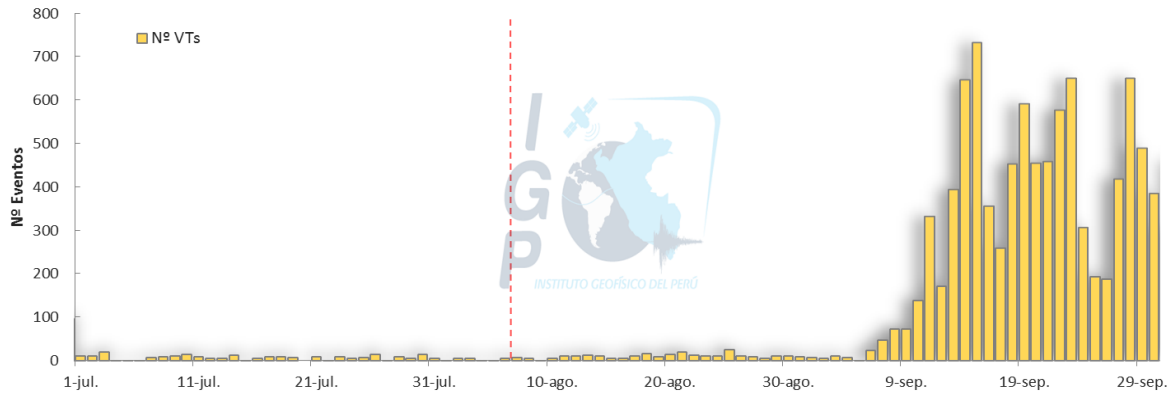


Figura 5.5 Histograma de ocurrencia de eventos relacionados a fractura de rocas. Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.

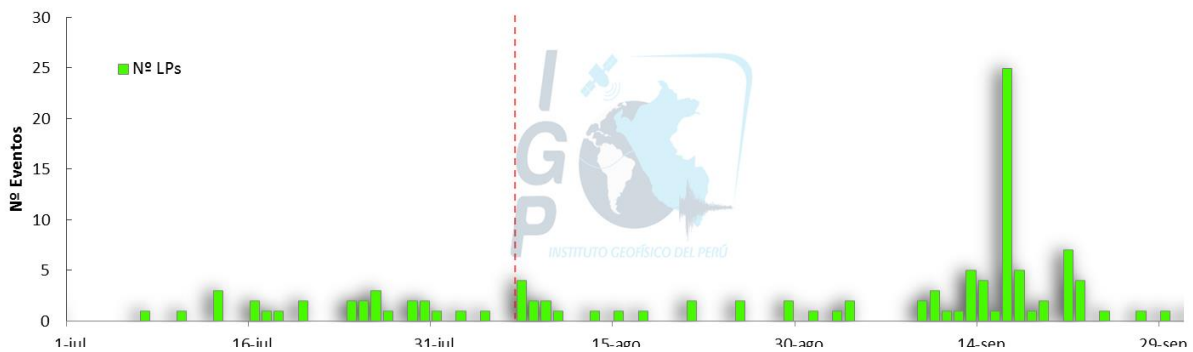


Figura 5.6 Histograma de ocurrencia de eventos de periodo bajo relacionados al paso de fluidos. Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.

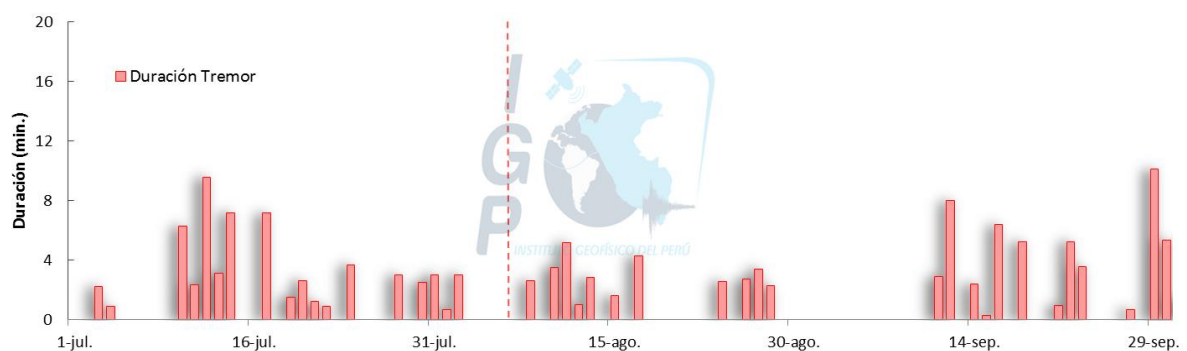


Figura 5.7 Histograma de ocurrencia de eventos de tipo tremor. Julio – Setiembre 2015. A partir de las líneas discontinuas rojas se procesan datos telemétricos.

En la figura 5.8 se observa el incremento en el registro de sismos relacionados a fractura de rocas correspondientes a los días 22 y 23 de setiembre, los sismos se presentan en muchos casos en forma de enjambres sísmicos.

La gran mayoría de sismos de fractura presenta valores de diferencia de tiempos de arribo t_{s-p} por debajo de los 1.5s lo cual indica eventos ubicados muy cercanos a la estación TCN1 (es decir, en o a proximidades del edificio volcánico), esto es corroborado mediante la *figura 5.9* que muestra la diferencia de tiempos de llegada de las ondas P y S, es importante mencionar que el análisis de diferencia de tiempos t_{s-p} se realiza en base a una sola estación, para este caso se tomó la estación TCN1 como referencia, es por esto que en la *gráfica 5.9* no se presentan los datos completos.

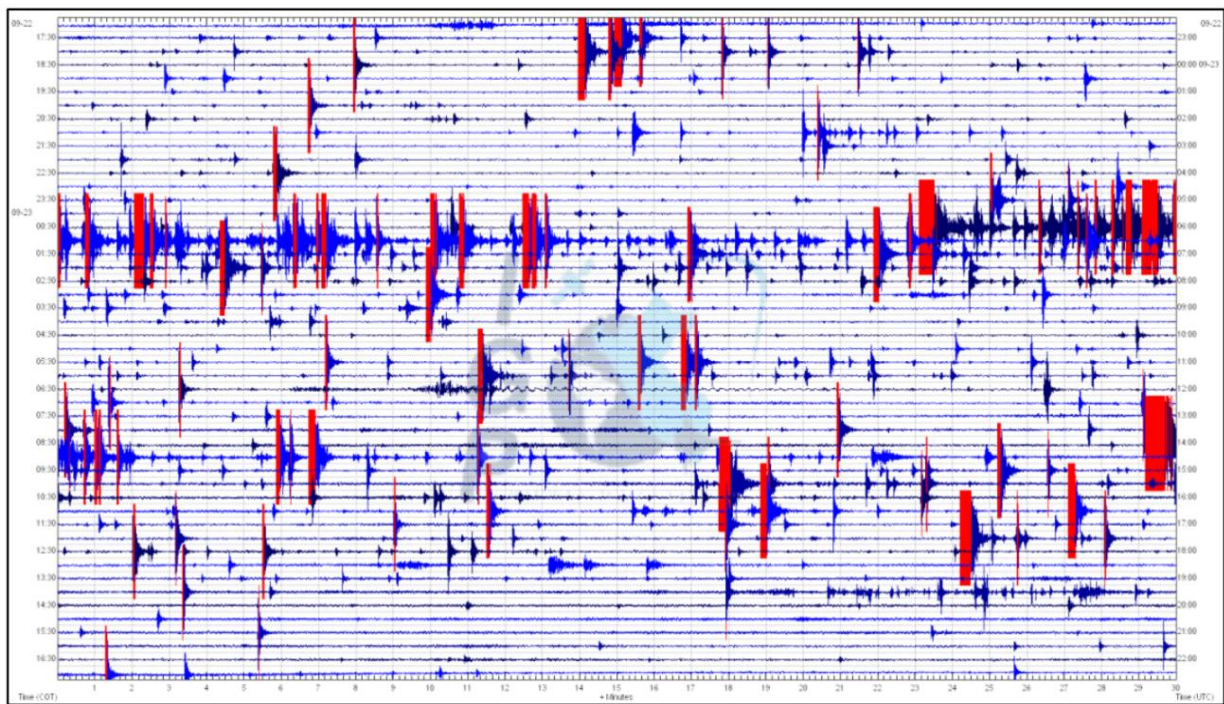


Figura 5.8 Incremento de actividad registrado por la estación TCN1 en el volcán Ticsani. Los eventos del sismograma se produjeron entre el 22 y 23 de setiembre y corresponden a eventos de tipo Volcano-Tectónicos

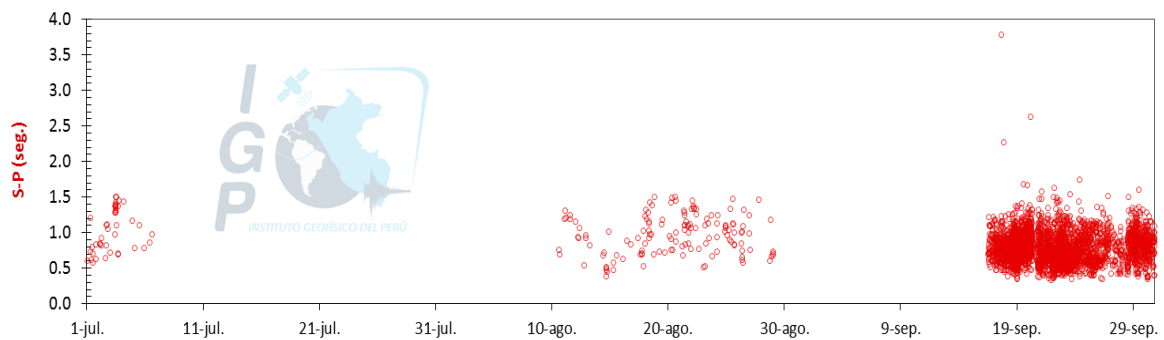


Figura 5.9 Análisis de diferencia de tiempo de arribo de ondas sísmicas P y S. En el periodo Julio-Setiembre 2015 se registraron sismos con tiempos t_{s-p} menores a 1.5s.

6. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS

La localización de eventos se realiza mediante el programa programa Hypoellipse (Lahr, J. 1999) basado en los principios de Geiger (1912), principalmente en la minimización de las diferencias de los tiempos de llegada teóricos y los observados correspondientes a las fases registradas. Para realizar la localización de eventos se debe tomar en cuenta al menos dos aspectos: las fases sísmicas de las ondas S y P deben ser identificables, otra característica es que deben ser registradas por al menos tres estaciones sísmicas, con estos datos ya es posible localizar un evento con cierto grado de error aceptable.

Las redes telemétricas del OVS capturaron en su registro la actividad producida el mes de setiembre en la región del volcán Ticsani, incluso los eventos más energéticos fueron captados por la red telemétrica del volcán Sabancaya. Gracias a estos registros se realizó la localización de eventos y la elaboración del mapa de sismicidad para estos tres meses.

Fueron localizados un total de 16 sismos de fractura con valores de RMS por debajo de los 0.4s. La distribución en superficie de los eventos se concentra en el flanco oeste del Domo D2 y a proximidades del Domo D1 (*figura 6.1*), en el mapa de perfiles E-W y N-S de la *figura 6.2* se ha ploteado los sismos, los cuales están distribuidos entre 1km y 5km de profundidad. Las magnitudes varían entre 2.8 y 3.8 ML. Siendo el sismo del 28 de setiembre a 02:31 UTC el que generó la mayor magnitud.

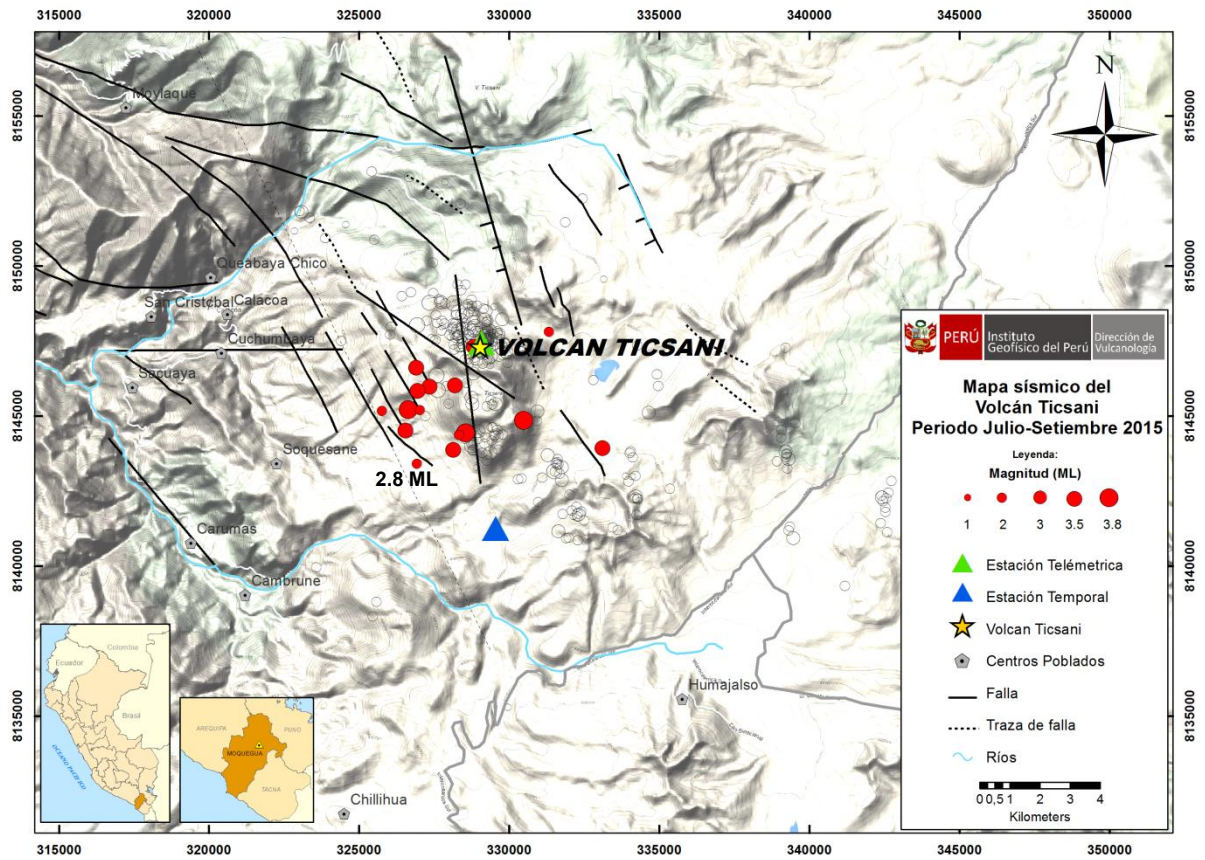


Figura 6.1 Distribución en superficie de la sismicidad registrada entre julio y setiembre de 2015. Se observa una mayor concentración de sismos en el lado oeste del volcán Ticsani.

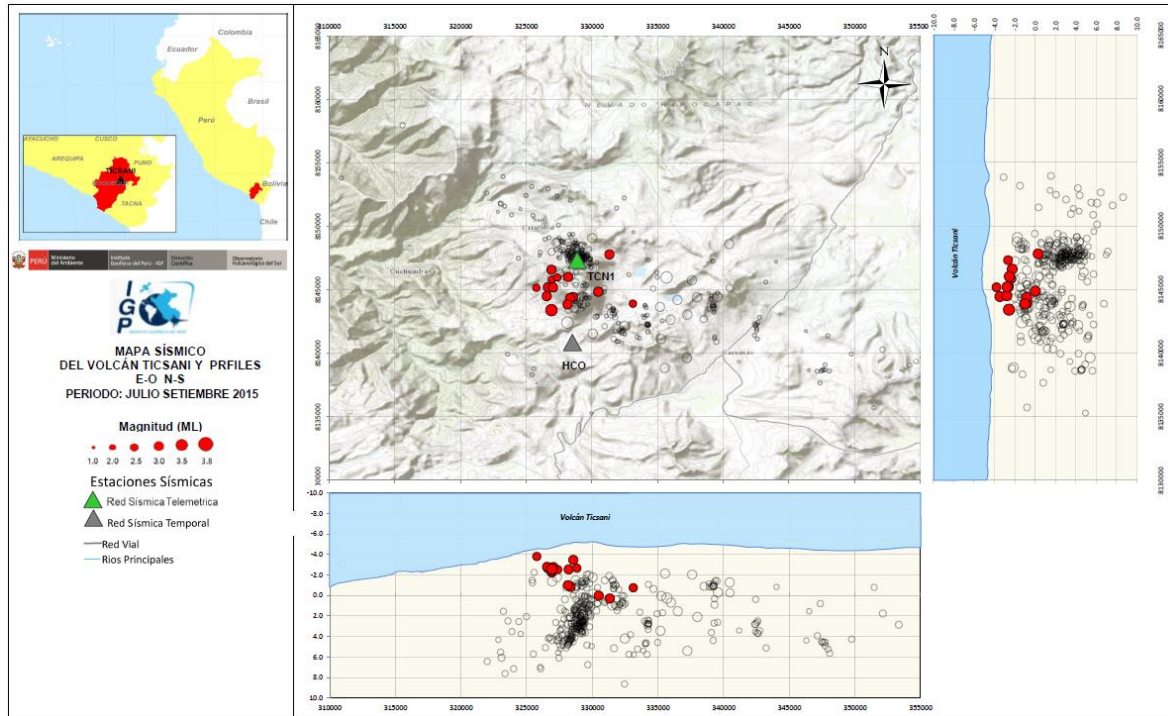


Figura 6.2 Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad de la región del volcán Ticsani. Periodo Julio – setiembre 2015.



CONCLUSIONES

- En el periodo de observación julio setiembre 2015, se registraron 9684 sismos relacionados a fractura de rocas representando el 98% de un total de 9871 sismos clasificados. Esta importante actividad se inició con el incremento de sismos de fractura el día 06 de setiembre y representa la sismicidad dominante en la región del Ticsani. Se registraron también 111 eventos de baja frecuencia representando un 1% del total y 69 eventos tipo tremor de corta duración (40s – 471s).
- Los sismos de fractura de mayor energía fueron captados por las redes telemétricas del OVS, logrando la localización de 16 sismos superficiales ubicados a 3km al lado Oeste del volcán Ticsani y a proximidades del D1. Estos eventos superficiales se encuentran entre 1 y 5km de profundidad con magnitudes que varían entre 2.8 y 3.8ML.
- Desde el 07 de agosto se vienen registrando datos sísmicos vía telemétrica provenientes de la estación TCN1, ubicada sobre el domo reciente del volcán Ticsani. El funcionamiento de esta estación telemétrica permite el monitoreo en tiempo real de este volcán. Por otro lado los trabajos en campo concluirán con la instalación de 3 estaciones más en esta región.
- El OVS realizó trabajos de comisión de servicios a la región del volcán Ticsani el 15 de setiembre, para realizar el ascenso al volcán y toma de temperaturas en los centros fumarólicos, donde la mayor temperatura registrada fue de 82° C. Así mismo fueron extraídos los datos de la estación temporal HCO y su desinstalación definitiva.



RECOMENDACIONES

- Complementar la red Ticsani con dos estaciones sísmicas telemétricas o temporales en los flancos SE y NO del volcán, esto permitirá identificar con mayor claridad los sismos de baja frecuencia y tremor volcánico.
- Es necesario la instalación de sensores de temperatura en los centros fumarólicos del volcán Ticsani.
- Realizar visitas periódicas al volcán Ticsani y realizar por lo menos dos campañas anuales del método geofísico de Potencial Espontaneo.
- Complementar los estudios sismológicos mediante la realización de una campaña de tomografía sísmica, esto ayudara a tener un idea somera de la ubicación de la cámara magmática y la delimitación del sistema hidrotermal.



BIBLIOGRAFIA

Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v. 91 (2001) p.69-80.

Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition*.

Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). *Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (2009) 253–264.

Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima*.

Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press, Berkeley*.

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

White, R. (2011). Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. *Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy*.