



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

Área  
Vulcanología

# INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



Área de Vulcanología

## INFORME TÉCNICO

### ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) PARA EL PERIODO MAYO SETIEMBRE DEL 2014

PRESENTADO POR:

**Bach. John Edward Cruz Igme**

FECHA: 15 DE JULIO 2015



# INDICE

## RESUMEN

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Ubicación .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Análisis de senales sismo-volcanicas .....</b>	<b>4</b>
3.1 Espectro de frecuencias.....	4
3.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma) .....	6
<b>4. Red sísmica.....</b>	<b>7</b>
4.1 Estación SOQ.....	11
4.2 Estación PAL.....	12
4.3 Estación CHT .....	12
4.4 Estación HTR.....	12
4.5 Estación TCN .....	13
<b>5. Actividad sísmica .....</b>	<b>13</b>
5.1 Sismos de fractura.....	13
5.2 Enjambres sísmicos .....	16
5.3 Sismos de baja frecuencia.....	18
<b>6. Localización de eventos .....</b>	<b>20</b>

## CONCLUSIONES

## RECOMENDACIONES

## BIBLIOGRAFIA

## ANEXOS



## 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 3.1 Representación de una señal <math>x(t)</math> bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3.2 Descomposición de Fourier.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3.3 Análisis tiempo-frecuencia.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4.1 Estaciones instaladas en la región del volcán Ticsani y sobre el domo reciente. Se pueden identificar las estaciones sísmicas 2014 (triángulos azules). ....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4.2 Periodo de funcionamiento de las cinco estaciones. Barra azul, estaciones con registradores Data - CUBE3 . Barra roja, estación con registrador Guralp DM-24. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4.3 Imagen del registrador Data – Cube3 utilizado en la estación SOQ. ....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4.4 Registrador Guralp CMG 3S -D24.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4.5 Sismómetro Lennartz LE-3D.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4.6 Estación SOQ con el registrador CUBE3, su sensor Lennartz a modo de prueba. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4.7 Instalación de la estación SOQ.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4.8 Instalación de los equipos sísmicos de la estación TCN (izquierda).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4.9 Instalación de los paneles solares para la estación TCN ubicada sobre el domo reciente (abajo).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5.1 Ejemplo de un sismo de fractura registrado en todas las estaciones de la red Ticsani 2014, el 24 junio 2014 06:40:30 (UTC), en la parte izquierda las formas de onda y a la derecha los espectros de frecuencia. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5.2 Ejemplo de sismo de fractura de tipo II registrado por la estación SOQ el 26 de junio a las 08:54 hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5.3 Ejemplo de sismo de fractura registrado por la estación TCN el 26 de setiembre a las 04:17hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5.4 Histograma de ocurrencia de eventos relacionados a fractura de rocas, mayo-setiembre del 2014. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5.5 A) Diferencia de tiempos de arribo de fases P y S para el enjambre de sismos ocurridos el día 24 de junio 2014. B) Calculo de magnitudes del enjambre sísmico, para los días 23 y 24 de junio y presencia de agrupamientos. Registros correspondientes a la estación CHT. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5.6 A) Diferencia de tiempos de arribo de fases P y S para el enjambre de sismos ocurridos el día 26 de setiembre B) Calculo de magnitudes del enjambre sísmico, para los días 25 y 26 de setiembre. Registros correspondientes a la estación TCN. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5.7 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación TCN el 24 de Agosto a las 17:24hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y si espectro de frecuencias característico.....</i>	<i>19</i>



*Figura 5.8 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado 03 setiembre 2014 por la estación TCN. Izquierda, se muestran las tres componentes. Derecha, se muestran sus espectros de frecuencia. .... 19*

*Figura 5.9 Distribución temporal de eventos de baja frecuencia mayo- setiembre 2014 registrados por las estaciones SOQ y TCN. .... 20*

*Figura 6.1 Distribución en superficie de la sismicidad registrada en la campaña sísmica de mayo-agosto 2014. Se observa un agrupamiento principal sobre el domo reciente, círculo azul. Se observa un agrupamiento secundario, círculo verde. .... 21*

*Figura 6.2 Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad; se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán. .... 22*



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4.1 Ubicación de cada una de las estaciones en coordenadas geográficas y UTM....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 4.2 Características de las estaciones sísmicas de la red Ticsani 2014.....</i>	<i>10</i>



## RESUMEN

El volcán Ticsani es un estrato volcán perteneciente a la zona volcánica de los andes centrales, constituido por un complejo de domos de lavas andesíticas a dacíticas y caracterizado por presentar extensos depósitos de avalanchas. Este volcán se encuentra ubicado a 60 km al NE de la ciudad de Moquegua cuyo centro poblado más cercano Soquezane se encuentra a 7.3 km del domo más reciente. En las inmediaciones de este volcán se observan depósitos dispersos que indican una probable e importante erupción freatomagmática ocurrida hace menos de 400 años.

Teniendo como objetivo el estudio del comportamiento de la sismicidad y la caracterización de las señales registradas en la región del volcán Ticsani, el OVS-IGP en convenio con la universidad de Liverpool estableció una red sísmica temporal de 5 estaciones sísmicas (TCN, SOQ, PAL, CHT, HTR) de periodo corto con tres componentes, el estudio comprende 153 días de adquisición de datos sísmicos desde 01 de mayo al 30 setiembre. El procesamiento de la información sísmica consistió en el tratamiento de datos, el análisis del contenido espectral, la forma de onda y obtención de parámetros hipocentrales para la su localización.

El volcán Ticsani presenta una importante actividad sísmica, registrando gran número de sismos asociados a la acumulación de esfuerzos y ruptura presentando un total de 2112 eventos (95% del total), resultado que indica a esta actividad como principal. Los días 24 de junio y 26 de setiembre se registraron dos enjambres constituidos por sismos de fractura, el primero se localizó sobre el domo reciente y el segundo a 4.5 km del volcán. También se encontraron sismos asociados a movimiento de fluidos pero en menor número, registrándose 118 eventos (5% del total).

Gracias a la configuración de la red sísmica temporal se lograron localizar un total de 334 sismos de fractura. Los resultados de esta localización muestran que la actividad sísmica es superficial con sismos entre los 2.5 y -14km de profundidad, presentando magnitudes entre 0.6ML y 3.3ML; además los sismos en su mayoría se encuentran debajo del domo reciente y a 3 km hacia el sur del mencionado domo.



## INTRODUCCIÓN

El sur del Perú forma parte del sector más septentrional de la ZVC (Zona Volcánica Central), donde actualmente se encuentran hasta 7 volcanes activos (Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, y Yucamane). Los estudios realizados en los volcanes activos peruanos han sido de tipo geológico en su mayoría; pero también se realizaron estudios aplicando métodos geofísicos y geoquímicos, la mayoría de ellos orientados básicamente a conocer los aspectos geológicos y estructurales de los edificios volcánicos. Existen, sin embargo algunos trabajos de investigación donde se ha empleado la sismología como herramienta principal o complementaria, tales como los realizados en los volcanes Sabancaya (Antayhua, 2002), Ubinas (González, 2001) y Misti (Llerena, 2005). Estos trabajos han sido promovidos en su mayoría por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la cooperación de instituciones extranjeras.

El volcán Ticsani es considerado como un volcán activo, según estudios estratigráficos, estructuras volcánicas y distribución de productos volcánicos, 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, J., & Thouret, J. 2003), actualmente existen fumarolas de manera restringida. El volcán Ticsani presenta una actividad hidrotermal importante, representada por surgentes de agua y vapor, que se distribuyen al NO, E y SO del volcán en un radio de 9km. La zona del volcán Ticsani ha presentado sismicidad importante en los últimos años, que en general ha sido asociada a la tectónica local (Aguilar et al., 1999; Tavera H, 2006). El año 2014, el OVA-IGP decidió efectuar un estudio de la actividad sísmica, así como iniciar el monitoreo permanente del volcán Ticsani, para lo cual instaló una red de 5 estaciones sísmicas temporales (SOQ, PAL, CHT, HTR y TCN) en colaboración con la Universidad de Liverpool.

El presente informe describe de la actividad del volcán Ticsani mediante el procesamiento y análisis de datos obtenidos en un monitoreo sísmovolcánico temporal realizado entre mayo y setiembre del 2014. Los resultados obtenidos permitirán realizar una interpretación de la relación existente entre los eventos registrados y la actividad volcánica.

## 1. UBICACIÓN

El volcán Ticsani forma parte del cinturón de fuego del pacífico, en la parte centro occidental de Sudamérica; 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 ubicado 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 )

Políticamente la zona de la zona de estudio se encuentra en 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: Soquezane, Quebaya, Calacoa, San cristobal, Carumas, Cambrune como los más resaltantes cercanos al volcán, siendo Soquezane el más cercano a 7.5km del domo reciente.

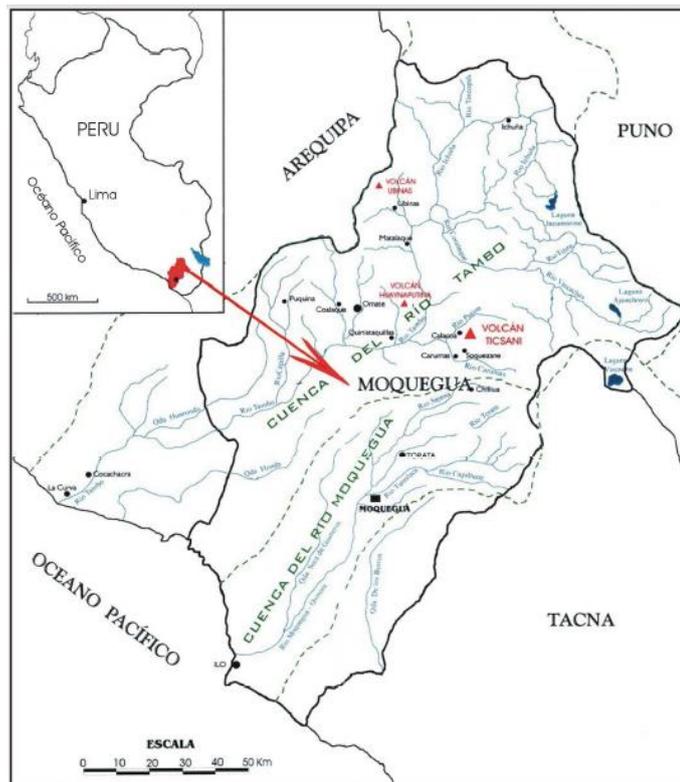


Figura 1.1 Mapa de Ubicación del área de estudio, en el departamento de Moquegua. El triángulo rojo representa al volcán Ticsani.

## 2. OBJETIVOS

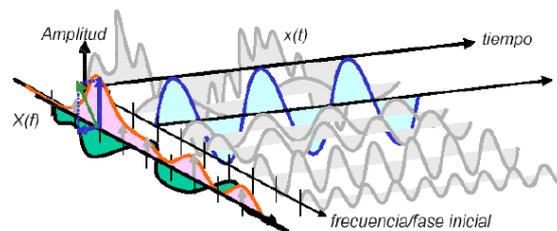
- ✓ Identificar y clasificar el tipo de las señales que generan la actividad sismo-volcánica mediante el análisis espectral y la forma de onda obtenidas en la campaña sísmica del 2014 en el volcán Ticsani.
- ✓ Monitorear la actividad del volcán Ticsani.
- ✓ Determinar la distribución en superficie y en profundidad de los sismos que presentan fases P y S mediante un mapa de sismicidad.

## 3. ANÁLISIS DE SEÑALES SISMO-VOLCÁNICAS

El análisis de una señal sísmica 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.

### 3.1 Espectro de frecuencias

Una señal expresada en el dominio de tiempo puede expresarse como la suma discreta o continua de sinusoides de distintas frecuencias (*Figura 3.1*), quedando determinada como un conjunto discreto o continuo, que forma el espectro de frecuencia de la señal representada en el dominio de frecuencias. Para este fin la “transformada de Fourier” es la principal herramienta disponible, la cual permite transformar una señal expresada en el dominio de tiempo en una señal expresada en el dominio de frecuencias (*figura 3.2*).



*Figura 3.1 Representación de una señal  $x(t)$  bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias*

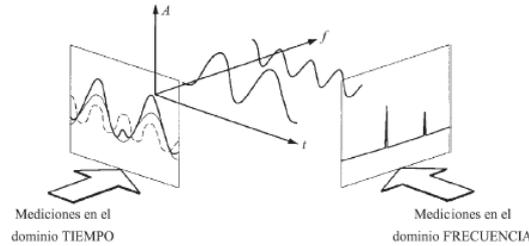


Figura 3.2 Descomposición de Fourier

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:

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

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:

$$U(\omega) = \sum_{j=1}^N u_j e^{-i\omega j\Delta t}$$

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.

### 3.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma)

Las distribuciones de tiempo frecuencia mapean una señal unidimensional (tiempo) en forma bidimensional (tiempo-frecuencia), en la figura 3.3 se muestra un ejemplo de una distribución de tiempo-frecuencia, estas distribuciones nos dan la capacidad de describir la verdadera estructura de la señal cuando el contenido de frecuencia varía en el tiempo. 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.

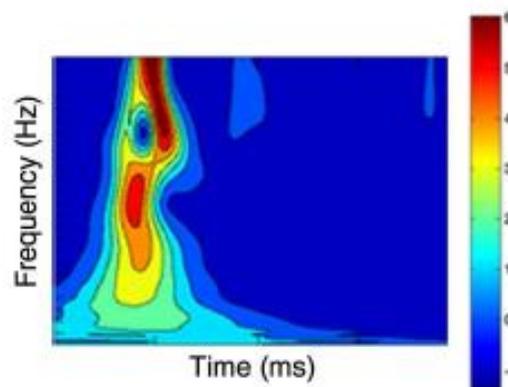


Figura 3.3 Análisis tiempo-frecuencia

#### 4. RED SÍSMICA

El Instituto Geofísico del Perú en colaboración con la universidad de Liverpool decide instalar la red sísmica temporal Ticsani 2014 desplegada sobre la región del volcán Ticsani con el fin de monitorear el masizo volcánico y encontrar indicios de intranquilidad que indiquen el incremento de su actividad. En base a conocimientos previos de estaciones instaladas con anterioridad en la zona (campañas 2005 y 2006) se instalaron cuatro estaciones sísmicas temporales: SOQ, PAL, CHT y HTR y posteriormente la instalación de una última estación denominada TCN, dispuestos en un radio de 25 km. del volcán (Figura 4.1). En la tabla 4.1 se detallan las ubicaciones las coordenadas geográficas y UTM de los cinco puntos escogidos para la instalación de las estaciones así como su elevación y código de estación.

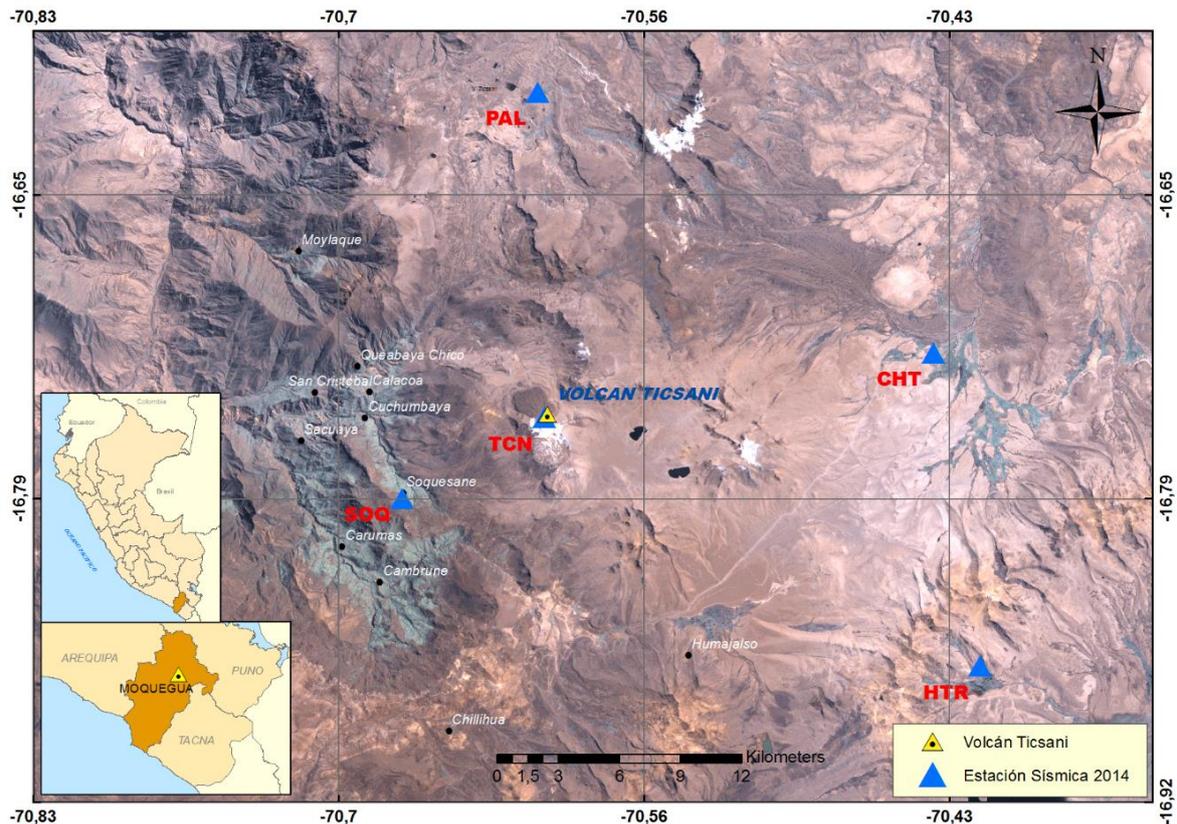


Figura 4.1 Estaciones instaladas en la región del volcán Ticsani y sobre el domo reciente. Se pueden identificar las estaciones sísmicas 2014 (triángulos azules).



RED TICSANI						
Coordenadas (datum WGS-84 Zona 19k)						
ESTACION	CODIGO	GEOGRAFICAS		UTM		ALTURA m.s.n.m.
Huaytire	HTR	-70.413°	-16.862°	8135122.83	349471.52	4573
Pallatea	PAL	-70.608°	-16.607°	8163181.54	328424.24	4406
Chillota	CHT	-70.434°	-16.723°	8150513.08	347168.43	4349
Soquesane	SOQ	-70.668°	-16.788°	8143167.27	322218.14	3713
Ticsani	TCN	-70.605°	-16.752°	8147185.30	328877.30	5133

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

El periodo de observación de este estudio se inició desde el 01 de mayo con la instalación de la estación SOQ, posteriormente se instalaron tres estaciones más: PAL, CHT y HTR. Finalmente el periodo de observación concluye el 29 de setiembre del 2014, con la toma de datos de la estación TCN (figura 4.2). El funcionamiento de las estaciones afortunadamente no tuvo ningún inconveniente durante el periodo de registro, cumpliendo con el planing establecido.

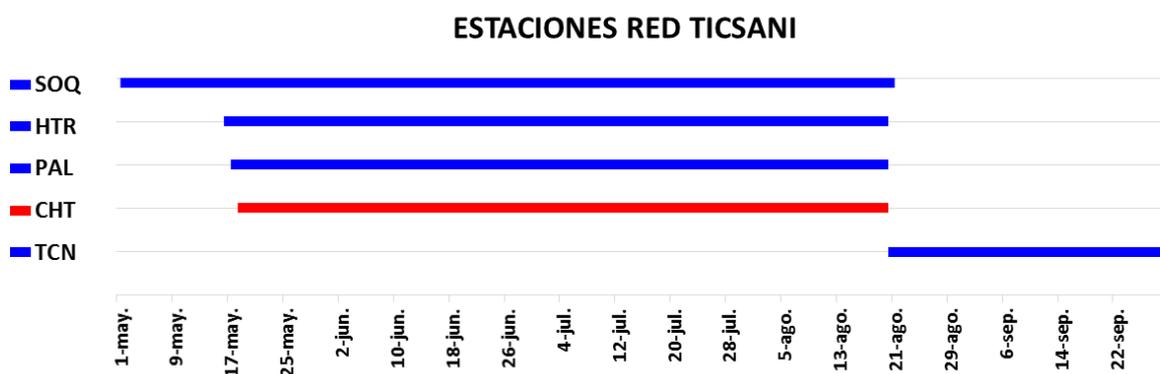


Figura 4.2 Periodo de funcionamiento de las cinco estaciones. Barra azul, estaciones con registradores Data - CUBE3. Barra roja, estación con registrador Guralp DM-24.

Todas las estaciones almacenaron datos de modo continuo y con sismómetros de periodo corto. Para el desarrollo de la campaña se emplearon cuatro registradores digitales CUBE3 con capacidad de 16 Gb incorporados (figura 4.3) y un registrador Guralp modelo DM-24 (figura 4.4) con memoria externa de 30Gb y 35Gb, así mismo se emplearon cinco

sismómetros Lennartz modelo LE-3D /1S LITE (figura 4.5), un computador portátil para recuperar la información de los registradores. Cada estación sísmica (registrador y sismómetro) contó con un reloj GPS para el control del tiempo, en la tabla 4.2 se puede apreciar las características de las estaciones sísmicas.



Figura 4.3 Imagen del registrador Data – Cube3 utilizado en la estación SOQ.



Figura 4.4 Registrador Guralp CMG 3S -D24.



Figura 4.5 Sismómetro Lennartz LE-3D.

ESTACION	TIEMPO DE REGISTRO (días)	MODO DE REGISTRO	REGISTRADOR		SENSOR
SOQ	113	continuo	Data - CUBE <sup>3</sup>	Periodo corto	Lennartz LE-3Dlite
HTR	97	continuo	Data - CUBE <sup>3</sup>	Periodo corto	Lennartz LE-3Dlite
PAL	96	continuo	Data - CUBE <sup>3</sup>	Periodo corto	Lennartz LE-3Dlite
CHT	95	continuo	Guralp DM-24	Periodo corto	Lennartz LE-3Dlite
TCN	163	continuo	Data - CUBE <sup>3</sup>	Periodo corto	Lennartz LE-3Dlite

*Tabla 4.2 Características de las estaciones sísmicas de la red Ticsani 2014.*

El registro fotográfico de las pruebas e instalación de equipos en campo pueden apreciar en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.



*Figura 4.6 Estación SOQ con el registrador CUBE3, su sensor Lennartz a modo de prueba.*



*Figura 4.7 Instalación de la estación SOQ*



*Figura 4.8 Instalación de los equipos sísmicos de la estación TCN (izquierda).*

*Figura 4.9 Instalación de los paneles solares para la estación TCN ubicada sobre el domo reciente (abajo)*



#### 4.1 Estación SOQ

Esta estación estuvo ubicada a 8 km al OSO del domo reciente, instalado en los alrededores del centro poblado Soquesane, esta estación es la más cercana al volcán; por este motivo fue tomada como estación de referencia para la clasificación de eventos registrados. Así mismo esta estación fue mejor ubicada a 1 km al oeste de su posición inicial para evitar el ruido causado por la población circundante. Esta estación inicio su funcionamiento el día 01 de mayo desde las 15 horas y tuvo un registro continuo hasta la 12 horas del día 16 de mayo, luego fue mejor ubicada a 1 km al O de su posición inicial e inicio nuevamente su funcionamiento a las 15 horas del mismo día, continuando su registro hasta las 14 horas del 21 de agosto, el periodo de funcionamiento fue 113 días. El registrador utilizado fue Data – Cube<sup>3</sup> y su sensor un sismómetro de periodo corto de marca Lennartz LE-3D /1S LITE (1 Hz y 3C).



## 4.2 Estación PAL

Esta estación es la segunda más cerca al volcán Ticsani, instalada en la zona conocida como Pallatea, ubicada a 16km al Norte del domo reciente; presenta un correcto funcionamiento con ruido un mínimo ruido ambiental por lo cual fue útil para la localización de eventos de fractura y discriminación de eventos tectónicos. La estación se instaló el 17 de mayo con el inicio de su registro a las 16 horas, presentando un registro de tipo continuo durante 96 días y culminado el 20 de agosto a las 17 horas. La estación emplea un registrador Data – Cube<sup>3</sup> al igual que la estación SOQ, con un sismómetro de periodo corto marca Lennartz LE-3D (1 Hz y 3C)

## 4.3 Estación CHT

Estación ubicada a 18km al Este del volcán Ticsani, en la zona de Chilota, del mismo modo presenta un correcto funcionamiento, registrando datos sísmicos durante 95 días, la instalación se realizó el día 18 de mayo iniciando su registro a las 18 horas, el registro fue continuo hasta su desinstalación el día 20 de Agosto a las 15 horas. Los datos de la estación también fueron necesarios para la localización de los eventos de fractura. Esta estación se tomó como referencia para el cálculo de la duración de cada evento de fractura, dato útil para obtener el parámetro de magnitud. A diferencia de las demás estaciones la estación CHT emplea un registrador *Guralp DM-24*, el sismómetro empleado fue Lennartz LE-3D (1 Hz y 3C) de periodo corto.

## 4.4 Estación HTR

La estación fue instalada el día 16 de mayo iniciando su registro a las 19 horas y fue desinstalada el día 20 de agosto a las 21 horas, el registro de información sísmica fue durante 97 días. Esta estación fue la más lejana del volcán ubicada a 24 km al SE del domo reciente y a 5 km al NO del centro poblado de Huaitire. La ausencia de eventos en esta estación fue notoria, lógicamente por su distancia al volcán, sin embargo si se registraron los eventos más energéticos, por tanto fue de utilidad para la localización de eventos. La estación emplea un registrador Data – Cube<sup>3</sup> al igual que la estación SOQ y PAL, con un sismómetro de periodo corto marca Lennartz LE-3D (1 Hz y 3C).



#### 4.5 Estación TCN

Luego de desinstalar las estaciones SOQ, PAL, CHT y HTR el 21 de Agosto se instaló la estación TCN, ubicada sobre el domo reciente. El IGP –OVA con el objetivo de registrar señales propias del volcán da inicio de su registro a las 18 horas del mismo día, registrando información sísmica continua durante 41 días hasta el 29 de setiembre. Mediante esta estación se pudo registrar sismos de fractura y eventos de baja frecuencia. El registrador utilizado fue Data – Cube<sup>3</sup> y su sensor un sismómetro de periodo corto de marca Lennartz LE-3D (1 Hz y 3C).

### 5. ACTIVIDAD SÍSMICA

Durante los 153 días de adquisición de datos (mayo-setiembre del 2014), se identificaron un total 2230 eventos sísmicos tomando como referencia la estación SOQ y posteriormente se tomó la estación TCN. De los eventos clasificados, 2112 sismos (es decir el 95%) fueron eventos relacionados a fractura de rocas y 118 sismos relacionados al paso de fluidos (5% del total).

#### 5.1 Sismos de fractura

La identificación de los 2112 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 hasta en las cuatro estaciones de la red (*figura 5.1*), además se registró una diferencia entre las fases S-P menor a 1.5 segundos. Un ejemplo característico de sismos de fractura se observa en las figuras 5.2 y 5.3 registradas por las estaciones SOQ TCN respectivamente. Con respecto a los espectros de frecuencia los eventos presentan una amplia banda espectral de con frecuencias dominantes de 3, 6 y 12 Hz, y con una duración promedio de 18 segundos.

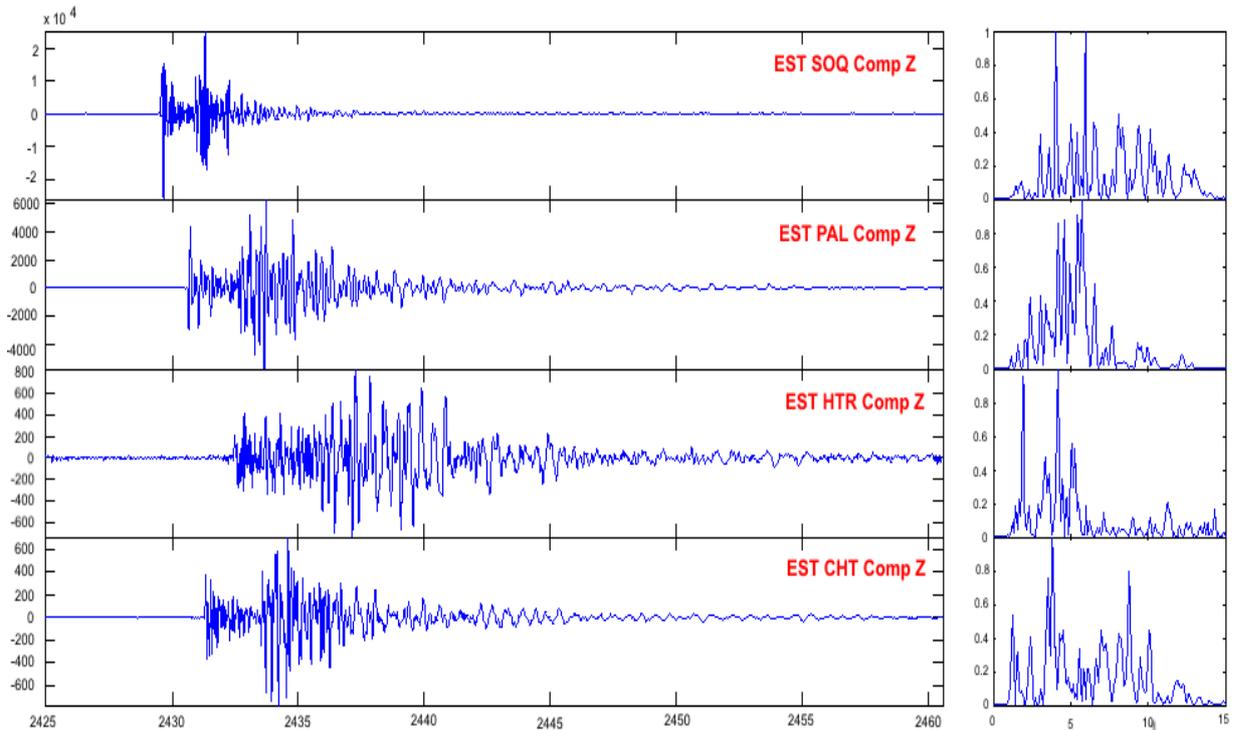


Figura 5.1 Ejemplo de un sismo de fractura registrado en todas las estaciones de la red Ticsani 2014, el 24 junio 2014 06:40:30 (UTC), en la parte izquierda las formas de onda y a la derecha los espectros de frecuencia.

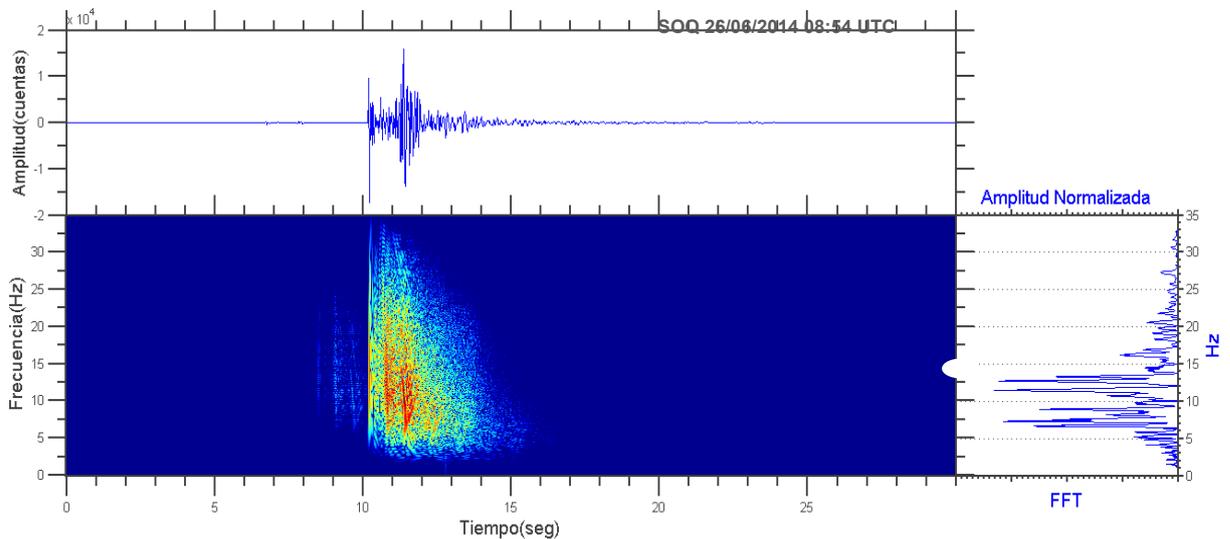


Figura 5.2 Ejemplo de sismo de fractura de tipo II registrado por la estación SOQ el 26 de junio a las 08:54 hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.

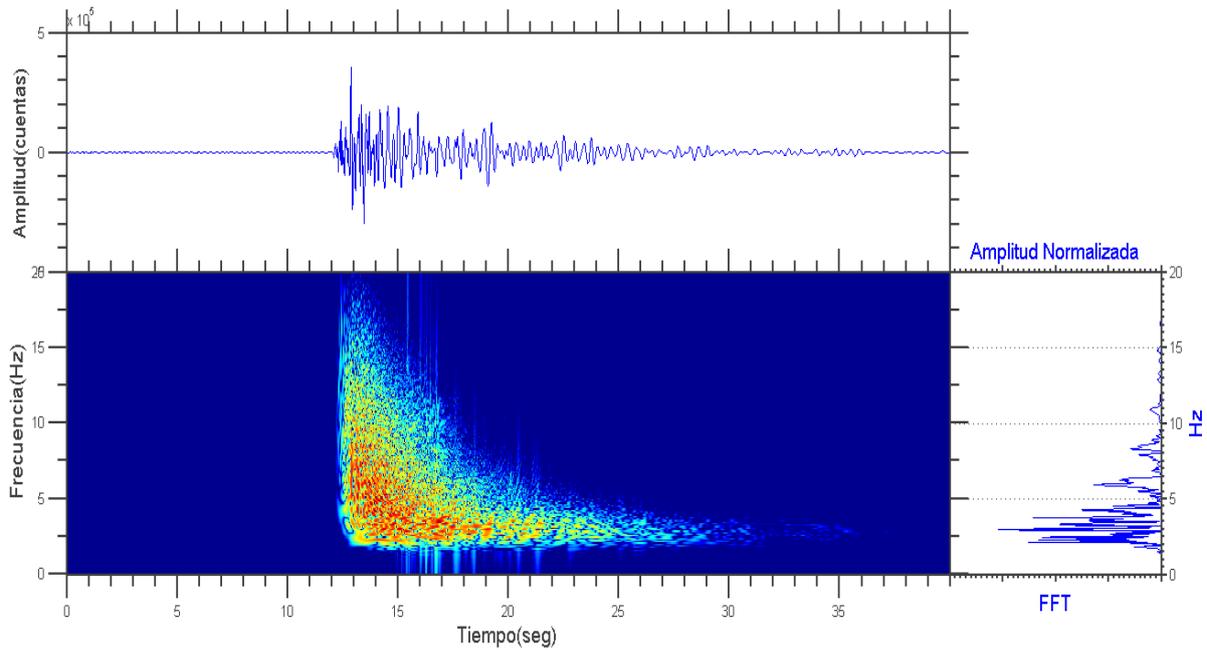


Figura 5.3 Ejemplo de sismo de fractura registrado por la estación TCN el 26 de setiembre a las 04:17hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.

La ocurrencia diaria de los sismos de fractura permite visualizar la evolución de la actividad durante el periodo de registro por ser continuo. En el histograma de la figura 5.4 muestra la variación de ocurrencia diaria de la actividad sísmica, durante los cinco meses de registro dando cuenta de dos incrementos notorios en el número de sismos. El primer incremento se desarrolló entre los días 10 de junio al 29 de junio teniendo un pico máximo el día 24 de junio en el cual se registraron 128 sismos de fractura. El segundo incremento se inició el día 06 de setiembre, presentando un máximo en su registro el día 26 de setiembre en forma de enjambre contabilizándose 447 sismos, posteriormente el número de eventos diarios descendió rápidamente.

Nº de Eventos

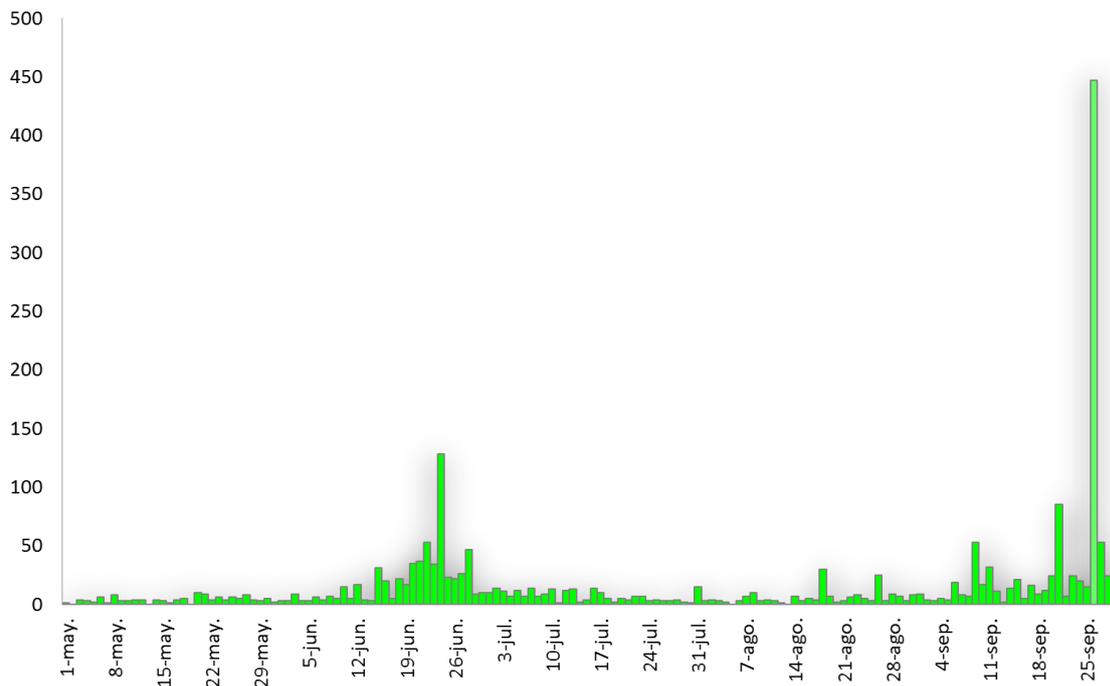


Figura 5.4 Histograma de ocurrencia de eventos relacionados a fractura de rocas, mayo-setiembre del 2014.

## 5.2 Enjambres sísmicos

Durante el tiempo de estudio se ha observado la ocurrencia de dos secuencias de enjambres sísmicos. En el primer enjambre se registró un número de 117 eventos, ocurridos el día 24 de junio entre las 3 y 17 horas con una diferencia de tiempos de arribo de fases promedio de 2.5 segundos (figura 5.5). La estación de referencia en este enjambre fue CHT. Los eventos fueron localizados sobre el domo reciente y tuvieron magnitudes de hasta 3.3 ML.

El segundo enjambre se registró el 26 de setiembre entre las 2 y 9 horas; los eventos fueron localizados a 4.5km al SSE del domo reciente. En este enjambre se tomó como referencia la estación TCN, cuyo registro fue de 363 eventos con magnitudes de hasta 3.2ML (figura 5.6) y una diferencia promedio de tiempos de arribo de fases P y S de 0.7 segundos.

Los enjambres y del 2014 registrados en la región del volcán Ticsani no presentan la secuencia mainshock-aftershock, ni tampoco cumplen con la ley de Bath (Bath, M. 1965) en cuanto al sismo que sigue al sismo de mayor magnitud (diferencia de 1.2 en magnitud), además no es comparable con la ley de Omori en cuanto a su decaimiento por ser de corta

duración y no presenta una secuencia Mainshock- Aftershock. Es importante mencionar que un patrón de ocurrencia típico de eventos volcánicos son los enjambres sísmicos (White, 2011; Zobin, 2012;), a diferencia de los eventos tectónicos que generan secuencias Mainshock-aftershock (McNutt, S. 2000).

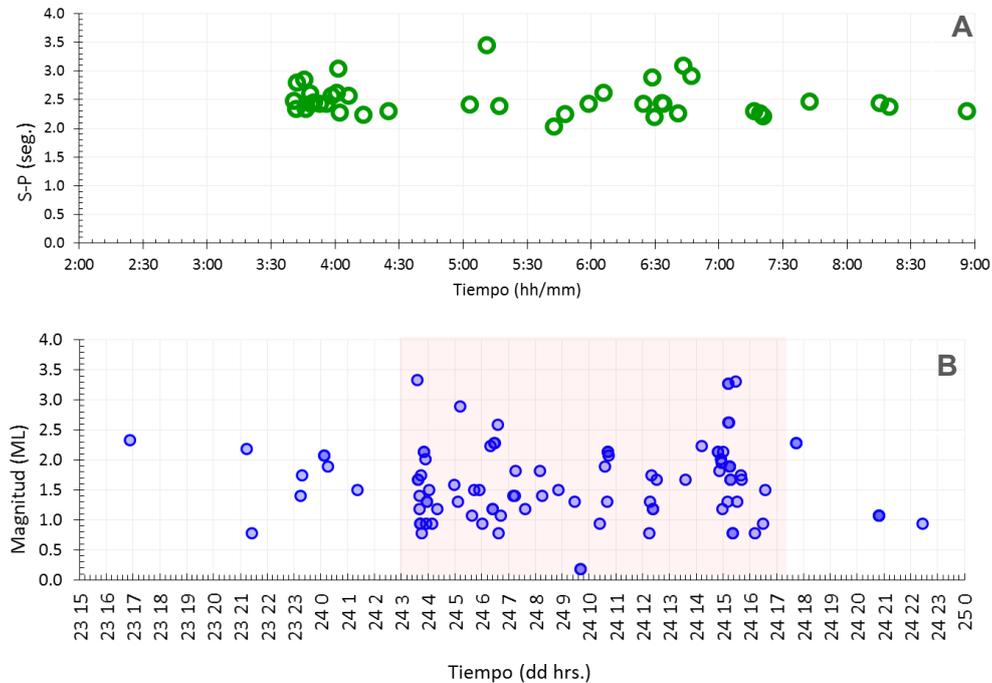


Figura 5.5 A) Diferencia de tiempos de arribo de fases P y S para el enjambre de sismos ocurridos el día 24 de junio 2014. B) Cálculo de magnitudes del enjambre sísmico, para los días 23 y 24 de junio y presencia de agrupamientos. Registros correspondientes a la estación CHT.

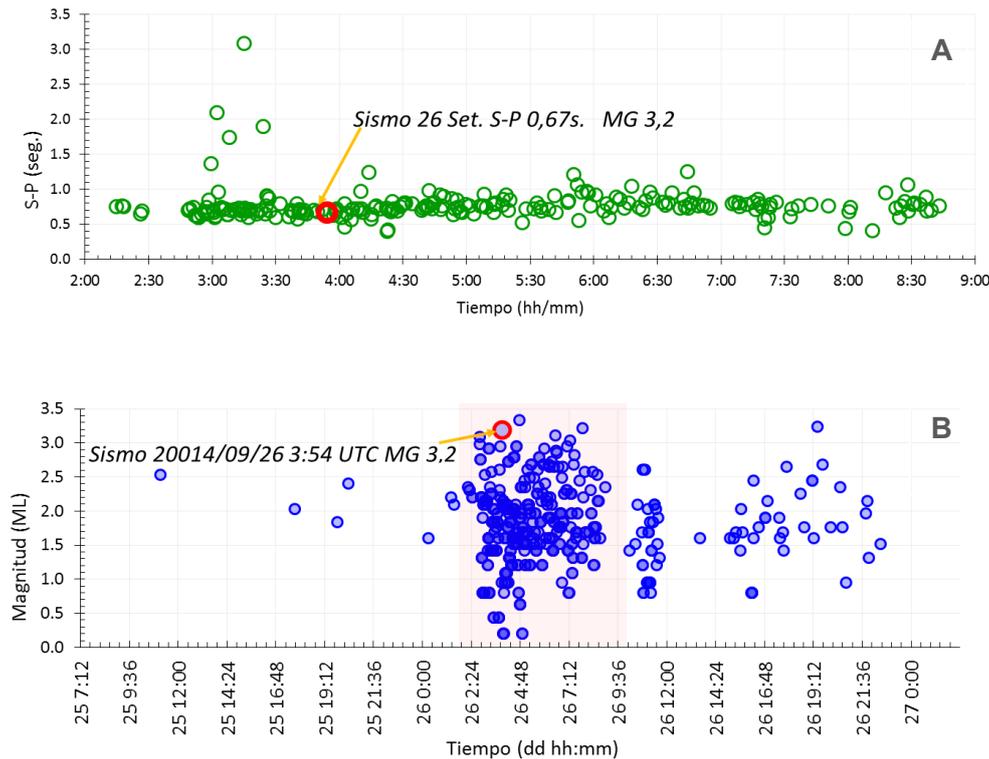


Figura 5.6 A) Diferencia de tiempos de arribo de fases P y S para el enjambre de sismos ocurridos el día 26 de setiembre B) Cálculo de magnitudes del enjambre sísmico, para los días 25 y 26 de setiembre. Registros correspondientes a la estación TCN.

### 5.3 Sismos de baja frecuencia

Se registraron un total de 118 eventos de baja frecuencia esto representa el 5% del total de eventos clasificados, presentando frecuencias dominantes en 2 Hz y 3Hz y un ancho de banda de 1 Hz a 4 Hz. Así mismo estos eventos presentan un claro inicio emergente con un decaimiento lento característico de su coda. La duración promedio de estos eventos fue de 33s.

En la figura 5.7 se muestra un ejemplo típico de un evento de baja frecuencia registrado en la estación TCN, el espectrograma muestra mayor incidencia en las frecuencias por debajo de 5 Hz. En la figura 5.8 se presenta otro evento registrado por la estación TCN en sus tres componentes con sus respectivos espectros de frecuencia.

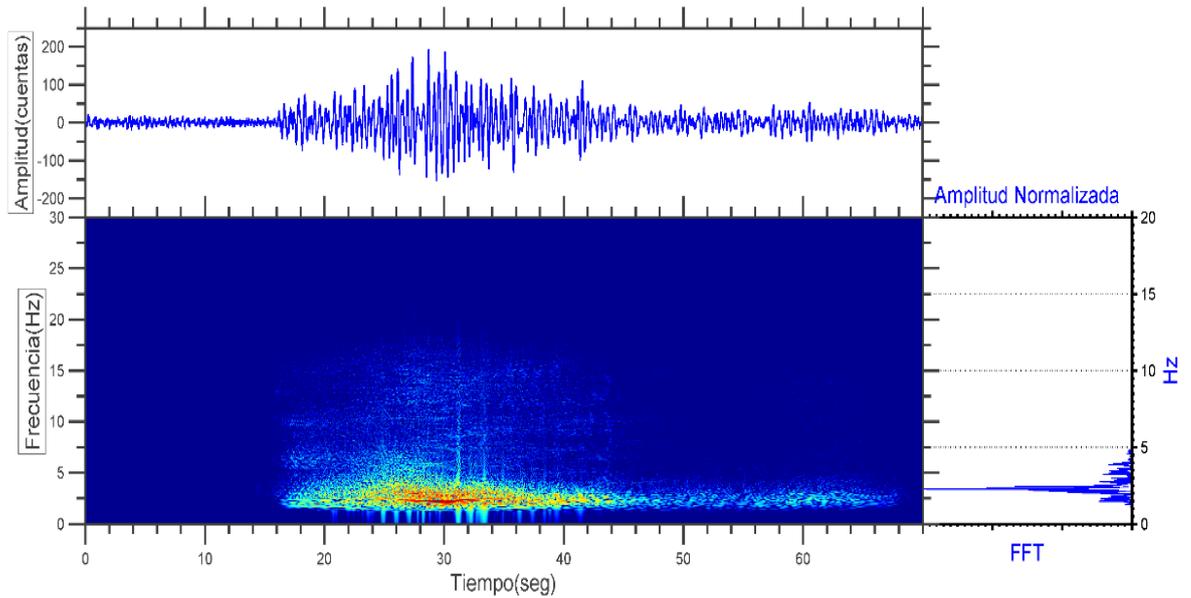


Figura 5.7 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación TCN el 24 de Agosto a las 17:24hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y su espectro de frecuencias característico.

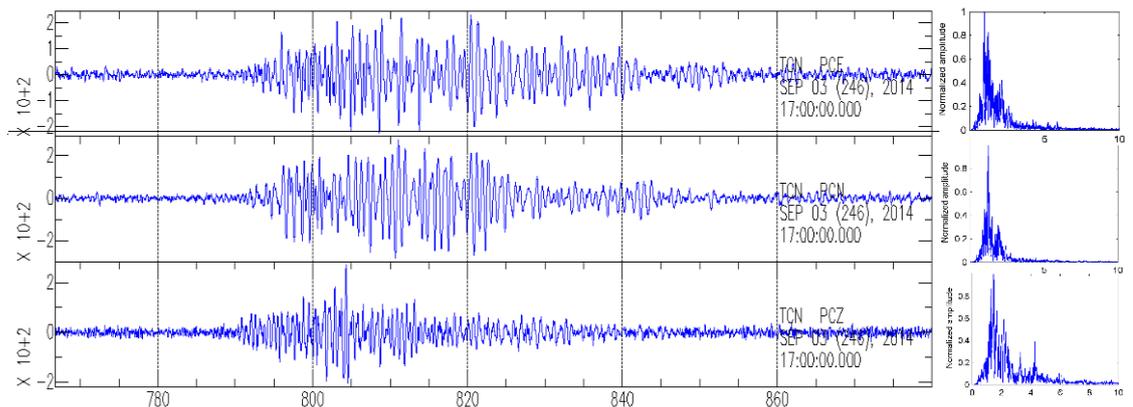


Figura 5.8 Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado 03 setiembre 2014 por la estación TCN. Izquierda, se muestran las tres componentes. Derecha, se muestran sus espectros de frecuencia.

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 5.9 el incremento de estos eventos a partir del 21 de agosto día en el que se instaló esta estación, a diferencia de los días anteriores cuando la estación de referencia fue SOQ. Esto muestra que la fuente de estos eventos estaría en la zona del edificio volcánico.

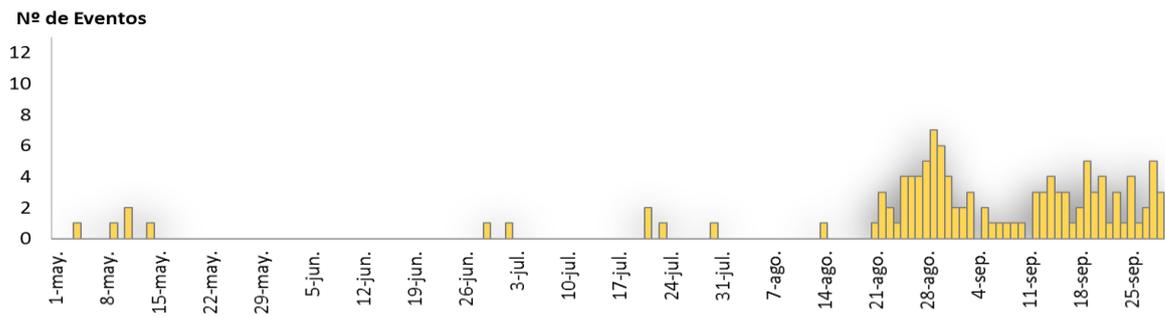


Figura 5.9 Distribución temporal de eventos de baja frecuencia mayo- setiembre 2014 registrados por las estaciones SOQ y TCN.

## 6. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS

Los eventos localizados mediante el programa Hypoellipse (Lahr, J. 1999) fueron sismos de fractura de rocas en su totalidad, gracias a las fases P y S que presentaron. Otro aspecto importante fue la presencia inicios impulsivos en su mayoría facilitando así el trabajo de localización. El análisis espacio temporal para los sismos de baja frecuencia no fue posible puesto que son de escaso número además de presentar fases emergentes.

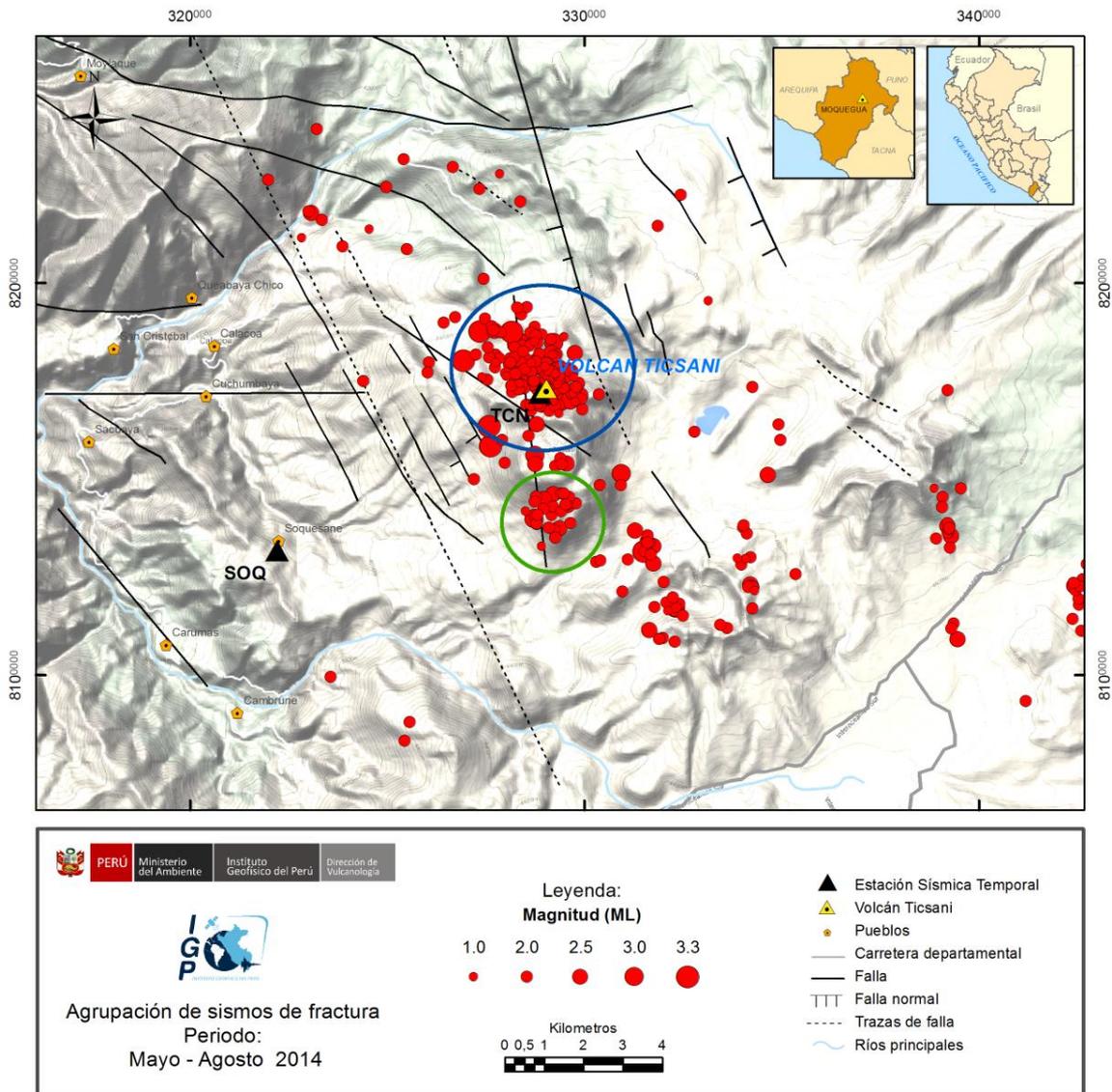
Gracias a la buena cobertura azimutal que cubre la región del volcán Ticsani se lograron localizar un total de 334 eventos con magnitudes entre 0.6 ML y 3.3 ML. Para tener una mejor certeza y precisión de la distribución de los eventos, solamente se consideraron aquellos eventos que presentaron errores en la horizontal y en la vertical por debajo de 2.67 km; es decir sismos con calidades A y B registrados por tres y cuatro estaciones.

A diferencia de los eventos clasificados el número de eventos localizados es mucho menor debido a que las estaciones funcionaron simultáneamente desde el 17 de mayo hasta el 20 de agosto, por tanto solo se tiene localizaciones para este periodo (96 días)

La distribución en superficie de los eventos está concentrada principalmente sobre el domo reciente del volcán, también se puede observar una pequeña agrupación a 3.5 km al sur, estas dos agrupaciones se encuentran sobre la falla descrita por Lavallé (2009), distribuidas pacticamente en direccion N-S (figuras 6.1 y 6.2). Tambien se observa

sismicidad dispersa en pequeñas agrupaciones en el sector sur-este y sismicidad muy dispersa por la zona de la caldera de destrucción.

En el mapa de localización y los perfiles E-W y N-S de la figura 6.2 fueron ploteados los 334 sismos, los cuales están distribuidos principalmente entre los 2,5 y 14 km de profundidad por debajo del volcán.



*Figura 6.1 Distribución en superficie de la sismicidad registrada en la campaña sísmica de mayo-agosto 2014. Se observa un agrupamiento principal sobre el domo reciente, círculo azul. Se observa un agrupamiento secundario, círculo verde.*

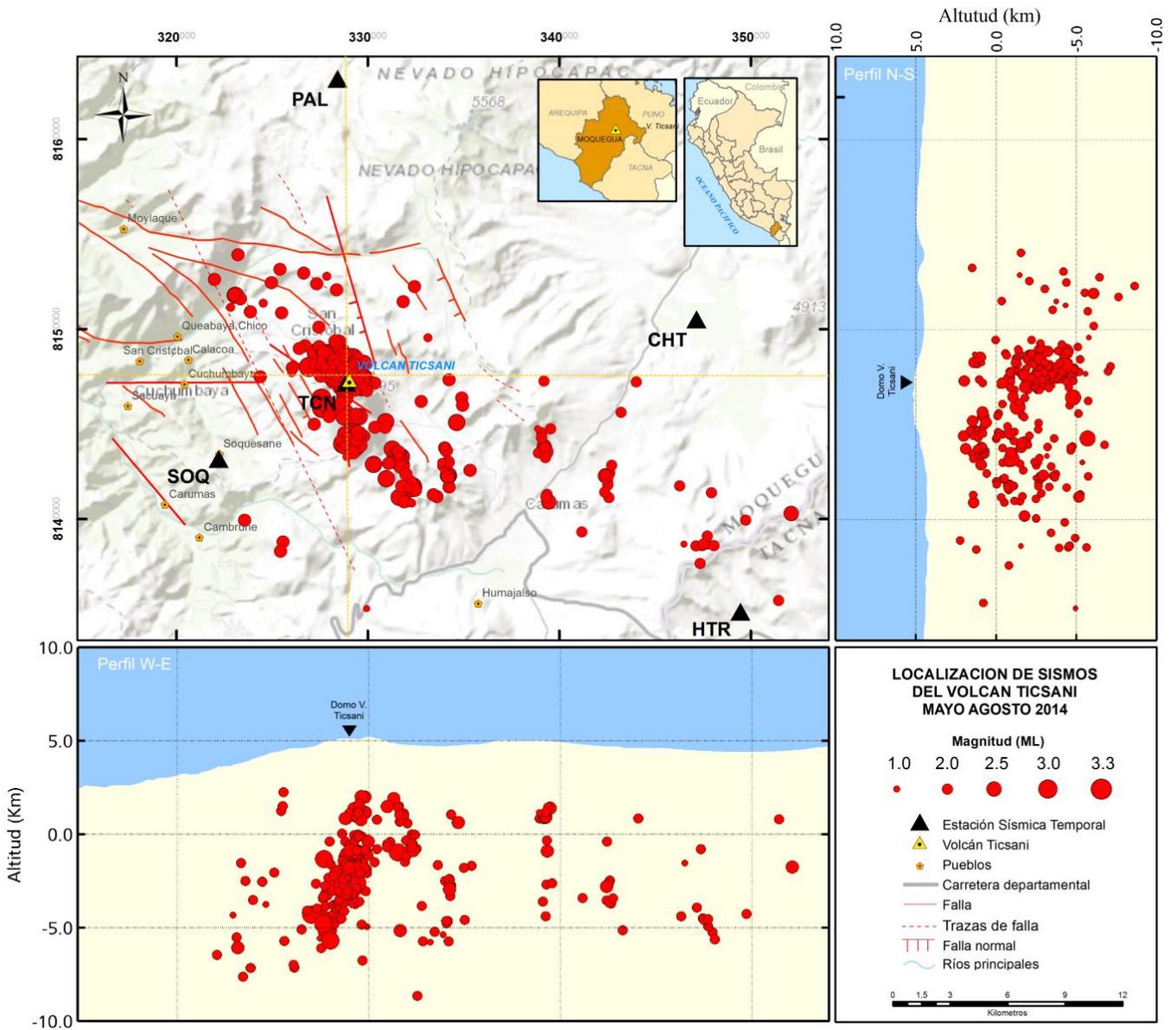


Figura 6.2 Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad; se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán



## CONCLUSIONES

- En el periodo de observación que se inicia desde 01 de mayo hasta el 29 de setiembre se registraron 2112 sismos relacionados a fractura de rocas representando el 95% de un total de 2230 sismos clasificados, esto representa la sismicidad dominante en la región del Ticsani. Se registraron también 118 eventos de baja frecuencia representando un 5% del total.
- Un enjambre de sismos registrados el día 24 de junio fue localizado sobre el domo 3 con 117 sismos de fractura. Un segundo enjambre se registró el día 26 de setiembre ubicado a 4.5km al SSE del domo reciente (cercanías del domo 1) con 363 sismos de fractura. Estos enjambres fueron de corta duración (menor a dos días) y de magnitudes menores a 3.3ML.
- Fue posible localizar un total de 334 eventos relacionados a fractura de rocas presentando magnitudes de 0.6ML a 3.3ML, la distribución en superficie se concentra principalmente sobre el domo 3 y cercanías, así mismo la distribución hipocentral muestra una mayor incidencia de eventos distribuidos entre los 2,5 y 14 km de profundidad.



## RECOMENDACIONES

- Los registros sísmicos evidencian actividad sísmica del volcán Ticsani, por tanto es necesario la continuidad de adquisición de datos sísmicos mediante un sistema de monitoreo continuo y en tiempo real, con al menos cuatro estaciones sísmicas instaladas. La distribución de las tres primeras estaciones deberán tener como centro el volcán Ticsani lo cual garantizaría una cobertura azimutal considerable para las localizaciones, así mismo la cuarta estación deberá instalarse sobre el mismo volcán Ticsani o cercanías, esto ayudara al monitoreo de sismos relacionados al paso de fluidos.
- Complementar los estudios sinológicos mediante la realización de una campaña de tomografía sísmica, esto ayudara para poder tener una para obtener la ubicación de la cámara magmática cámara y la delimitación del sistema hidrotermal.
- Es importante continuar con los estudios de los sismos de fractura, sismos correspondientes al paso de fluidos y los enjambres sísmicos.



## 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.
- Antayhua, Y. (2002). Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). *Tesis de ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, 146 p.*
- Gonzales, K., Froger, J., Rivera, M., & Audin, L. (2006). Deformación co-sísmica producida por el sismo Mb=5.4 del 01 de Octubre de 2005 (Carumas-Moquegua), detectada por interferometría radar - InSAR. *In XIII Congreso peruano de Geología. Vol, 2005, pp. 488-489.*
- 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.
- Llerena, P. (2005). Características de la sismicidad observada en octubre del 2001 en el volcán Misti (Sur del Perú). *Tesis de ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. 151 p.*
- Mariño, J. (2002). Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Peru). 160.
- McNutt, S. (2000a). Volcanic seismicity, In "Encyclopedia of Volcanoes".
- Omori, F. (1911). The Usu-san eruption and earthquake and elevation phenomena. *Bull. Imper. Earthq. Invest, Com 5, 1-38.*
- 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.*

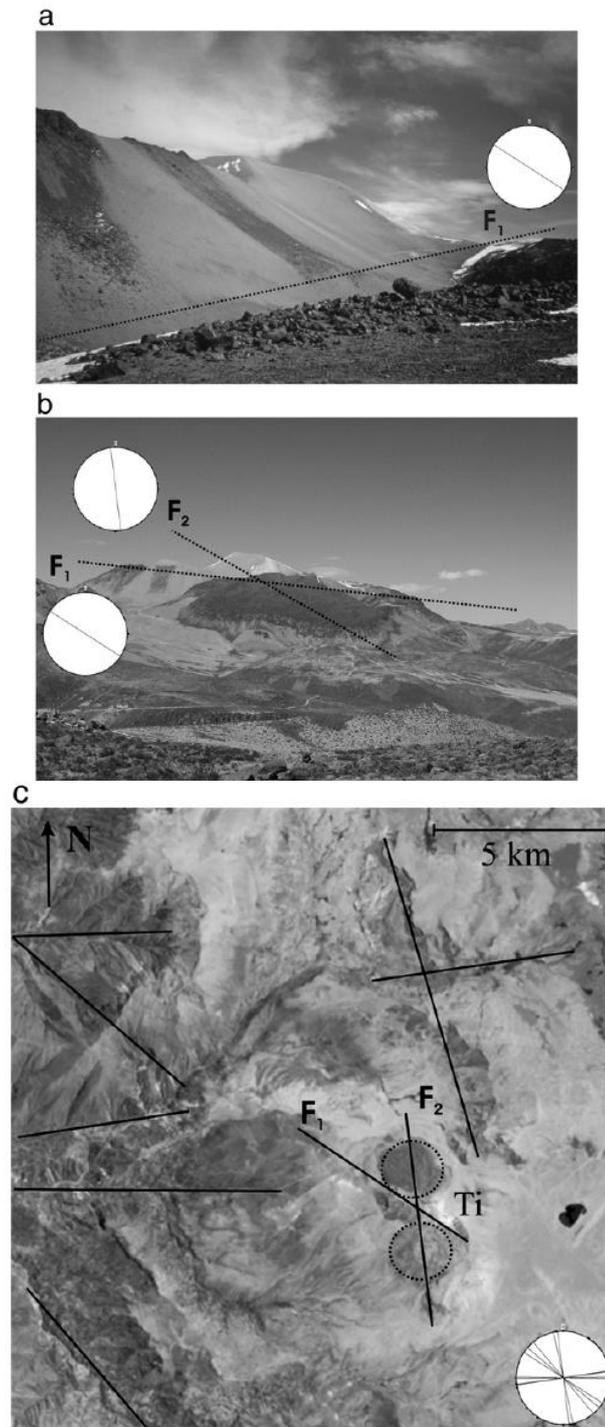


Zobin, V. (2012). General Properties of Volcano-Tectonic Earthquake Swarms. Introduction to Volcanic Seismology. *Second edition, pp. 144-160. Elsevier, 482 p.*

## ANEXO I

## ESFUERZOS PREDOMINANTES EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI

Lavallé, De Silva, Salas, &amp; Byrnes (2009)



**Fig. 6.** Ticsani volcano. (a) Photograph of the NW-SE trending ridge (dotted line:  $F_1$ ) at Ticsani (looking NW). (b) Photograph of the northern lava dome and the ridge at Ticsani (looking SSW). Parts of the southern lava dome can be seen beyond the left side of the ridge. (c) Landsat TM images showing the major faults (plotted on a stereonet), surrounding Ticsani volcano (Ti) and its lateral domes (dotted circles).



## ANEXO II

NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS POR DÍA PARA EL PERIODO MAYO-SETIEMBRE  
2014

FECHA	SISMOS DE FRACTURA	SISMOS DE BAJA FRECUENCIA	TOTAL
01/05/2014	1	0	1
02/05/2014	0	0	0
03/05/2014	4	0	4
04/05/2014	3	1	4
05/05/2014	2	0	2
06/05/2014	6	0	6
07/05/2014	1	0	1
08/05/2014	8	0	8
09/05/2014	3	1	4
10/05/2014	3	0	3
11/05/2014	4	2	6
12/05/2014	4	0	4
13/05/2014	0	0	0
14/05/2014	4	1	5
15/05/2014	3	0	3
16/05/2014	1	0	1
17/05/2014	4	0	4
18/05/2014	5	0	5
19/05/2014	0	0	0
20/05/2014	10	0	10
21/05/2014	9	0	9
22/05/2014	4	0	4
23/05/2014	6	0	6
24/05/2014	4	0	4
25/05/2014	6	0	6
26/05/2014	5	0	5
27/05/2014	8	0	8
28/05/2014	4	0	4
29/05/2014	3	0	3
30/05/2014	5	0	5
31/05/2014	2	0	2
01/06/2014	3	0	3
02/06/2014	3	0	3

FECHA	SISMOS DE FRACTURA	SISMOS DE BAJA FRECUENCIA	TOTAL
03/06/2014	9	0	9
04/06/2014	3	0	3
05/06/2014	3	0	3
06/06/2014	6	0	6
07/06/2014	4	0	4
08/06/2014	7	0	7
09/06/2014	5	0	5
10/06/2014	15	0	15
11/06/2014	5	0	5
12/06/2014	17	0	17
13/06/2014	4	0	4
14/06/2014	3	0	3
15/06/2014	31	0	31
16/06/2014	20	0	20
17/06/2014	5	0	5
18/06/2014	22	0	22
19/06/2014	17	0	17
20/06/2014	35	0	35
21/06/2014	37	0	37
22/06/2014	53	0	53
23/06/2014	34	0	34
24/06/2014	128	0	128
25/06/2014	23	0	23
26/06/2014	22	0	22
27/06/2014	26	0	26
28/06/2014	47	0	47
29/06/2014	9	1	10
30/06/2014	10	0	10
01/07/2014	10	0	10
02/07/2014	14	1	15
03/07/2014	11	0	11
04/07/2014	7	0	7
05/07/2014	12	0	12



FECHA	SISMOS DE FRACTURA	SISMOS DE BAJA FRECUENCIA	TOTAL
06/07/2014	7	0	7
07/07/2014	14	0	14
08/07/2014	7	0	7
09/07/2014	9	0	9
10/07/2014	13	0	13
11/07/2014	1	0	1
12/07/2014	12	0	12
13/07/2014	13	0	13
14/07/2014	2	0	2
15/07/2014	4	0	4
16/07/2014	14	0	14
17/07/2014	10	0	10
18/07/2014	5	0	5
19/07/2014	2	0	2
20/07/2014	5	0	5
21/07/2014	4	2	6
22/07/2014	7	0	7
23/07/2014	7	1	8
24/07/2014	3	0	3
25/07/2014	4	0	4
26/07/2014	3	0	3
27/07/2014	3	0	3
28/07/2014	4	0	4
29/07/2014	2	0	2
30/07/2014	1	1	2
31/07/2014	15	0	15
01/08/2014	3	0	3
02/08/2014	4	0	4
03/08/2014	3	0	3
04/08/2014	2	0	2
05/08/2014	0	0	0
06/08/2014	3	0	3
07/08/2014	7	0	7
08/08/2014	10	0	10
09/08/2014	3	0	3
10/08/2014	4	0	4
11/08/2014	3	0	3
12/08/2014	1	0	1
13/08/2014	0	0	0
14/08/2014	7	1	8
15/08/2014	3	0	3
16/08/2014	5	0	5
17/08/2014	4	0	4

FECHA	SISMOS DE FRACTURA	SISMOS DE BAJA FRECUENCIA	TOTAL
18/08/2014	30	0	30
19/08/2014	7	0	7
20/08/2014	2	0	2
21/08/2014	3	1	4
22/08/2014	6	3	9
23/08/2014	8	2	10
24/08/2014	5	1	6
25/08/2014	3	4	7
26/08/2014	25	4	29
27/08/2014	3	4	7
28/08/2014	9	5	14
29/08/2014	7	7	14
30/08/2014	3	6	9
31/08/2014	8	4	12
01/09/2014	9	2	11
02/09/2014	4	2	6
03/09/2014	3	3	6
04/09/2014	5	0	5
05/09/2014	4	2	6
06/09/2014	19	1	20
07/09/2014	8	1	9
08/09/2014	7	1	8
09/09/2014	53	1	54
10/09/2014	17	1	18
11/09/2014	32	0	32
12/09/2014	11	3	14
13/09/2014	2	3	5
14/09/2014	14	4	18
15/09/2014	21	3	24
16/09/2014	5	3	8
17/09/2014	16	1	17
18/09/2014	9	2	11
19/09/2014	12	5	17
20/09/2014	24	3	27
21/09/2014	85	4	89
22/09/2014	7	1	8
23/09/2014	24	3	27
24/09/2014	20	1	21
25/09/2014	15	4	19
26/09/2014	447	1	448
27/09/2014	53	2	55
28/09/2014	24	5	29
29/09/2014	28	3	31
<b>Total</b>	<b>2112</b>	<b>118</b>	<b>2230</b>