

II. CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS DEL SISMO DEL 1 DE OCTUBRE DE 2005 Y DE SU SERIE DE REPLICAS

Autores: Hernando Tavera ⁽¹⁾, Victor Aguilar ⁽²⁾, Armando Minaya ⁽²⁾, Yolanda Zamudio⁽¹⁾, Luis Vilcapoma ⁽¹⁾, Javier Ticona ⁽²⁾, Henry Salas ⁽¹⁾, Rocio Parillo ⁽¹⁾, Simeón Rodríguez ⁽¹⁾, Ivonne Perez-Pacheco ⁽¹⁾.

(1). CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú

(2). Instituto de Geofísica, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa

2.1 Introducción

La importante actividad sísmica presente en el Perú es debida al proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, el mismo que se produce con una velocidad promedio del orden de 7-8 cm/año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999). Este proceso es responsable de la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud que se hayan producido frente a la línea de costa (Dorbath et al, 1990; Tavera y Buforn, 2001), todos asociados al contacto sismogénico interplaca. Estos sismos son muy frecuentes en el tiempo y en un año es posible registrar la ocurrencia de hasta 60 sismos con magnitudes $m_b \geq 4.5$, y en general, todos son sentidos en las localidades cercanas a la línea de costa y al epicentro con intensidades mínimas de IV-V (MM). Los sismos de mayor magnitud ($M > 7.0$) han producido importantes daños en áreas relativamente muy grandes como el ocurrido en la región sur de Perú el 23 de Junio de 2001 ($M_w = 8.2$) que afectó un área de 70 x 370 km, ubicada entre las localidades de Atico (Arequipa) e Ilo (Moquegua). Este sismo produjo un número moderado de fallecidos (74 personas), heridos (2,689 personas) y destrucción en los departamentos de Moquegua y Tacna (35, 601 viviendas afectadas y 17584 destruidas), siendo sentido con intensidades del orden de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada entre las localidades de Chala y Arica en Chile.

Estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú sugieren que el sismo del 23 de Junio de 2001 presentó un proceso complejo de ruptura que se propagó en dirección SE, a lo largo de 370 km desde el epicentro del sismo ubicado cerca de la localidad de Ocoña (CNDG, 2002). Como parte de todo este proceso, la energía sísmica liberada por el sismo se ha acumulado en la región sur de Perú y norte de Chile en donde de manera aleatoria se han venido produciendo sismos de magnitud moderada seguidos o no por enjambres de sismicidad que han tenido duraciones de horas o días, tal es el caso del enjambre de sismicidad que se produjo en los alrededores del volcán Ticsani (Departamento de Moquegua) durante el mes de octubre de 2005.

El día 1 de Octubre de 2005, ocurre un sismo de magnitud moderada (5.4 ML) en la región sur de Perú afectando a un área relativamente pequeña que considera diversas localidades distribuidas alrededor del volcán Ticsani. El epicentro del sismo del 1 de octubre fue ubicado a 8 km al Este de la localidad de Calacoa y 62 km al NE de la ciudad de Moquegua. El sismo produjo daños en un gran número de viviendas de adobe de las localidades de San Cristóbal, Calacoa, Cuchumbaya, Solajo, Carumas, Soquesane y otras aldeañas. Después de ocurrido el sismo y durante un periodo de 30 días aproximadamente, se ha producido un gran número de replicas de diversos tamaños que causaron pánico y alarma en los pobladores de las localidades antes indicadas. Inicialmente, la alarma se incremento en razón que los pobladores

asociaban la ocurrencia de los sismos con una posible erupción del volcán Ticsani, hecho que no ocurrió así y por el contrario con el pasar de los días, la sismicidad ceso completamente. En el presente capítulo se describe las características principales del sismo ocurrido el 1 de octubre y de su serie de replicas, además de los daños que ellos causaron en las localidades aledañas al volcán Ticsani.

2.2 Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales del sismo del 1 de Octubre de 2005 fueron obtenidos utilizando información de las estaciones sísmicas de la RSN-IGP distribuidas en la región sur de Perú (Tavera & Bufoin):

Tiempo Origen:	22h 19m 46.9 seg. (Hora Universal)
	17h 19m 46.9 seg. (Hora Local)
Latitud Sur:	-16.748°
Longitud Oeste:	-70.609°
Profundidad:	8.5 km
Magnitud:	5.4 ML

Después del sismo, se produjo un número importante de replicas llegándose a contabilizar para los primeros 7 días un total de 254 replicas registradas en la estación de Toquepala (TOQ), la más cercana a la zona epicentral (60 km), y 180 registradas por la estación de Arequipa (ARE) ubicada a 120 km del área epicentral. De estas replicas, inicialmente se logró localizar 39, todas con magnitudes entre 2.0 y 5.2 ML, y de estas un total de 7 fueron sentidas en las localidades de Calacoa y Carumas con intensidades máximas de IV (escala Mercalli Modificada, MM), produciendo pánico en la población de ambas localidades.



Fig. 2.1. Ubicación epicentral del sismo del 1 de octubre de 2005, 5.4ML (estrella) y valores de intensidad en las localidades aledañas al área epicentral. Los triángulos indican la ubicación de las estaciones sísmicas temporales instaladas para el monitoreo de las replicas.

Como se puede apreciar en la Fig. 2.1, el epicentro del sismo principal se ubica a 8 km en dirección Este de la localidad de Calacoa; es decir, en el extremo norte del volcán Ticsani. La profundidad del sismo ha sido estimada en 8.5 km, lo cual sugiere el desarrollo de una deformación superficial y por su cercanía al volcán, podría estar asociada a los procesos internos propios del volcán Ticsani.

2.3 Intensidades

Inmediatamente después de ocurrido el sismo del 1 de Octubre de 2005, el IGP procedió a realizar las evaluaciones de los efectos y daños causados por el sismo en las diversas localidades ubicadas en los alrededores del volcán Ticsani. Estas evaluaciones se realizaron mediante encuestas vía línea telefónica a dos o tres personas de cada localidad y la información

obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (Fig. 2.1). La descripción más resaltante de los daños y efectos se describe a continuación:

- *Localidades de Carumas, Solajo, Sijuaya, Quinastaquillas, Soquesane y Calacoa:* El sismo produjo daños importantes en las viviendas de adobe más no, en viviendas de material noble. El sismo causó pánico y desesperación en la población.
- *Localidades de Omate, Ubinas, Lloque, Torata y Chojota:* El sismo produjo daños parciales en las viviendas de adobe y pánico en la población.
- *Ciudad de Moquegua y localidades de Puquina, Yanque y Yunga:* El sismo no produjo daños en las viviendas, pero fue sentido fuerte por la población.
- *Ciudades de Arequipa y Tacna:* No produjo daños en las viviendas y fue sentido levemente por personas que se encontraban en reposo.

Como se puede ver en la Fig. 2.1, el área afectada por el sismo es pequeña al igual que su radio de percepción, siendo esto típico de los sismos con magnitud moderada y con hipocentros cerca de la superficie. Los mayores daños ocasionados por el sismo se han concentrado en las localidades aledañas al volcán Ticsani.

A fin de realizar una evaluación in situ de los efectos y daños producidos por el sismo, el IGP envió una misión de campo por cinco días para visitar las localidades de Carumas, Cambrune, Cuchumbaya, Sacuaya, Quebaya, Calacoa, Bellavista, Ichupampa y Quinistaquillas. Para la evaluación de intensidades en estas localidades, se ha realizado encuestas personales a fin de conocer el comportamiento de las personas, construcciones y suelos ante la ocurrencia del sismo, para luego ser interpretada con la escala de intensidades MSK-64 modificada para su uso en el Perú por Ocola (1979). Esta escala, a diferencia de la Mercalli Modificada (MM), permite considerar las características de las viviendas, sea material de construcción, antigüedad y tipo de daño; sin embargo, ambas escalas son complementarias.

En general, el trabajo de recolección de información no ha sido uniforme en razón que en muchos de los poblados sus habitantes prácticamente permanecen todo el día dedicados a sus tareas agrícolas, no disponiendo en los poblados de personas a quienes encuestar. Las localidades con mayor número de entrevistas fueron Carumas y Calacoa; y por lo tanto, fue posible elaborar sus mapas de intensidades macrosísmicas y ellas son presentadas en las Figs. 2.2 y 2.3. En general, en todas las localidades visitadas, los mayores daños se presentaron en las viviendas de tipo A (construcciones de adobe, tapial, bloques de piedra, etc.) mal preservadas, más aún si se considera que dichas viviendas tienen muchos años de antigüedad (más de 30 años) y que fueron previamente afectadas por el gran sismo del 23 de Junio de 2001.

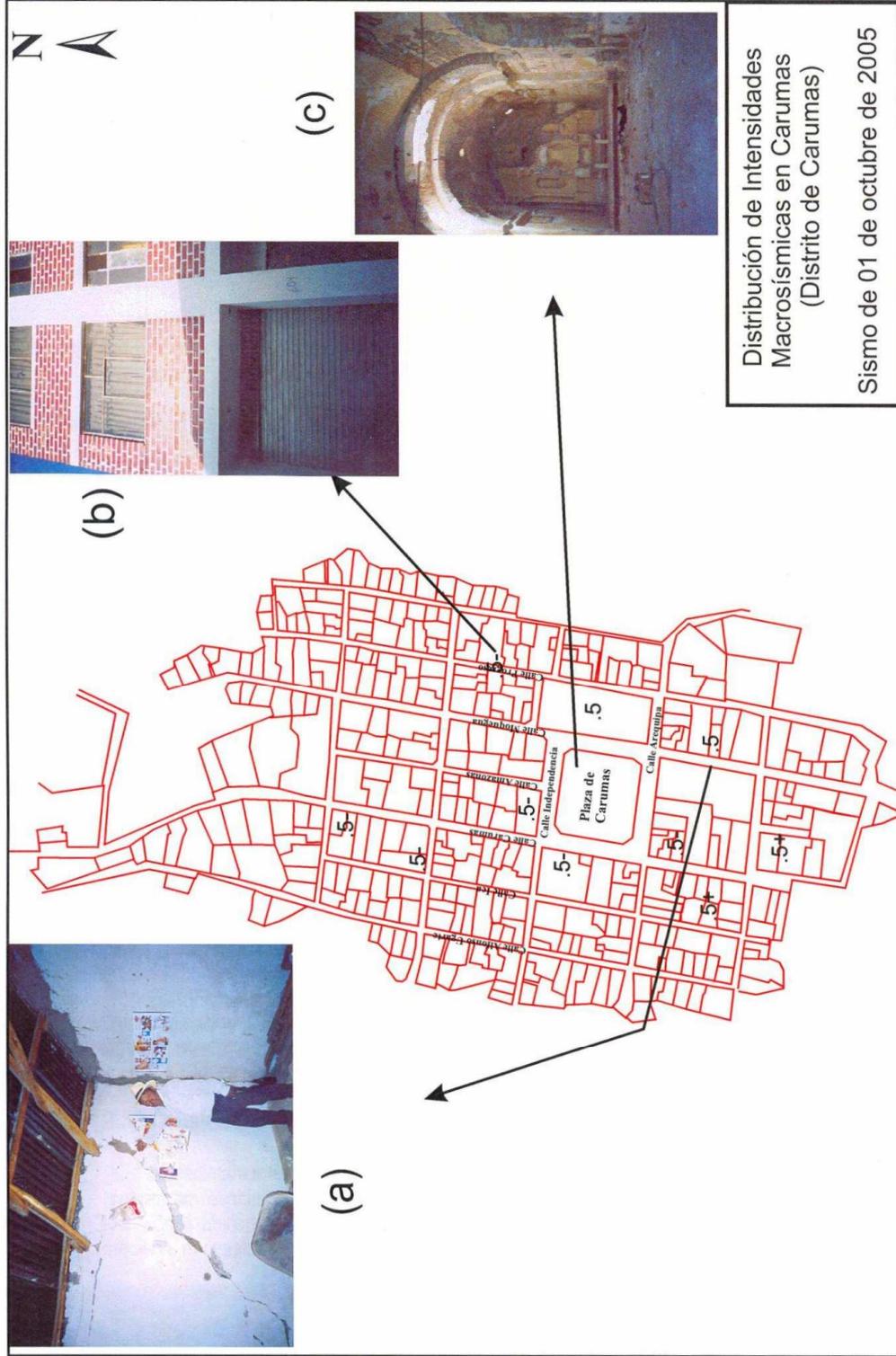


Fig. 2.2. Distribución de intensidades macroísmicas en la localidad de Carumas, asociados al sismo del 1 de octubre, 2005. a). Vivienda de tipo A con grietas profundas en sus paredes. b). Vivienda del tipo B sin daños. c). Iglesia de Carumas considerablemente afectada debido a su antigüedad.

2.4 Redes Sísmicas de Intervención

Después de haberse producido el sismo principal y ante la ocurrencia de un gran número de réplicas, la Universidad Nacional San Agustín y el Instituto Geofísico del Perú coordinaron sobre la instalación de redes sísmicas locales temporales para el registro de dichas réplicas y así poder conocer las características de los procesos de ruptura que se producían como producto de la crisis sísmica. Inicialmente, la UNSA procedió a instalar 3 estaciones sísmicas de registro analógico y sensores de periodo corto tipo SP-2 en las localidades de Quinistacas, Torata y Pasto Grande, todas operaron entre los días del 6 al 13 de octubre llegando a registrar un importante número de réplicas.

Posteriormente, el IGP instala 4 estaciones digitales de banda ancha de tipo reftek en las localidades de Carumas, Pallateca, Humajalso y otra en el volcán Ticsani. Esta última para evaluar el registro de eventos que pudieran tener relación con la posible reactivación del volcán. Estas estaciones temporales funcionaron entre los días 14 y 20 de octubre. La distribución de las estaciones sísmicas se muestra en la Fig. 2.1.

Durante ambos periodos de monitoreo (entre el 6 y 9; 14 y 20 de octubre), algunas estaciones llegaron a registrar hasta 800 réplicas; sin embargo, durante la etapa de correlación de registros entre cada una de las estaciones, se rescato para el primer periodo un total de 122 réplicas y de 147 para el segundo. Esta información fue utilizada para el procesamiento sísmico preliminar.

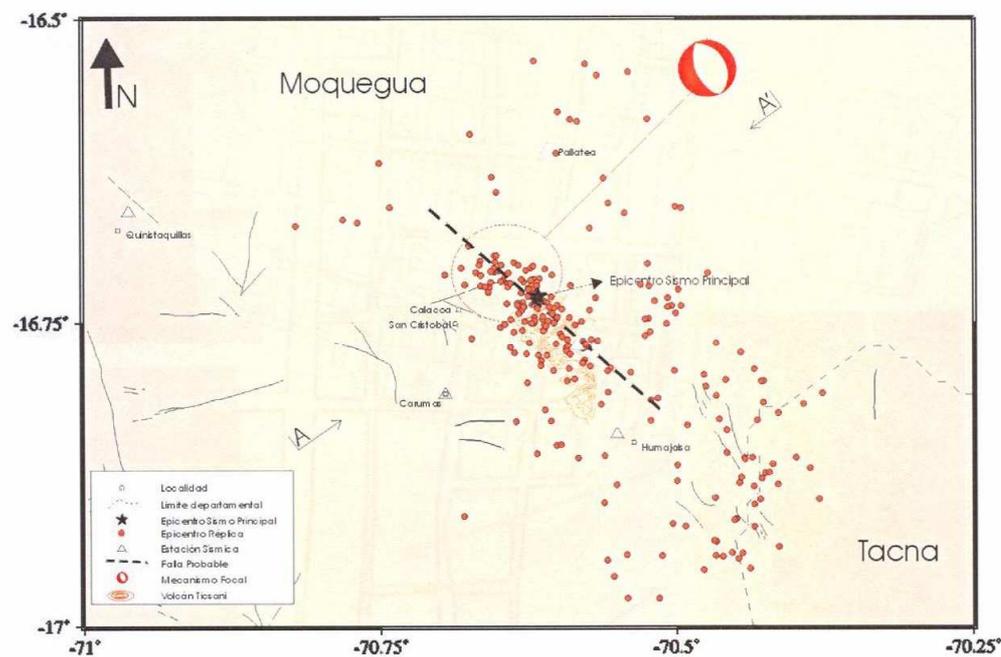


Fig. 2.4. Distribución epicentral de algunas de las réplicas del sismo del 1 de octubre de 2005 (5.4 ML) registrados por las redes sísmicas temporales que funcionaron en el área entre el 6 y 20 de octubre (ver Fig. 2.1). El mecanismo focal de tipo normal es representado en el hemisferio inferior de la esfera focal.

2.5 Las replicas

En la Fig. 2.4 se presenta un mapa con la distribución espacial de un total de 269 replicas registradas por las redes sísmicas antes indicadas. Según esta figura, sobre el extremo oriental del cono del volcán Ticsani, las replicas se distribuyen siguiendo un aparente alineamiento con una orientación NO-SE con el mayor número de sismos distribuidos en su extremo NO, lo cual podría sugerir que en esta área se habría producido la mayor deformación durante la crisis sísmica. Contrariamente, en el extremo SE, los sismos se distribuyen de manera más dispersa siendo difícil identificar algún patrón; sin embargo, se debe considerar que en esta área existe un gran número de fallas de pequeña longitud que podrían haber producido los sismos.

El total de la sismicidad presenta magnitudes ML menores a 3.0 y alcanzan niveles de profundidad del orden de 12 km (Fig. 2.5), lo cual explicaría porque no fueron sentidos en superficie o causaron daños en las localidades aledañas al área epicentral.

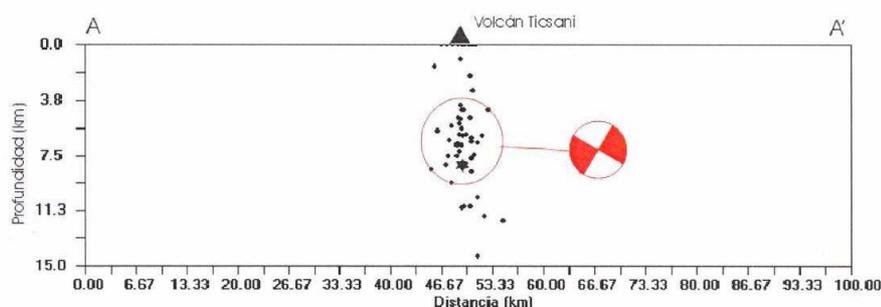


Fig. 2.5. Sección vertical de sismicidad en la dirección A-A' indicada en la Fig. 2.4. Se considera únicamente las replicas utilizadas en la elaboración del mecanismo focal compuesto, el mismo que es representado en su proyección vertical siguiendo la dirección A-A'. La estrella indica la ubicación del epicentro del sismo principal.

2.6 Orientación de la Fuente Sísmica

A fin de conocer la orientación de la fuente que dió origen al sismo del 1 de Octubre y a su serie de replicas, se procedió a elaborar el mecanismo focal utilizando la información de los primeros impulsos del registro de la onda P en las diversas estaciones sísmicas de las redes temporales. Para el sismo principal no ha sido posible obtener su mecanismo focal en razón al poco número de datos disponibles.

Para las replicas, por el número de estaciones sísmicas utilizadas en el monitoreo de la sismicidad, se ha elaborado un mecanismo focal compuesto utilizando un total de 65 replicas, todas ubicadas en el extremo norte del cono volcánico. La solución obtenida corresponde a un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección NNO-SSE (Fig. 2.4), ambos buzando con ángulos del orden de 38 y 52 grados en dirección Este y Oeste. Este mecanismo para las replicas corresponde a un proceso de deformación por extensión con ejes principales de esfuerzo T (Tensión) orientados en dirección ENE-OSO.

2.7 Monitoreo Sísmico Temporal del Volcán Ticsani

Como parte del monitoreo sísmico en la zona afectada por el sismo del 1 de octubre de 2005, se llegó a instalar una estación sísmica de banda ancha (TIC), cerca del cono volcánico para evaluar si la actividad sísmica presente en el área tiene relación con una posible reactivación del volcán Ticsani. La estación TIC registro la actividad sísmica durante un periodo inicial de 24 horas del día 14 de octubre de 2005 y posteriormente, durante 4 días a partir del 18 de octubre.

A manera de comparación en la Fig. 2.6, se muestra algunos ejemplos de los registros típicos obtenidos de estaciones sísmicas que funcionaron en volcanes italianos y colombianos, y que estuvieron en proceso de reactivación hasta llegar a su etapa eruptiva. Para distinguir cada tipo de registro es necesario analizar con atención su forma, periodo o frecuencia de la señal y para ello, algunos autores recurren a elaborar espectros como la herramienta más útil para tener detalle de los procesos que teóricamente se producen en el interior de un volcán previo a su erupción.

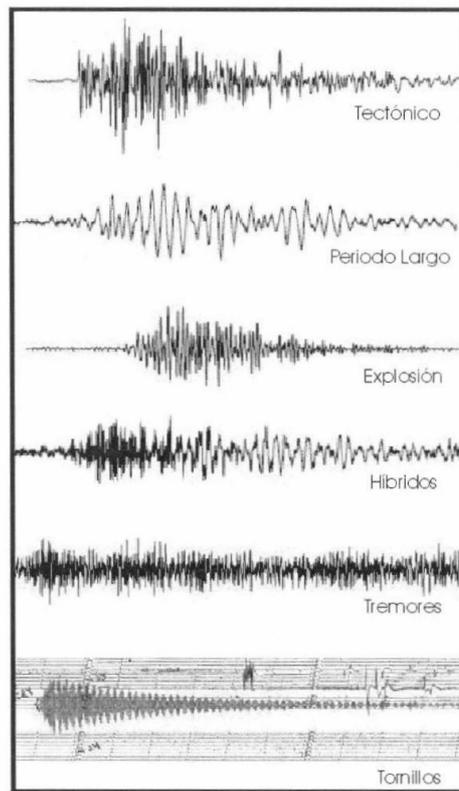


Fig. 2.6. Registros característicos de señales correspondientes a volcanes italianos y colombianos en etapas de crisis y/o etapa eruptiva.

Según la Fig. 2.6, se pueden identificar hasta seis tipos de señales volcánicas, **siendo** sus principales características las siguientes:

.- *Eventos Volcano-tectónicos*: señales correspondientes a fracturamientos de rocas debido a la intrusión o migración de magma o roca fundida hacia la superficie. También es generado por la expansión de fluidos volcánicos sometidos a grandes presiones.

.- *Eventos de Periodo Largo*: señales producidas por la influencia directa de los fluidos volcánicos dentro del volcán, los mismos que producen efectos de resonancia o inestabilidad del magma.

.- *Eventos Híbridos*: señales que se producen por la ocurrencia simultánea de sismos y eventos de periodo largo. Se originan en zonas o áreas sometidas a presión por los fluidos volcánicos que llevan a la ruptura.

.- *Eventos Explosivos*: señales que presentan las explosiones volcánicas que se producen durante la actividad eruptiva del volcán y/o liberación de vapor de agua o gases contenidos en las capas superficiales del volcán.

.- *Eventos Tremores*: señales propios de volcanes activos que muestran el registro continuo de vibraciones que pueden durar horas, días y semanas. En general, proporcionan información de todo el proceso eruptivo del volcán.

.- *Eventos Tornillo*: señales que frecuentemente preceden a las explosiones o emisiones de magma del cono volcánico. Eventos que resultan de la combinación de la excitación impulsiva y resonancia dentro del volcán por la dinámica de los fluidos en el sistema magma-gas o hidrotermal.

En la Fig. 2.7 se muestra un sismograma con 1 hora de registro para el día 14 de octubre correspondiente a la estación TIC, instalada cerca del cráter principal del volcán Ticsani (Fig. 2.1). En dicho sismograma se observa el registro de un gran número de eventos con diversos tamaños y contenidos de frecuencias. El análisis detallado de los registros, ha permitido considerar que todos corresponden a sismos de tipo tectónico debido a que se puede distinguir para cada sismo la llegada de las ondas P y S. En general, durante todo el periodo de monitoreo no se ha registrado eventos característicos de crisis volcánicas pre-eruptivas o eruptivas como las mostradas en la Fig. 2.6, lo cual lleva a considerar que no existió relación entre la sismicidad y una reactivación del volcán Ticsani. Sin embargo, la sismicidad registrada puede deberse a deformaciones corticales producto de la presión que ejerce el magma dentro de la cámara magmática, de ahí que el total de la sismicidad presenta sus epicentros sobre el volcán Ticsani. La presión generada y la deformación producida probablemente no habrían sido suficientes como para producir la erupción del volcán Ticsani.

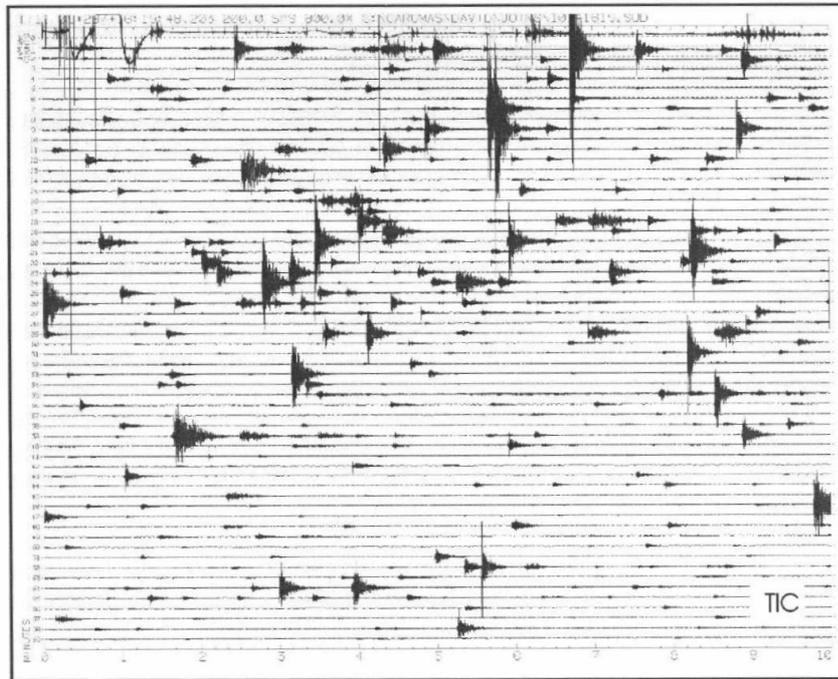


Fig. 2.7. Sismograma correspondiente a la estación TIC instalada en el cono del volcán Ticsani. El registro es para una (1) hora de registro del día 14 de octubre de 2005. Cada línea corresponde a un minuto de registro. Obsérvese el gran número de registros de eventos tectónicos. Compare con los registros de la Fig. 2.6.

2.8 Discusión y Conclusiones

El sismo del 1 de octubre de 2005 presentó una magnitud moderada (5.4 ML) y su epicentro fue localizado a 8 km al Este de la localidad de Calacoa en Moquegua. Los mayores daños y efectos producidos por el sismo se han concentrado en un área que considera a las localidades de Calacoa, Carumas, San Cristóbal, Cuchumbaya, Soquesane, Sijuaya, etc. y en donde se ha evaluado una intensidad máxima de V en la escala de Mercalli Modificada. Según la evaluación hecha con la escala de intensidades MSK, los mayores daños se produjeron en viviendas de tipo A (adobe, tapial, piedras, etc.), además muchas de ellas fueron previamente dañadas por el gran sismo ocurrido en la región sur de Perú en el año 2001.

Una vez ocurrido el sismo principal, fue seguido por un gran número de réplicas por un periodo de aproximadamente 30 días, tiempo durante el cual la continua sismicidad generó pánico en la población y que se incrementó ante la posibilidad de que la sismicidad estuviese asociada a una posible reactivación del volcán Ticsani. En informe preliminar, la UNSA (UNSA, 2005), indica que en la zona afectada, la sismicidad local se hizo presente desde el mes de mayo con la ocurrencia de un sismo de magnitud 3.9 que se repitió en los meses de junio (4.0ML) y julio (4.2ML), para luego producirse un incremento en la sismicidad durante el mes de agosto hasta la ocurrencia del sismo de magnitud 5.4ML el día 1 de octubre de 2005 (Fig. 2.8). Del mismo modo, en dicho informe se indica que durante los meses de agosto y septiembre, la

sismicidad local se producía al sur del volcán Ticsani alineada en dirección NS; mientras que, en el mes de octubre se habría desplazado al norte del volcán y de las localidades de Calacoa y Carumas; sin embargo, esta posible migración de sismicidad es necesario cuantificarla y analizarla con más detalle en razón que la UNSA ha localizado dichos sismos utilizando registros de una estación de 3 componentes ubicada a 120 km de distancia de la zona afectada. La relocalización de los sismos utilizando información de otras estaciones sísmicas de la región permitirá tener mejor idea de las posibles migraciones de sismicidad.

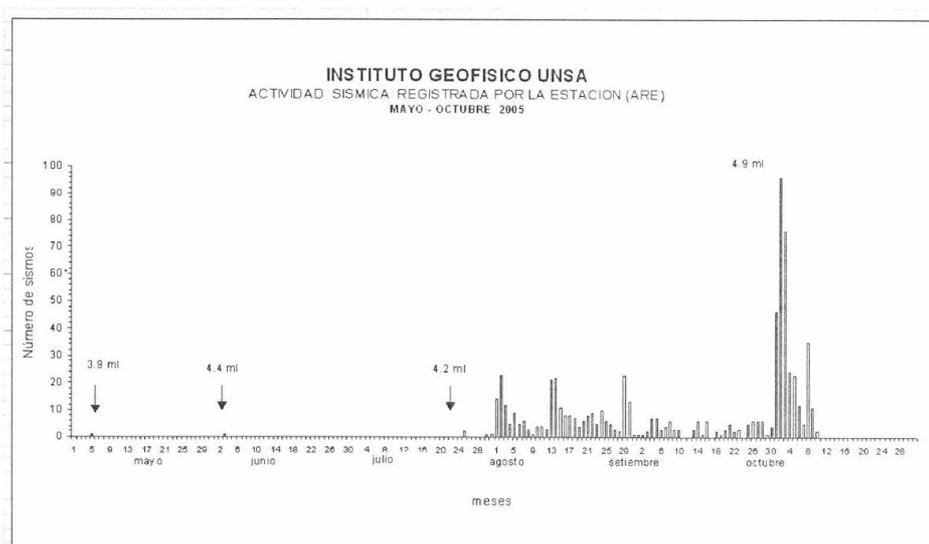


Fig. 2.8. Histograma de sismos ocurridos en el área del volcán Ticsani entre mayo y octubre de 2005. Se identifica la ocurrencia de 3 sismos de magnitud moderada y un enjambre de sismicidad previos al sismo del 1 de octubre de 2005 (5.4ML, IGP; 4.9 ML, UNSA).

La instalación de dos redes sísmicas locales en la zona afectada ha permitido registrar un gran número de réplicas entre los días 6 y 20 de Octubre. De estas réplicas, ha sido posible localizar un total de 269, todas con magnitudes menores a 3.0ML y de las cuales algunas fueron sentidas en las localidades de Carumas y Calacoa con intensidades de hasta III (MM) sin producir daños mayores en las viviendas, pero sí mucho pánico en la población.

La puesta en operatividad de una estación sísmica en el cono volcánico por un periodo de tiempo inicial de 5 horas (día 14 de Octubre) y durante 3 días después del 16 de octubre, ha permitido registrar un gran número de eventos, tal como se ha mostrado en la Fig. 2.7. El análisis detallado de los registros y de su contenido de frecuencias, ha permitido considerar que todos los sismos sugieren un origen tectónico. Durante el periodo de monitoreo no se ha registrado sismos con características típicas de eventos volcánicos como los mostrados en la Fig. 2.6.

De acuerdo los resultados obtenidos en este estudio, el sismo del 1 de octubre (5.4ML) y su serie de réplicas habrían sido producidos por procesos de deformación del tipo extensional con ejes de tensión (T) orientados en dirección ENE-OSO. Especialmente, las réplicas se ubican en mayor número en el extremo norte del volcán Ticsani, pero en conjunto muestran una

alineación de los sismos en dirección NO-SE (línea negra sobre la Fig. 2.4), sugiriendo la presencia de una estructura regional que estaría sometida a esfuerzos de tensión. De acuerdo a estos resultados es necesario plantear dos hipótesis:

1) La primera considera que en ambos extremos del volcán Ticsani existen dos estructuras geológicas regionales orientadas en dirección NO-SE, paralelas entre si y a la línea de costa, que producen un importante proceso de deformación por compresión en dirección NE-SO. Dentro de contexto, es posible que se desarrolle en su interior deformación por extensión, tal como se ha evidenciado con la serie de replicas del sismo del 1 de octubre y por tanto, este proceso podría haber sido la fuente de origen de la crisis sísmica de Calacoa (Carlotto, V., comunicación personal).

2) La segunda hipótesis considera que la sismicidad habría sido producida por el fisuramiento de rocas como resultado de la presión que podría haber ejercido el magma dentro de la cámara magmática del Ticsani. En estas condiciones, la ocurrencia del sismo del 1 de octubre y del mayor número de replicas en el extremo norte del volcán, se habrían producido por una posible intrusión del magma a causa de una mayor presión en dicho extremo. Sustentan esta hipótesis el hecho que el mayor numero de replicas se encuentran distribuidas sobre el volcán Ticsani, así como la ocurrencia de estas por un periodo de mas de 30 días (en sismos tectónicos, la frecuencia de replicas para un sismo de la misma magnitud, generalmente es de algunos días) y la posible migración de la sismicidad de SE a NO (L. Audin, comunicación personal).

En conclusión, de las dos hipótesis planteadas, la segunda puede ser aceptada y por lo tanto, se asume que la crisis sísmica de Calacoa (sismo principal y serie de replicas) del mes de octubre, habría tenido relación parcial con una eventual reactivación del volcán Ticsani. Sin embargo, la presión ejercida por el magma a niveles de profundidad de 4 a 12 km, que a la vez produjo deformación cortical, no fue suficiente para acelerar el desarrollo de una etapa pre-eruptiva del volcán Ticsani. A la fecha, la sismicidad local ha disminuido considerablemente lo cual indicaría que por el momento, no existe peligro de una crisis volcánica.

Por otro lado, debe considerarse que los volcanes, a diferencia de los sismos, pueden advertirnos si se encuentran en una etapa pre-eruptiva mediante el incremento en las emanaciones de fumarolas, ocurrencia de microsismos, cambios en la temperatura y composición de las aguas termales que brotan de sus alrededores, todo esto días hasta semanas antes de llegar a una erupción; por lo tanto, es necesario decidirse por una política de vigilancia continua de todos los volcanes presentes en la región sur de Perú.