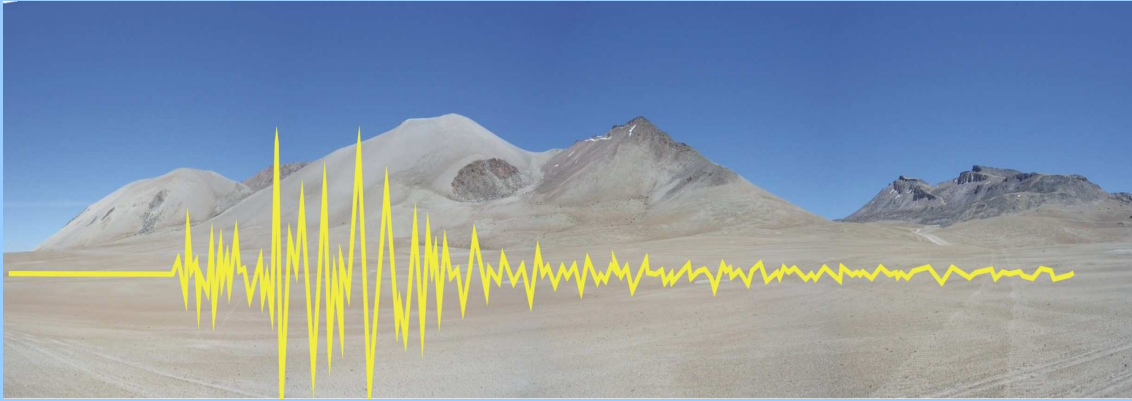




INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU



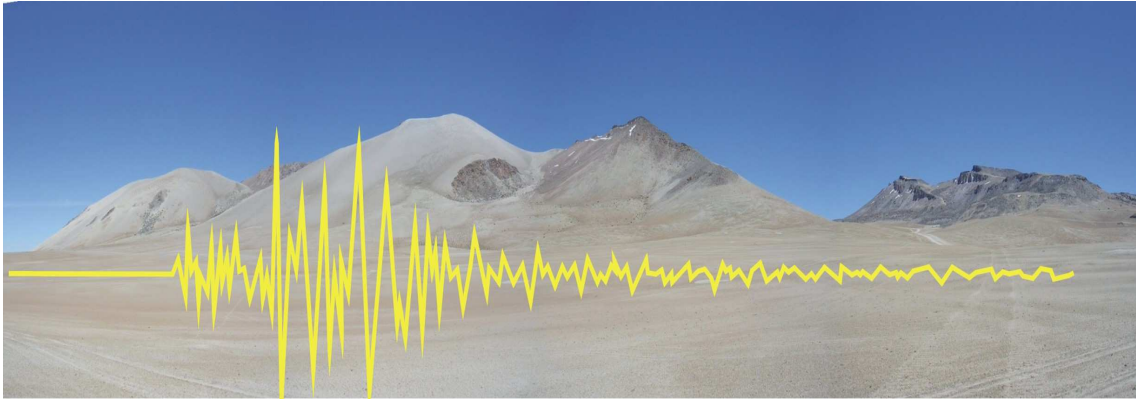
**CARACTERISTICAS SISMOTECTONICAS DE LA CRISIS SISMICA
DE OCTUBRE DEL 2005 EN LA REGION DEL VOLCAN TICSANI
(MOQUEGUA)**

Hernando Tavera

**Lima-Perú
Diciembre, 2006**



INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU



**CARACTERISTICAS SISMOTECTONICAS DE LA CRISIS SISMICA
DE OCTUBRE DEL 2005 EN LA REGION DEL VOLCAN TICSANI
(MOQUEGUA)**

Hernando Tavera

**Lima-Perú
Diciembre, 2006**

Personal Participante

CNDG-Sismología:

Efrain Fernandez

Yolanda Zamudio

Simeón Rodriguez

Rocio Parillo

Henry Salas

Ivonne Perez-Pacheco

Consuelo Agüero

Redes Geofísicas:

David Portugal

Gudner Pinedo

Edmundo Vila

RESUMEN

El día 1 de octubre del 2005, en la región del volcán Ticsani (Moquegua) se inicia una crisis sísmica con la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada (5.3ML) que fue seguido por un gran número de replicas de diversas magnitudes. En dicha región, el Instituto Geofísico del Perú instala por un periodo de 10 días una red sísmica de cuatro estaciones de banda ancha alrededor del volcán. Las formas de onda del total de registros obtenidos indican la ocurrencia de eventos tectónicos debido a la presencia en ellos, de fases impulsivas P y S. El estudio del sismo principal y el análisis de la distribución espacial de 128 replicas sobre el volcán Ticsani, han permitido considerar su origen en deformaciones corticales muy locales. Los mecanismos focales simples y compuestos elaborados para el sismo principal y serie de replicas definen el desarrollo de deformaciones por extensión asociados a una falla con planos orientados en dirección NO-SE y ejes de tensión (T) en dirección NE-SO, siendo coherente con la traza de la falla Ticsani. Estos resultados correlacionados con datos obtenidos por otros autores a partir de observaciones de campo, análisis de imágenes satelitales y estudios de interferometría, permiten concluir que la crisis sísmica en la región del volcán Ticsani tuvo su origen en la reactivación de la falla Ticsani y no en la posible deformación de la estructura del volcán Ticsani previa a una erupción.

INDICE

- 1.- INTRODUCCION
 - 2.- EL VOLCAN TICSANI Y LA TECTONICA LOCAL
 - 3.- CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD REGIONAL Y LOCAL
 - 4.- EL SISMO DEL 1 DE OCTUBRE DE 2005
 - 4.1.- Parámetros Hipocentrales
 - 4.2.- Intensidades
 - 4.2.1.- Intensidades Regionales
 - 4.2.2.- Intensidades Locales
 - 4.3.- Orientación de la Fuente Sísmica
 - 4.4.- Parámetros de la Fuente
 - 5.- EVALUACION DE LA INFORMACION SISMICA
 - 5.1.- La Red Sísmica Local
 - 5.2.- Tipos de Eventos Sísmicos Registrados
 - 6.- ANALISIS Y EVALUACION DE LAS REPLICAS
 - 6.1.- Cálculo de los Parámetros Hipocentrales
 - 6.2.- Distribución espacial de la Replicas
 - 6.3.- Orientación de la Fuente Sísmica - Replicas
 - 7.- INTERPRETACION SISMOTECTONICA
 - 8.- CONCLUSIONES
- AGRADECIMIENTOS
- BIBLIOGRAFIA
- ANEXOS
- A1: Escala de Intensidades Mercalli Modificada
 - A2: Escala de Intensidades MSK
 - A3: Registros de Eventos Volcánicos

1.- INTRODUCCION

La importante actividad sísmica presente en el Perú es debida al proceso de subducción 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, 1990; Norabuena et al, 1999). Este proceso es responsable de la ocurrencia continua de sismos de diversa magnitud, todos con epicentros ubicados frente a la línea de costa y asociados al contacto sismogénico interplaca (Tavera y Buforn, 2001; Bernal y Tavera 2002). Estos sismos son muy frecuentes en el tiempo y en un año es posible registrar la ocurrencia de hasta un centenar de 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 en la escala de Mercalli Modificada (MM). Los sismos de mayor magnitud ($M_w > 7.0$) han producido en el pasado importantes superficies de ruptura con longitudes de hasta 500 km (Dorbath et al, 1990) y recientemente en la región sur, el sismo ocurrido el 23 de Junio de 2001 ($M_w = 8.2$) con una longitud de ruptura de 370 km (Tavera et al, 2006). Este último 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 (MM) entre las localidades de Chala y Arica en Chile.

Para el sismo del 2001, los diversos estudios realizados en el Instituto Geofísico del Perú y compilados en un Volumen Especial (CNDG, 2002), sugieren que dicho sismo desarrollo un proceso complejo de ruptura que se propagó en dirección SE a lo largo de 370km desde su epicentro ubicado cerca de la localidad de Ocoña. Como parte de dicho proceso, la energía sísmica liberada por

el sismo se habría acumulado en toda la región sur de Perú y norte de Chile, y a la fecha se han venido produciendo de manera aleatoria sismos de magnitud moderada seguidos o no por enjambres de sismicidad que han tenido duraciones de horas o días dependiendo del tamaño del sismo y de la región afectada, tal es el caso de la crisis sísmica que se produjo en la región del volcán Ticsani (Departamento de Moquegua) durante el mes de octubre de 2005.

En la región del volcán Ticsani, el día 1 de octubre de 2005 ocurre un sismo de magnitud 5.3 ML que afectó un área relativamente pequeña que abarca a las localidades de Calacoa, Cuchumabaya y Carumas, todas distribuidas alrededor del volcán. En general, el sismo y su serie de replicas produjeron daños en un gran número de viviendas de adobe de estas localidades y de otras como San Cristóbal, Solajo y Soquezane, además de causar 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 reactivación eruptiva del volcán Ticsani, hecho que no ocurrió así y por el contrario con el pasar de los días, la sismicidad disminuyó considerablemente.

En el presente informe se describe las características principales del sismo ocurrido el 1 de octubre y de una serie de 128 replicas registradas por una red sísmica temporal compuesta de cuatro estaciones de banda ancha instaladas alrededor del volcán Ticsani. Los resultados obtenidos en este estudio, sumado a los propuestos por otros autores, permitirán realizar la interpretación sismotectónica y proponer una hipótesis que explique todo el proceso de deformación que se desarrollo en la región del volcán Ticsani durante el mes de octubre de 2005.

2.- EL VOLCAN TICSANI Y LA TECTONICA LOCAL

El volcán Ticsani forma parte de una serie de aproximadamente 21 volcanes catalogados como activos y se encuentra ubicado en la Zona Volcánica Central (ZVC) de América del Sur en las coordenadas 16.73°S y 70.60°O con una altura de 5,408 msnm (Figura 1). El volcán Ticsani se encuentra dentro del área que durante un periodo de 30 días a partir del 1 de octubre de 2005, fue afectada por una crisis sísmica que se inicia con la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada (5.3ML) que produjo daños parciales en las localidades circundantes a dicho volcán. Esta área se encuentra en el extremo SE de la cuenca del río Tambo, provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua (Figura 2) y circunscribe principalmente a las localidades de Calacoa, Carumas y Soquezane.

En general, se considera que el volcán Ticsani esta constituido por un complejo de domos en cuyo substrato existirían lavas andesíticas a dacíticas intercaladas con material sedimentario depositados durante el Cretáceo (volcanico Matalaque y grupo Toquepala), sedimentos clásticos continentales del Paleógeno (formación Pichu) e ignimbritas riolíticas del Mioceno (formación Huayllas) (García y Guevara, 1998). Según Mariño (2002), las estructuras volcánicas presentes son: un anfiteatro a manera de herradura en el llamado edificio "Ticsani Antiguo" y la presencia de cuatro domos mas tres cráteres en el edificio "Ticsani Moderno" (Figura 3).

La historia evolutiva del volcán Ticsani ha sido muy compleja y considera el desarrollo de fases de actividad e inactividad desde el Pleistoceno, además la

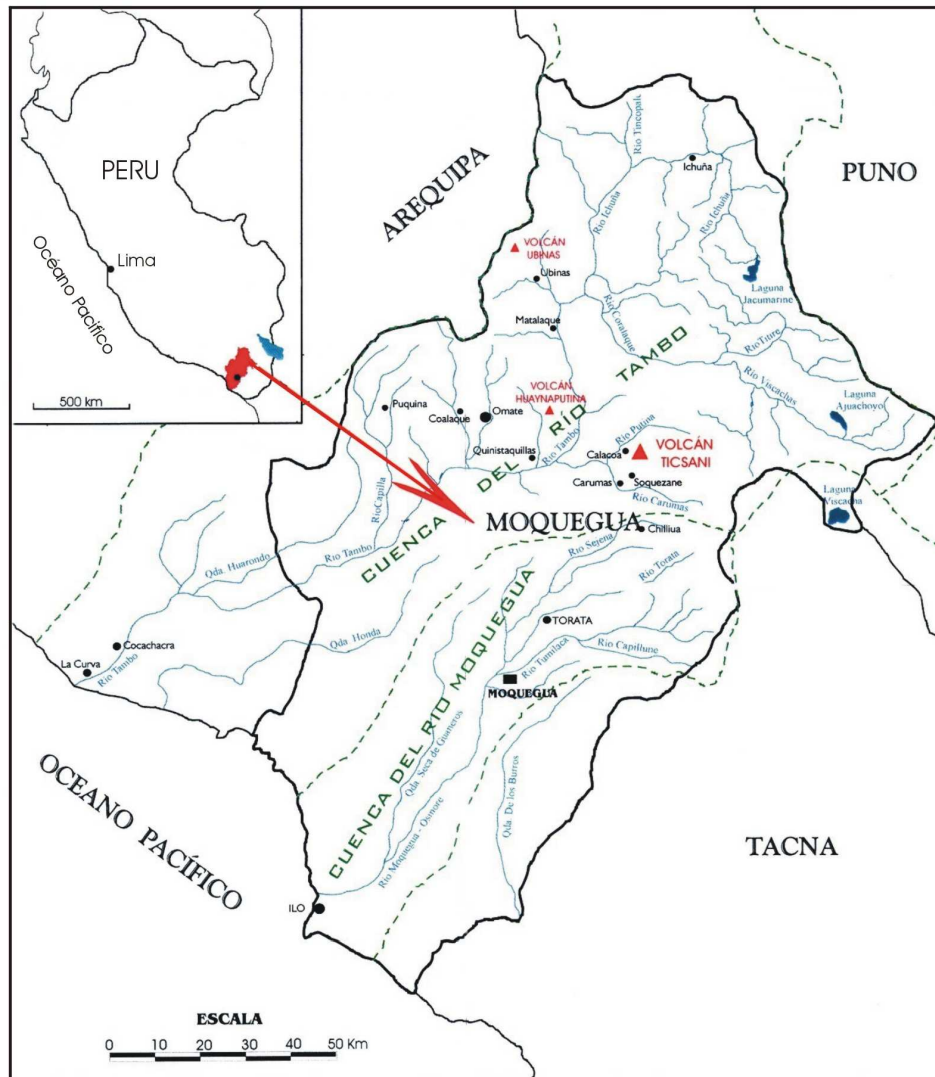


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Departamento de Moquegua (Región Sur de Perú). El triángulo representa al volcán Ticsani rodeado de las localidades de Calacoa, Carumas y Soquezane.

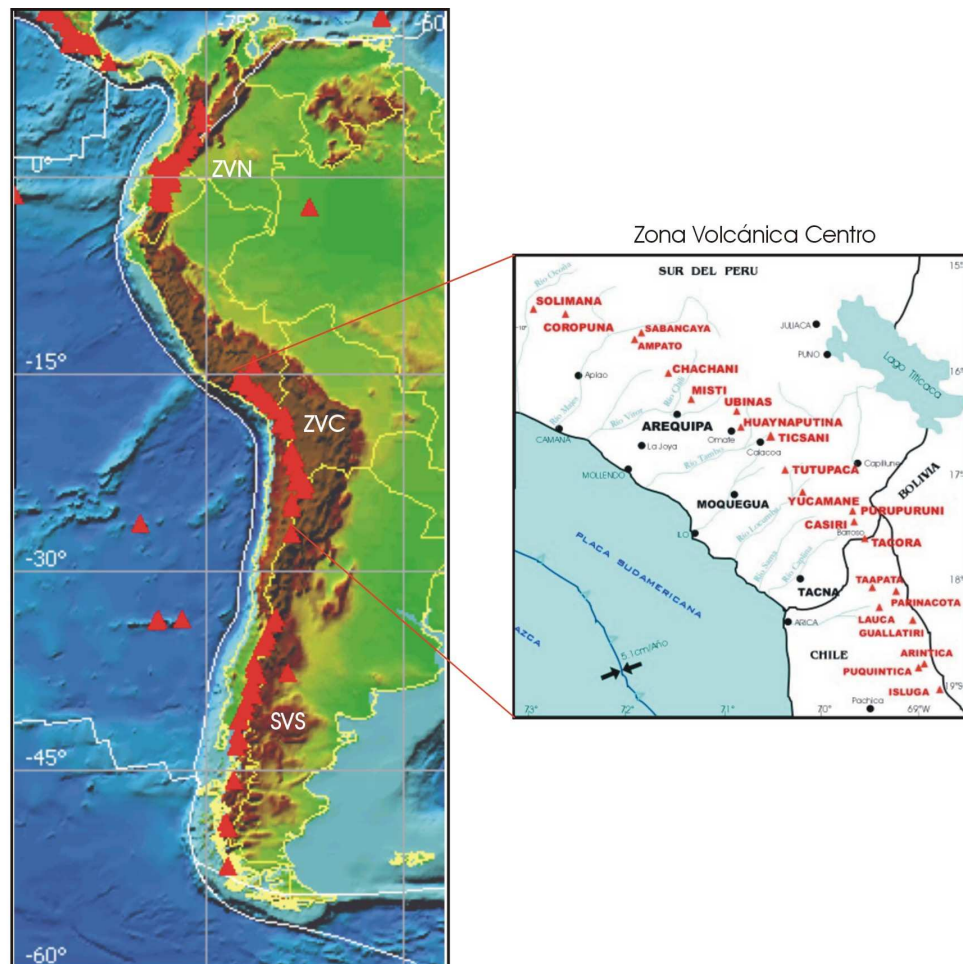


Figura 2- Distribución de las principales cadenas volcánicas en Sudamérica (ZVN= Zona Volcánica Norte; ZVC= Zona Volcánica Centro, ZVS = Zona Volcánica Sur). Distribución de los principales volcanes en la región Sur de Perú y Norte de Chile (modificado de Francis y Silva, 1989).

presencia de las estructuras antes indicadas, sugieren que los centros de emisión han migrado con el tiempo y presentan hoy en día, un edificio volcánico complejo y poligénico. Durante el periodo "Ticsani Antiguo" se habrían producido los depósitos de flujos de lavas y rocas volcanoclásticas e ignimbritas que llegaron a ocupar un área de aproximadamente 65 km^2 , además de la presencia de depósitos de avalanchas de escombros sobre los paleo-valles de los ríos Putina, Carumas y Tambo. En el periodo "Ticsani Moderno" se habría producido la emisión de lavas en bloques, cúmulos y coladas de domos, además de flujos piroclásticos y cenizas; por lo tanto, es posible que en los últimos 11,000 años el volcán Ticsani haya tenido hasta tres erupciones explosivas (freatomagmáticas y subpliniana) y durante ellas, se habría eyectado entre 0.015 hasta 0.4 km^3 de ceniza y pómez con índice de explosividad volcánica de 2 a 4 (Mariño, 2002). Las áreas en donde actualmente se encuentran las localidades de Calacoa, Cuchumbaya, Quebaya y Soquezane habrían sido cubiertas por tetras de 0.1 a 0.4 metros de espesor; por lo que, de producirse una erupción existiría el peligro de tener la presencia de flujos y oleadas piroclásticas, así como deslizamientos, flujos de lodo y escombros; sin embargo, en la actualidad se considera que el volcán Ticsani presenta una actividad fumarólica muy restringida (Mariño, 2002).

Según la Figura 3, la región en donde se ubican los volcanes Ticsani y Huaynaputina, la presencia de fallas y lineamientos es muy numerosa, siendo posible distinguir la presencia de hasta dos sistemas regionales. Un primer sistema sigue la orientación andina NO-SE, NNO-SSE, ONO-ESE y el segundo, la dirección NNE-SSO y NE-SO afectando rocas del Oligoceno y Mioceno. Localmente, en la región se observa la presencia de fallas activas o recientes con orientación en dirección NE-SO. Según Mariño (2002), los emplazamientos de materiales volcánicos en el área estarían relacionados con fracturas

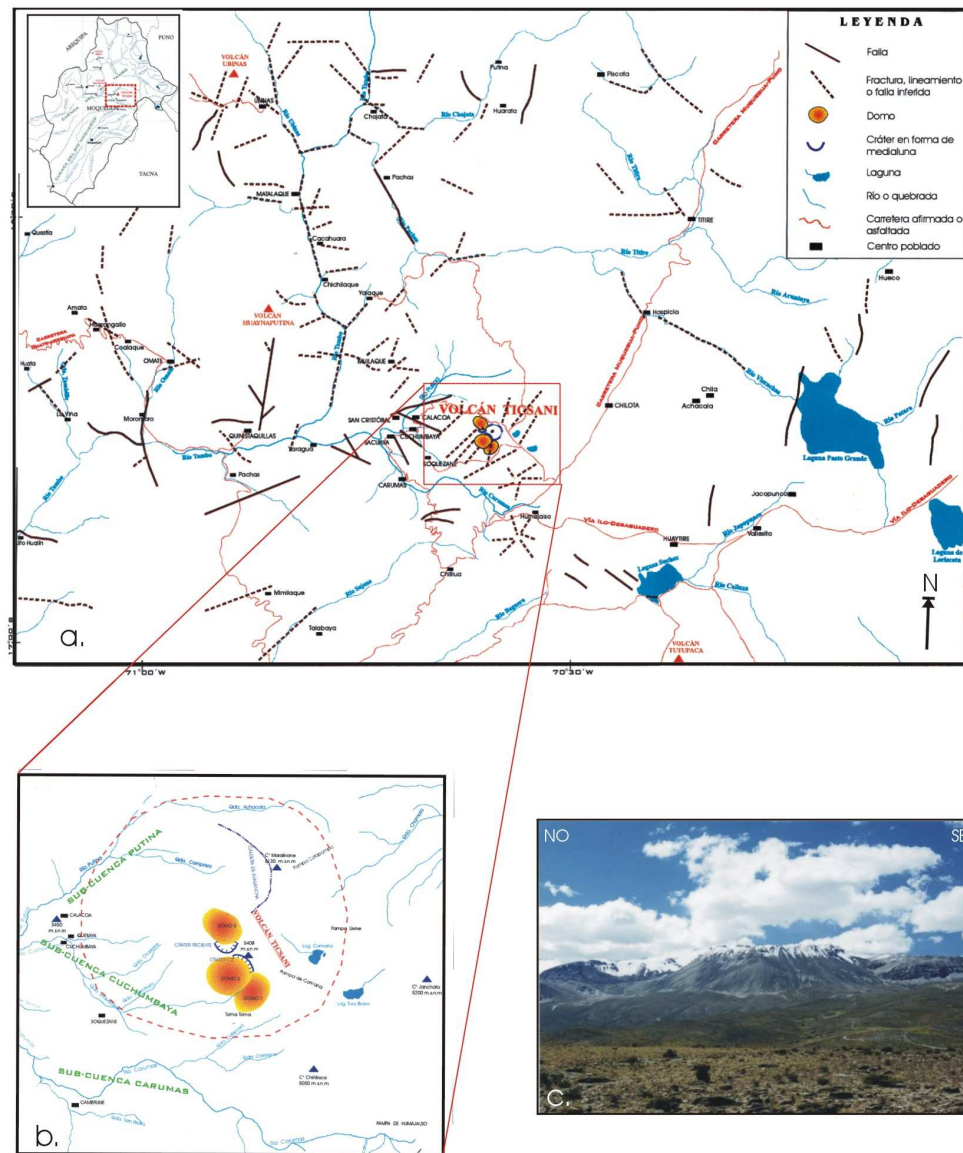


Figura 3. a). Principales rasgos tectónicos presentes en la región del volcán Ticsani. B).Ubicación de los conos del volcán Ticsani y c).Imagen del volcán Ticsani tomada en dirección NO-SE (modificado Mariño, 2002).

profundas que tendrían una orientación ONO-ESE, siendo algunas identificadas en las inmediaciones de las localidades de Calacoa y San Cristóbal.

3.- CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD REGIONAL Y LOCAL

En la Figura 4a se presenta un mapa con la sismicidad característica de la región sur del Perú y que considera sismos superficiales ($h < 60$ km) e intermedios ($61 < h < 300$ km) ocurridos durante el periodo comprendido entre el mes de enero del 2000 y setiembre del 2005, todos con magnitudes iguales o mayores a 4ML. Según la figura, el mayor número de sismos presentes en la región tendrían su origen en el proceso de subducción (círculos distribuidos frente a la línea de costa), seguida por los sismos de foco intermedio asociados a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera (cuadrados) y los sismos con origen en los grandes sistemas de fallas geológicamente reconocidas como activas (círculos distribuidos en continente). En la Figura 4b, se observa que durante los meses de octubre y noviembre del año 2005 el número de sismos con foco superficial se incrementa en la región del volcán Ticsani debido a la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada (5.3ML) y de su serie de réplicas. Este incremento de la sismicidad muestra que una región en donde existe estructuras jóvenes como es la Cordillera de los Andes, esta propensa a deformarse y producir sismos en cualquier momento. En los últimos 20 años, el único sismo de magnitud moderada (4.0ML) que afectó a la región del volcán Ticsani ocurrió el 6 de Mayo de 1999, teniendo su epicentro sobre la traza de la falla Calacoa (al NO del volcán Ticsani) y foco a escasos 6 km de profundidad (Aguilar et al, 2001). Este sismo produjo intensidades máximas de IV-V (MM) en las localidades de Calacoa y Carumas, siendo las viviendas de adobe y quincha las más dañadas.

Los estudios estadísticos de la sismicidad netamente local; es decir, aquella que ocurre en la región del volcán Ticsani, indican que ella no es muy

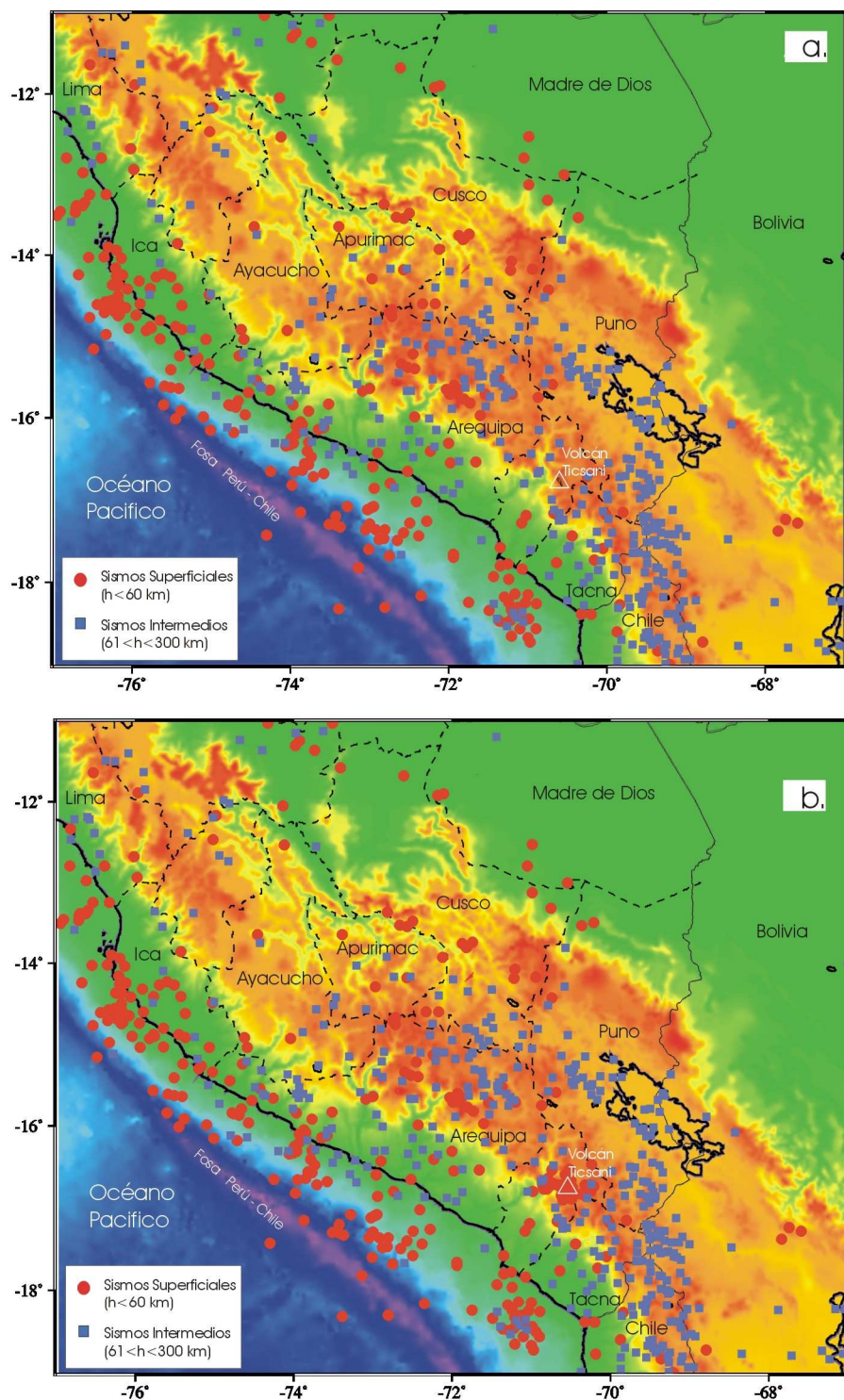


Figura 4. a). Actividad sísmica en la región sur del Perú ocurrida entre los meses de enero - 2000 y setiembre - 2005 ($M_L > 4.0$).

b). Actividad sísmica en la región sur del Perú ocurrida entre los meses de enero - 2000 y diciembre - 2005 ($M_L > 4.0$). En la región de estudio, el 1 de octubre de 2005 ocurre un sismo de magnitud 5.3 M_L seguido por un importante número de replicas.

numerosa a pesar de que existe un importante número de fallas que probablemente produzcan microsismicidad incapaz de ser registrada por las estaciones de la Red Sísmica Nacional (RSN) por encontrarse alejadas, tal es el caso de la estación Toquepala (TOQ) ubicada a 60 km de distancia en dirección sur. Sin embargo, durante los meses de julio a setiembre de 2005 se produjo en la región del volcán Ticsani un importante número de sismos que fueron sentidos únicamente por los pobladores de las localidades de Humajalso, Chillua y Huaytire, todas ubicadas a 35 km del volcán en dirección sur. De estos sismos, los de mayor magnitud se muestran en la Figura 5a y ellos presentan sus epicentros cercanos a las localidades antes indicadas. Esta inusual microsismicidad cesó hacia finales del mes de Setiembre y los pocos sismos que ocurrían fueron localizados en el extremo norte del volcán Ticsani hasta producirse un sismo de magnitud mayor el 1 de Octubre (5.3ML) que fue acompañado de un gran número de réplicas que se prolongaron hasta por un periodo de 30 días (Figura 5b), todos con epicentros próximos a la estructura volcánica del Ticsani. Esta aparente variación espacio-tiempo de la sismicidad local sugiere que se habría producido, de sur a norte, una migración de los sismos a lo largo del mismo sistema de fallas cubriendo una distancia de aproximadamente 35 km. Esta apreciación es válida debido a que toda la región del volcán Ticsani se caracteriza por la presencia de un gran número de trazas de fallas y lineamientos de diversas longitudes que pudieron ingresar en una etapa de reactivación local.

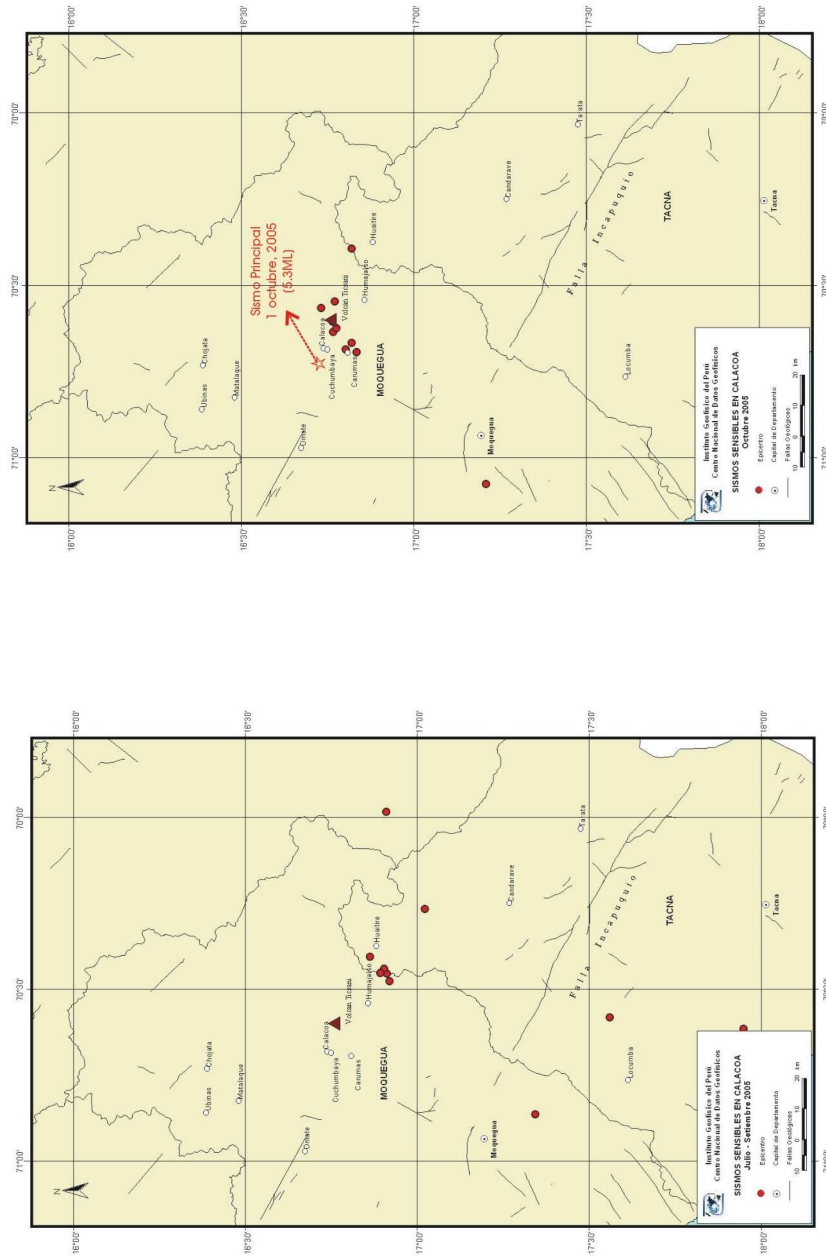


Figura 5. Actividad sísmica sensible en la región del volcán Ticsani antes (julio a setiembre) y después del 1 de octubre de 2005, fecha en que ocurre un sismo de magnitud moderada, 5.3ML.

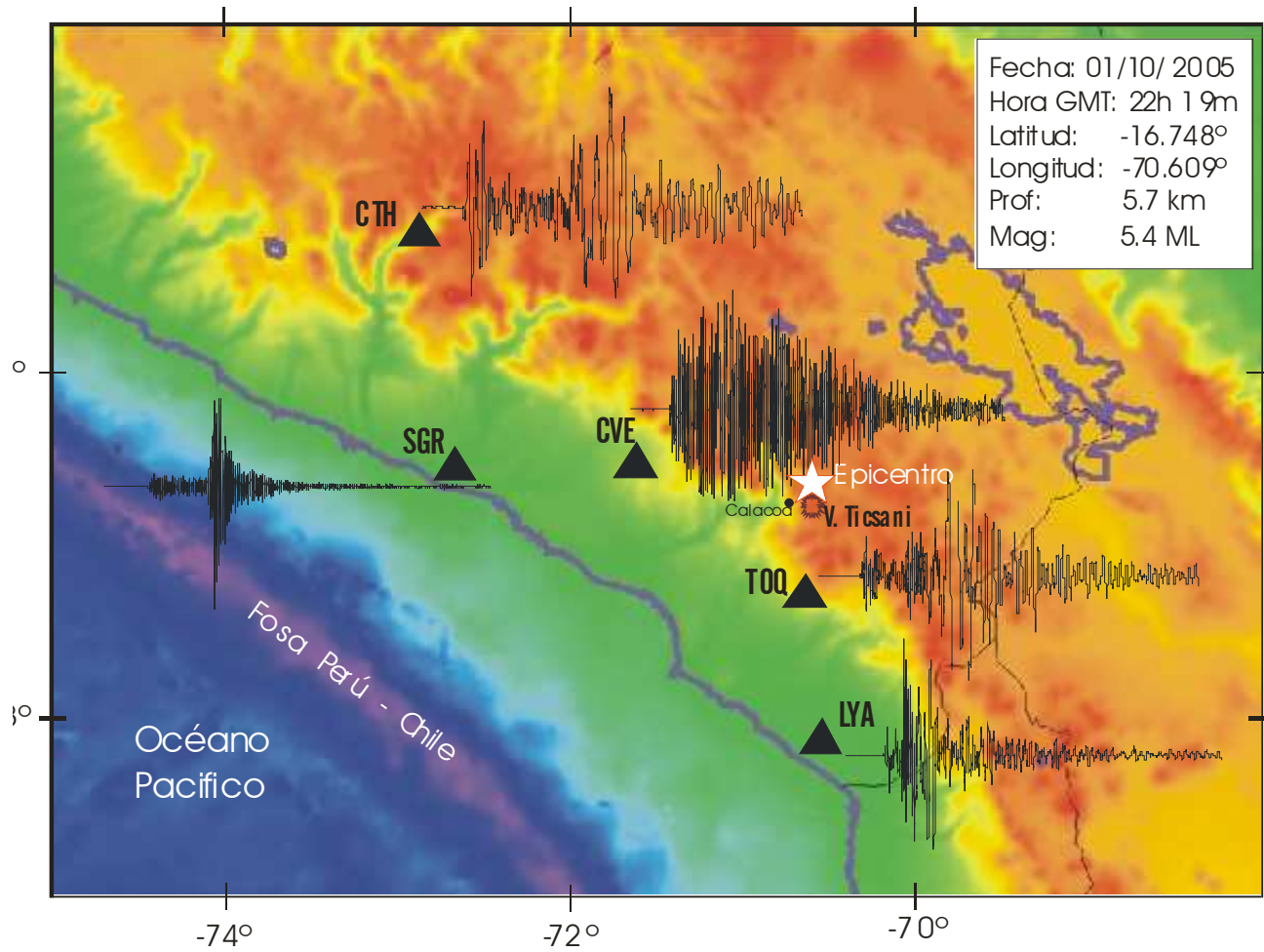
4. - EL SISMO DEL 1 DE OCTUBRE DE 2005

4.1- Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales del sismo del 1 de octubre de 2005 fueron obtenidos utilizando información de cinco estaciones sísmicas pertenecientes a la Red Sísmica Nacional (RSN), todas distribuidas en la región sur de Perú (Figura 6):

Tiempo Origen:	22h 19m 46.9 seg. (Hora Universal, GMT) 17h 19m 46.9 seg. (Hora Local)
Latitud Sur:	-16.748°
Longitud Oeste:	-70.609°
Profundidad:	5.7 km
Magnitud:	5.3 ML

Según la Figura 6, el epicentro del sismo se ubica a 8 km en dirección Este de la localidad de Calacoa y sobre el extremo norte del volcán Ticsani. La profundidad del sismo ha sido estimada en 5.7 km, lo cual sugiere un proceso de deformación netamente superficial que por su magnitud y cercanía al volcán, habría dado la impresión de que dicho volcán estaría en proceso de reactivación. Después del sismo, se produjo un número importante de replicas llegándose a contabilizar para los primeros 15 días aproximadamente 268 registradas en la estación de Toquepala (TOQ) la mas cercana a la zona epicentral (60 km) (Figura 7) y de 180 registradas por la estación de Arequipa (ARE) ubicada a 120 km del área epicentral (Aguilar, V., comunicación personal). De estas replicas, 7 fueron sentidas en las localidades de Calacoa y Carumas con intensidades



5. Distribución de las estaciones de la región sur que integran la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto físico del Perú y ejemplos de registros sísmicos utilizados para el cálculo de los parámetros hipocentrales sismo ocurrido el 1 de octubre de 2005 (estrella).

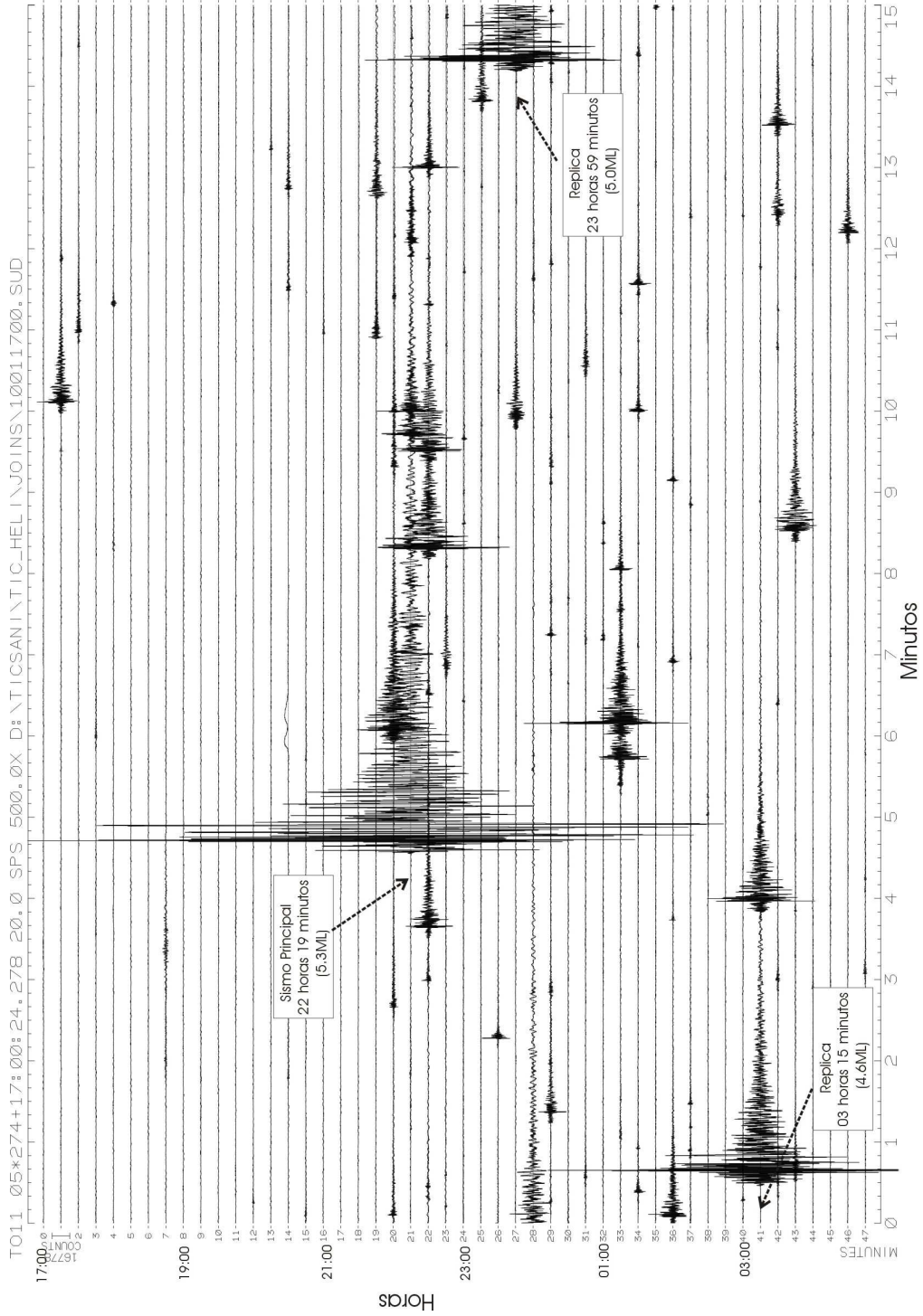


Figura 7. Sismograma de la estación sísmica Toquepala (TOQ) correspondiente a los días 1 y 2 de octubre de 2005. Observese

máximas de IV (escala Mercalli Modificada, MM), produciendo daños moderados en las viviendas y pánico en la población de ambas localidades (Tabla 1).

Los parámetros hipocentrales reportados por el National Earthquake Information Center (NEIC) y la Universidad de Harvard (HRV) para el sismo principal (Tabla 1 y Figura 8), permiten ubicar al epicentro a 21 y 17 km en dirección NO y SE del volcán Ticsani y del área en donde el sismo causó mayor daño. Del mismo modo, la profundidad para el foco reportado por ambas agencias resulta alto en razón que la deformación local en el área parece ser muy superficial, además se debe considerar que los daños estuvieron centrados en un área relativamente pequeña, siendo esto característico de sismos con focos cercanos a la superficie. Considerando que para calcular los parámetros hipocentrales de sismos de magnitud moderada y foco superficial se requiere de información proveniente de redes locales, los obtenidos por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) para el sismo del 1 de octubre del 2005 describen mejor los procesos de deformación y daños producidos por dicho sismo.

Tabla 1

Parámetros hipocentrales del sismo del 1 de octubre de 2005 y de sus réplicas mayores ocurridas durante un periodo de 15 días.

<i>Fecha</i> <i>dd/mm/aaaa</i>	<i>Tiempo GMT</i> <i>hh:mm:ss.ss</i>	<i>Latitud</i> <i>(°)</i>	<i>Longitud</i> <i>(°)</i>	<i>Prof.</i> <i>(km)</i>	<i>Magnitud</i> <i>ML</i>	<i>Fuente</i>
01/10/2005**	22:19:46.90	-16.74	-70.61	5.7	5.3	IGP
	22:19:51.31	-16.64	-70.79	20.0	5.4	NEIC
	22:19:51.80	-16.86	-70.70	12.0	5.1	HRV
01/10/2005	23:59:25.80	-16.81	-70.66	12.0	5.0	
02/10/2005	03:15:42.39	-16.77	-70.54	9.0	4.6	
05/10/2005	01:24:16.35	-16.76	-70.63	11.0	4.4	
12/10/2005	22:43:03.42	-16.77	-70.62	9.0	4.4	
13/10/2005	23:24:49.62	-16.73	-70.56	10.0	3.6	
14/10/2005	01:44:13.27	-16.83	-70.69	10.0	4.0	
14/10/2005	03:34:29.68	-16.76	-70.60	8.0	4.5	

** Sismo principal; NEIC y HRV, parámetros hipocentrales reportados por agencias internacionales.

4.2. - Intensidades

4.2.1. - Intensidades Regionales

Inmediatamente después de ocurrido el sismo del 1 de octubre de 2005 (5.3ML), se procedió a realizar la evaluación de los daños y efectos causados por el sismo mediante encuestas vía línea telefónica a dos o tres personas de cada localidad ubicada en los alrededores del volcán Ticsani. La información obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (MM), ver Anexo 1. Según la Figura 8, el área de daños ocasionados por el sismo es pequeña al igual que su radio de percepción para una intensidad de IV (MM) (aproximadamente 50 km), siendo esta característica típica de los sismos con magnitud moderada y con hipocentros cercanos a la superficie. La descripción más resaltante de los daños y efectos evaluados se describe a continuación:

Localidades de Carumas, Solajo, Sijuaya, Quinastaquillas, Soquezane y Calacoa: El sismo produjo daños importantes en las viviendas de adobe más no, en las construidas con material noble. El sismo causó pánico 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 por la población.

Ciudades de Arequipa y Tacna: Fue sentido levemente por personas que se encontraban en reposo sin producir daños.

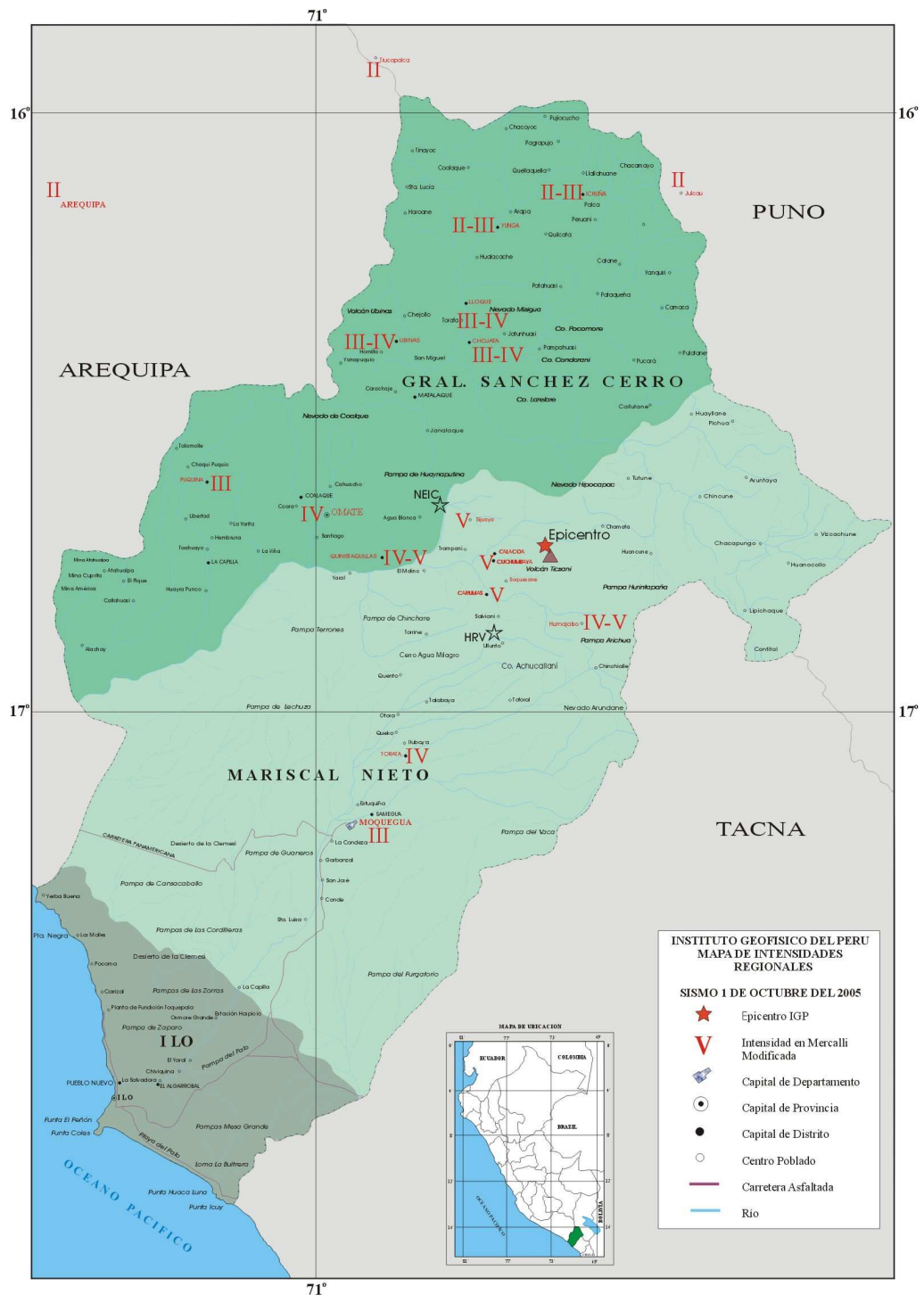


Figura 8. Ubicación epicentral del sismo del 1 de octubre de 2005 (5.4ML) y valores de intensidad regional en la escala de Mercalli Modificada. Las estrellas en negro indican los epicentros del sismo reportados por el NEIC y HRV (ver texto).

4.2.2. - Intensidades Locales

A fin de realizar la evaluación in situ de los efectos y daños producidos por el sismo en viviendas y construcciones en general, el Instituto Geofísico del Perú envió una misión de campo por cinco días para visitar las localidades de Carumas, Cambrune, Cuchumbaya, Secuaya, Quebaya, Calacoa, Bellavista, Ichupampa y Quinistaquillas. La evaluación se realizó mediante encuestas usando dos formatos: "Formato de Encuesta de Intensidades" y "Efectos en Construcciones", ambos ampliamente utilizados por el IGP desde el año 1996 (Ocola, 1996). La información recopilada fue interpretada por Zamudio y Parillo (2005) haciendo uso de la escala de intensidades MSK-64 modificada para su uso en el Perú por Ocola (1979). Esta escala, a diferencia de la MM, permite considerar las características de las viviendas, el material de construcción utilizado, su antigüedad y tipo de daño (Anexo 2). En general, el trabajo de recolección de información no ha sido uniforme en razón que en muchos de los poblados sus habitantes prácticamente permanecían todo el día dedicados a sus tareas agrícolas, no disponiendo de personas a quienes encuestar. Las localidades con mayor número de entrevistas fueron Carumas y Calacoa; y por lo tanto, para ellas fue posible elaborar los mapas de intensidades locales. Según la Figura 9, en la localidad de Calacoa las intensidades máximas fueron de 6 MSK y en la de Carumas de 5 MSK, presentándose los mayores daños en viviendas de tipo A mal preservadas (construcciones de adobe, tapial, bloques de piedra, etc.) y con más de 20 años de antigüedad. Además, se debe considerar que muchas de estas viviendas fueron previamente dañadas por el último gran sismo que afectó toda esta región el 23 de Junio de 2001 (8.2Mw). En la Figura 10 se presenta algunas imágenes de los daños que soportaron diferentes viviendas de las localidades Calacoa, Cambrune, Carumas, Cuchumbaya, Ichupampa y Bellavista, todas afectadas por el sismo del 1 de octubre de 2005.

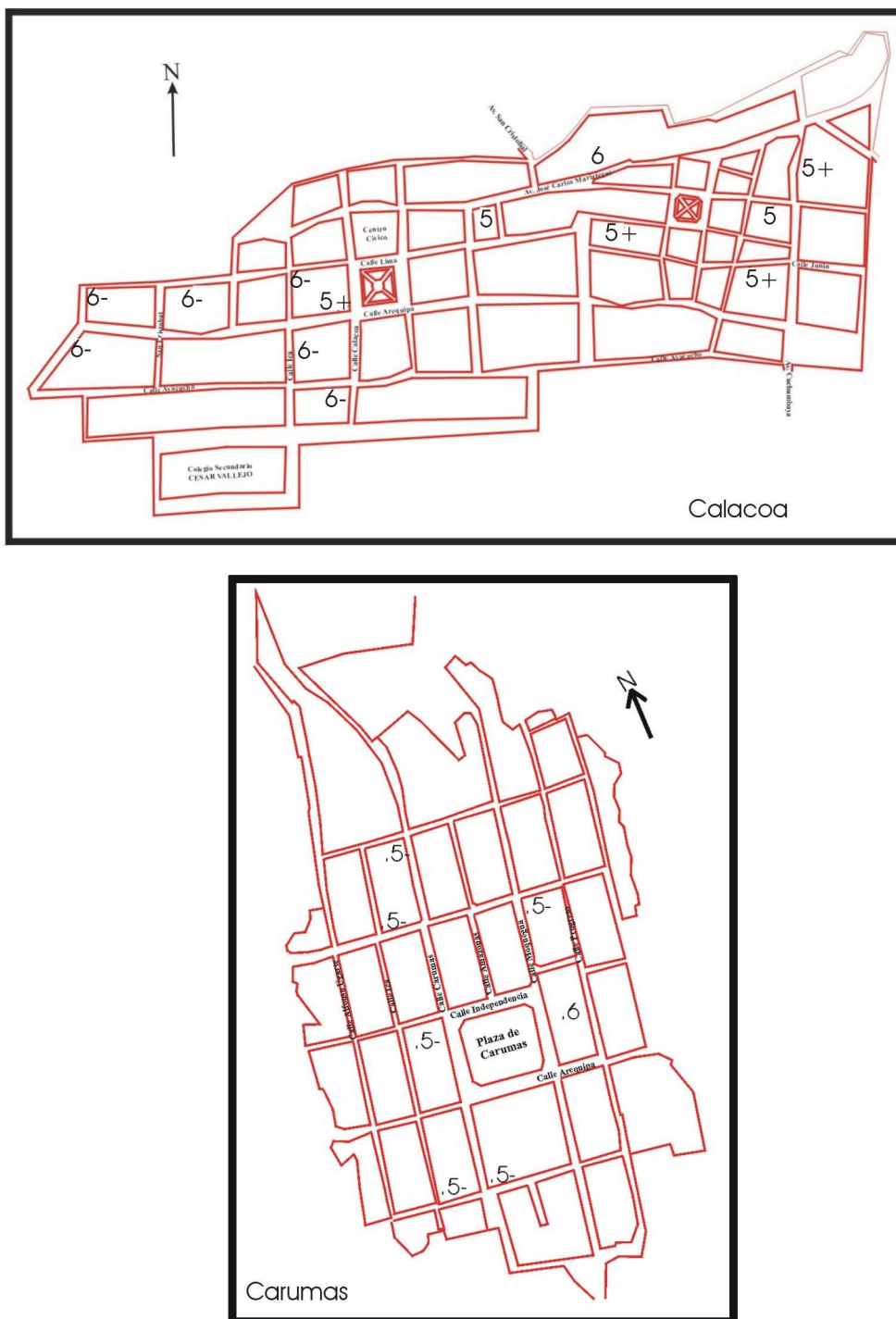


Figura 9. Valores de intensidades locales en la escala MSK para las localidades de Calacoa y Carumas (Zamudio y Parillo, 2006).



Figura 10. Imágenes que muestran los daños ocasionados por el sismo del 1 de octubre en la localidad de Calacoa. Observese que el material de las viviendas es de adobe y quincha con techos de madera y calaminas. La foto inferior muestra la ubicación de las carpas de emergencia utilizadas por la población.



Figura 10. Continuación...../

Imágenes que muestran los daños ocasionados por el sismo del 1 de octubre en la localidad de Cambrune. Observese que las viviendas son de material diverso (adobe, quincha, ladrillo y cemento) y que han respondido de diferente forma ante el sismo.



Carumas



Cuchumbaya



Ichupampa



Bellavista

Figura 10. Continuación...///

Imágenes que muestran los daños ocasionados por el sismo del 1 de octubre en las localidades de Carumas, Cuchumbaya, Ichupampa y Bellavista. Obsérvese que el material de las viviendas es diverso presentando mayor nivel de daños las de adobe y quincha.

4.3. - Orientación de la Fuente Sísmica

Para conocer la orientación de la fuente se procede a elaborar el mecanismo focal a partir de la información correspondiente a los primeros impulsos de la onda P identificado en un determinado número de registros para un sismo en particular. Tal como se muestra en la Figura 11, cada solución para el mecanismo focal tiene su respectiva equivalencia con un tipo de falla geológica; por lo tanto, es posible identificar el proceso de deformación que produjo el sismo a partir de esta información.

Para elaborar el mecanismo focal que corresponde al sismo del 1 de octubre se ha utilizado 11 registros provenientes de las estaciones sísmicas que integran la red sísmica nacional, todas ubicadas en el extremo Oeste del epicentro y de las cuales, únicamente la de CTH indica dilatación (Figura 1), siendo este dato el que ha permitido ajustar correctamente uno de los planos nodales del mecanismo focal. La solución obtenida se presenta en la Figura 11 y corresponde a un mecanismo equivalente a una falla de tipo normal con planos orientados en dirección NO-SE y ángulos de buzamiento de 31° y 60° en dirección NE y SO. Según la Figura 11, la solución para la fuente reportada por la Universidad de Harvard - HRV (Método del CMT) es similar a la obtenida en este estudio.

Después del sismo principal, durante un periodo de 15 días se contabilizó la ocurrencia de hasta siete réplicas con magnitudes entre 3.6 y 5.0 ML que produjeron intensidades del orden de III a IV en la escala de Mercalli Modificada en casi todas las localidades distribuidas alrededor del volcán (ver Tabla 1). De estas réplicas, las ocurridas los días 1 (23h 59m) y 2 (03h 15m) de Octubre fueron registradas por un buen número de estaciones de la red sísmica nacional; por lo tanto, su información fue utilizada para estimar la orientación

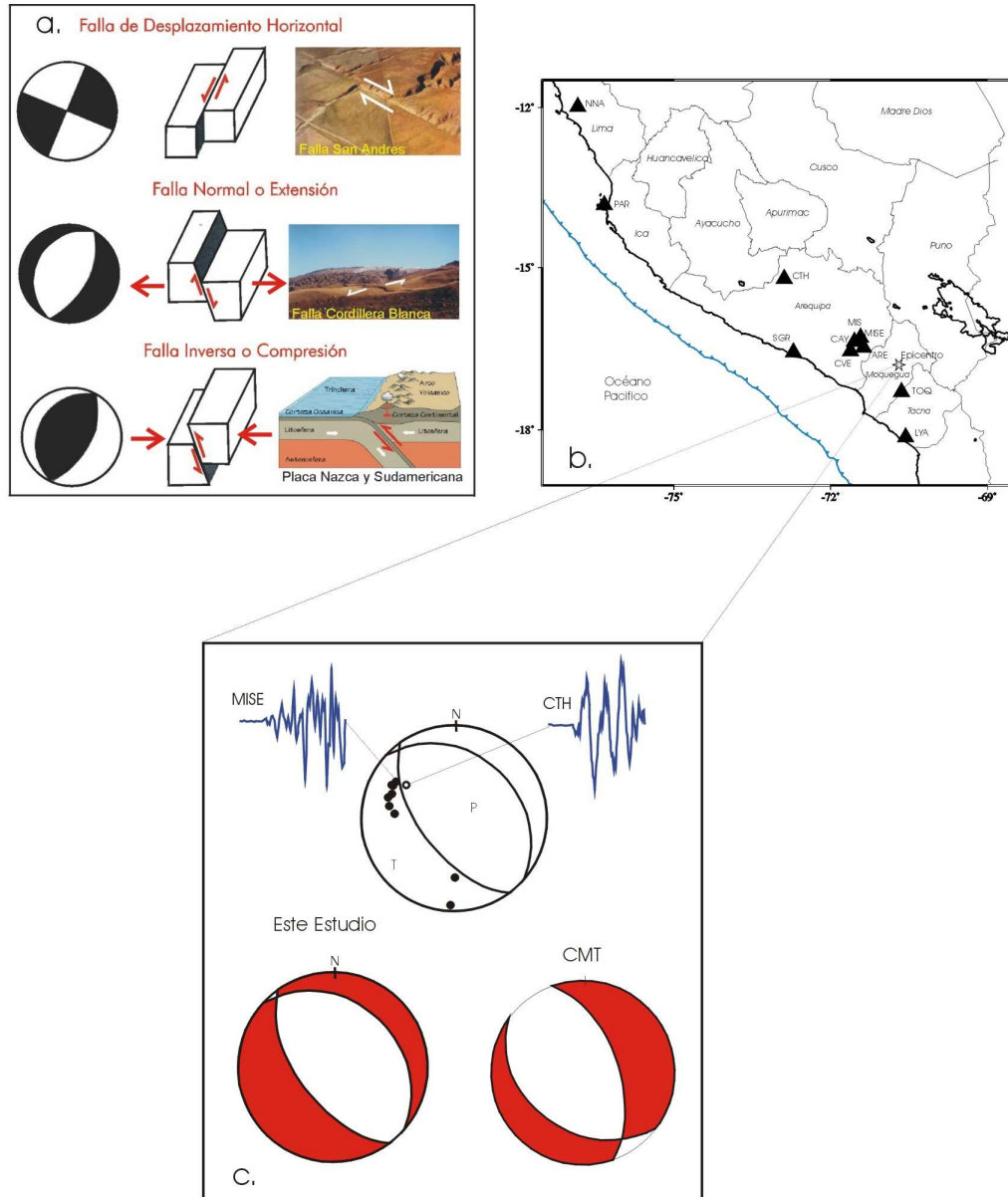


Figura 11. a).Correlación y ejemplos de mecanismos focales asociados a los tres principales tipos de fallas geológicas (las flechas indican la dirección del movimiento de los bloques y de los esfuerzos principales). b).Distribución espacial de las estaciones sísmicas cuya información se ha utilizando para elaborar el mecanismo focal para el sismo del 1 de octubre, 2005(c). Las áreas de color rojo y círculos negros representan las compresiones; mientras que, las blancas y círculos vacíos a las dilataciones. Los registros corresponden a las estaciones de Cotahuasi (CTH) y Misti (MISE). Con las siglas CMT se indica la solución obtenida por la Universidad de Harvard.

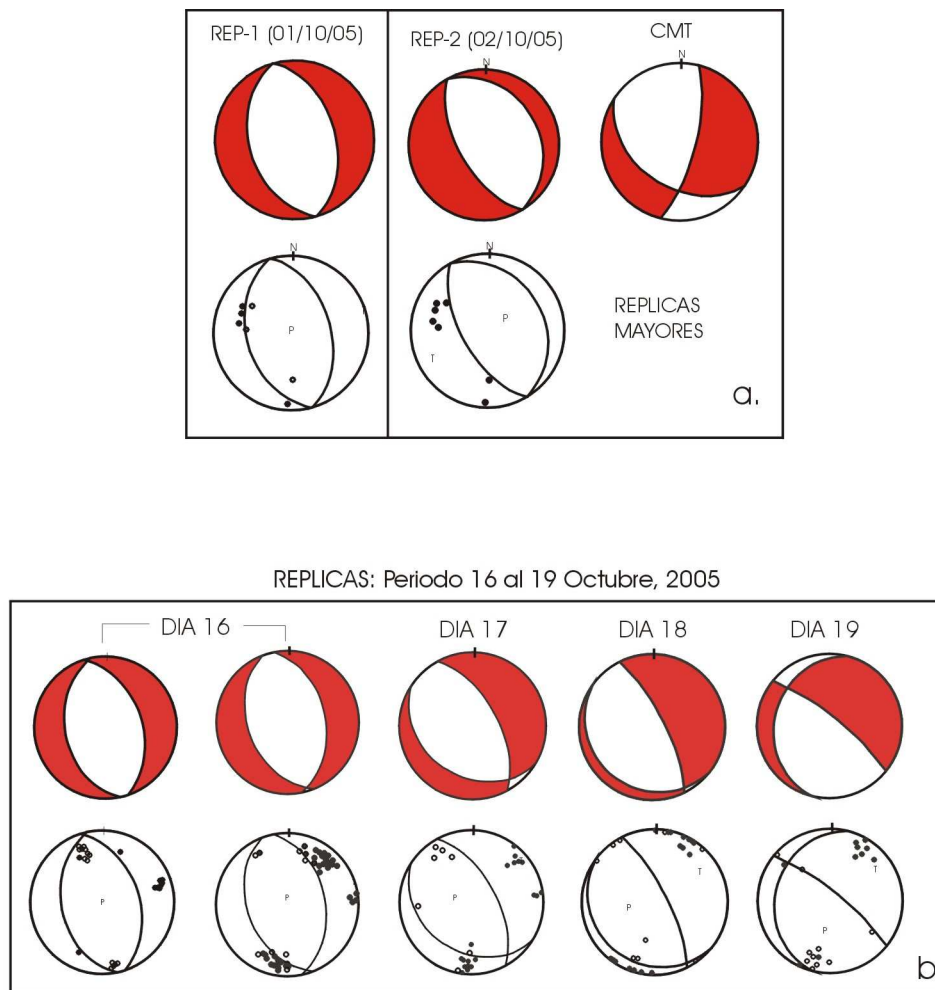


Figura 12. a). Mecanismos focales simples para las replicas mayores ocurridas los días 1 y 2 de octubre 2005.

b). Mecanismos compuestos para las replicas ocurridas entre los días 16, 17, 18 y 19 de octubre de 2005.

Las áreas de color rojo y círculos negros representan las compresiones; mientras que, las blancas y círculos vacíos a las dilataciones.

de la fuente sísmica que les diera origen. En la Figura 12 se muestra las soluciones obtenidas y los mecanismos corresponden a fallas de tipo normal con similares características que el sismo principal. En el caso de estas réplicas, la HRV reporta la solución para la réplica ocurrida el 2 de octubre, siendo la misma similar a la obtenida en este estudio.

4.4. - Parámetros de la Fuente

Otros parámetros importantes a determinar los constituyen el momento sísmico escalar, el radio de fractura y la caída de esfuerzos; todos a partir de las dos características más importantes de los espectros de la amplitud del desplazamiento de las ondas de volumen; es decir, la parte plana del espectro a bajas frecuencias y la frecuencia esquina. Para un modelo de dislocación por cizalla y asumiendo un modelo de falla circular, la parte plana del espectro (Ω) es proporcional al momento sísmico escalar (M_0) y la frecuencia de esquina (f_c), inversamente proporcional al radio de fractura (r), (Brune, 1970).

Para el sismo del 1 de octubre se ha obtenido los espectros de amplitud de las ondas S (NS y EO) correspondientes a los registros de las estaciones sísmicas de banda ancha de Cotahuasi (CTH) y Huancayo (HUA) ubicadas a 300 y 800 km de distancia del epicentro en dirección NO. En la Figura 13 se presenta los espectros y los valores promedios obtenidos para el momento sísmico usando la relación de Buforn et al (1996) y para el radio de fractura según la relación de Brune (1970). El sismo del 1 de octubre tuvo un momento sísmico de $1.7E+17$ Nm y un radio de fractura de 5.8 km.

Conocidos el momento sísmico escalar (M_0) y el radio de fractura (r), se hace uso de las relaciones establecidas por Kanamori (1977) y Brune (1970) para estimar la magnitud momento (M_w), el desplazamiento medio (ΔU) y

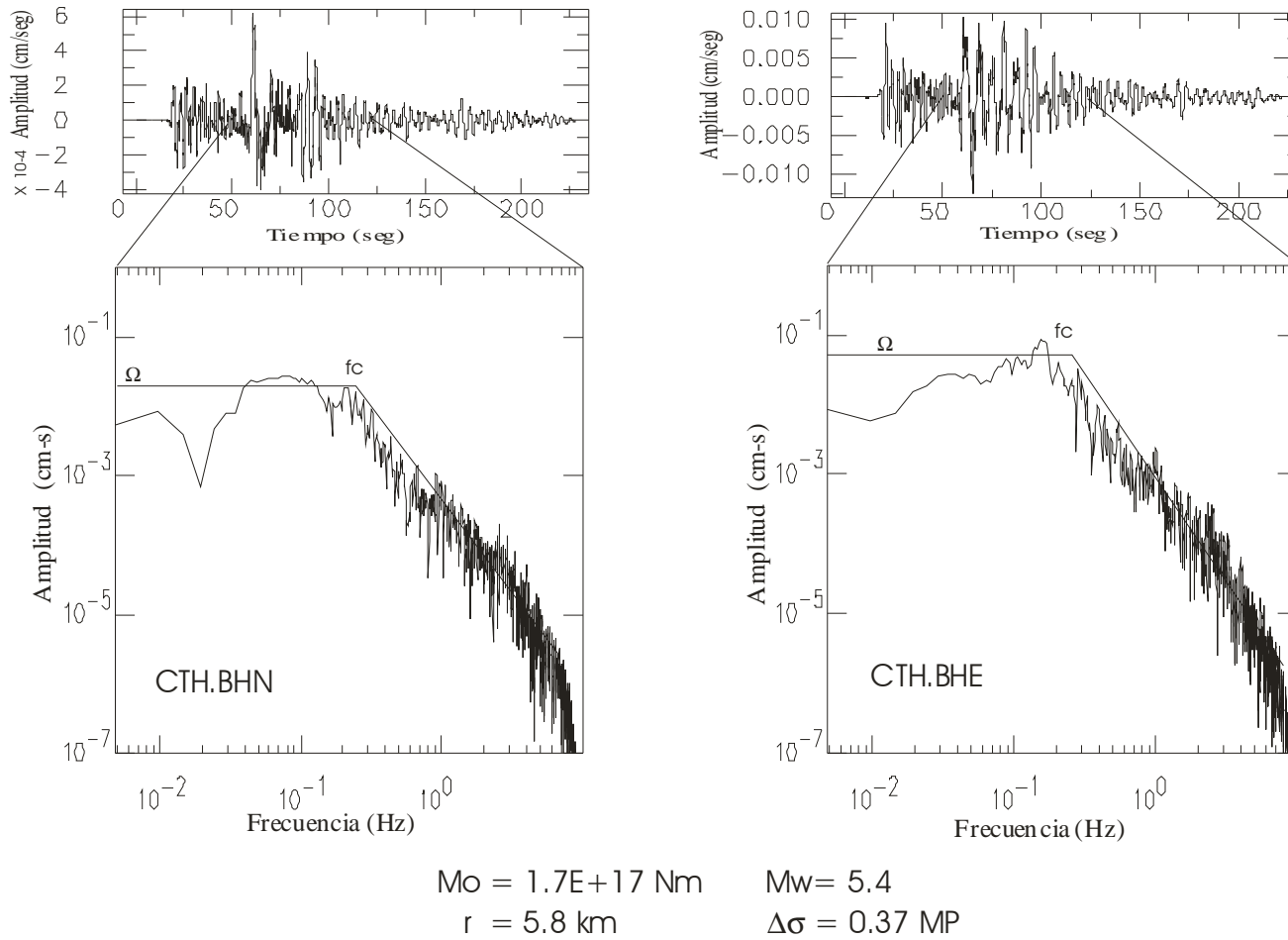


Figura 13. Espectros de amplitud de la onda S para el sismo del 1 de octubre, 2005. CTH indica a la estación sísmica de Cotahuasi, BHN y BHE corresponden a los registros en las componentes norte-sur y este-oeste. Los parámetros de la fuente obtenidos se muestran en la parte inferior.

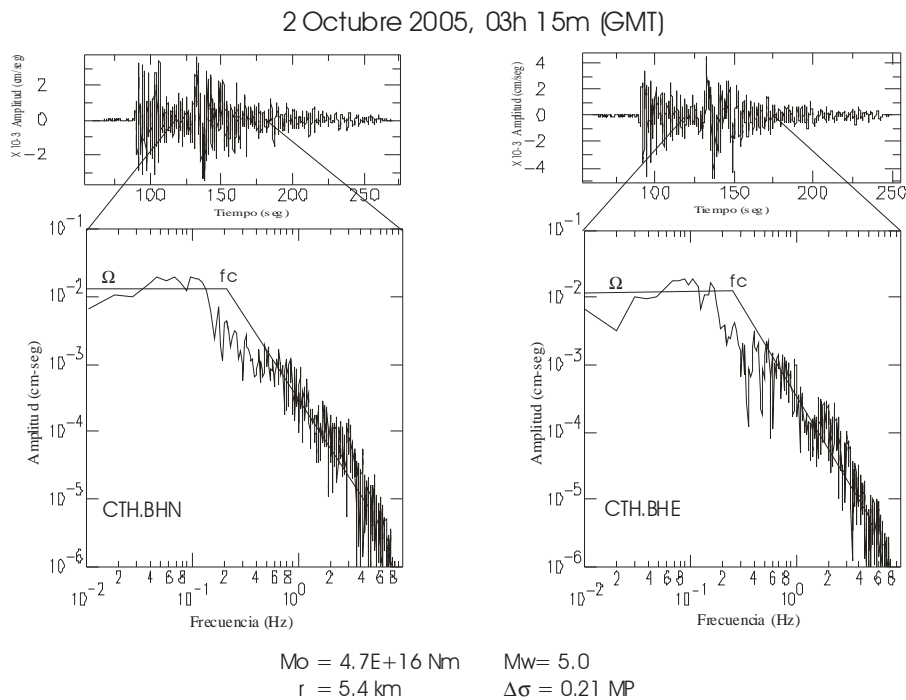
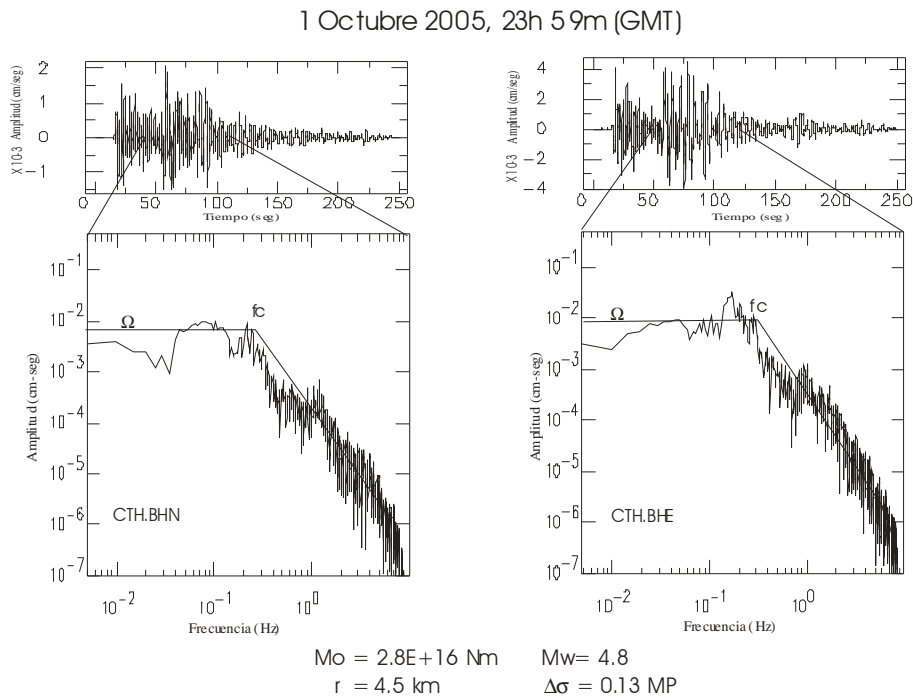


Figura 14. Espectros de amplitud de la onda S para las replicas de mayor magnitud ocurridas los días 1 y 2 de octubre de 2005. CTH indica a la estación sísmica de Cotahuasi, BHN y BHE corresponden a los registros en las componentes norte-sur y este-oeste. Otros, ver texto.

la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$), siendo los valores obtenidos de $M_w=5.4$, $\Delta U=2.3$ cm y $\Delta\sigma=0.37$ MP.

Del mismo modo, en la Figura 14 se presenta los espectros obtenidos para las dos replicas de magnitud mayor indicadas anteriormente y registradas por la estación de CTH, así como los valores obtenidos para cada parámetros que define a la fuente sísmica. En general estos valores son menores con respecto al sismo principal y son resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de la fuente sísmica para el sismo del 1 de octubre de 2005 y para su serie de replicas. Se incluye los valores reportados por el NEIC y HRV

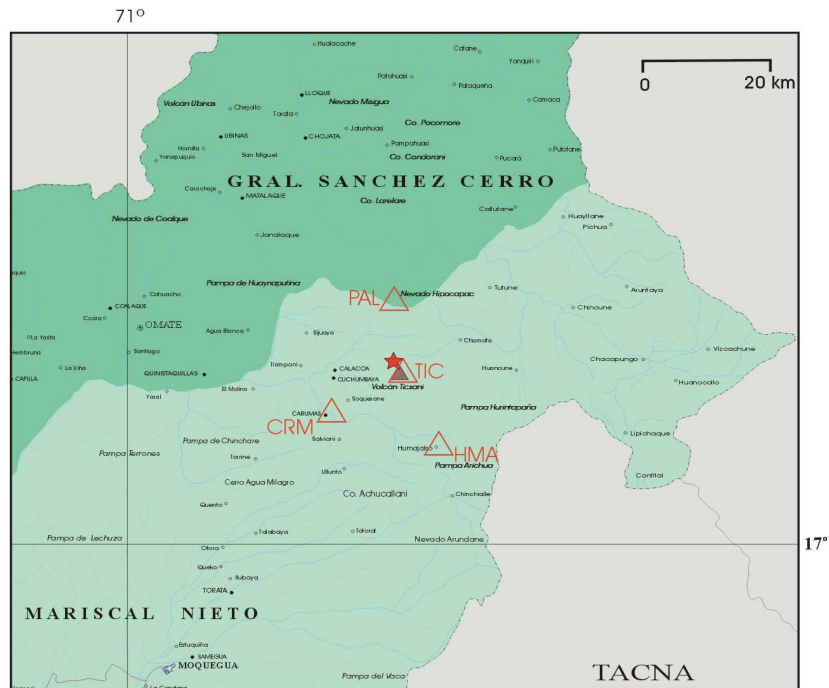
MFS	EJE T		EJE P		Mo (Nm)	r (Km)	ΔU (Cm)	$\Delta\sigma$ (MP)	Mw	Fuente
	Azim	Buza	Azim	Buza						
Sismo Principal: 01/10/05	230°	15°	71°	74°	1.7E+17	5.8	2.3	0.37	5.4	EE
	56°	12°	295°	69°	1.1E+17					
Replica: 01/10/05	249°	8°	70°	82°	2.8E+16	4.5	0.5	0.13	4.8	EE
Replica: 02/10/05	242°	23°	64°	67°	4.7E+16	5.4	0.8	0.21	5.0	EE
	76°	19°	324°	47°	6.5E+16					
MFC										
Replica: Día 16	75°	2°	197°	86°	EE					
	74°	1°	332°	85°	EE					
Replica: Día 17	51°	16°	273°	69°	EE					
Replica: Día 18	58°	31°	253°	58°	EE					
Replica: Día 19	57°	31°	193°	50°	EE					

*MFS, MFC: mecanismos focales simples y compuestos; EE: este estudio; HRV: Universidad de Harvard
Azim, Buza: azimut y buzamiento de los ejes P y T de los mecanismos focales.*

5.- EVALUACION DE LA INFORMACION SISMICA

5.1.- La Red Sísmica Local

Después de ocurrido el sismo del 1 de octubre de 2005 en la región del volcán Ticsani, el Instituto Geofísico del Perú envió a la zona afectada un total de 4 estaciones sísmicas a fin de disponer de una red temporal en dicha región. Estas estaciones sísmicas fueron de banda ancha y estuvieron constituidas por sensores de tipo GURALP-40T y registradores digitales Reftek con una resolución de 24 bits que funcionaron durante un periodo de 10 días a partir del 13 de octubre del 2005. La principal ventaja de este tipo de instrumental sísmico es su gran banda de frecuencia (0.01-50Hz) y su resolución de registro (24 bits) con lo cual se dispone de señales de buena calidad sin problemas de saturación, y en el caso del monitoreo volcánico no existe restricción en cuanto a la diversidad de frecuencias que caracteriza a las señales volcánicas (volcano-tectónicas, periodo largo, tremores, híbridos, tornillos, explosiones, etc., ver Anexo 3). En la Figura 15 se muestra la distribución espacial de las cuatro estaciones que integraron la red sísmica y que fueron instaladas en las localidades de Humajalso, Carumas y Pallatea formando un triangulo, y en cuyo centro se instaló la cuarta estación; es decir, sobre el cráter del volcán a fin de disponer de información sobre los posibles procesos de deformación que pudieran producirse dentro del mismo. En la misma figura se muestra un ejemplo de la disposición típica de una estación sísmica de banda ancha (sensor, sistemas de registro y almacenamiento de la información, sistema de alimentación, etc.). El periodo de operación de cada una de las estaciones sísmicas, no fue homogénea debido principalmente a problemas de logística; sin embargo, se



Estación	Octubre	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
HMA	Humajalzo		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PAL	Palleta		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
CRM	Carumas			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
TIC	Ticsani			-----			-----	-----	-----	-----	-----

----- Periodo de funcionamiento

Figura 15. En la parte superior se muestra la ubicación de las estaciones sísmicas de banda ancha instaladas alrededor del volcán Ticsani (triángulos) después de ocurrido el sismo del 1 de octubre de 2005 (5.4ML). En el centro, disposición típica de una estación sísmica de banda ancha y Abajo, periodo de operación de cada estación sísmica de la red local.

dispone de información conjunta para un periodo de cinco días, siendo la misma utilizada en el presente estudio.

5.2. - Tipos de Eventos Sísmicos Registrados

A fin de identificar los diferentes tipos de señales registradas por las estaciones sísmicas que funcionaron en la región del volcán Ticsani, en la Figura 16 se muestra dos sismogramas correspondientes a una estación de banda ancha (0.01 a 50 Hz) que opero en las proximidades del cráter del volcán durante el mes de octubre de 2005. Asimismo, en la misma figura se presenta otros dos sismogramas de la estación de periodo corto (1 Hz) que estuvo operativa cerca del cráter del volcán Ubinas durante los meses de mayo y junio de 2006, en razón que este volcán ingreso a una etapa de reactivación en el mes de abril del mismo año. Al comparar ambos sismogramas, pero sin considerar sus rangos frecuenciales de registro, es notorio las marcadas diferencias existentes entre las formas de las señales registradas. Por ejemplo, en el volcán Ubinas las señales que prevalecen presentan gran diversidad de amplitudes y su trazo continuo llega a tener duraciones de hasta 6 horas, siendo ellas típicas señales de tremores volcánicos. Del mismo modo, se observa el registro de algunas explosiones y otras señales correspondientes a eventos de periodo largo (LP). Según el Anexo 3, estas señales son propios de volcanes activos y tienen su origen en la circulación del magma y expulsión de gases por parte de la cámara magmática. Contrariamente, para el volcán Ticsani las formas de las señales muestran claras fases P y S, lo cual sugiere la ocurrencia de fracturamientos de roca dentro del cono volcánico o en fallas geológicas cercanas al mismo (Anexo 3). La simple apreciación de los diferentes tipos de señales registradas en ambos volcanes, permiten sugerir para el volcán Ubinas el desarrollo de procesos netamente volcánicos con la participación directa del material

magmático; mientras que, para el Ticsani los procesos serían debidos a fracturamientos de rocas asociados a fallas geológicas (Figura 16).

Por otro lado, en la Figura 17 se muestra cuatro ejemplos de los registros típicos obtenidos de la estación sísmica ubicada en el volcán Ticsani (TIC) y tal como se indico anteriormente, en los registros predominan los eventos de tipo tectónico y por lo tanto; fácilmente se puede identificar las fases P y S (Figura 17a,b). Del mismo modo, la forma de su espectrograma y rangos de frecuencias predominantes (entre 1 a 10 Hz) confirman que dichos eventos son netamente tectónicos. Sin embargo, si los procesos de deformación cortical se produjeron cerca del volcán Ticsani es posible considerar que el material de la cámara magmática de dicho volcán haya tenido participación en menor grado, tal como se observa en la Figura 17c con el registro de un evento de periodo largo (LP) con su respectivo espectrograma característico. Durante todo el periodo que funciono la red sísmica local, se ha registrado únicamente tres eventos de periodo largo y ellos evidencian posibles movimientos del magma, aunque no fue suficiente como para iniciar el proceso eruptivo del volcán Ticsani.

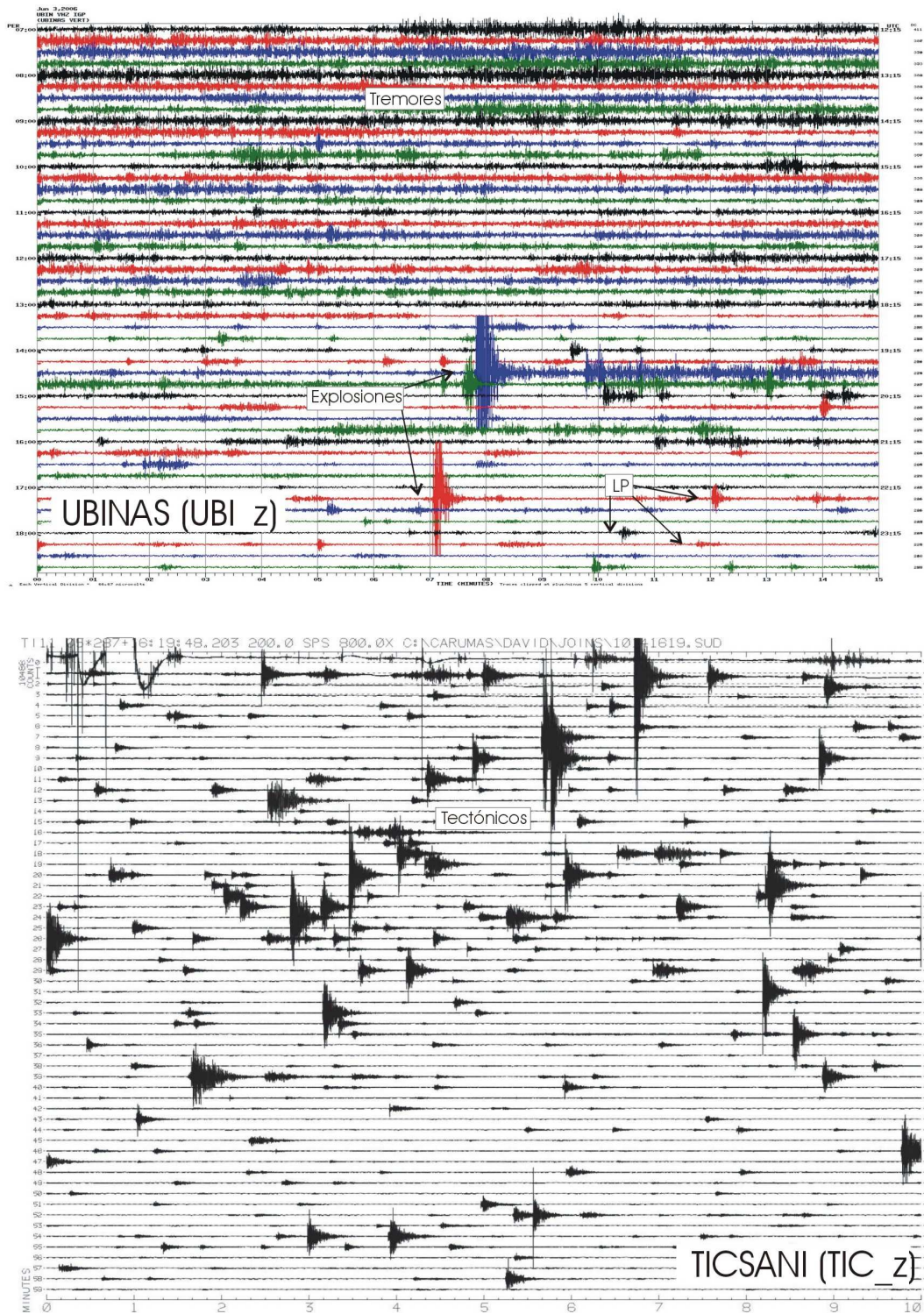


Figura 16. Ejemplos de registros sísmicos obtenidos en los volcanes Ubinas (junio, 2006) y Ticsani (octubre, 2005). Observe el registro de diversos tipos de señales que sugieren el proceso de deformación que caracterizó a ambos volcanes durante sus respectivos periodos de monitoreo sísmico: V. Ubinas, registros de tremores y explosiones; V. Ticsani, registros de sismos tectónicos.

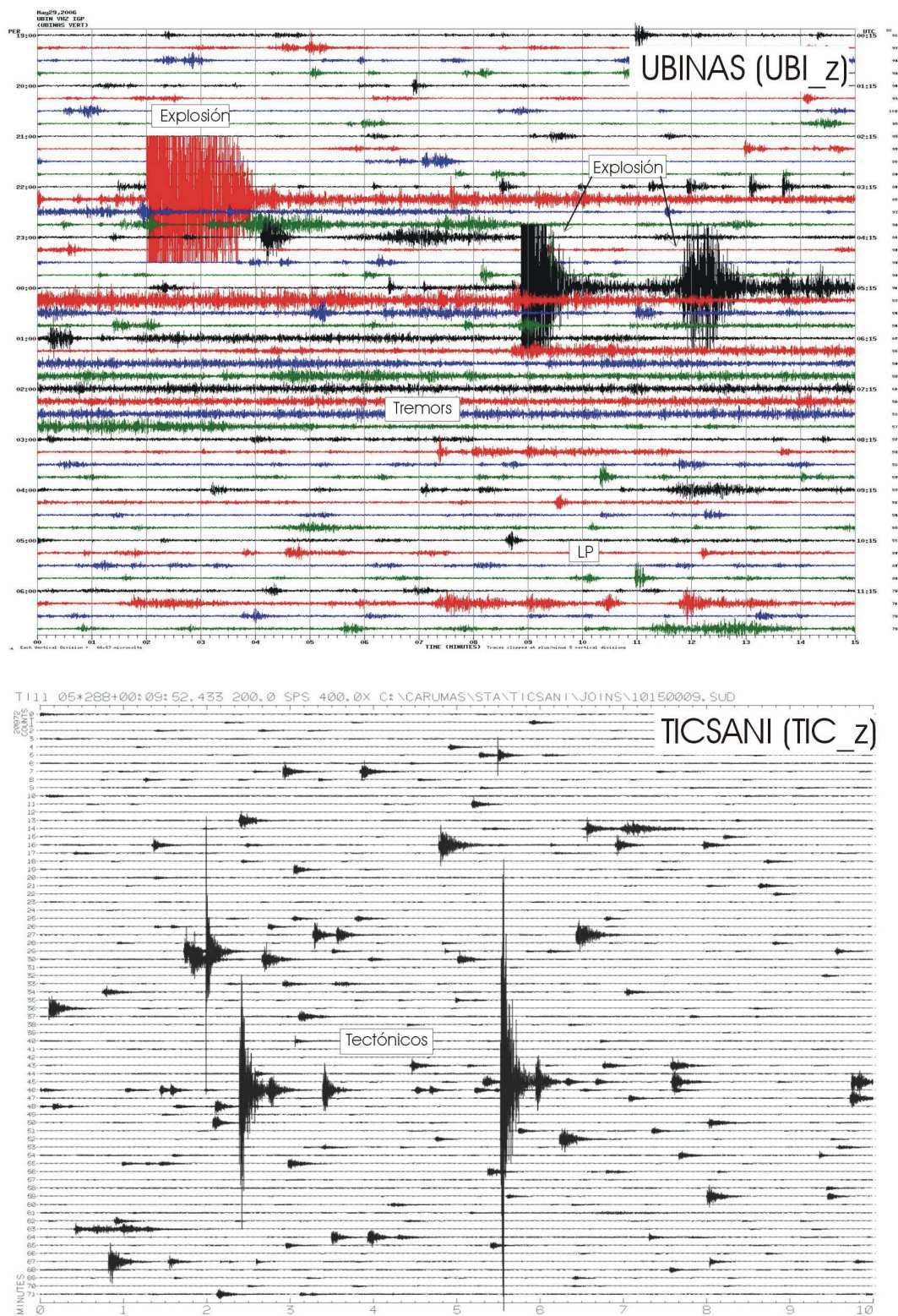


Figura 16. Continuación...//

Ejemplos de registros sísmicos obtenidos en los volcanes Ubinas (mayo, 2006) y Ticsani (octubre, 2005). Observe el registro de hasta tres explosiones ocurridas en el volcán Ubinas, además de tremores de diversas duraciones. En el caso del volcán Ticsani, los registros corresponden a sismos tectónicos de diferentes magnitudes.

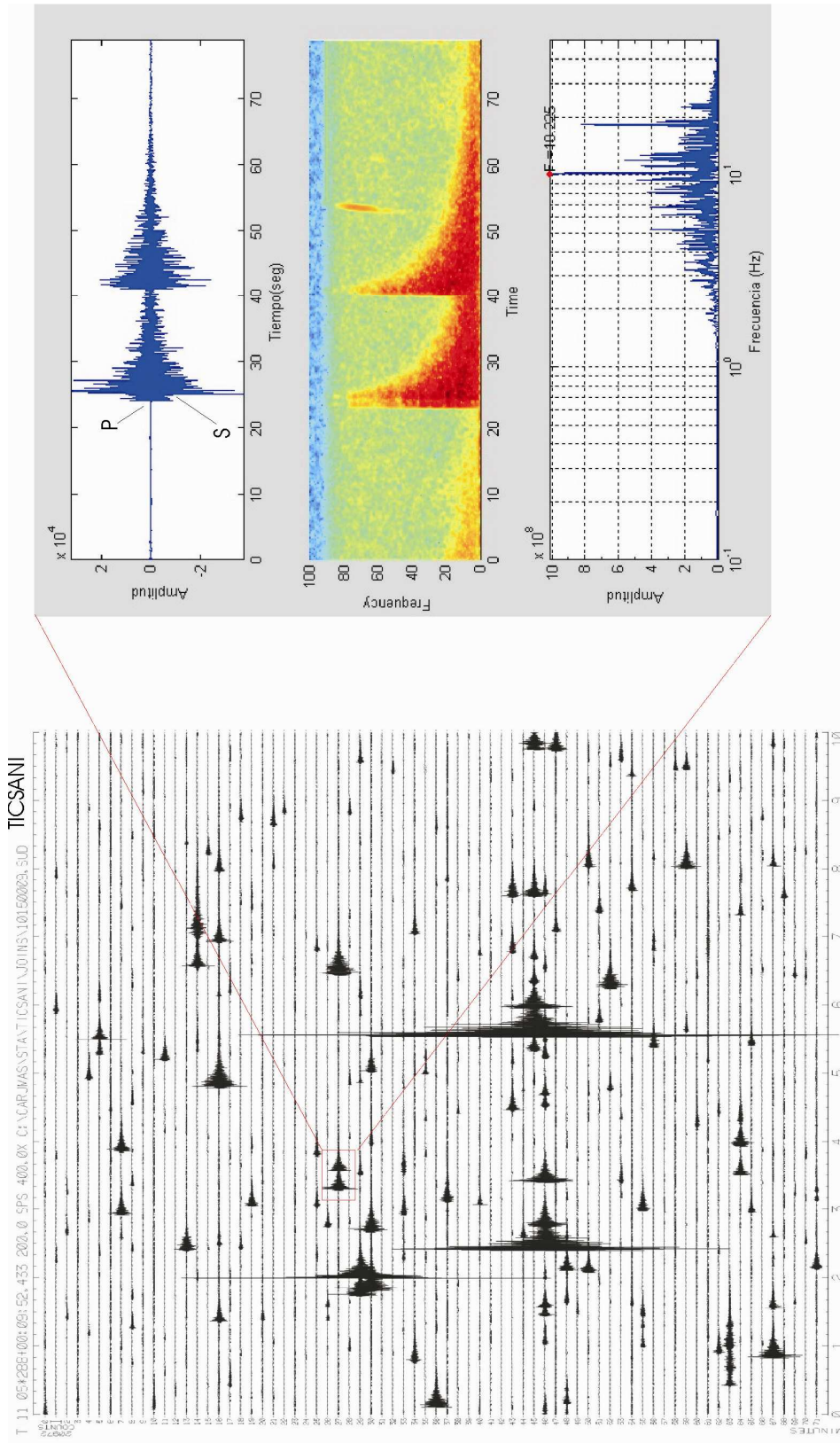


Figura 17a. Registros sísmicos obtenidos de la estación instalada en el cono del volcán Ticsani (TIC) y análisis espectral de las formas de onda para dos sismos característicos. Obsérvese que los registros y sus espectros presentan la forma típica de eventos tectónicos. P y S indican los tiempos de llegada de las ondas sísmicas.

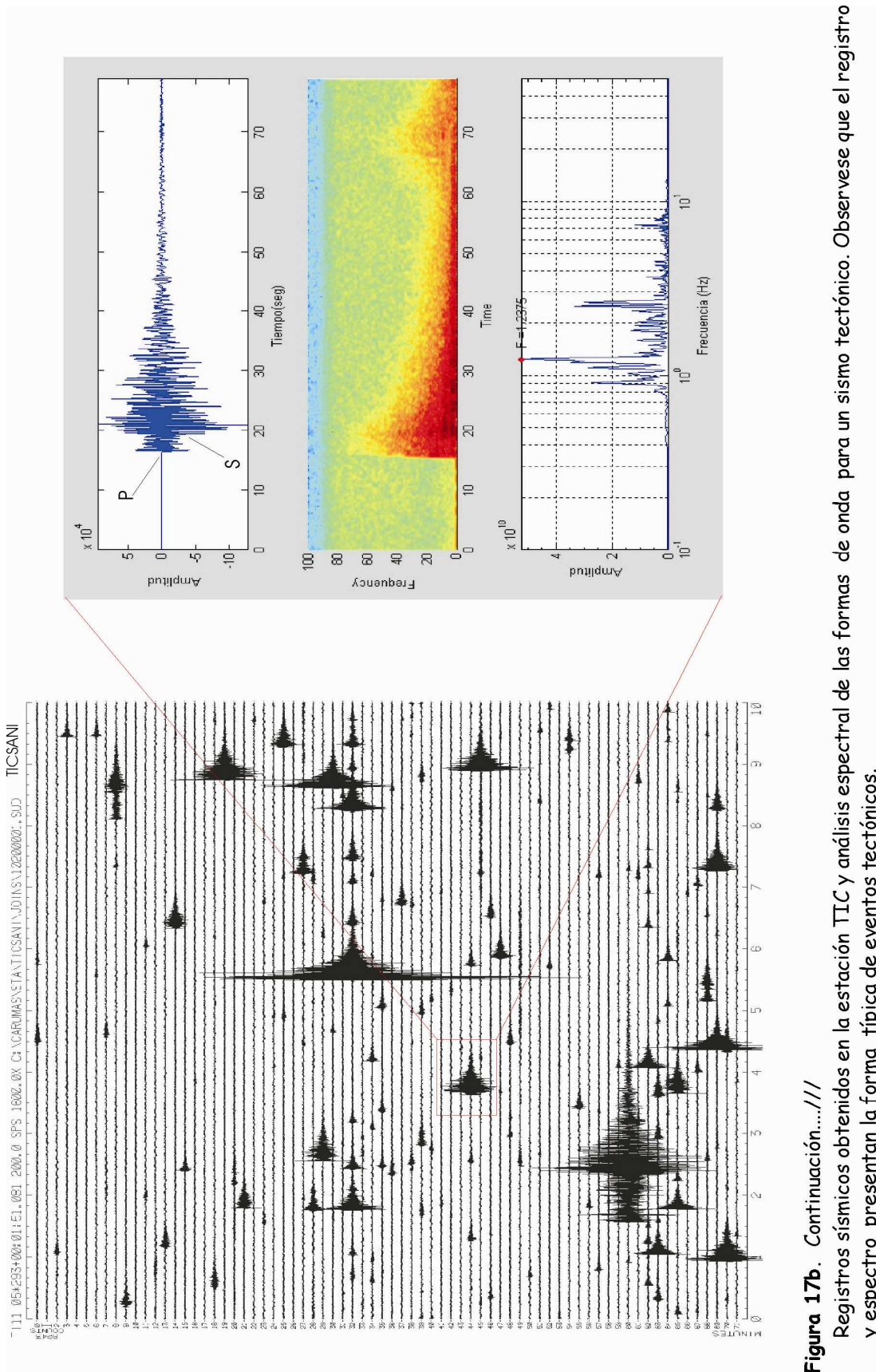


Figura 17b. Continuación.....
Registros sísmicos obtenidos en la estación TIC y análisis espectral de las formas de onda para un sismo tectónico. Observe que el registro y espectro presentan la forma típica de eventos tectónicos.

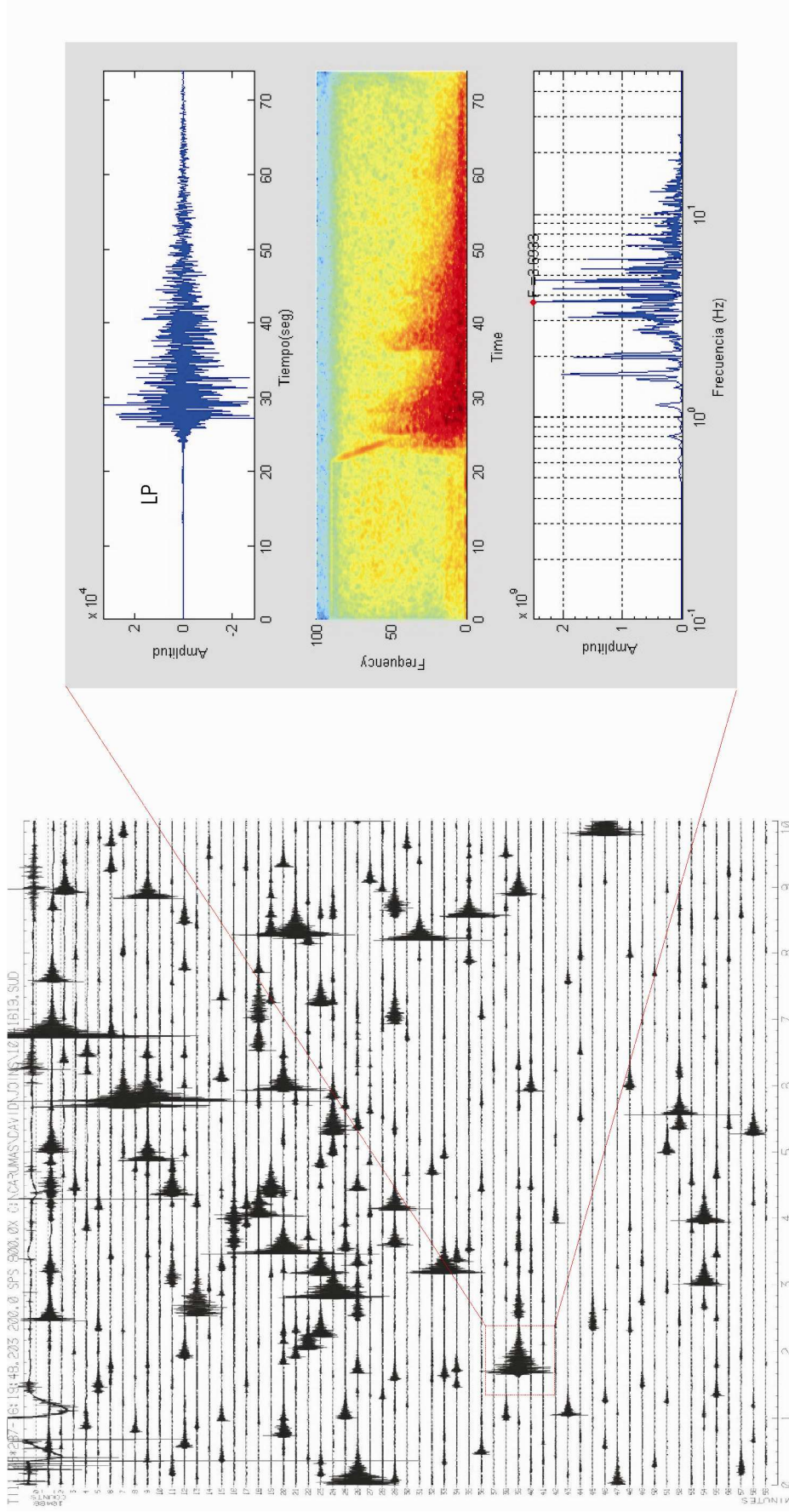


Figura 17c. Continuación....!!!

Registros sísmicos obtenidos en la estación TIC y análisis espectral de las formas de onda para un evento de Periodo Largo (LP). El registro de evento tectónicos y LP sugiere que en la zona se habría desarrollado dos procesos de deformación, el primero como asociado a deformación cortical (fallas) y el segundo, a movimientos del magma dentro de la cámara magmática del volcán Ticsani.

6. - ANALISIS Y EVALUACION DE LAS REPLICAS

Durante el periodo de monitoreo de las replicas, la red sísmica estuvo integrada por 4 estaciones de banda ancha que operaron entre los días del 13 al 22 de Octubre de 2005. De acuerdo a la Figura 15, las estaciones funcionaron durante diversos periodos de tiempo habiendo registrado diferente número de eventos. Sin embargo, el análisis de los sismogramas ha sido realizado para la totalidad de la data disponible y la información extraída considera los tiempos de llegada a las estaciones de las fases P y S correspondiente a cada replica (información necesaria para realizar la localización hipocentral), la duración del registro de la replica en segundos para estimar su magnitud local (ML) y la polaridad del primer impulso de la onda P a fin de elaborar mecanismos focales y así conocer la orientación de la fuente. Del total de sismos identificados en cada estación, se ha logrado correlacionar su registro en tres o más estaciones para un total de 148 sismos. Considerando que las estaciones de banda ancha permiten disponer de registros de buena calidad, los errores en la lectura de los tiempos de llegada de las ondas P y S han sido estimados en 0.05 segundos, lo cual permite lograr mayor resolución en el cálculo de los parámetros hipocentrales de las replicas.

6.1. - Calculo de los Parámetros Hipocentrales

Los parámetros hipocentrales para el total de las replicas fueron obtenidos utilizando una versión del algoritmo Hypoinverse (Klein, 1978) y un modelo de distribución de velocidades que considera pequeñas variaciones para la velocidad de las ondas P por encima de los 25 km, característica que permite tener mayor control sobre los parámetros de los focos superficiales (Figura 18).

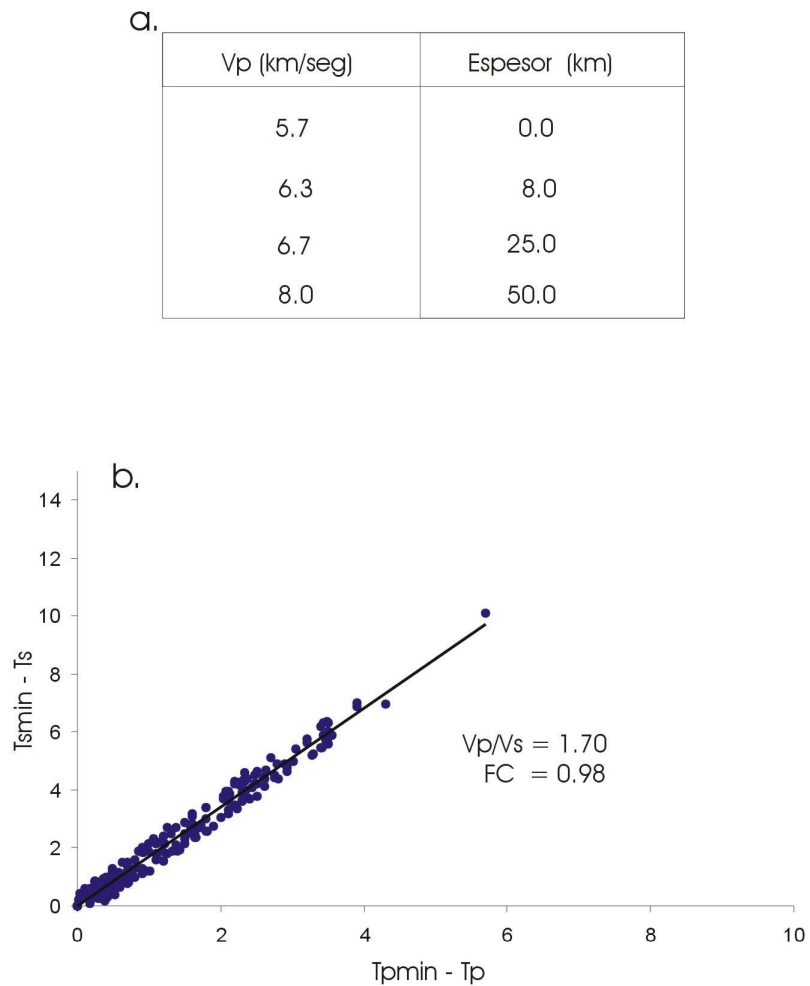


Figura 18. a). Modelo de velocidad utilizado en el cálculo de los parámetros hipocentrales de las réplicas del sismo del 1 de octubre de 2005 registrados por la red local del Ticsani (Dorbath et al, 1991). b). Curva de Wadatti obtenido con el total de los tiempos de llegada de las ondas P y S correspondiente a las réplicas del sismo del 1 octubre de 2005. En la figura FC indica el factor de correlación.

Este modelo de velocidad corresponde al propuesto por Dorbath et al, (1991) para el estudio en detalle de la microsismicidad presente en el área de la falla del Huaytapallana y cuyos procesos de deformación superficial son similares a los que se presentaron en la región del volcán Ticsani. Para corregir la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (onda S), se utiliza una relación de velocidades V_p/V_s de 1.70 obtenida con una base de datos que considera 280 tiempos de llegada de ondas P y S correspondiente a las replicas registradas por la red sísmica local (Figura 18).

La magnitud de las replicas ha sido estimada a partir de la relación propuesta por Klein (1978) y que considera la duración total del registro en segundos:

$$M_L = -1.1 + 2.\text{Log}(D) + 0.007 (\Delta) + 0.0035(Z)$$

donde, M_L = magnitud local en función de la duración del registro, D = duración del registro del sismo en segundos, Δ = distancia epicentral en km y Z = la profundidad del foco en km. Según esta relación, el valor de magnitud M_L calculado para cada replica corresponde a la media de los valores obtenidos para cada registro.

Finalmente, se ha construido una base de datos compuesta por los parámetros hipocentrales de 128 replicas que presentaban errores en la horizontal (ERH) y vertical (ERZ) menores a 2.5 km. Los focos de las replicas alcanzan profundidades máximas de 12 km y magnitudes menores a 3.0ML.

6.2. - Distribución Espacial de las Replicas

En la Figura 19 se presenta el detalle topográfico del área de estudio mas la distribución espacial de las 128 replicas consideradas en este estudio, así como la ubicación del volcán Ticsani y de las localidades de Calacoa, Carumas y Humajalzo. Según la figura, las replicas se distribuyen sobre el volcán Ticsani siguiendo un aparente alineamiento con una orientación NO-SE y con mayor número de replicas en su extremo NO, lo cual podría sugerir que en esta área se habría producido la mayor deformación durante el periodo de registro de datos. Hacia SE del volcán Ticsani y en los alrededores de la localidad de Humajalzo aparecen algunas replicas cuyos epicentros no permiten identificar algún alineamiento o patrón de deformación; sin embargo, se debe considerar que en esta área existe un gran número de fallas de pequeña longitud que podrían haber producido todos los eventos (Figura 3).

Según la sección vertical de la Figura 19, las replicas se habrían producido en mayor número hasta niveles de profundidad de 12 km con una aparente alineación en dirección SE que se iniciaría a 2.5 km hacia el SO del cono volcánico (flecha en la sección vertical). De acuerdo a la sección vertical, las replicas prácticamente se concentran por debajo del volcán Ticsani hasta niveles de profundidad del orden de 7.5 km, lo cual sugiere que la deformación producida en toda el área fue de carácter superficial.

6.3. - Orientación de la Fuente - Replicas

A fin de conocer la orientación de la fuente que dio origen a la serie de replicas que siguieron al sismo del 1 de octubre, se procedió a elaborar mecanismos focales compuestos utilizando la información de los primeros impulsos del registro de la onda P del total de replicas en cada una de las

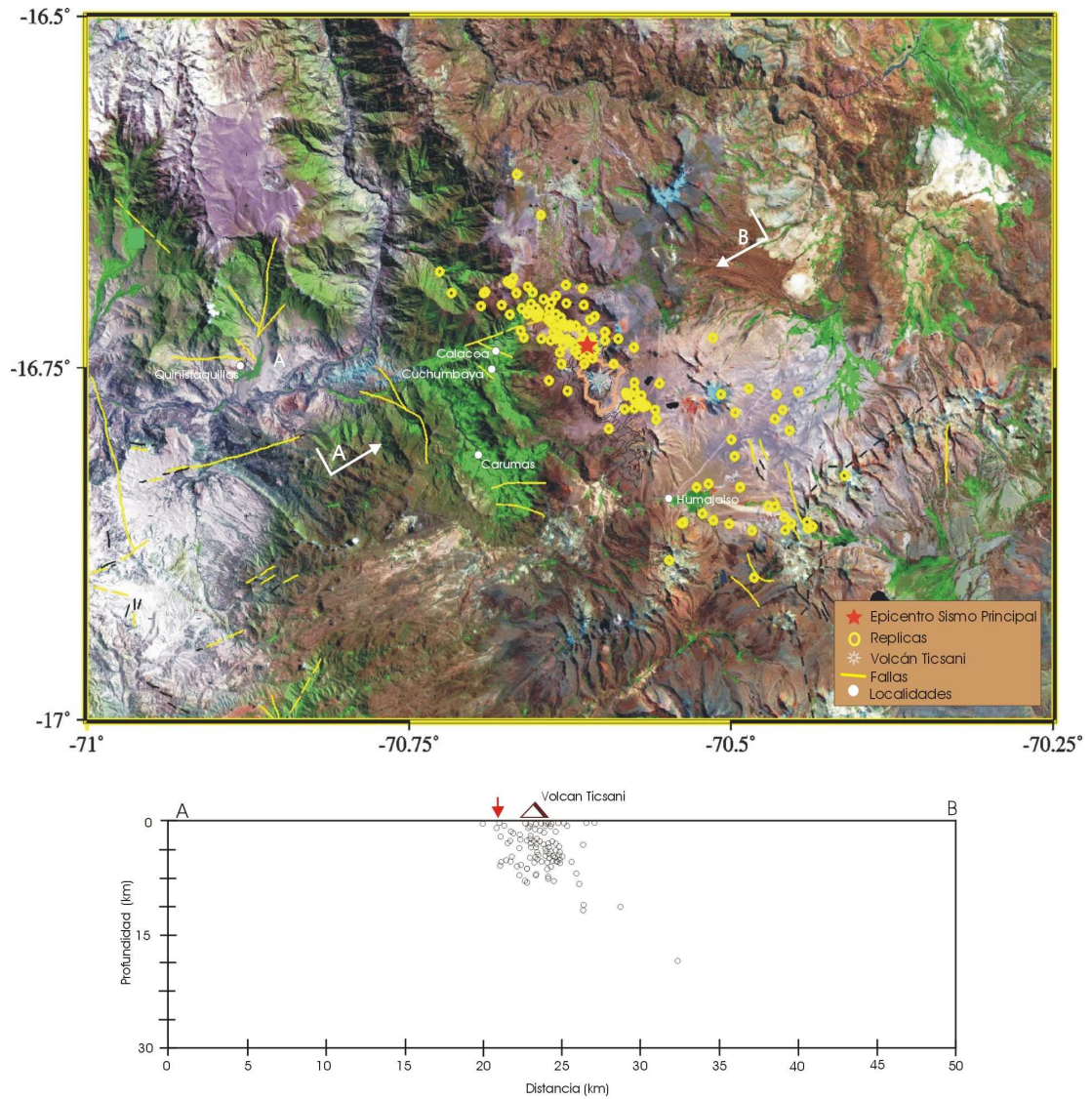


Figura 19. Distribución espacial de las replicas del sismo del 1 de octubre de 2005 registrados por la red local del volcán Ticsani durante los días del 16 al 19 de octubre de 2005. Abajo, sección vertical en profundidad según la dirección NE-SO (A-B). Para la flecha, ver texto.

estaciones sísmicas que integran la red del volcán Ticsani. Para una mejor evaluación de los procesos de ruptura, se ha elaborado los mecanismos focales para el total de los sismos ocurridos durante los días 16, 17, 18 y 19 de octubre, y los resultados se presentan en la Figura 12 y Tabla 2.

Según las soluciones obtenidas, los mecanismos focales corresponden a fallas de tipo normal con planos orientados en promedio en dirección NO-SE y ángulos de buzamiento en dirección NE y SO. Los mecanismos focales para las réplicas ocurridas durante los días 16 y 17 presentan planos nodales con inclinaciones del orden de 45° ; mientras que, para las ocurridas los días 18 y 19, los planos son buzamiento en dirección NE son casi verticales (76° y 79°) y con una pequeña componente de desgarre. Estos resultados sugieren que los procesos de deformación fueron complejos con la posibilidad de que el plano de falla cambie su buzamiento si los sismos ocurren más al NO con respecto al volcán. En general, las soluciones para los mecanismos focales son similares a las obtenidas para el sismo del 1 de octubre y réplicas mayores.

7.- INTERPRETACION SISMOTECTONICA

La distribución espacial de las réplicas registradas durante los días del 16 al 19 de octubre 2005 se presenta en la Figura 20, y ella presenta las siguientes características: durante el día 16 de octubre las réplicas se concentran en dos grupos ubicados en los extremos SE y NO del volcán Ticsani, estando en este último algo más dispersos. Para ambos grupos los mecanismos focales compuestos son de tipo normal con ejes de tensión (T) orientados en dirección ENE-OSO. Las réplicas ocurridas durante los días 17, 18 y 19 de octubre se concentran en el extremo NO del volcán Ticsani y de acuerdo a sus mecanismos focales tendrían su origen en proceso de deformación de tipo tensional con ejes T orientados en dirección NO-SE, aunque para los dos últimos días (18 y 19), los mecanismos sugieren planos de falla próximos a la vertical. Los resultados en conjunto presentados en la Figura 21 confirman lo descrito anteriormente; es decir, toda la actividad sísmica que siguió al sismo del 1 de octubre ha tenido su origen en la deformación superficial producto de los procesos extensionales ocurridos en la zona y cuyos ejes de tensión (T) tuvieron una orientación en dirección NE-SO (flechas de color rojo en la Figura 21). La distribución en profundidad de los sismos, permite sugerir que la cámara magmática del volcán Ticsani tendría profundidades menores a 15 km.

Por otro lado, trabajos de campo realizados por O. Macedo del Instituto Geofísico del Perú - Oficina Regional de Arequipa (comunicación personal) alrededor del volcán Ticsani durante el mes de octubre de 2006, han permitido identificar sobre el terreno la existencia de una importante traza de falla ubicada a escasos 5 km en dirección NE del volcán Ticsani. Esta traza de falla a la que llamaremos "Ticsani" tiene una orientación de 155°N y muestra una

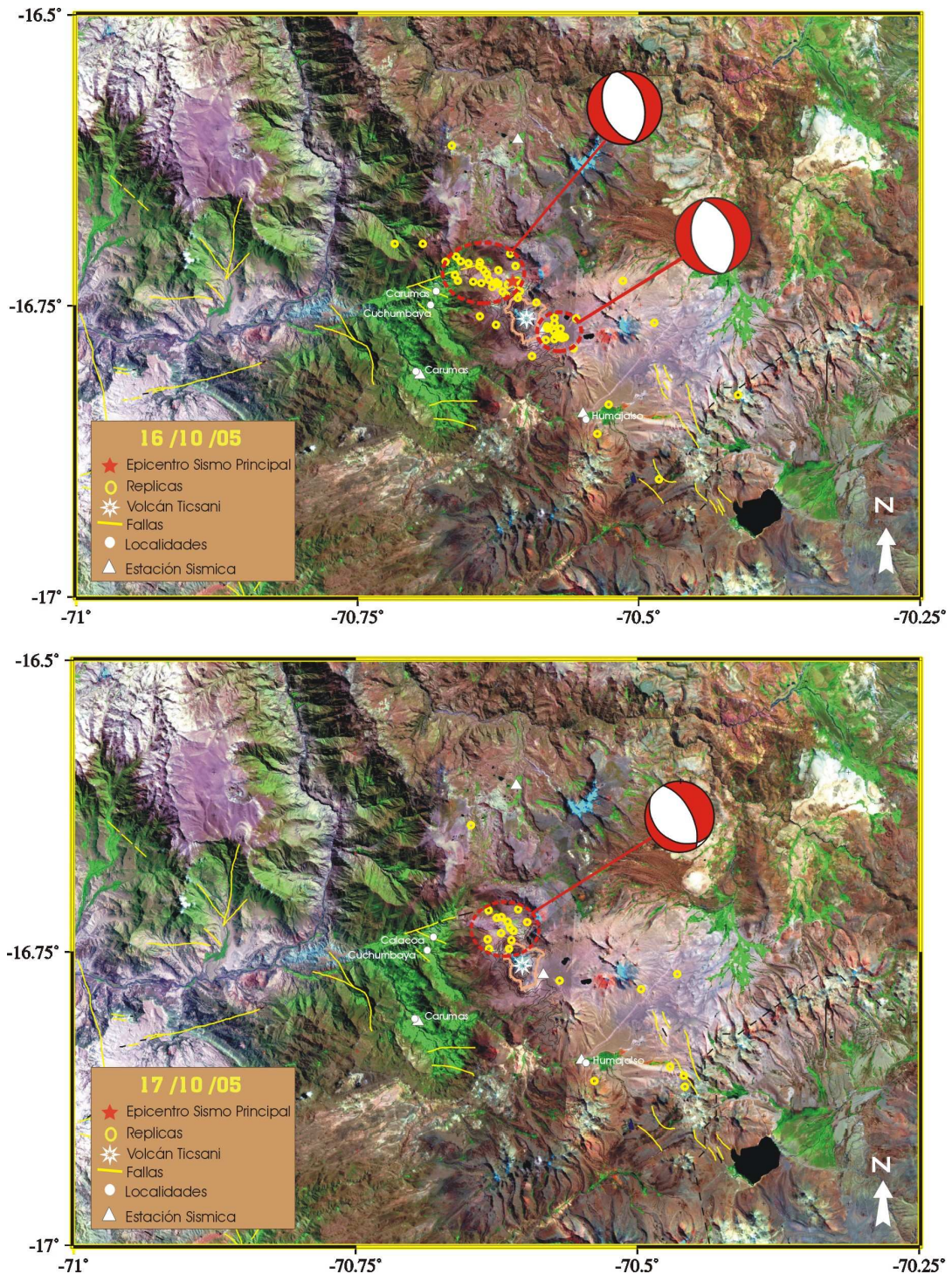


Figura 20. Distribución espacial de las replicas del sismo del 1 de octubre de 2005 ocurridas durante los días 16 y 17 de octubre de 2005. Observe la migración de la sismicidad alrededor del volcán Ticsani. Las esferas corresponden a los mecanismos focales de la Figura 12 (mecanismos compuestos).

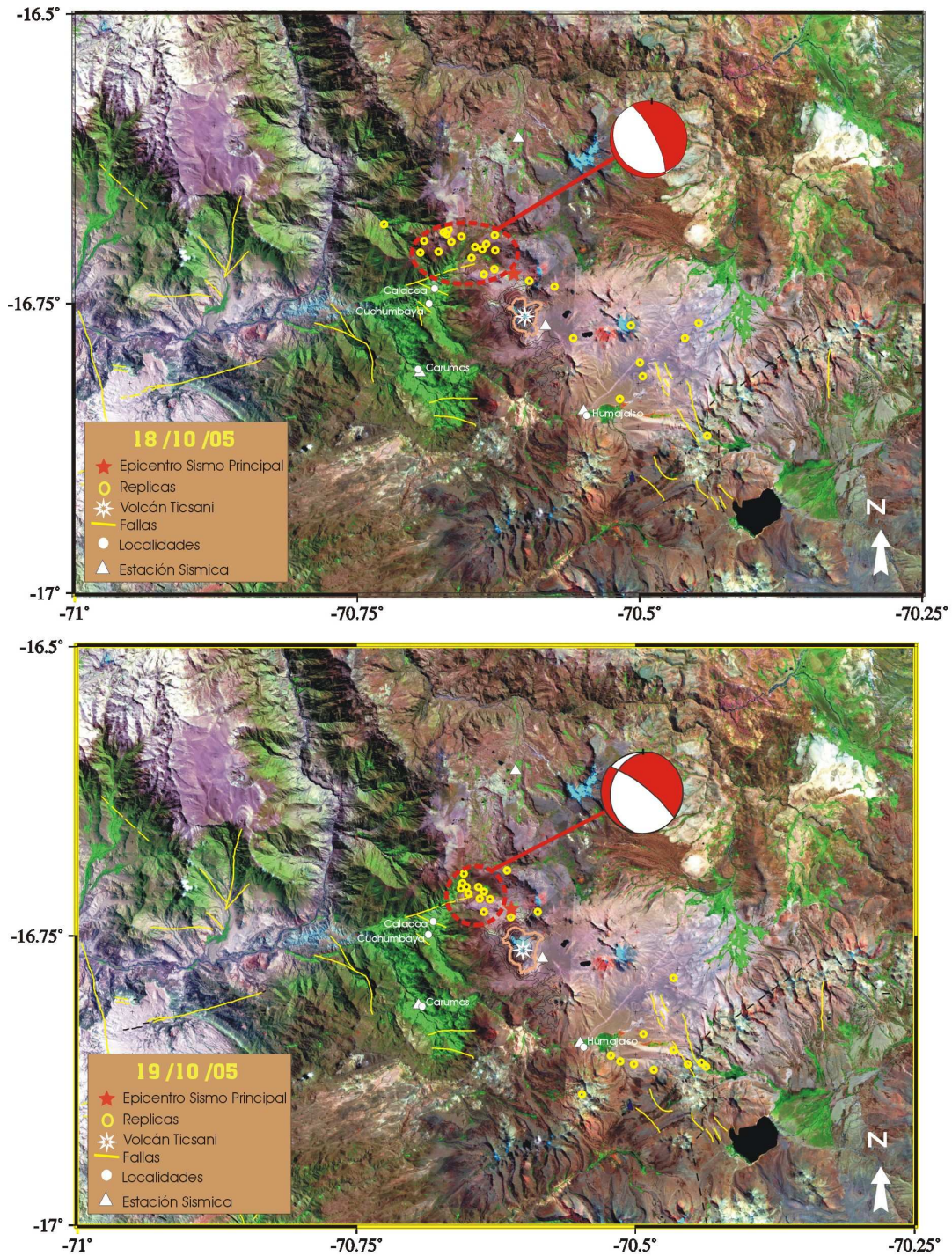


Figura 20. Continuación///

Distribución espacial de las replicas del sismo del 1 de octubre de 2005 ocurridas durante los días 18 y 19 de octubre de 2005. Observe la ubicación de las replicas en comparación con los días 16 y 17 de octubre. Las esferas corresponden a los mecanismos focales según la Figura 12 (mecanismos compuestos).



Figura 21. Interpretación sismotectónica del sismo del 1 de octubre de 2005 y de su serie de replicas ocurridas en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Las esferas indican mecanismos focales de tipo extensión y corresponden a las Figuras 11 y 12: PRI, sismo principal; REP1-2, replicas mayores; D16-19, replicas ocurridas entre los días 16 y 19 de octubre 2005..

escarpa de aproximadamente 10 metros con buzamiento en dirección SE y con claras evidencias de haber soportado recientes procesos extensivos. Las coordenadas GPS tomadas sobre la traza de falla a lo largo de aproximadamente 1.5 km, han sido proyectadas en la Figura 21 en donde se muestra además, las replicas y los mecanismos focales para el sismo principal, replicas mayores y series de replicas para los días del 16 al 19 de octubre. La proyección en dirección NO y SE de la traza de la falla Ticsani, permite suponer que estuvo asociada al proceso de deformación superficial producido en la región durante el mes de octubre de 2005 (Figura 22). En la sección vertical de la Figura 23 se observa que todas las replicas se encuentran por debajo del volcán siguiendo un aparente alineamiento que se iniciaría en la traza de la falla "Ticsani" con una inclinación del orden de 35° , confirmado a partir de los mecanismos focales. En dicha sección, las flechas sugieren el tipo de deformación; es decir, el bloque en el cual se encuentra el volcán habría descendido en dirección SE, coherente con lo observado en superficie. Las replicas alcanzan profundidades del orden de 12 km, estando la mayor deformación por encima de los 7.5 km alrededor del epicentro del sismo principal; además, parte de estas replicas podrían haberse producido por deformación de la estructura volcánica.

Asimismo, durante el mes de octubre de 2005 diferentes instituciones como el INGEMMET, INDECI y la UNSA de Arequipa realizaron trabajos de campo a fin de evaluar in situ el comportamiento del volcán Ticsani considerando una posible erupción, de esta última el Ing. V. Aguilar durante el mismo mes visitó las localidades afectadas y áreas aledañas al volcán llegando a identificar la presencia de importantes trazas de posibles fallas que se habrían reactivado durante la ocurrencia del sismo del 1 de octubre, 2005. Por ejemplo, sobre la ladera del volcán en su extremo NO, se ha identificado la existencia de una traza de aproximadamente 500 metros con orientación NE-SO y con claras



Figura 22. Imagen que muestra la traza de falla Ticsani identificada en campo. Abajo, roca ubicada a 20 metros de la falla en dirección SE que ha sido removida por el sismo del 1 de octubre de 2005 (Fotos: O. Macedo).

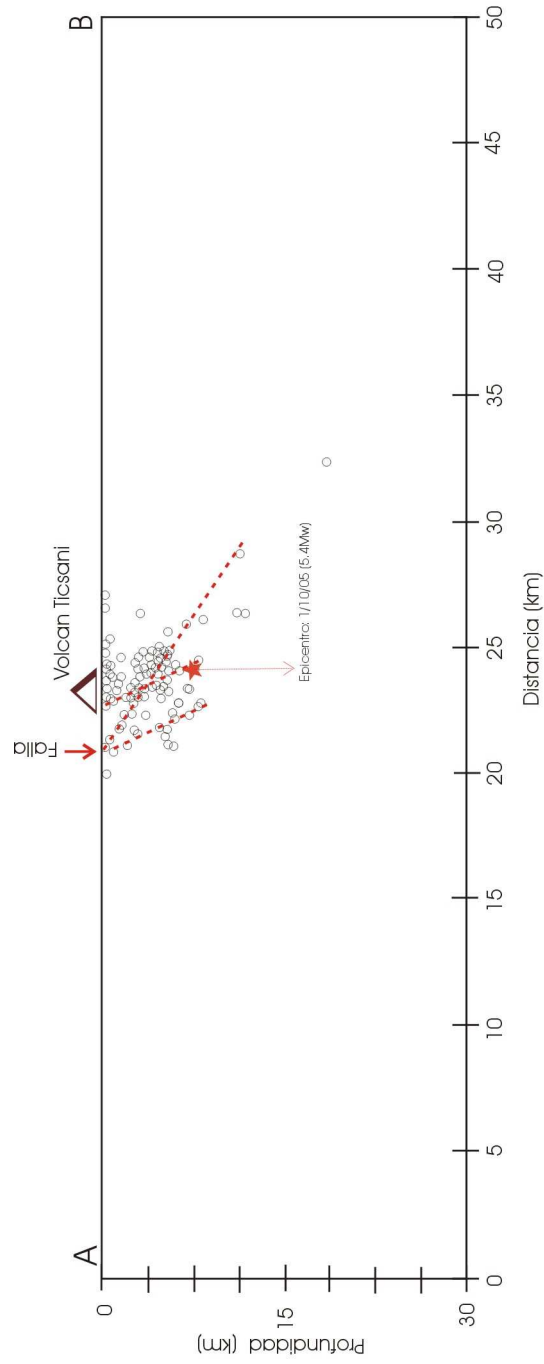


Figura 23. Sección vertical de la sismicidad ocurrida en la región de volcán Ticsani durante el periodo del 16 al 19 de octubre, 2005. La estrella indica el epicentro del sismo del 1 de octubre de 2005 (5.4Mw). Las líneas discontinuas indican posibles trazas de falla.

evidencias de haber experimentado un proceso de extensión en dirección NO-SE; es decir, prácticamente perpendicular a la traza de la falla "Ticsani". Sobre dicha traza de falla a la que llamaremos "Ticsani Domo", Aguilar realiza tres medidas equidistantes de GPS que proyectados sobre la Figura 24 se observa lo siguiente: una traza de falla que sugiere desplazamientos del orden de 15 cm, siendo el bloque en el cual se encuentra el volcán quien habría descendido. En el extremo NE de la imagen se observa claro desnivel que sugiere antiguos desplazamientos extensionales para esta falla. Del mismo modo, sobre la traza de la falla conocida como Calacoa (ubicada al NO del volcán Ticsani), V. Aguilar (comunicación personal) identifica un tramo de aproximadamente 2 km de longitud con evidencias (traza de falla) de haberse reactivado con el sismo del 1 de octubre de 2005 y sobre la cual realizó seis medidas de GPS. En la Figura 24 se ha proyectado dichas medidas, además de una imagen de falla con orientación NE-SO. Sobre la imagen es posible identificar el desarrollo de procesos extensivos en dirección NO-SE, siendo el bloque del extremo SE quien habría descendido con desplazamientos del orden de 20 cm. En general, estos resultados sugieren que durante la ocurrencia del sismo del 1 de octubre de 2005 y de su serie de réplicas, además de reactivarse la falla "Ticsani", también se han reactivado otros sistemas como las fallas Calacoa y "Ticsani Domo" mostrando el desarrollo y la existencia en la zona de un complejo sistema de deformación (Figura 25).

Estudios sobre interpretación de imágenes satelitales realizados por L. Audin (comunicación personal) han permitido identificar en el área de estudio la existencia de lineamientos y trazas de posibles fallas con orientaciones NO-SE y E-O. Una de las trazas de falla presenta una forma de "L" invertida y su parte inferior se prolongaría por el extremo occidental del volcán Ticsani coincidiendo con la traza de la falla "Ticsani" reconocida en el campo (Figura 26); por lo

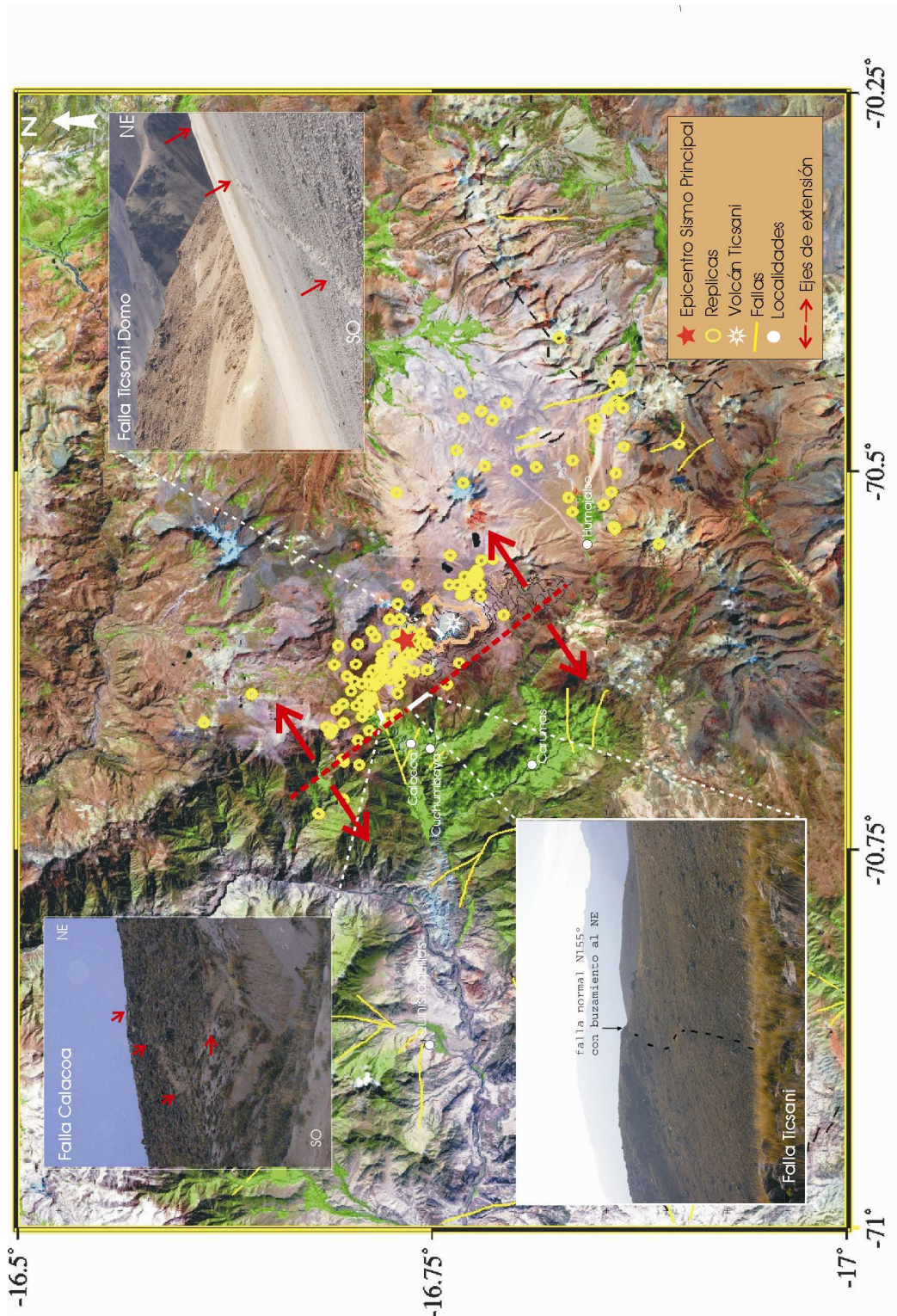


Figura 24. Correlación entre el sismo del 1 de octubre 2005, su serie de réplicas y las principales trazas de falla identificadas en campo por V. Aguilar (UNSA) y O. Macedo (IGP-Arequipa). Las flechas sobre las fotos indican la traza de las fallas.

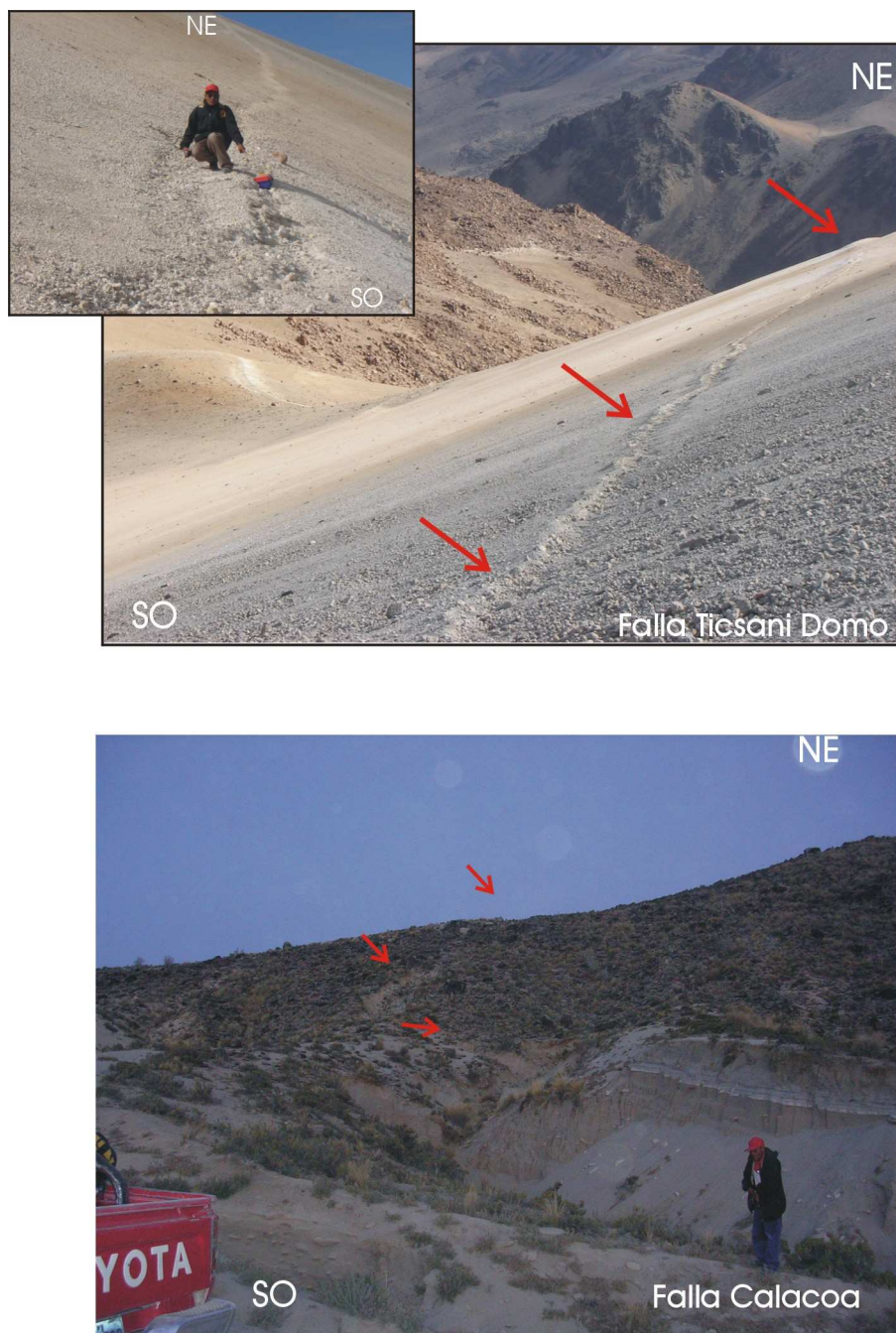


Figura 25. Imágenes que muestran las trazas de las fallas Ticsani Domo y Calacoa reactivadas por el sismo del 1 de octubre de 2005 (Fotos: V. Aguilar)

tanto, se confirmaría que dicha falla es de tipo regional. Del mismo modo, resultados preliminares obtenidos por González et al (2006) para los volcanes Ubinas y Ticsani a partir de estudios de interferometría muestran características importantes (Figura 26). Para el volcán Ubinas las imágenes de interferometría sugieren que no existió deformación cortical durante el proceso eruptivo freatomagmático de dicho volcán (abril y mayo de 2006) debido a que la acumulación de esfuerzos de deformación fue mínima al tener el volcán su cráter prácticamente abierto. Contrariamente, en el volcán Ticsani las imágenes de interferometría muestran las típicas franjas que describen el desarrollo de importante deformación cortical. Si la deformación es producida por fuerzas de cizalla (sismos), las franjas de deformación se distribuirían en forma de cuatro lóbulos separados por dos líneas perpendiculares entre si, y una de estas líneas correspondería a la traza de la falla. En el caso de la falla "Ticsani" (Figura 26), el lóbulo del extremo NE es mayor que los restantes y sugiere que el área de mayor deformación correspondería al bloque de la falla que ha descendido y muestra en superficie una línea divisoria con orientación 150°N , similar a la orientación de la traza de la falla "Ticsani". Según González et al (2006), en el área se habrían producido procesos de deformación extensional con desplazamientos en dirección NE del orden de 10 cm.

Los resultados obtenidos en este estudio, sumados a las observaciones de campo y a los obtenidos de manera preliminar por diversos autores, permiten afirmar que durante el mes de octubre de 2005, en la región del volcán Ticsani se desarrolló un proceso de deformación netamente cortical debido a la esfuerzos extensionales que reactivaron varios de los sistemas de fallas activas presentes en la región. Por lo tanto, se descarta la eventual erupción del volcán Ticsani.

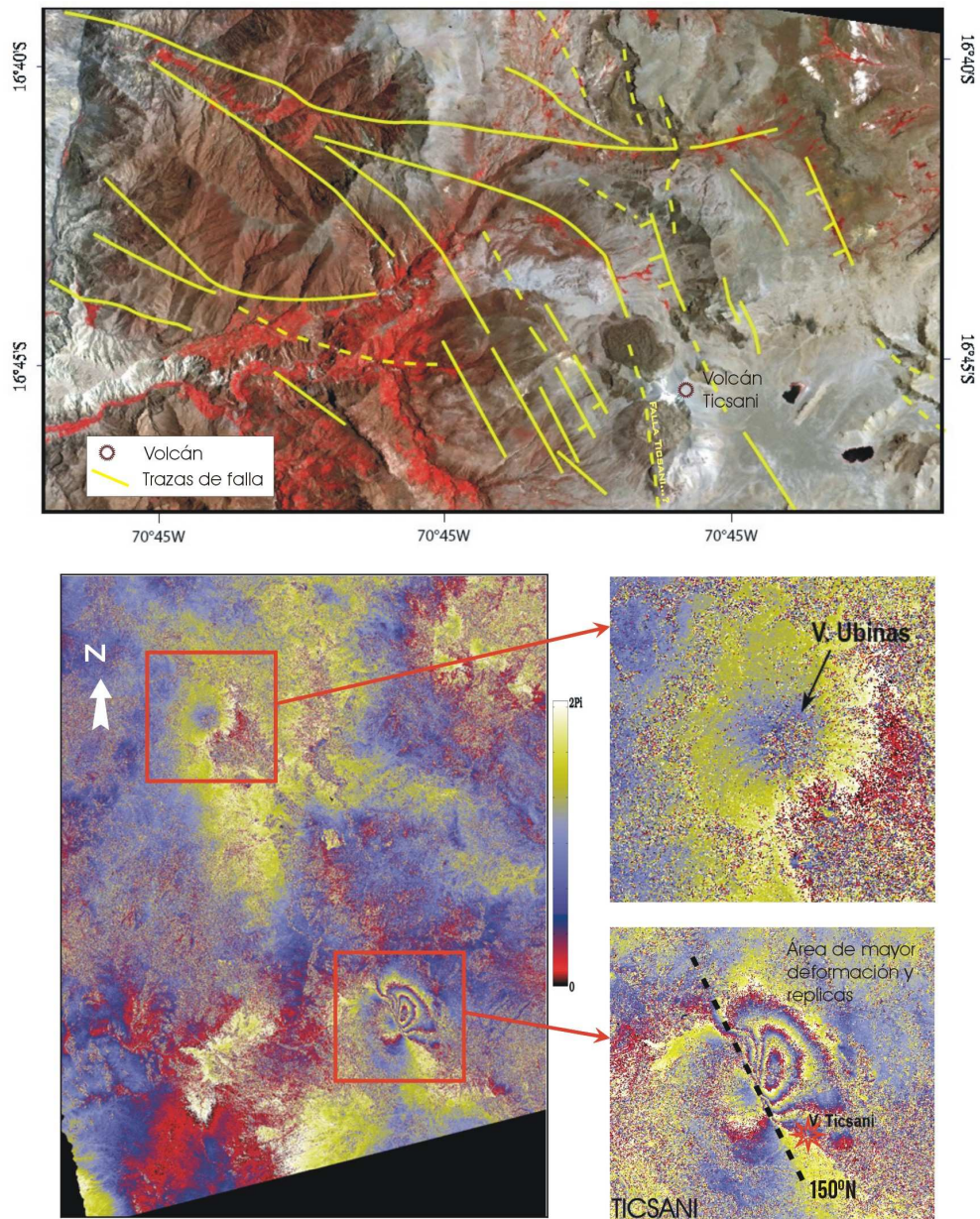


Figura 26. En la imagen de la parte superior de muestra trazas de fallas identificadas en la región del volcán Ticsani a partir de imágenes satelitales (L. Audin, comunicación personal) y en la que se observa la falla Ticsani. En la parte inferior, resultados de los estudios de interferometría de radar realizados en los volcanes Ubinas y Ticsani por González et al (2006). Observese la distribución y orientación de la "curvas de deformación" sobre el volcán Ticsani, las mismas que sugieren deformación por ostensión asociada a una posible falla con orientación 150°N.

8.- CONCLUSIONES

Durante el mes de octubre de 2005, la región del volcán Ticsani soporto durante un periodo de 30 días, la ocurrencia de un gran número de sismos de diversas magnitudes que siguieron a otro de magnitud moderada ocurrido el 1 de octubre de 2005 (5.4Mw). Inicialmente, al estar el volcán Ticsani en el centro del área de ocurrencia de sismos, los pobladores de las localidades aledañas a dicho volcán, asumieron la idea de que este se encontraría en un eventual proceso eruptivo. Disminuido el número de sismos y a la fecha, el volcán Ticsani no ha presentado síntomas de reactivación.

Los estudios preliminares realizados por investigadores del Instituto Geofísico del Perú y otros afines (CISMID, UNSA), indicaban que la ocurrencia de sismos en la región del volcán Ticsani se debía a deformaciones corticales asociados a la presencia de fallas geológicas. Estas apreciaciones resultaban válidas al comprobarse la existencia de un gran número de trazas de fallas alrededor del volcán, así como la ausencia de anomalías y/o indicadores de posibles procesos eruptivos como la deformación del cráter, emisión de fumarolas y explosiones volcánicas. Únicamente los reportes del INGEMMET indicaban sobre el incremento en el número de géiseres a lo largo de la quebrada del río Tambo, así como el incremento en la presión y temperatura de los mismos (Cruz et al, 2006), lo cual puede considerarse como normal si toda la región soporta importantes procesos de deformación superficial y mas aun si ella se concentra en el extremo NO del volcán; es decir, sobre la quebrada del río Tambo. Los movimientos sísmicos pudieron producir el cierre o incremento de los conductos por donde circula el agua termal, la facturación de las rocas facilitando el brote del agua o el incremento de aguas frescas a través de las

fallas a las fuentes termales produciendo el incremento o disminución de la temperatura.

Desde el punto de vista geológico (Mariño et al, 2006), se ha identificado la ocurrencia de caída de rocas con diámetros de hasta 6 metros, derrumbes y deslizamientos en áreas donde las laderas fueron cortadas para la construcción de carreteras (Calacoa-San Cristóbal) y canales de agua para abastecer a Calacoa, Bellavista y San Cristóbal. Resultados obtenidos por el CISMID han permitido conocer que mas del 90% de las viviendas de los poblados de Calacoa, San Cristóbal, Cuchumbaya, Sacuaya y Crumas, son construcciones de adobe sin reforzamiento estructural, de uno o dos pisos, auto construidas, con cimientos de piedra y barro; además, en su mayoría las viviendas tienen mas de 30 años de antigüedad. Según Lazares et al (2006), el análisis de los registros de aceleración obtenidos en la estación Calacoa, ha permitido identificar un periodo dominante de 0.1 segundo con aceleraciones espectrales de hasta 200 cm/seg². Según el autor, este periodo de oscilación corresponde a las viviendas de adobe (típicas de la zona), lo cual produciría en ellas efectos de resonancia.

La explotación de información sísmica de buena calidad obtenida de una red local y temporal instalada alrededor del volcán Ticsani, ha permitido conocer en detalle parte del proceso de deformación que se desarrolló en dicha región durante todo el mes de octubre de 2005. Estos resultados correlacionados con los datos recolectados de las observaciones de campo y con los obtenidos por otros autores, han permitido finalmente asegurar que en la región del volcán Ticsani se ha producido importante deformación cortical debido a la reactivación de algunos sistemas de fallas. El detalle de las conclusiones es como sigue:

.- El sismo del 1 de octubre de 2005 y su serie de réplicas se distribuyen sobre el volcán Ticsani siguiendo un alineamiento NO-SE, estando los epicentros del sismo principal y del mayor número de réplicas ubicados en el extremo NO del volcán. Estos sismos tuvieron su origen en la reactivación de una falla regional que se ubica, en dirección SO, a 2.5 km de distancia del volcán. La falla denominada en este estudio como "Ticsani" tendría una orientación 155° N y buzamiento de 35° en dirección SE. De acuerdo a la distribución espacial de las réplicas, la falla tendría al menos una profundidad de 12 km.

.- La existencia de la falla "Ticsani" ha sido confirmada con observaciones de campo realizados cerca del volcán, con imágenes satelitales y con estudios preliminares de interferometría (L. Audin, comunicación personal; Gonzales et al., 2006).

.- El proceso de deformación local puesto en evidencia con la ocurrencia de sismos fue de tipo extensional y con ejes T orientados en dirección NE-SO (falla Ticsani). Fallas secundarias presentaron el mismo tipo de deformación pero en dirección NO-SE (fallas Calacoa y Ticsani Domo); es decir, perpendicular a la falla Ticsani.

.- De acuerdo a la distribución espacial de las réplicas, la mayor deformación local se ha producido en el extremo NO del volcán Ticsani, lo cual es coherente con la ubicación de las trazas de fallas reconocidas en el terreno y estudios de imágenes satelitales e interferometría.

.- Durante el mes de octubre del 2005, la crisis sísmica de la región del volcán Ticsani se debió a procesos de deformación cortical y no a la posible deformación del volcán Ticsani previos a una erupción. Los volcanes Ticsani,

Huaynaputina y Ubinas se encuentran distribuidos a lo largo de un importante sistema de fallas que aun están activas.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al personal de la Jefatura de Redes Geofísicas del IGP por su inmediata disponibilidad para la instalación, operación y mantenimiento de la red sísmica local en el volcán Ticsani. Al personal del Centro Nacional de Datos Geofísicos - Sismología del IGP por la labor realizada en el análisis y lectura de los datos registrados por la red sísmica local.

A los Drs. Laurence Audin, Jean-Philippe Metaxian, Jose Machare, Orlando Macedo, a la MsC. Isabel Bernal, a los Ings. Victor Aguilar y Katherine Gonzáles por sus comentarios y sugerencias recibidas durante el desarrollo del presente estudio. A las autoridades y población en general de las localidades afectadas por el sismo del 1 de octubre del 2005, por la ayuda brindada durante el desarrollo de los trabajos de campo.

El trabajo de campo y las tareas realizadas inherentes a este estudio fueron subvencionados por el Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú (INDECI) según Resolución Jefatural N°039-2006-INDECI como parte de los proyectos incluidos en el "PROGRAMA DE PREVENCIÓN Y REHABILITACION".

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar V., Tavera H., Bernal I. y Palza H (2001): Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate-Moquegua) del 6 de Mayo de 1999. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. V91, 69-80.
- Bernal I. y Tavera H. (2002): Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú. Monografía, Instituto Geofísico del Perú, 64 pag.
- Brune J. (1970): Tectonics stress and seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
- Bufo E., Coca, P., Udias A. y Lasa C. (1996): Source mechanism of intermediate and deep earthquake in southern Spain. Journal Seismology, 1, 113-130.
- CNDG (2002): El terremoto de la región sur de Perú del 23 de Junio de 2001. Editor, H. Tavera, Instituto Geofísico del Perú, Lima-Perú, 422 pag.
- Cruz, V., Aguilar, V., y Rivera M. (2006): Evaluación de las fuentes termales localizadas en áreas aledañas del Ticsani. . En Crisis Sísmica de Calacoa (Moquegua) Octubre-2005. Informe Multi-institucional, Editores: Rivera, M., Tavera, H., Aguilar, V., Medina, J.. Lima Perú, 55-68p.
- DeMets C., Gordon R., Aargus A. y Stein S. (1990): Current plate motions. Geophys. J. Int., 101, 425-478.
- Dorbath L., Cisternas A. y Dorbath C. (1990): Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. Bull. Seism. Soc. Am., 80, 551-576.
- Dorbath L., Dorbath C., Jimenez E. y Rivera L.(1991): Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and sub-andean zone of central Peru. Jour. of South American Earth Sciences. 4, 13-24.
- Francis P. y Silva S. (1989): Application of the Lansat Thematic Mapper to the identification of potentially active volcanoes: a new satellite technique. Nature, 338: 144-146.

- García W. y Guevara C. (1998): *Geología del cuadrángulo de Huaytiri*. INGEMMET, Mapa en versión digital, Lima.
- Gil-Cruz J. y Chouet M. (1999): Observations of two special kinds of tremors at Galeras volcano Colombia (1989-1991). *Annali di Geofisica*, 43, 3, 437-449.
- Gonzales K., Froger J-L., Rivera M. y Audin L. (2006): Deformación co-sísmica producida por el sismo mb=5.4 del 1 de octubre de 2005 (Carumas-Moquegua), detectada por interferometría radar - INSAR. XIII Congreso Peruano de Geología, Resúmenes extendidos. 488-491.
- Kanamori I. (1977): The energy release in great earthquake. *J. Geophys. Res.*, 82, 2981-2987.
- Klein, F. (1978): Hypocenter location program. U.S. Geological Survey Open Field Report, 78-694 pag.
- Lazares, F., Mariño, J., Rivera, M., Median J., Aguilar Z., Piedra R., Cantoral Y. y Almora J. (2006): Efectos en las Construcciones. En *Crisis Sísmica de Calacoa (Moquegua) Octubre-2005*. Informe Multi-institucional, Editores: Rivera, M., Tavera, H., Aguilar, V., Medina, J. Lima Perú, 40-51p.
- Latter I. (1979): Types and classification of volcanic earthquakes, 1976-1978. Geophysical Division Volcanological Observations at Tongarito National Park. Depart. Scientific and Ind. Res. Report N°150, 60 pag.
- Mariño J. (2002): Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur Perú). Tesis de Ingeniería, UNI, 240 pag.
- Mariño, J., Rivera M., y Cacya, L. (2006): Efectos Geológicos producidos por los sismos. En *Crisis Sísmica de Calacoa (Moquegua) Octubre-2005*. Informe Multi-institucional, Editores: Rivera, M., Tavera, H., Aguilar, V., Medina, J. Lima Perú, 25-39 p.
- Norabuena E., Dixon T. y Stein S. (1999): Deceleration Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3405-3408.
- Ocola L. (1979): La Escala MSK - Versión adaptada para su uso en el Instituto Geofísico del Perú. Informe Interno, IGP, 30 pag.

- Ocola L. (1996): Efectos macrosísmicos del sismo de Nazca del 12 de Noviembre de 1996. Informe Inédito, Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera H. y Buforn E. (2001): Source mechanism of earthquake in Peru. *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- Tavera H., Fernandez E., Bernal I., Antayhua Y. y Agüero C. (2006): The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology*, DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2.
- Zamudio Y. y Parillo R. (2006): Intensidades Sísmicas locales en las localidades de Carumas y Calacoa debido al sismo del 1 de octubre de 2005 (5.3ML). Informe Interno CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú, 25 pag.

ANEXOS

ANEXO 1

ESCALA DE INTENSIDAD MERCALLI MODIFICADA ABREVIADA

GRADO	DESCRIPCION
I	<i>No sentido excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.</i>
II	<i>Sentido solo por muy pocas personas en reposo, especialmente en pisos altos de edificaciones. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.</i>
III	<i>Sentido sensiblemente por personas dentro de edificaciones, especialmente las ubicadas en los pisos superiores. Muchas personas no se dan cuenta que se trata de un sismo. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como las producidas por el paso de un camión. Duración apreciable.</i>
IV	<i>Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos se despiertan. Platos, ventanas, puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.</i>
V	<i>Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento de algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.</i>
VI	<i>Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algunos muebles pesados se mueven y en otros caen. Caída de revestimientos en paredes.</i>
VII	<i>Todo el mundo corre al exterior. Daños significantes en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas. Notado por personas que conducen automóviles.</i>
VIII	<i>Daños leves en estructuras de diseño especial. Daños considerables en edificios sólidos con colapso parcial. Daños grandes en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Conductores en automóviles entorpecidos.</i>
IX	<i>Daños considerables en estructuras de diseño especial. Estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la vertical. Grandes edificios sólidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.</i>
X	<i>Algunos edificios bien construidos en madera destruidos. La mayoría de las estructuras de ladrillo destruidas; suelo muy agrietados. Carriles torcidos. Corrimientos de tierra en las orillas de los ríos y laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro.</i>
XI	<i>Pocas o ninguna obra de albañilería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Carriles muy retorcidos.</i>
XII	<i>Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.</i>

ANEXO 2

ESCALA DE INTENSIDADES MSK

VERSION ADAPTADA I.G.P. 1979

CLASIFICACION USADA EN LA ESCALA

1. **TIPO DE ESTRUCTURAS** (excluye estructuras sismo - resistente)

Tipo A: Bloques de piedra sin tabar; piedras y barro como mortero, adobes. Canto rodado y barro (formando hormigones), tapial ordinario, piedra asentada con trabazones, ladrillo de teja asentado con mortero pobre.

Tipo B: Construcciones de ladrillo sin reforzar y de bloques prefabricados, construcciones de sillar o piedra natural cortada. Estructura de pilares de concreto ó acero.

Tipo C: Edificios reforzados con elementos dúctiles , de acero o de concreto armado. Estructuras de concreto y acero de nudos soldados o empernados, sin consideración especial de simetría. Casas de madera bien diseñadas.

2. **DEFINICIONES DE CANTIDAD**

Algunos, pocos o muy pocos	5%	aproximadamente.
Mucho o muchos	50%	"
La mayor parte o la mayoría	75%	"

3. **CLASIFICACION DE LOS DAÑOS**

Clase 1 Daños Leves

Fisuras en los revestimientos, caídas de pequeños trozos de revoque.

Clase 2 Daños Moderados

Grietas pequeñas en los muros, caída de grandes trozos de revoque, caída de parapetos, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

Clase 3 Daños Severos

Grietas grandes y profundas en los muros caída de chimeneas.

Clase 4 Destrucción Parcial

Brechas y grietas en los muros, derrumbamiento parcial de los edificios; agrietamiento entre distintas partes o secciones de las construcciones; desmoronamiento (colapso) de paredes interiores y muros.

Clase 5 Colapso

Destrucción total de las construcciones o de sus partes vitales.

4. **AGRUPAMIENTO DE LOS CRITERIOS DE INTENSIDAD**

- a) Personas y las circunstancias en que perciben el sacudimiento.
- b) Construcciones (estructuras).
- c) Fenómenos naturales.

GRADOS DE INTENSIDAD

1. **IMPERCEPTIBLE**

- a) La intensidad de la vibración está bajo el límite de perceptibilidad humana; el sismo solo se detecta mediante sismógrafos.
- b) (No daño).
- c) (No efectos).

2. **APENAS PERCEPTIBLE** (muy leve)

- a) La vibración es sentida solo por personas en reposo dentro de las casas especialmente por aquellas personas que se encuentran en los pisos superiores.
- b) (No daño).
- c) (No efectos).

3. DEBIL, OBSERVADO SOLO PARCIALMENTE

- a) *Sentido por pocas personas en el interior de los edificios; en el exterior solo en circunstancias favorables. La vibraciones son similares al paso de camiones livianos. Observadores atentos pueden notar pequeñas oscilaciones de los objetos colgados, las cuales son un poco más notorias en los pisos superiores.*
- b) *(no daño).*
- c) *(no efectos).*

4. OBSERVADO POR MUCHOS

- a) *Sentido por muchas personas en el interior, por pocas en el exterior de los edificios. Algunas personas despiertan, pero casi nadie se asusta. La vibración de puertas, ventanas y vajilla. Crujido de pisos y muros. Los muebles comienzan a sacudirse. Los objetos colgantes oscilan. Los líquidos en envases abiertos se agitan levemente. Carro estacionado se mece.*
- b) *(no daño)*
- c) *(no efectos).*

5. LAS PERSONAS DESPIERTAN

- a) *Sentido por todas las personas en el interior, y por muchas personas en el exterior. Algunas personas corren al exterior, los animales se inquietan. Sacudimiento de todo el edificio. Los objetos colgantes oscilan considerablemente. Los cuadros se desvían de posición. Rara vez los relojes de péndulo se detienen. Objetos inestables pueden volcarse o desplazarse. Puertas y ventanas sin seguros se abren y luego se cierran. Los líquidos se derraman en pequeñas cantidades de recipientes abiertos. Las vibraciones son similares a las producidas por un objeto pesado que cayera dentro del edificio.*
- b) *Posibles daños de clase 1 en algunos edificios de tipo A.*
- c) *A veces cambia el flujo de las vertientes.*

6. LAS PERSONAS SE ASUSTAN

- a) *Sentido por la mayoría, tanto en el interior como en el exterior. Muchas personas se asustan en los edificios y corren al exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Los animales domésticos, arrancan de sus establos. En algunos casos puede quebrarse la vajilla y cristalería; y pueden caer libros. Es posible que los muebles pesados se muevan, y pueden sonar campanas pequeñas.*
- b) *Daños de clase 1 en algunos edificios de tipo B y en muchos del tipo A. Algunos edificios del tipo A sufren daños de clase 2.*
- c) *En algunos casos pueden presentarse grietas de hasta 1 cm. de ancho en terrenos húmedos; deslizamientos ocasionales en regiones montañosas. Cambios de flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos.*

7. DAÑOS EN LOS EDIFICIOS

- a) *La mayoría de las personas se asusta y corre hacia el exterior. Muchas encuentran dificultad en sostenerse de pie. La vibración es sentida por personas manejando carros; campanas grandes suenan.*
- b) *Daños de clase 1 en muchos edificios de tipo C; daños de clase 2 en muchos edificios de tipo B; daños de clase 3 en muchos edificios de tipo A, y de clase 4 en algunos de tipo A. En algunos casos se producen deslizamientos en carreteras construidas en topografías de gran pendiente; grietas en las carreteras. Daños en las uniones de las tuberías; grietas en muros de albañilería.*
- c) *Se forman olas en las superficies del agua, y se enturbia debido al lodo del fondo. Cambios en el flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos. En algunos casos las vertientes dejan de correr, o nuevas vertientes aparecen. En casos aislados se deslizan partes de riberas (terrazas de arena o grava).*

8. SEVEROS DAÑOS EN EDIFICIOS

- a) *Susto y pánico; incluso los conductores de vehículos se perturban. Se quiebran algunas ramas de los árboles. Se mueven los muebles pesados, y algunos se vuelcan. Algunas lámparas colgantes se dañan.*
- b) *Muchos edificios de tipo C sufren daños de clase 2, y algunos de clase 3; muchos edificios de tipo B sufren daños de clase 3, y algunos de clase 4; muchos de tipo A sufren daños de clase 4, y algunos de clase 5. Roturas de algunas tuberías. Los monumentos y estatuas se mueven y giran. Las lápidas se vuelcan y caen. Muros de piedra se derrumban.*
- c) *Derrumbes pequeños en las pendientes fuertes de las "bajadas y cuestras" de las carreteras; grietas en el terreno hasta de varios centímetros de ancho. Aparecen nuevas lagunas y manantiales. En muchos casos el flujo de las vertientes y los niveles de agua de los pozos cambian. Se ven olas en la superficie del terreno.*

9. DESTRUCCION PARCIAL DE EDIFICIOS

- a) *Pánico general; daño considerable en los muebles. Los animales corren despavoridos, "gritan", mugen, etc.*
- b) *Muchos edificios de tipo C sufren daños de clase 3, algunos de clase 4; muchos edificios del tipo B muestran daños de clase 4, unos pocos de la clase 5; muchos edificios de tipo A sufren daños de clase 5. Pilares y monumentos se voltean. Daños considerables en los reservorios*

artificiales, algunas tuberías subterráneas se rompen. En casos aislados se doblan o tuercen las líneas ferroviarias y se dañan las carreteras.

10. DESTRUCCION TOTAL DE EDIFICIOS

- b) Muchos edificios de tipo C sufren daños de clase 4, algunos de clase 5; muchos edificios de tipo B sufren daños de clase 5. Los diques y represas sufren daños críticos, y se observan daños severos en los puentes. Las líneas ferroviarias se doblan o tuercen. El pavimento de las carreteras se ondula.*
- c) Se observan grietas en el terreno de hasta varios decímetros, a veces hasta de 1m de ancho. Se producen grietas anchas a lo largo de las riberas de los cursos de agua. Se pueden producir deslizamientos considerables en riberas y costas abruptas. Se producen cambios en el nivel de agua en los pozos; en áreas costaneras desplazamiento de arena y lodo; el agua de los ríos, lagos, canales, etc. se derraman violentamente sobre el terreno vecino.*
- d) Aparecen nuevos lagos.*

11. CATASTROFE

- b) Daños severos incluso en edificios bien construídos, puentes y represas y líneas ferroviarias; las carreteras quedan inservibles, las tuberías subterráneas se destruyen.*
- c) Daños considerables en el terreno debido a grandes grietas, fisuras y desplazamientos, tanto horizontal como vertical; numerosos deslizamientos en terrenos montañosos. Es preciso investigar cuidadosamente los efectos del sismo para determinar la intensidad del sacudimiento.*

12. CAMBIOS EN EL PAISAJE

- b) Graves daños destrucción de todas las estructuras ubicadas sobre o bajo el nivel del suelo.*
- c) Cambia radicalmente la superficie del terreno. Se observan grandes grietas con desplazamientos verticales y horizontales grandes. Desprendimiento de rocas y deslizamiento de las riberas sobre grandes extensiones. Aparecen nuevos lagos y cascadas; los ríos cambian de curso. Es preciso investigar cuidadosamente los efectos del sismo para determinar la intensidad del sacudimiento.*

ANEXO 3

Registros de Eventos Volcánicos

Todo proceso de deformación asociado a volcanes activos se caracteriza por producir diversos tipos de señales en frecuencia y amplitud, de tal forma que estos registros han podido ser clasificados y diferenciados teniendo en cuenta básicamente su contenido frecuencial. En general, y de acuerdo a la Figura A3.1, los procesos de deformación volcánica se inicia con el movimiento del magma dentro del cono volcánico por el incremento de las presiones y temperaturas que traen consigo el aumento del volumen del cráter, el fracturamiento de las rocas que circundan al cono, la producción de ruidos continuos o explosiones que se traducen en la emanación de gases, cenizas y materiales piroclásticos. La ocurrencia unitaria o en conjunto de estos procesos produce diversas señales volcánicas, siendo su clasificación más sencilla y práctica la que considera los siguientes tipos (Figura A3.2):

Señales de Eventos Tectónicos: *Corresponden a eventos provenientes de la fracturación de rocas debido a la intrusión o migración del magma. También por la expansión de los fluidos sometidos a grandes presiones.*

Señales de Periodo Largo: *Señales producidas por la influencia directa de los fluidos dentro del cono volcánico y que producen efectos de resonancia o inestabilidad del magma.*

Señales de Explosiones: *Estas señales caracterizan a 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.*

Señales de Eventos Híbridos: *Corresponden a 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.

Señales de Eventos Tremores: *Este tipo de señales son los que mas caracterizan a los volcanes activos y corresponden a vibraciones continuas que pueden durar horas, días y semanas. En general, proporcionan información de todo el proceso eruptivo del volcán.*

Señales de Eventos Tornillos: *Estas señales frecuentemente preceden a las explosiones o salidas de magma del cono volcánico. Las señales 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.*

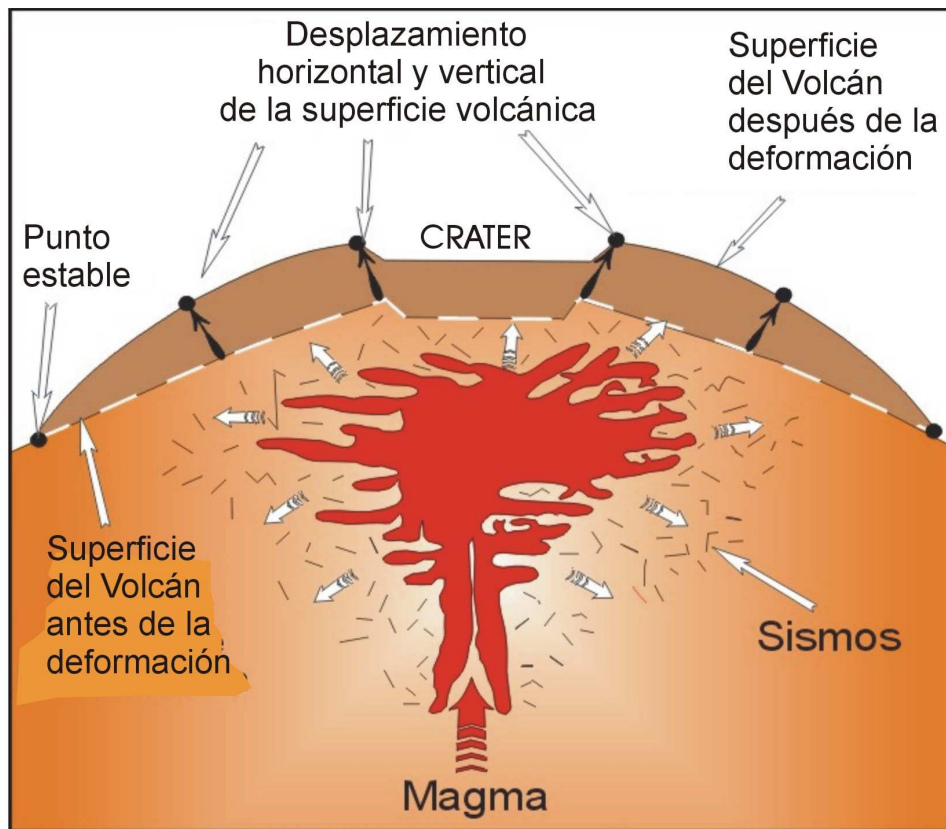


Figura A3.1. Esquema que muestra los principales procesos de deformación que soporta un volcán: incremento de la presión y temperatura por acción del magma, fracturamiento de la cámara magmática y deformación volumétrica del cono volcánico con ocurrencia de sismos.

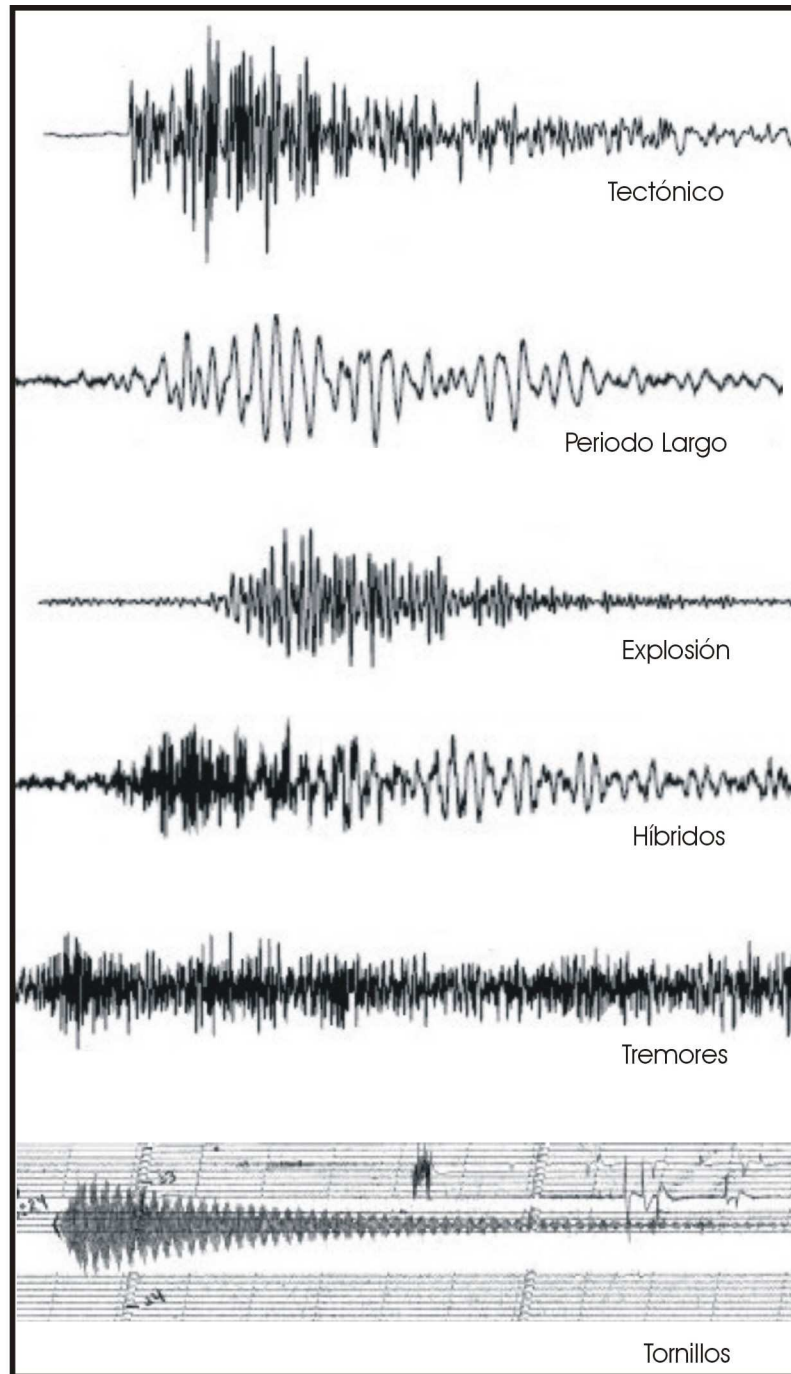


Figura A3.2. Diferentes tipos de señales características que se registran durante el proceso eruptivo de un volcán (Later, 1979; Gil-Cruz y Chouet, 1999).

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU
Calle Badajos N°169, Urb. Mayorazgo, IV Etapa, Ate
Teléfono: 3172300