



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP



INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



Domo reciente del volcán Ticsani, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua

## INFORME VULCANOLÓGICO

# Análisis de la actividad sísmica en el volcán Ticsani y su variación temporal, periodo 1999-2019

Fecha: abril de 2020

2020

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe vulcanológico

IGP/CENVUL-TIC/IV 2020-0001

Análisis de la actividad sísmica en el volcán Ticsani y su variación temporal, periodo 1999-2019

Autores:

John Cruz Igme

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz n.º 169, Mayorazgo, Ate

Teléfono: 51-1-3172300

## RESUMEN

El presente trabajo describe los resultados del análisis de la actividad sísmica del volcán Ticsani registrada en los periodos 1999, 2005 y 2014-2019 por las redes geofísicas del Instituto Geofísico del Perú (IGP). Se ha realizado principalmente el análisis de espectros de frecuencias y formas de onda de las señales sísmicas. Los resultados muestran que entre marzo y mayo de 1999 la región del volcán Ticsani, luego de un importante sismo de magnitud M4.1, presentó actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico (VT) asociada al fracturamiento de rocas y probable actividad de fallas activas presentes en inmediaciones del volcán. En octubre de 2005, también se registró actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico (VT), asociada al fracturamiento de rocas. El cálculo de parámetros hipocentrales para 241 sismos muestra eventos próximos a este macizo volcánico que alcanzaron profundidades de hasta 15 km. En la campaña temporal de 2006, se logró identificar alrededor de 511 sismos de tipo Volcano-Tectónico o de fractura en esta región. Finalmente, para el periodo 2014-2019 se ha realizado el cálculo de parámetros hipocentrales para 10 221 sismos de tipo Volcano-Tectónico; se observó sismicidad recurrente, principalmente bajo el domo reciente del volcán Ticsani y en el sector E y SE, entre los 5 km y 14 km del cráter, que alcanzaron magnitudes de hasta M4.4 y profundidades de hasta 20 km bajo de la superficie. El modo de ocurrencia de esta sismicidad se presenta principalmente en forma de enjambres sísmicos con duraciones de hasta 24 horas, tal como se observó el 30 de marzo de 2016.

Una característica peculiar del Ticsani es la presencia de sismos de tipo Híbrido que, en ocasiones, llegan a ser registrados por otras redes geofísicas del IGP que operan en los volcanes Misti y Coropuna, localizadas a más de 150 km de distancia, tal como se observó el 26 de febrero de 2019. La ocurrencia de sismos de tipo Híbrido en esta región probablemente está relacionada con el ascenso de magma hacia zonas próximas a la superficie. Este estudio propone que la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico se debe a la presión de fluidos magmáticos (presurización del sistema) que actúa bajo el volcán; estas

presiones pueden ser transmitidas a distancias lejanas del edificio volcánico, lugares donde se registran sismos de tipo Volcano-Tectónico Distales.

En la actualidad, el volcán Ticsani presenta una actividad sísmica por debajo de los niveles observados en 2015 y 2016; sin embargo, no se descarta la posibilidad que presente un incremento en su actividad como se ha observado en años anteriores. Existe también la posibilidad, pero en menor grado, de la ocurrencia de un proceso preeruptivo por ser un volcán activo de alto riesgo.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....</b>	<b>8</b>
1.1 UBICACIÓN.....	8
1.2 ACCESIBILIDAD .....	8
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	9
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	9
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	10
<b>CAPÍTULO II: CONTEXTO VULCANOLÓGICO Y RIESGO .....</b>	<b>11</b>
2.1 VULCANISMO EN EL PERÚ.....	11
2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TICSANI.....	12
2.2.1 <i>Depósitos volcánicos del edificio "Ticsani antiguo"</i> .....	14
2.2.2 <i>Depósitos volcánicos del edificio "Ticsani moderno"</i> .....	14
2.2.3 <i>Marco estructural local del área del volcán Ticsani</i> .....	16
2.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO .....	18
<b>CAPITULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>20</b>
3.1 REDES SÍSMICAS .....	20
3.1.1 <i>Red de monitoreo temporal 1999</i> .....	20
3.1.2 <i>Red de monitoreo temporal 2005</i> .....	22
3.1.3 <i>Red de monitoreo temporal 2006</i> .....	23
3.1.4 <i>Red de monitoreo temporal y permanente 2014-2019</i> .....	24
3.2 METODOLOGÍA.....	26
3.3 CATÁLOGOS DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA.....	27
3.4 CÁLCULO DE LA ENERGÍA SÍSMICA .....	27
3.5 CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL.....	28
3.6 RELACIÓN DE VELOCIDADES (VP/VS) .....	28
3.7 MODELO DE VELOCIDADES.....	29
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL VOLCÁN TICSANI .....</b>	<b>33</b>

4.1	TIPO DE SEÑALES SÍSMICAS REGISTRADAS EN LA ZONA DEL VOLCÁN TICSANI.....	33
4.1.1	<i>Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT)</i> .....	33
4.1.2	<i>Sismos de tipo Largo Periodo (LP)</i> .....	35
4.1.3	<i>Sismos de tipo Tremor</i> .....	36
4.1.4	<i>Sismos de tipo Híbrido</i> .....	37
4.2	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 1999 .....	38
4.3	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 2005 .....	39
4.4	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 2006 .....	41
4.5	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA DESDE 2014-2019.....	42
4.5.1	<i>Estadística de eventos sismovolcánicos</i> .....	42
4.5.2	<i>Distribución espacial de sismos de tipo Volcano-Tectónico</i> .....	45
4.5.3	<i>Enjambres sísmicos</i> .....	50
4.5.4	<i>Mecanismos focales</i> .....	52
	<b>CAPITULO V: DISCUSIONES .....</b>	<b>55</b>
5.1	APARICIÓN Y RECURRENCIA DE NUEVOS FOCOS SÍSMICOS .....	55
5.2	MODO DE OCURRENCIA DE SISMOS DE TIPO VOLCANO-TECTÓNICO (ENJAMBRES).....	59
5.3	SISMICIDAD DE MUY BAJAS FRECUENCIAS DE TIPO HÍBRIDO .....	61
5.4	LA ACTIVIDAD SÍSMICA VERSUS LA DINÁMICA INTERNA DEL VOLCÁN TICSANI .....	63
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>68</b>

## INTRODUCCIÓN

El volcán Ticsani está ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua; es uno de los ocho volcanes activos del sur peruano, perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC). Está constituido por un complejo de domos de lavas de composición andesítica a dacítica albergado dentro de una caldera de avalancha. La más reciente erupción del volcán Ticsani, que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 2 y 3 (Siebert et al., 2010), ocurrió hace menos de 400 años. Según los estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) (Mariño, 2002; Mariño y Thouret, 2003), esta última erupción explosiva de tipo freatomagmática pudo haber presentado una columna eruptiva de hasta 10 km de altura, cuyas pómez fueron dispersadas en dirección noroeste del volcán. Aparentemente, esta erupción precedió la formación del domo reciente, denominado "domo D3" (Mariño y Thouret, 2003), visible en el sector norte del Ticsani.

A la fecha de realización de este informe, el volcán no solamente muestra una actividad fumarólica visible en varios puntos cercanos a su cima y domo reciente, sino también una actividad sísmica notable y recurrente. En efecto, desde 1999, en la zona del volcán Ticsani ha ocurrido sismicidad importante probablemente asociada a la actividad de fallas activas (Aguilar et al., 1999; Tavera, 2006). Desde finales de 2015 hasta mediados de 2016, fueron registrados mediante la red telemétrica miles de sismos, eventos sentidos incluso por la población asentada en áreas aledañas. Asimismo, en la zona se observa una importante actividad hidrotermal representada por surgentes de agua y vapor en un radio menor a 10 km, donde destacan las fuentes termales distribuidas a lo largo del río Putina, situado al noroeste del edificio volcánico.

En el presente informe se presentan los resultados de los estudios de sismicidad que el IGP ha efectuado en la región del volcán Ticsani durante los años 1999, 2005, 2006 y el periodo 2014-2019.

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## 1.1 UBICACIÓN

El volcán Ticsani ( $16^{\circ}45' S$ ;  $70^{\circ} 36' O$ ; 5408 m s.n.m.) se ubica a 60 km al NE de la ciudad de Moquegua (Figura 1). Políticamente, este volcán se ubica en la jurisdicción del distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua. Los centros poblados más importantes de la zona como Soquesane, Quebaya, Calacoa, San Cristobal, Carumas y Cambrune se encuentran dentro de un radio de 11 km al oeste del volcán Ticsani, siendo Soquezane el más cercano al volcán, localizado a 7.5 km del domo reciente.

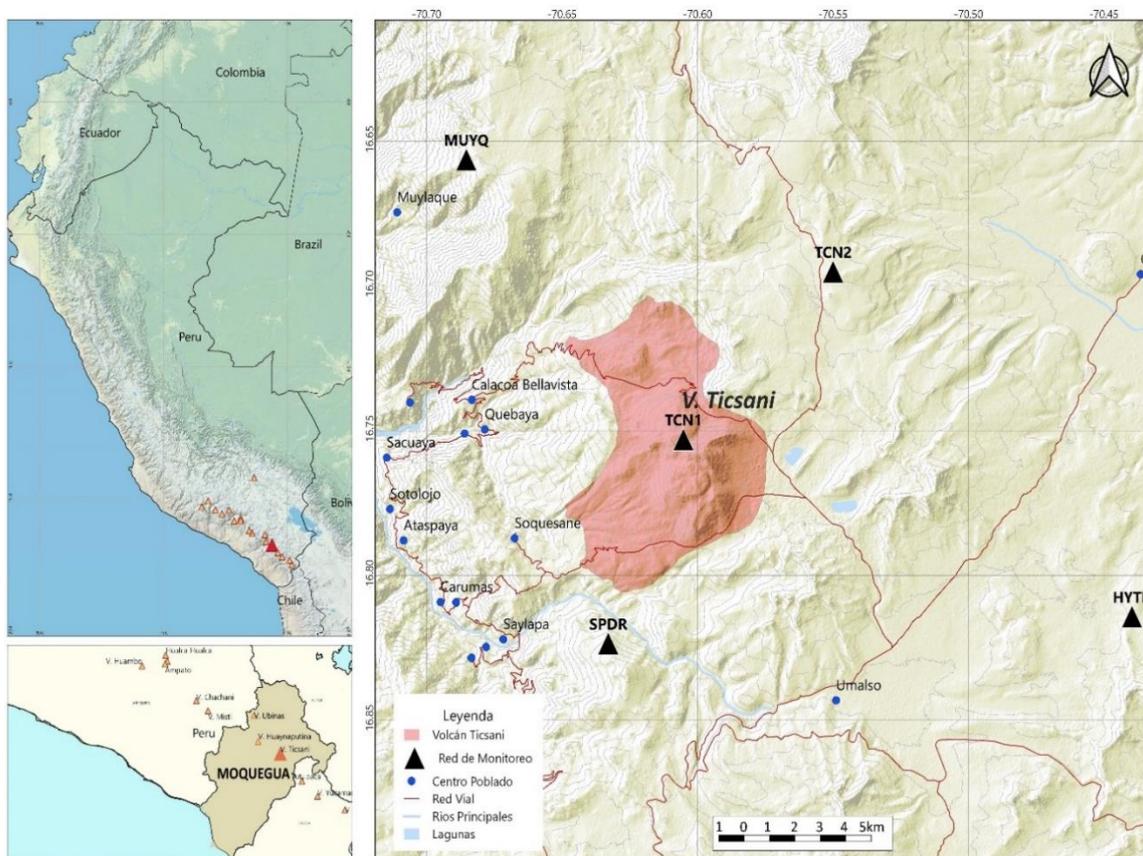


Figura 1.- Mapa de ubicación del volcán Ticsani localizado en la región Moquegua, sur del Perú. En el mapa principal, el triángulo negro señala la ubicación del volcán Ticsani.

## 1.2 ACCESIBILIDAD

Existen varias vías de acceso hacia las inmediaciones del volcán Ticsani, aunque en los tramos finales se constituyen en trochas carrozables que, en épocas de lluvia, se hacen

intransitables. Para llegar al volcán Ticsani se considera como principal vía de acceso la carretera asfaltada Ilo-Desaguadero que pasa por Moquegua y los centros poblados Torata, Chillihua hasta Humajalso. En Humajalso, se toma un desvío hacia el norte que constituye la carretera afirmada Humajalso-Ticsani-Calacoa que pasa por el flanco este del volcán Ticsani, punto en el cual se toma un ramal de trocha que llega hasta el domo reciente "D3". Otra opción es tomar la carretera asfaltada Ilo-Desaguadero hasta el cruce de las carreteras Moquegua-Carumas y seguir la vía afirmada que pasa por las localidades de Sacuaya, Quebaya y Calacoa.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Conocer el tipo de la actividad sismovolcánica registrada por las redes geofísicas del Instituto Geofísico del Perú en el área del volcán Ticsani durante los periodos 1999, 2005, 2006 y 2014-2019, además de establecer algún tipo de relación con la actividad volcánica para el pronóstico de erupciones con fines de prevención y/o mitigación de desastres.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Identificar y caracterizar la actividad sismovolcánica del volcán Ticsani a partir de sus formas de onda y contenido espectral mediante datos recabados provenientes de campañas temporales y de su red telemétrica.
- Proponer un modelo de velocidades mediante la inversión del tiempo de arribo de la onda P para el cálculo de parámetros de localización de los sismos de la región del volcán Ticsani.
- Realizar cálculos para identificar la ubicación de las fuentes de los sismos de tipo Volcano-Tectónico y eventos asociados al movimiento de fluidos en superficie y profundidad.
- Analizar los focos de sismicidad, los esfuerzos predominantes, sismicidad de bajas frecuencias y su asociación al movimiento de fluidos magmáticos.

- Encontrar el patrón sísmico asociado a un modelo que explique el estado actual de actividad del volcán Ticsani.

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Según Macedo et al., (2016), el volcán Ticsani es considerado como un volcán de alto riesgo, ya que su última erupción ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010; Mariño y Thouret, 2003) y existen más de seis poblados localizados a menos de 15 km del volcán. Además, en las últimas décadas viene presentando una actividad sísmica persistente, tal como fue observado en los años 1999 (Aguilar et al., 2001), 2005 (Tavera, 2006) y 2014 (Cruz et al., 2018). Asimismo, presenta constantes emisiones de gases y un sistema hidrotermal activo y poco profundo según los trabajos efectuado por Byrdina et al., (2013), evidenciado por la presencia de abundantes fuentes termales distribuidas a lo largo de quebradas situadas al NO, E y SO del volcán, en un radio de 9 km.

Ante un eventual proceso eruptivo de este volcán están expuestos al peligro diversos distritos aledaños y sus infraestructuras: Carumas (2366 habitantes), Cuchumbaya (761 habitantes) y San Cristóbal (1736 habitantes), cuyos pueblos principales se encuentran ubicados en un radio menor a 12 km del volcán Ticsani (INEI, 2018). Es por esta razón que es importante conocer con mayor precisión su nivel de actividad y los procesos dinámicos que ocurren en su interior, ya que al considerarse al Ticsani como un sistema cerrado existe una mayor probabilidad de generarse una erupción explosiva que afectaría las localidades próximas. Este informe constituye una herramienta importante para el pronóstico de erupción del Ticsani, así como para la gestión del riesgo de desastres.

## **CAPÍTULO II: CONTEXTO VULCANOLÓGICO Y RIESGO**

### **2.1 VULCANISMO EN EL PERÚ**

La subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana genera la producción de magmas, el emplazamiento de volcanes y, por ende, la existencia de un arco volcánico del Pleistoceno-Holoceno en el sur del Perú. Estos volcanes se alinean según una dirección NO-SE y forman el segmento norte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; de Silva y Francis, 1991). En zonas de subducción, debido a su baja densidad, el nuevo magma proveniente del manto de la Tierra asciende hasta la superficie aprovechando zonas de debilidad (zonas de fracturas, fallas), para después almacenarse en cámaras magmáticas desde donde son emitidas en forma de erupciones volcánicas.

Actualmente, la dirección de convergencia entre la placa de Nazca y la Sudamericana es N78°E, con una velocidad de 5-7 cm/año (Somoza, 1998; Norabuena et al., 1999). Este arco volcánico Pliocuaternal de 1000 km de largo es de naturaleza calcoalcalina con predominancia de andesitas, aunque es común encontrar magmas mucho más silíceos (Delacour et al., 2007; Mamani et al., 2008).

Una característica importante de los volcanes ligados a procesos de subducción, como es el caso de los volcanes peruanos, es que su magma, por lo general, es viscoso y contiene importantes volúmenes de gas, lo cual hace que las erupciones sean altamente explosivas. Estas condiciones hacen que las erupciones generadas por los volcanes peruanos sean muy peligrosas.

En el sur del Perú se han identificado 16 estructuras volcánicas catalogadas como activas y potencialmente activas: Cerro Auquihuato, Sara Sara, Quimsachata, Coropuna, Andahua, Huambo, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, Casiri y Cerros Purupuruni (De Silva & Francis, 1991; Macedo et al., 2016; Siebert et al., 2010), (Figura 2). Todas ellas están distribuidas entre las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna. De estos volcanes, al menos 6 han experimentado actividad histórica posterior a la conquista española (i.e. posterior a 1532 d. C.).

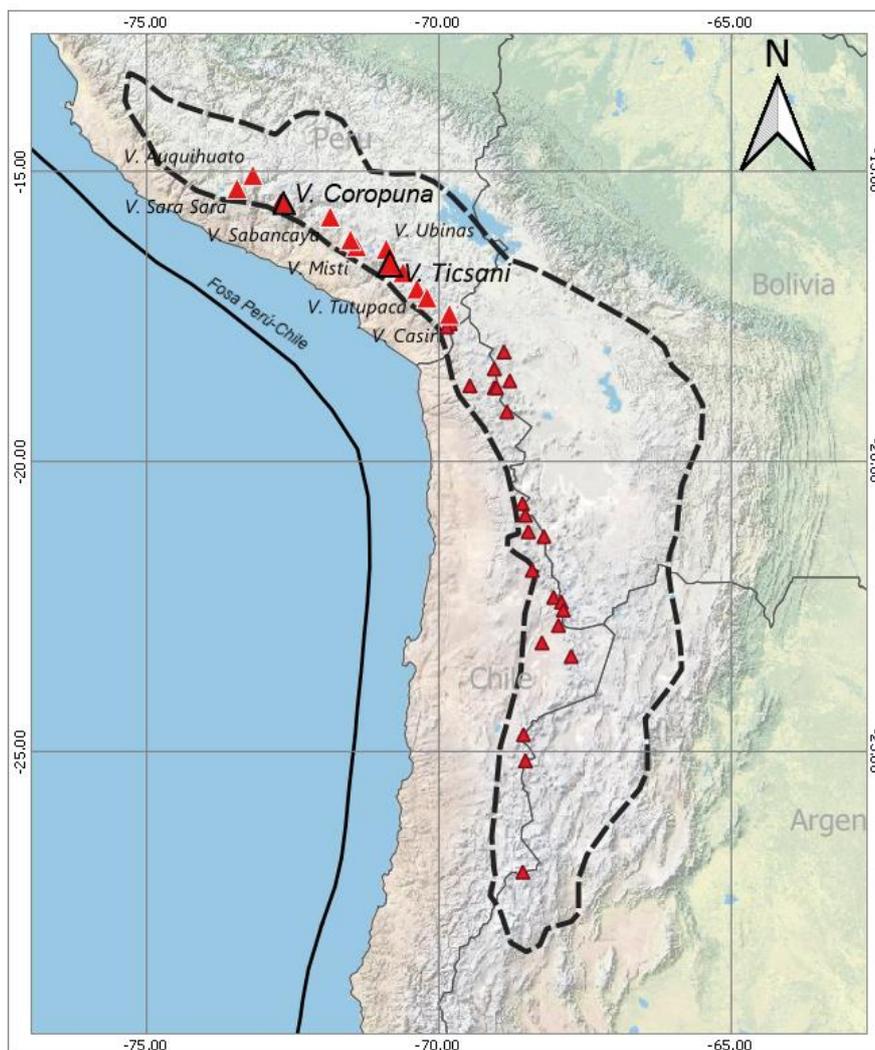


Figura 0.- Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) donde se ubica en el volcán Ticsani (De Silva & Francis, 1991).

## 2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TICSANI

El volcán Ticsani está constituido de un complejo de domos de lava y flujos de lava que se halla emplazado sobre lavas andesíticas y dacíticas del Mioceno (Mariño y Thouret, 2003). Estas últimas cubren secuencias volcano-sedimentarias del Cretáceo medio a superior (Volcánico Matalaque y Grupo Toquepala), sedimentos clásticos continentales del Paleógeno (Formación Pichu) e ignimbritas riolíticas del Mioceno medio pertenecientes a la formación Huaylillas (García & Guevara, 1998) (Figura 3).

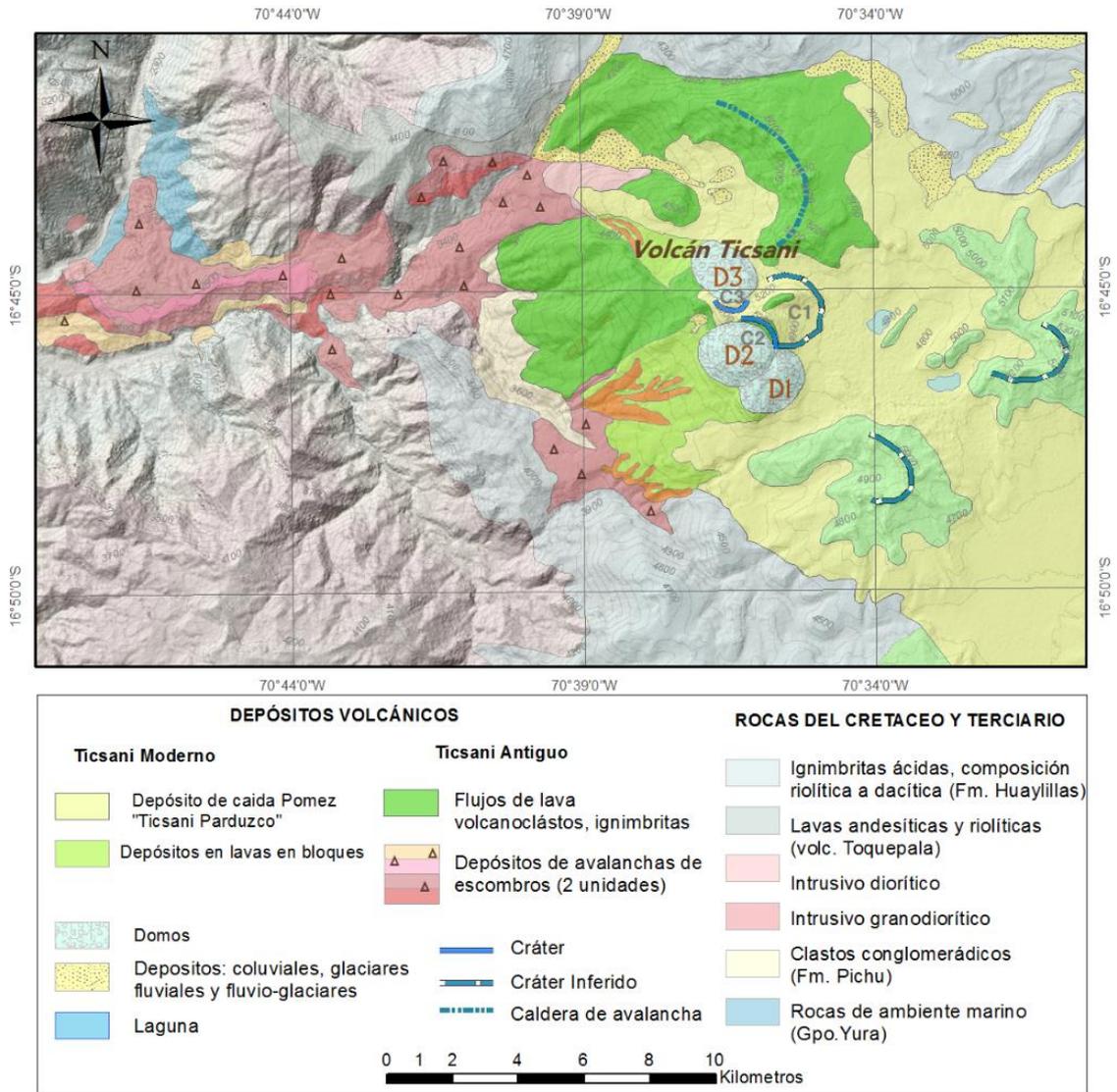


Figura 3.- Mapa geológico del volcán Ticsani y alrededores (modificado de Mariño, 2002).

El macizo volcánico está conformado de un complejo de domos, donde resaltan tres de ellos que están localizados al interior de una caldera de avalancha en forma de herradura originada por el colapso del edificio denominado "Ticsani antiguo" (Figuras 3 y 4). En medio de los domos "D1" y "D2" se distinguen tres cráteres: el cráter más reciente (C3) tiene 500 m de diámetro y tiene forma de media luna, puesto que sus extremos norte y noroeste están ocupados por el domo D3 (Mariño, 2002).

Según estudios geológicos efectuados por Mariño y Thouret (2003), el volcán Ticsani ha presentado dos etapas de evolución denominados "Ticsani antiguo" y "Ticsani moderno".

### **2.2.1 Depósitos volcánicos del edificio “Ticsani antiguo”**

El edificio “Ticsani antiguo” corresponde a un estratovolcán conformado por flujos de lavas, rocas volcanoclásticas, ignimbritas y depósitos de avalanchas de escombros (Figura 3). Las lavas son de composición andesítica y cubren un área de 65 km<sup>2</sup>, junto con depósitos volcanoclásticos que alcanzan un espesor de 900 m. Se estima que estos se emplazaron entre el Plioceno y el Pleistoceno inferior (Mariño, 2002). Los depósitos de avalanchas de escombros se encuentran emplazados hacia el oeste del Ticsani, con espesores que van desde los 100 m hasta 400 m, originados por el colapso del volcán antiguo. Asimismo, estos cubren alrededor de 70 km<sup>2</sup> con un volumen de 12 km<sup>3</sup>, conformados por fragmentos de roca no consolidadas y fragmentos líticos angulosos a subangulosos, además de facies de matriz y facies de bloques.

### **2.2.2 Depósitos volcánicos del edificio “Ticsani moderno”**

**a) Lavas en bloques, cumulo domos y domos coladas.** En el Ticsani se distinguen tres domos denominados D1, D2 y D3, los cuales se encuentran alineados en dirección N325° (Mariño, 2002). El domo D1 se encuentra en el extremo sureste, es de composición andesítica y de forma elongada de suroeste a noreste. El domo central “D2”, de 2 km de diámetro, es el más voluminoso y está emplazado en el cráter C2. El domo “D3” es el más reciente y está emplazado en el cráter C3; este presenta composición andesítica y mide 1.95 km de largo (Figura 3). Por su parte, las lavas en bloques de composición andesítica afloran al SO y NO de los domos D2 y D3, respectivamente. Las lavas se encuentran sobre ignimbritas, depósitos volcanoclásticos y avalanchas de escombros provenientes del edificio “Ticsani antiguo”.

**b) Flujos piroclásticos de bloques y cenizas.** Estos depósitos se encuentran en los sectores suroeste y noroeste, canalizados en quebradas de poca profundidad (3 m a 30 m) y sobreyacen a depósitos de avalanchas de escombros o lavas en bloque (Mariño, 2002). Estos depósitos fueron

originados por el colapso de domos con una dinámica de emplazamiento semejante a "nubes ardientes" tipo Merapi.

**c) Depósitos de caídas piroclásticas.** En los últimos 11 000 años, se registraron tres erupciones explosivas (freatomagmáticas y subpliniana) con Índices de Explosividad Volcánica de 2 a 4 (Mariño, 2002). Los depósitos emitidos por estas erupciones, según su edad de emplazamiento, son denominados "depósito de lapilli de pómez gris", "depósito de ceniza gris" y "lapilli de pómez parduzco", cada una de ellas precedieron al emplazamiento de los domos "D1", "D2", "D3" y eyectaron hasta  $0.4 \text{ km}^3$  de ceniza y lapilli de pómez.

El depósito de caída de lapilli de pómez "Ticsani gris" es el más importante y voluminoso. Se halla cubriendo los sectores este, sureste y noreste del cráter "C3" (Figura 3). La isópaca de 1 cm de espesor abarca un área de aproximadamente  $806 \text{ km}^2$ , con un volumen de depósito de poco más de  $0,4 \text{ km}^3$  (Mariño J. , 2002). Asimismo, este presenta espesores de hasta 4 m en el sector proximal. La columna eruptiva habría llegado hasta los 17 km de altura con un IEV 4. Dataciones realizadas arrojan una edad mínima de aproximadamente 10 600 años AP. El depósito de caída de ceniza "Ticsani gris" sobreyace al depósito de lapilli de pómez "Ticsani gris" e infrayace al depósito de caída de ceniza de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C. (Thouret et al., 1999). La última erupción de tipo freatomagmática del Ticsani emplazó un depósito de caída de pómez denominado "Ticsani parduzco" que precedió al emplazamiento del domo D3 (posterior a año 1600 d. C.). Esta erupción ocurrió hace menos de 400 años y podría haber presentado una columna eruptiva de hasta 10 km, con un IEV entre 2 y 3 (Mariño, 2002).

En la actualidad, existen fumarolas de manera restringida próximas al volcán y una actividad hidrotermal importante representada por surgentes de agua y vapor que se distribuyen principalmente al noroeste del volcán. También se encuentran algunas fuentes al este y suroeste del volcán en un radio de 9 km.

### **2.2.3 Marco estructural local del área del volcán Ticsani**

Según estudios realizados por Lavallée et al., (2009,) en el área del volcán Ticsani se distinguen estructuras como fallas y fracturas de alcance regional y local. En cuanto a las estructuras de alcance regional se distinguen cuatro sistemas de fallas: 1) Sistemas de fallas con dirección N-S que siguen el graben del río Tambo, delimitado por fallas de tipo normal con orientaciones de 170° a 180°; 2) Sistemas de fallas de dirección NO-SE, principalmente observados en inmediaciones de los volcanes Ubinas y Huaynaputina; 3) Sistemas de fallas de dirección E-O visibles entre los volcanes Huaynaputina y Ticsani. 4) Fallas de dirección NE-SO visibles a 25 km al ENE del volcán Huaynaputina.

Según Lavallée et al., (2009), el volcán Ticsani está ubicado al este del río Tambo, en la intersección de las fallas de rumbos NO-SE, N-S y E-O.

A nivel local, en el volcán Ticsani se distingue un control estructural similar al regional que presenta domos alineados de dirección N-S. Al noreste, presenta escarpas de fallas de dirección N-S, como es el caso de la falla F2 (Figura 4). Se encuentran también fallas antiguas al oeste del volcán Ticsani de orientación NO-SE que afectan rocas del Mesozoico, Paleoceno, Eoceno y Oligoceno.

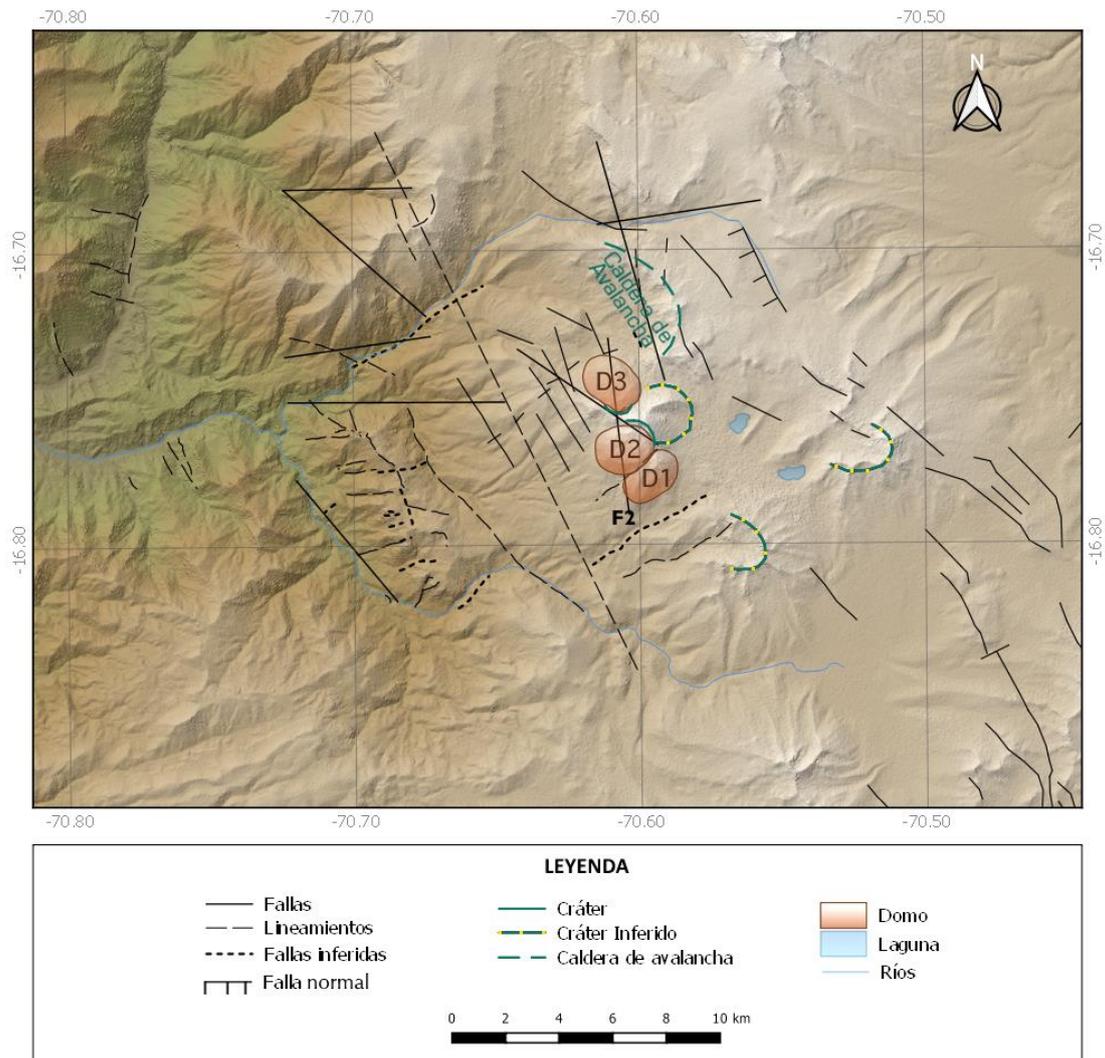


Figura 4.- Estructuras tectónicas y volcánicas locales del área del volcán Ticsani. Imagen modificada de Lavallée et al., (2009); Gonzales (2009) y Carlotto (2009).

## 2.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

El Instituto Geofísico del Perú, en colaboración con instituciones científicas peruanas y el Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP) de los EE.UU., han realizado la Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú (Macedo et al., 2016), la cual consiste en una estimación semicuantitativa orientada a la evaluación objetiva del riesgo volcánico que representa la actividad volcánica a nivel nacional. Este sistema es una adaptación del modelo utilizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) denominado *National Volcano Early Warning System* (NVEWS)

El nivel de riesgo volcánico viene determinado por el producto de los dos puntajes hallados para el peligro volcánico y exposición (vulnerabilidad). Este ejercicio nos proporciona como resultado un valor relativo que representa el "Riesgo Volcánico Relativo" (RVR). Tal valor ofrece un diagnóstico previo que es muy útil para la planificación y la intervención de la política pública.

El riesgo volcánico es calculado en base a la siguiente formulación:

$$\text{RIESGO VOLCÁNICO RELATIVO} = \text{PELIGRO VOLCÁNICO} \times \text{EXPOSICIÓN} \dots\dots(a)$$

Los principales factores de peligro asociados al Ticsani muestran que hace 11 600 años presentó una erupción con IEV 4, en una escala que va del 0 a 8. La última erupción explosiva de tipo freatomagmática ocurrió hace menos de 400 años. Recientemente, en los años 1999, 2005, 2017 registró actividad sísmica recurrente ligada, probablemente, a la actividad de fallas o a una reactivación volcánica. El puntaje acumulado de todos estos factores equivale a 10 de un máximo de 19.

Los factores de exposición relacionados a este volcán detallan principalmente que existen poblaciones importantes en un radio de 20 km del centro volcánico. Además, existe infraestructura energética y de transporte muy próxima al edificio volcánico. Asimismo, en caso de erupción el tráfico aéreo sería muy perjudicado. Por lo tanto, los resultados de exposición por erupción acumulan un total de 13.5 puntos de un máximo de 22.7.

Si aplicamos el producto de ambos factores, tal como indica la formula "a", obtenemos una puntuación total RVR de 135.3. Este resultado concerniente al volcán Ticsani muestra que este macizo presenta un nivel de riesgo alto. Dentro de este mismo nivel de riesgo se encuentran también los volcanes Yucamane, Tutupaca, Huaynaputina y Chachani (Figura 5). En tal sentido, su actividad viene siendo monitoreada por el IGP a través del método sísmico, deformación, visual y sensores remotos.

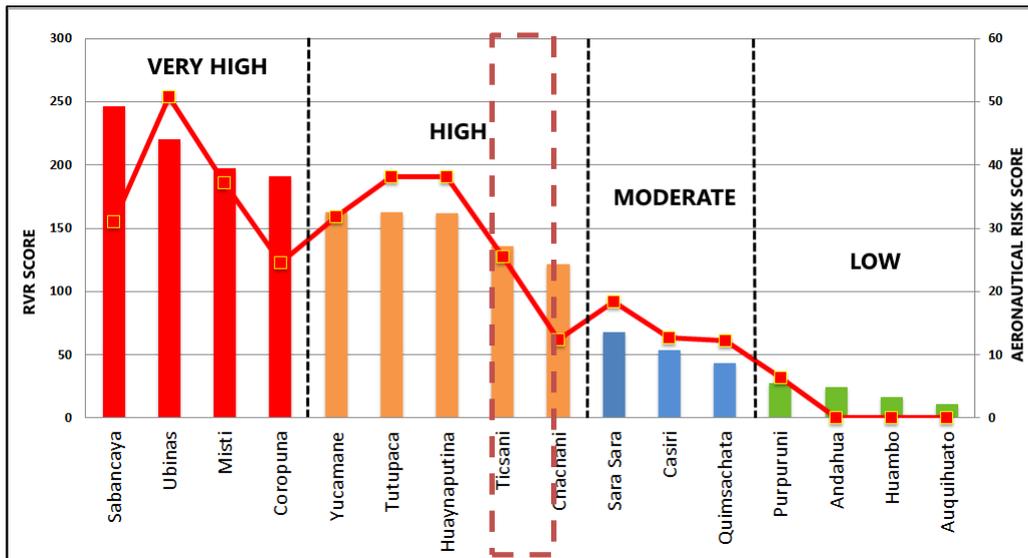


Figura 5.- Categorización de los volcanes según el RVR. Los grupos (Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo). De acuerdo a esta categorización el volcán Ticsani presenta un RVR alto.

## **CAPITULO III: DATOS GEOFÍSICOS Y METODOLOGÍA**

Los datos sismovolcánicos utilizados para el desarrollo de este estudio fueron adquiridos mediante instrumentos sísmicos de gran sensibilidad, los cuales están distribuidos estratégicamente en zonas aledañas al volcán Ticsani. Durante los años 1999, 2005 y 2006 el IGP ha desplegado redes de monitoreo temporales y, desde 2014, este macizo volcánico es monitoreado de manera permanente través de una moderna red de sismómetros cuyos datos adquiridos son recepcionados en tiempo real en las instalaciones del IGP en Arequipa. A continuación, se describen las redes de monitoreo volcánico instaladas en la región del volcán Ticsani en los últimos 20 años.

### **3.1 REDES SÍSMICAS**

#### **3.1.1 Red de monitoreo temporal 1999**

Hasta el año 1999 no se habían instalado equipos sísmicos en la región del volcán Ticsani. El 7 de mayo a las 04:04 UTC, el IGP, mediante su Red Sísmica Nacional, detectó un sismo de magnitud M4.1 a 6.5 km de profundidad, localizado en las coordenadas  $-16.728^{\circ}$ ,  $-70.612$  y situado a 5 km al SSE de la localidad de Calacoa, distrito de San Cristóbal, región Moquegua. Inmediatamente, el IGP, con participación del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IG-UNSA), instalaron en la región del volcán Ticsani tres estaciones portátiles de periodo corto (Figura 6; Tabla 1). Es preciso señalar que la Red Sísmica Nacional opero de manera permanente antes, durante y después de este periodo de crisis, así como los registros sísmicos del IG-UNSA que fueron obtenidos durante los días 12, 13 y 14 de mayo de 1999.

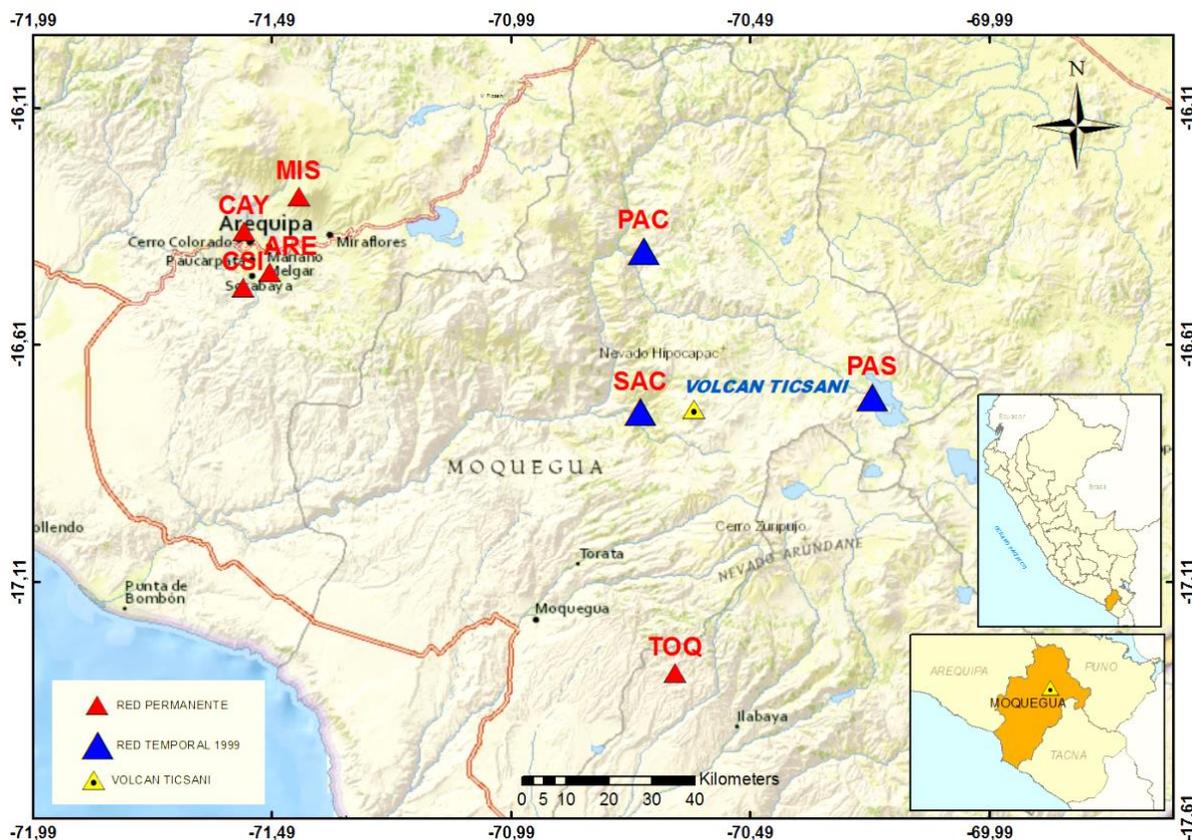


Figura 6.- Distribución de las estaciones sísmicas temporales del IG-UNSA (triángulos azules) y las estaciones permanentes de la Red Sísmica Nacional (RSN) del IGP (triángulos rojos).

RED TICSANI 1999						
ESTACION	CODIGO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		Tipo	Tipo de registro	Institución
Sacuaya	SAC	-16.757°	-70.715°	PS2	Analógico	IGUNSA
Pachas	PAC	-16.416°	-70.707°	PS2	Analógico	IGUNSA
Pasto Grande	PAS	-16.725°	-70.230°	PS2	Analógico	IGUNSA
Arequipa	ARE	-16.462°	-71.491°	Benioff	Analógico 3C	IGUNSA
Toquepala	TOQ	-17.307°	-70.643°	BB	Digital	IGP
Misti	MIS	-16.301°	-71.430°	BB	Digital	IGP
Cayma	CAY	-16.376°	-71.545°	SP	Digital	IGP
Cerro San Ignacio	CSI	-16.494°	-71.547°	SP	Digital	IGP

Tabla 1.- Coordenadas geográficas y características de las estaciones sísmicas temporales y permanentes que funcionaron en 1999.

### 3.1.2 Red de monitoreo temporal 2005

El 1 de octubre de 2005 a las 22:19 UTC, la Red Sísmica Nacional del IGP registró un sismo de magnitud M5.3, localizado a 8 km al este de la localidad de Calacoa, sobre el domo reciente del volcán Ticsani (Tavera, 2006). Este ocurrió a una profundidad de 5.7 km. Luego de doce días de haber ocurrido el sismo y por un periodo de 10 días, es decir del 12 al 22 de octubre de 2005, el Instituto Geofísico del Perú instaló una red sísmica temporal (Figura 7) conformada por cuatro estaciones digitales de banda ancha, constituidas por sensores de tipo Guralp-40T y registradores digitales *Reftek* (24 bits de resolución). En la tabla 2 se muestran las coordenadas de las cuatro estaciones (TIC, PAL, CRM y HMA) y su elevación con respecto al nivel del mar. Los sensores utilizados en esta campaña fueron de banda ancha (0.01 a 50 Hz) y de amplio rango dinámico, capaces de registrar señales de baja frecuencia y no presentar problemas de saturación.

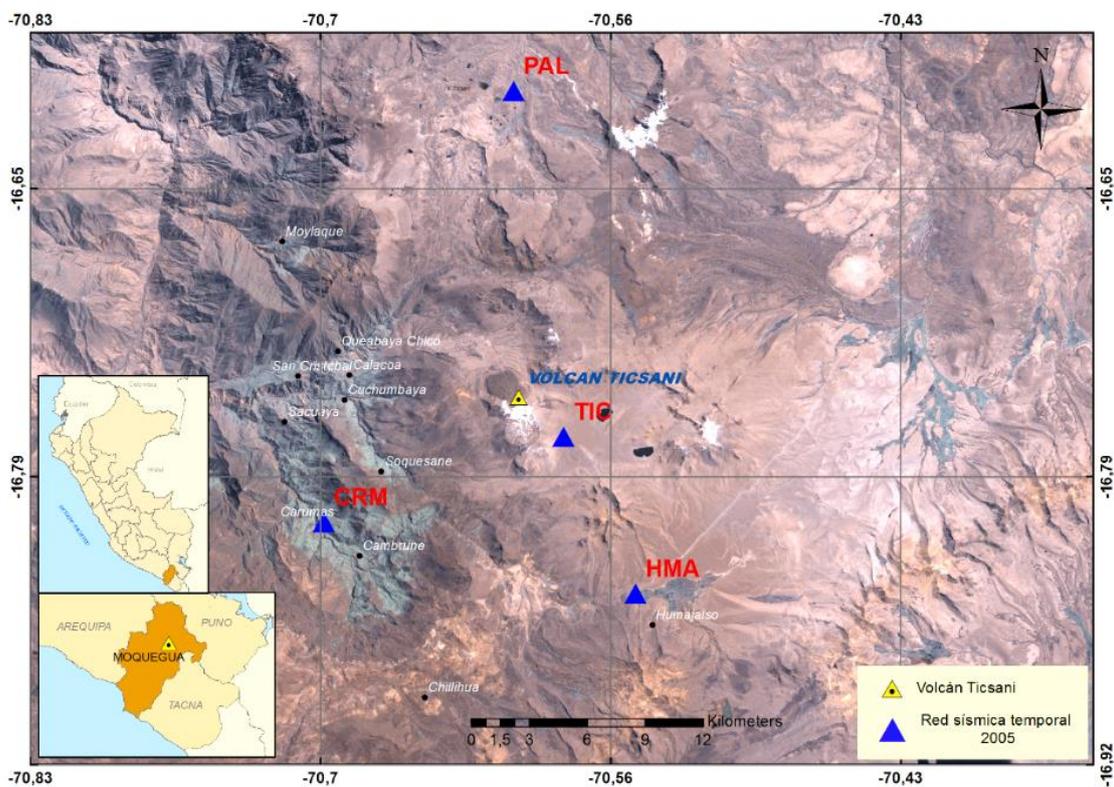


Figura 7.- Distribución de las estaciones sísmicas temporales del IGP (triángulos azules) desplegadas en 2005 en el volcán Ticsani

RED TEMPORAL TICSANI 2005				
Estación	Código	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		Altura (m s.n.m.)
Ticsani	TIC	-70.5831	-16.7695	4805
Pallatea	PAL	-70.6065	-16.6076	4409
Carumas	CRM	-70.6946	-16.8095	3074
Humajalso	HMA	-70.5496	-16.8429	4471

Tabla 2.- Coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas temporales.

### 3.1.3 Red de monitoreo temporal 2006

Entre el 14 de septiembre al 3 de diciembre de 2006, el Instituto Geofísico del Perú instaló siete estaciones sísmicas denominadas TCN, HMA, HTR, PAL, CHT, SCR y CRM, distribuidas en un radio de 30 km alrededor del volcán Ticsani. Una de las estaciones (TCN) estuvo localizada sobre el domo reciente del volcán (Figura 8; Tabla 3). Durante este periodo, las estaciones TCN, HMA y HTR presentaron un buen nivel de funcionamiento; sin embargo, otras no funcionaron adecuadamente debido a falta de energía solar en condiciones meteorológicas desfavorables y por problemas con respecto al tiempo GPS. La ubicación y equipos utilizados se pueden observar en la tabla 3.

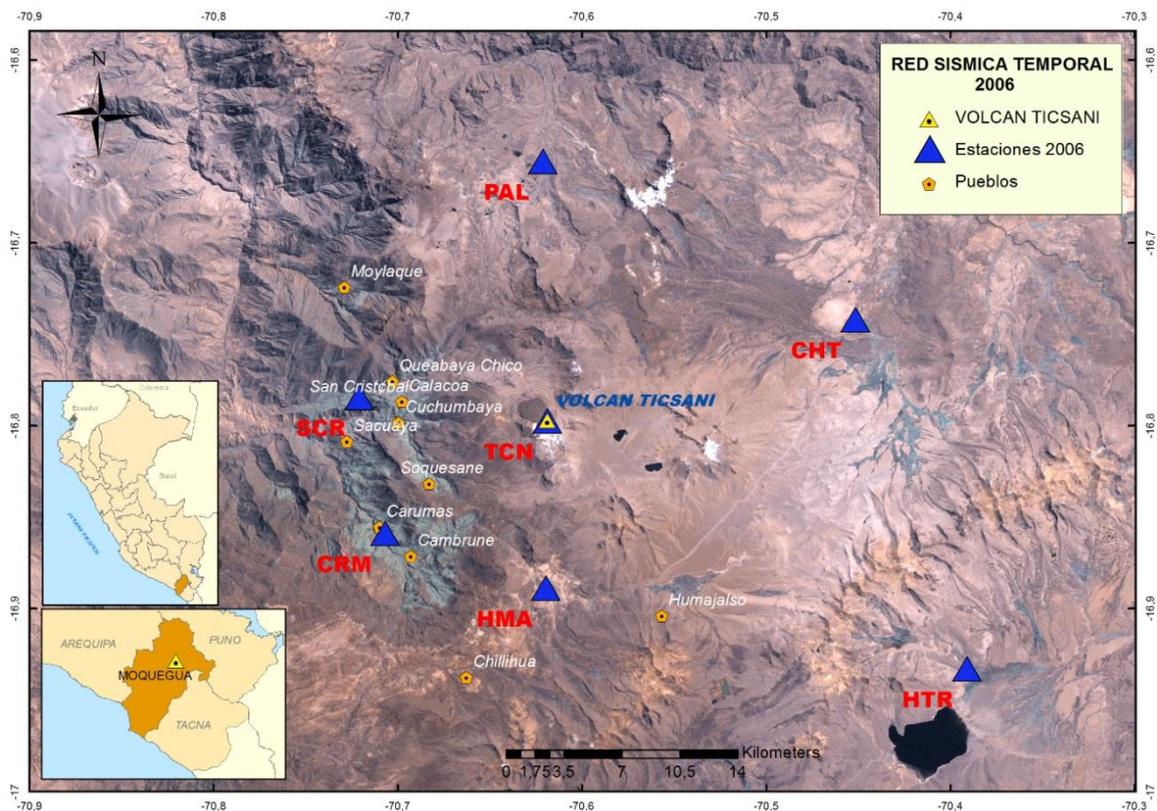


Figura 8.- Distribución de las estaciones sísmicas temporales instaladas por el IGP en 2006 en el área del volcán Ticsani.

RED TICSANI 2006						
ESTACIÓN	CÓDIGO	ESTE (WGS84)	NORTE (WGS84)	ALTURA (msnm)	SISMÓMETRO	
					Marca	Modelo
Ticsani	TCN	329040	8147316	5115	GURALP	T4854
Humajalzo	HMA	329040	8137188	4434	GURALP	T41059
Huaytire	HTR	353439	8132503	4516	GURALP	T4866
Pallatea	PAL	328672	8163003	4391	GURALP	T4862
Chillota	CHT	346847	8153570	4408	GURALP	T4864
San Cristóbal	SCR	318159	8148646	3173	GURALP	T4391
Carumas	CRM	319723	8140438	3131	GURALP	T4865

Tabla 3.- Coordenadas UTM de la red de estaciones sísmicas temporales instaladas en 2006 en inmediaciones del volcán Ticsani. Asimismo, se presentan las características de los sismómetros utilizados.

### 3.1.4 Red de monitoreo temporal y permanente 2014-2019

Desde mayo de 2014, el volcán Ticsani viene siendo monitoreado, inicialmente, por una red de estaciones temporales y, desde agosto de 2015, por una moderna red de estaciones permanentes con sensores de alta sensibilidad,

cuyos datos procesados son transmitidos en tiempo real vía telemetría hacia la ciudad de Arequipa, donde opera el Centro Vulcanológico Nacional CENVUL). Los trabajos de implementación obedecen a las labores de monitoreo de este volcán, así como para el estudio de las características sísmicas observadas ante las posibilidades de una eventual reactivación del volcán. Es importante destacar la distribución de las estaciones sísmicas permanentes; todas obedecen a una apropiada distribución azimutal con una estación central de referencia para la clasificación de sismos "TCN1" (Figuras 9 y 10).

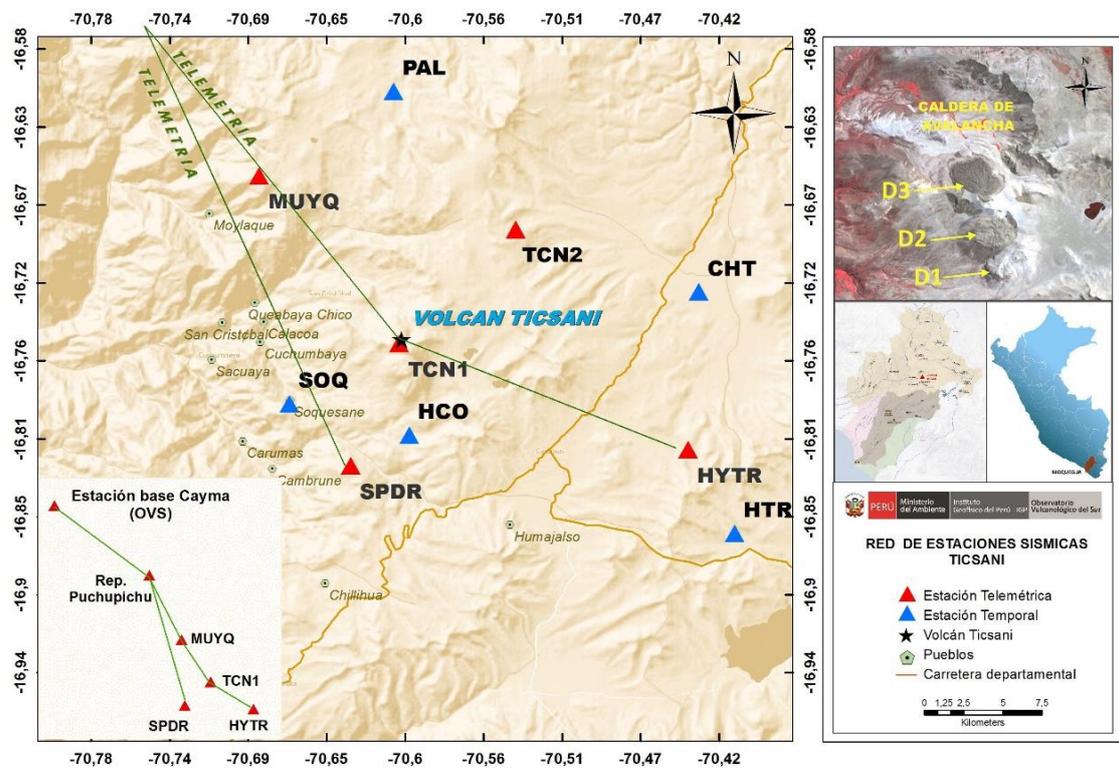


Figura 9.- Distribución de las estaciones temporales (triángulos azules) y permanentes (triángulos rojos) instaladas en la región del volcán Ticsani y sobre el domo reciente.



Figura 10.- Estación sísmica telemétrica para el monitoreo en tiempo real del volcán Ticsani.

### 3.2 METODOLOGÍA

La metodología aplicada en el presente estudio está basada en cinco fases:

- (1) Procesamiento y análisis de las señales sísmicas a partir de la clasificación de tipos de sismos volcánicos, formas de onda y contenido espectral y utilización de las metodologías ya existentes de clasificación de señales e identificación de fuentes sísmicas (Shimozuru, 1971; Minakani, 1974; McNutt, 2000; Chouet, 1996; Ibáñez, 2000).
- (2) Cálculo y análisis de la energía de cada evento sísmico (Johnson & Aster, 2005),
- (3) Cálculo de la magnitud de los eventos clasificados utilizando la duración del sismo y la distancia epicentral.
- (4) Análisis de las fuentes sísmicas, es decir, la localización de sismos usando el algoritmo de *Hypoellipse* (Lahr, 1999) y tomando como base un modelo de velocidades apropiado para la zona y su respectiva relación de velocidades  $V_p/V_s$ .
- (5) Correlación de datos sísmicos con datos obtenidos en campaña anteriores.

### 3.3 CATÁLOGOS DE ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA

Son elaborados a partir de la clasificación y análisis manual de cada tipo de evento sísmico registrado por la red de monitoreo del volcán Ticsani, cuya fuente está localizada al interior del volcán y/o hasta 25 o 30 km del volcán como lo explica el modelo propuesto por White & McCausland (2016). Los catálogos contienen al detalle el tipo de evento, la fecha, hora, frecuencia principal, amplitud pico, duración y energía sísmica del evento. Recientemente, en algunos casos, muestra la magnitud local, desplazamiento reducido, así como las coordenadas y profundidad de los sismos que fueron localizados.

Los catálogos de actividad sismovolcánica son un producto del CENVUL y son publicados anualmente. El análisis efectuado en este informe involucra a los catálogos elaborados desde 2014 con el inicio del monitoreo ininterrumpido del volcán Ticsani hasta octubre de 2019.

### 3.4 CÁLCULO DE LA ENERGÍA SÍSMICA

La energía sísmica está relacionada a la magnitud de un sismo, la magnitud es entendida como la medida del tamaño de un sismo en términos de energía sísmica liberada por la fuente.

Los niveles de energía sísmica liberada en el volcán Ticsani durante el periodo de análisis 2014–2019 han sido calculados con base en la estación de referencia TCN1, estación localizada sobre el volcán Ticsani. El cálculo se formula por integración de la señal sísmica (Johnson & Aster, 2005). La ecuación aplicada fue la siguiente:

$$E_{seismic} = 2\pi r^2 \rho c \frac{1}{A} \int S^2 U(t)^2 dt$$

Donde:

*r*: distancia Fuente - estación

*ρ*: densidad del medio

*c*: velocidad de la onda P

*A: corrección de atenuación*

*S: corrección por respuesta de sitio (estación)*

*U(t): velocidad de partícula*

### **3.5 CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL**

La magnitud Richter de sismos locales pueden ser convenientemente estimada desde la duración de la señal usando una formula empírica:

$$\dot{M} = -0.87 + 2.00 \log(\tau) + 0.0035 \Delta$$

Donde:

*$\dot{M}$ : estimación de la magnitud de Richter.*

*T: duración de la señal en segundos.*

*$\Delta$ : distancia epicentral en kilómetros.*

Esta escala de magnitud fue establecida analizando la relación entre la magnitud Richter, duración de la señal y la distancia epicentral (Lee et al., 1972).

Los cálculos de energía se realizaron para los periodos de 2013 en adelante, ello debido a que se cuenta con la información en formato digital para poder realizar dicho cálculo.

### **3.6 RELACIÓN DE VELOCIDADES (VP/VS)**

En general, todos los algoritmos de localización hipocentral utilizan como modelo de velocidad una distribución de capas planas, donde solo se conoce su espesor y la velocidad de la onda P. A fin de estimar la velocidad de la onda S, los algoritmos de localización consideran la relación teórica  $V_p/V_s = 1.73$ , correspondiente a una Tierra esféricamente homogénea donde la propagación de las ondas se produce en un medio supuestamente conocido. Por lo tanto, para conocer la velocidad de la onda S es necesario utilizar técnicas como la de Wadati & Oki, (1933), que relacionan los tiempos de llegada de las ondas P y S, ambas afectadas por las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Para construir la curva de Wadati para la región de estudio se hizo uso de un total de 3862 lecturas de ondas P y S registradas por la red sísmica del volcán Ticsani durante el 8 de

marzo al 31 de mayo de 2016 (Figura 11). Los valores utilizados en el ajuste corresponden a la diferencia en tiempo existente para cada sismo, entre el valor del tiempo de llegada mínimo con los valores mayores, tanto para la onda P como para la onda S:  $T_s - T_{s\min}$  y  $T_p - T_{p\min}$  (Tavera, 2005). Conocidos estos valores, se ha construido el gráfico de la figura 11, cuyo ajuste de la tendencia sigue una recta con pendiente igual a  $1.6966 \pm 0.085$ , por debajo del teórico ( $V_p/V_s = 1.73$ ).

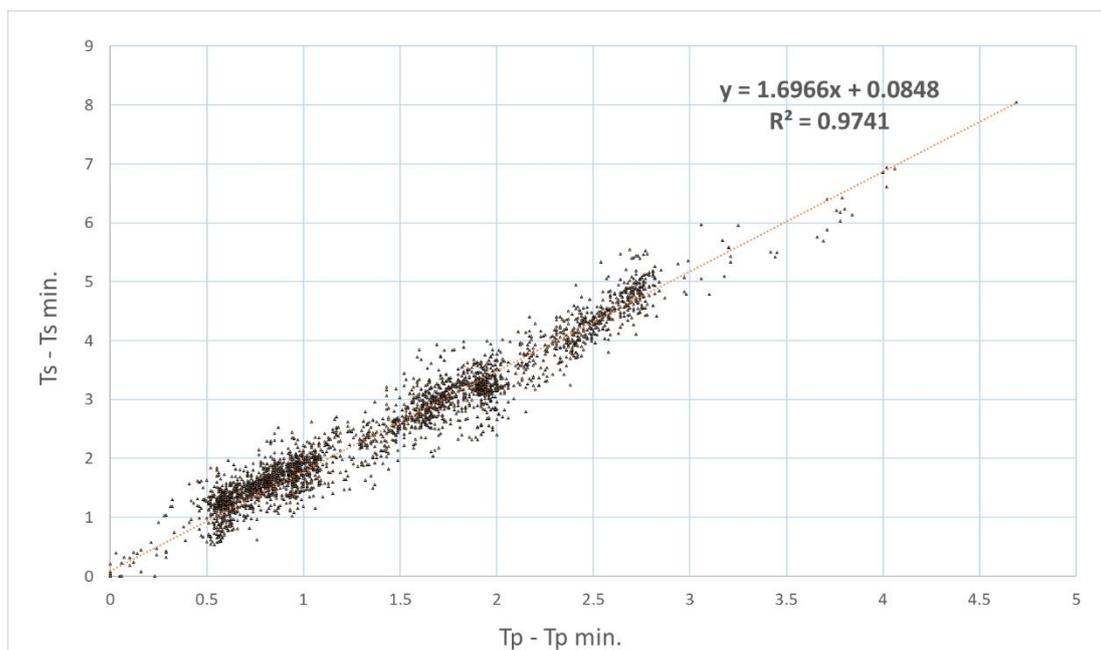


Figura 11.- Curva de Wadati de los sismos ocurridos en la región del volcán Ticsani.  $T_p$  y  $T_s$  son los tiempos de llegada de las ondas P y S, mientras que  $V_p$  y  $V_s$  son las velocidades de las ondas P y S, respectivamente.

### 3.7 MODELO DE VELOCIDADES

Una componente importante para el cálculo de parámetros hipocentrales (localización de eventos sísmicos) es contar con un apropiado modelo de velocidades, pues de esto depende el grado de incertidumbre y aproximación a la realidad de la ubicación de un sismo. El desarrollo de un modelo de velocidad implica la realización de diversas pruebas con una muestra consistente de sismos y algoritmos matemáticos. En el caso del volcán Ticsani se ha utilizado el software VELEST (Kissling et al., 1995), desarrollado por el *Institute of Geophysics, ETH Zuerich*.

Los datos sísmicos utilizados para el cálculo del modelo de velocidades fueron adquiridos entre los años 2014 y 2019; se utilizaron 4245 eventos sísmicos. La selección de la muestra principal estuvo basada en sismos detectados por cuatro o más estaciones sísmicas que tuvieron una apropiada cobertura azimutal ( $GAP < 180^\circ$ ) y fases sísmicas ajustadas a la curva de Wadati. Los modelos de velocidades de referencia utilizados para el cálculo del modelo final fueron el modelo de Dorbath (1991), Grange (1983), Villegas (2019) y Villegas modificado (Cruz, 2016). Los dos primeros corresponden a modelos regionales con un alcance en profundidad de 50 km, mientras que el modelo de Villegas fue desarrollado para la zona sur del Perú.

El modelo de velocidades final (1D) que se ajusta mejor a la zona del volcán Ticsani fue calculado realizando inversiones a 841 eventos sísmicos y presenta 8 capas con un RMS  $< 0.2$ , cuyas velocidades de las capas varían entre 4.04 a 7.88 km/s (Figura 12; Tabla 4). En el cuadro inferior izquierdo de la figura 12 se aprecia el número de eventos utilizados en base a las profundidades que no sobrepasan los 20 km. Por otro lado, la comparación entre las localizaciones realizadas con base en los modelos anteriores y el final muestra una clara mejora que reduce el margen de error en la dislocación, tanto en latitud, longitud y profundidad (Figura 13).

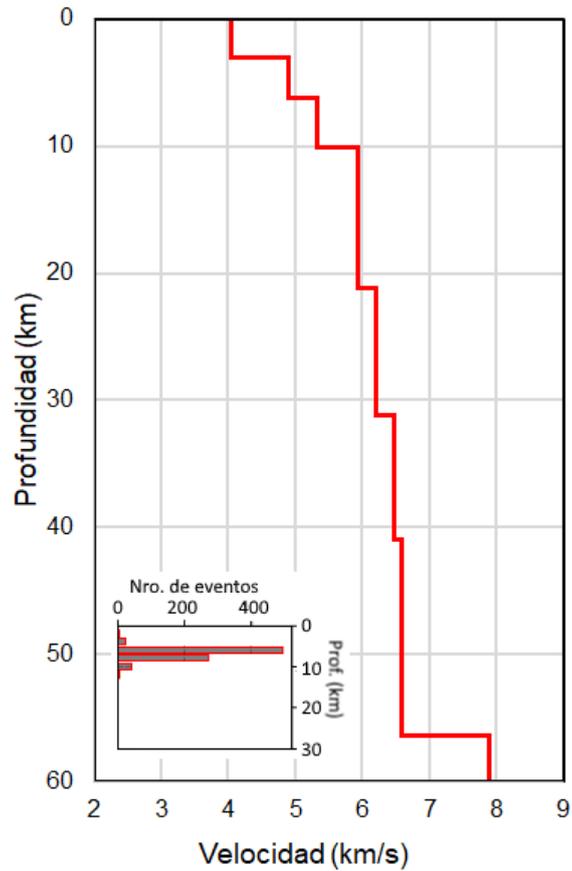


Figura 12.- Modelo de velocidades final obtenido para la zona del volcán Ticsani. En el cuadro inferior izquierdo se muestra el número de eventos utilizados para la obtención de este modelo según la profundidad.

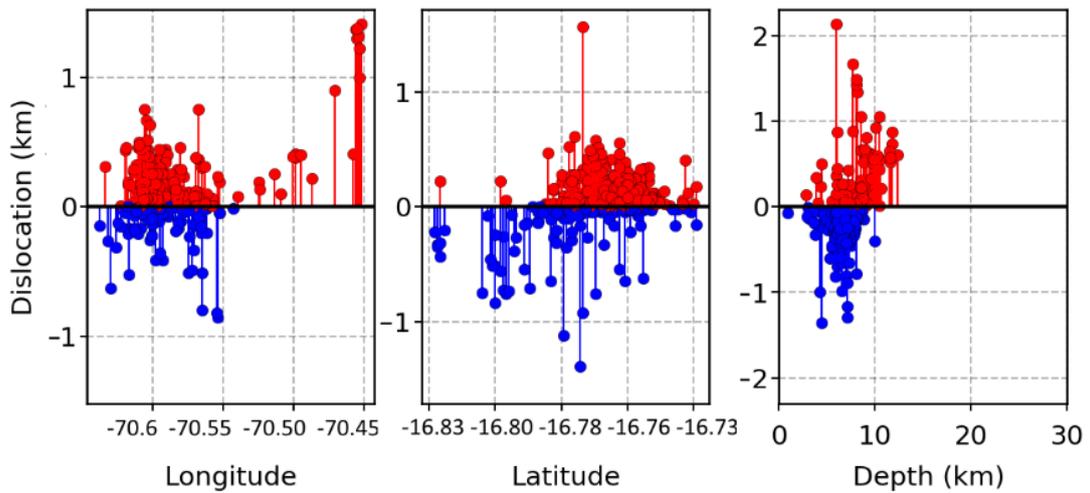


Figura 13.- Disminución de los errores en latitud, longitud y profundidad entre los modelos anteriores (puntos rojos) y el modelo final de velocidades (puntos azules).

VELEST	
Vp (km/s)	Prof (km/s)
4.04	0.0
4.89	3.0
5.33	6.2
5.93	10.1
6.2	21.2
6.5	31.2
6.59	41.0
7.88	56.4

*Tabla 4.- Modelo final de velocidades calculado a partir de algoritmos de Velest (Kissling et al., 1995).*

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL VOLCÁN TICSANI**

Este capítulo presenta la descripción de la actividad sísmica observada en la región del volcán Ticsani desde el año 1999 hasta 2019. Permanentemente, se realiza el análisis espectral y las formas de ondas sísmicas, con lo cual se elaboran los catálogos sísmicos que son publicados de manera anual, información disponible para este estudio. Además, se realiza el análisis temporal y el cálculo de parámetros hipocentrales, los cuales muestran la intensidad de la actividad sísmica y el agrupamiento de los sismos. El análisis del modo de ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (en forma de enjambres) y sismos de tipo Híbrido permite obtener argumentos para las discusiones respecto al origen de la actividad sísmica y su relación con los procesos dinámicos que ocurren al interior del volcán Ticsani.

### **4.1 TIPO DE SEÑALES SÍSMICAS REGISTRADAS EN LA ZONA DEL VOLCÁN TICSANI**

A lo largo de las dos últimas dos décadas en el volcán Ticsani se registran diversas señales sísmicas descritas a continuación:

#### **4.1.1 Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT)**

Los sismos tipo Volcano-Tectónico, relacionados al fracturamiento de rocas, fueron registrados en las proximidades del volcán Ticsani a distancias menores a 6 km del cráter. Este tipo de eventos es muy común en el Ticsani. Similar a ellos, pero situados a distancias de más de 6 km se localizaron eventos de tipo Volcano-Tectónico Distales (VTD). Los sismos de tipo Volcano-Tectónico en el Ticsani presentan, en general, fases de llegada de onda P y onda S muy claras, de tipo impulsivo. Estos eventos tienen una duración promedio de 25 segundos y muestran amplias bandas espectrales con picos que van entre 2 Hz y 16 Hz.

En general, en esta región se ha observado mayor incidencia energética en frecuencias de 6 Hz en promedio. Los sismos de tipo Volcano-Tectónico en el Ticsani presentan una coda con decaimiento en forma exponencial que es la parte final del sismo. En la figura 14 se observa una señal de tipo Volcano-Tectónico Proximal (VTP) detectada por la estación TCN1. Cabe señalar que la diferencia entre los tiempos de arribo de sus fases es menor a 1 segundo.

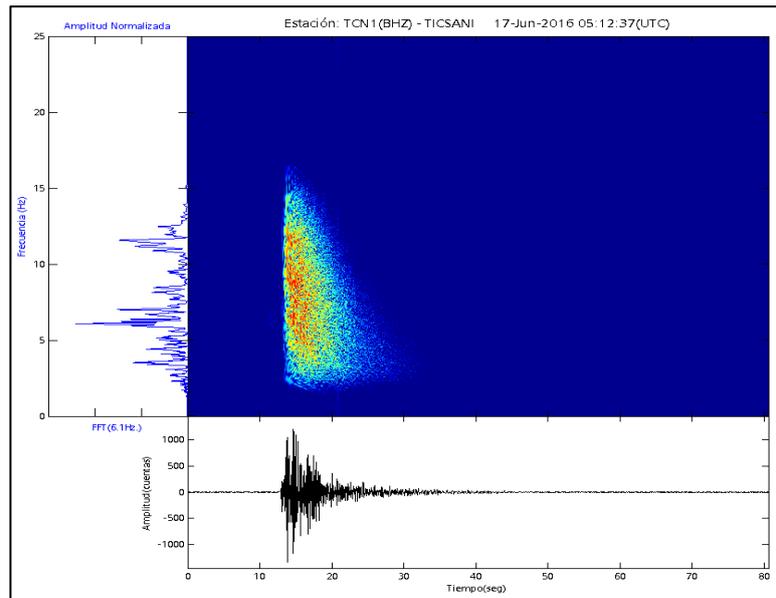


Figura 14.- Ejemplo típico del registro de un sismo de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Ticsani registrado el 17/06/2016 a las 05:12:37 UTC en la estación TCN1, componente Z.

En cuanto a los sismos de tipo Volcano-Tectónico Distantes (VTD), estos también presentan fases P y S claramente distinguibles, aunque su diferencia de tiempos de arribo es mayor respecto a los sismos VT. En la figura 15 se muestra un ejemplo de este tipo de sismo registrado por la estación TCN1 el 11 de julio de 2016 a las 22:01:09 UTC, donde la diferencia entre los tiempos de arribo de las fases P y S es mayor a los 1.2 segundos.

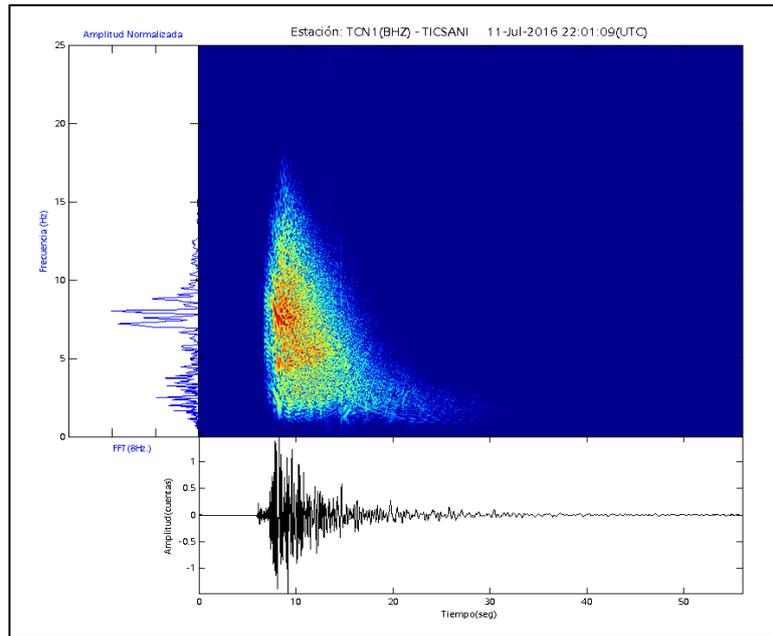


Figura 15.- Ejemplo de sismo de tipo Volcano-Tectónico Distal en el volcán Ticsani registrado el 11/07/2016 a las 22:01:09 UTC por la estación sísmica TCN1, componente Z.

#### 4.1.2 Sismos de tipo Largo Periodo (LP)

El registro de eventos de tipo Largo periodo (LP) o de baja frecuencia constituyen una particularidad propia de los sistemas volcánicos. Estas señales están asociadas al paso o movimiento de fluidos al interior del volcán. En el registro de este tipo de eventos no es posible identificar el inicio de la onda P y S, pues se presentan emergentes. Por lo tanto, son también difíciles de localizar por métodos convencionales. Una característica adicional es que estos eventos presentan un decaimiento lento de su coda.

La figura 16 muestra un ejemplo típico de un evento de baja frecuencia registrado en la estación TCN1 el día 16 de enero de 2016; el espectrograma muestra mayor incidencia en las frecuencias por debajo de 5 Hz.

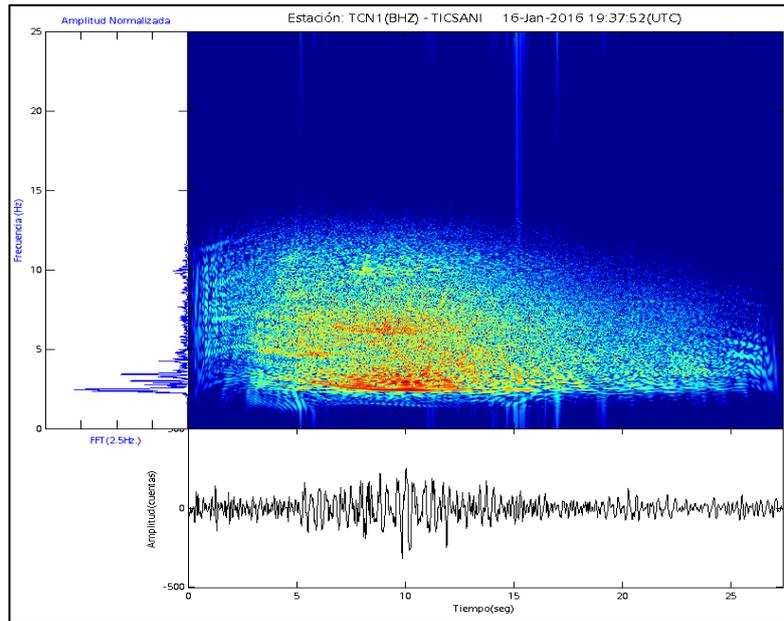


Figura 16.- Ejemplo de sismo de tipo Largo periodo (LP) registrado por la estación TCN1 el 16 de enero a las 19:37 UTC.

#### 4.1.3 Sismos de tipo Tremor

Muchos volcanes en el mundo muestran señales de tipo Tremor en sus diferentes estados o fases de actividad, principalmente en periodos preeruptivos y eruptivos. Gran parte de estas señales están asociadas al tránsito de gases y magma a través del sistema volcánico o hidrotermal hacia la superficie. Los tremores registrados en el volcán Ticsani son esporádicos. Estos son de tipo espasmódico y presentan un rango de duración que va desde los 40 a 148 segundos. Las frecuencias dominantes alcanzan picos promedio de 6 Hz y son poco energéticos (Figura 17).

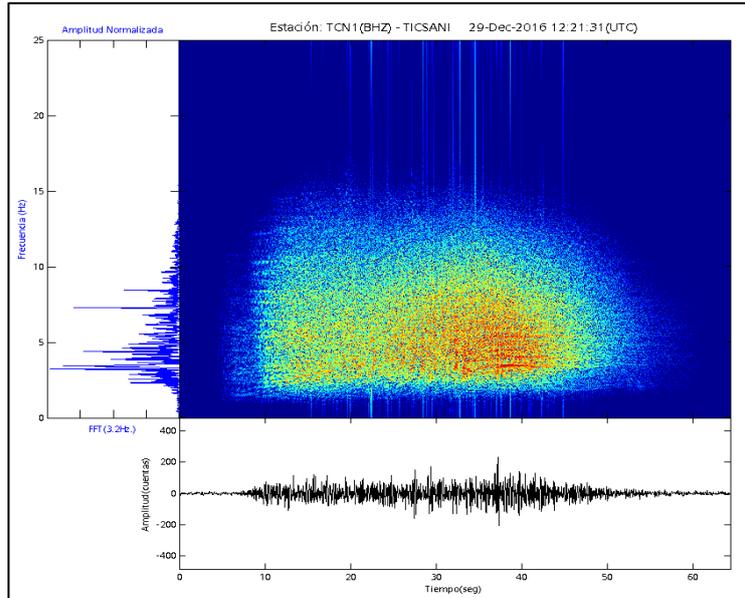


Figura 17.- Ejemplo de sismo de tipo Tremor en el volcán Ticsani registrado el 29 de diciembre de 2016 a las 12:21:31 UTC en la estación TCN1, componente Z.

#### 4.1.4 Sismos de tipo Híbrido

Los sismos de tipo Híbrido son denominados así debido a que en su contenido espectral presentan casi de manera simultánea altas y bajas frecuencias. En el volcán Ticsani se observa esporádicamente este tipo de sismicidad. Una característica especial de estos sismos es que tienen frecuencias dominantes muy bajas, próximas a 0.3 Hz (Figura 18); al mismo tiempo, presentan frecuencias altas entre 7 Hz y 9 Hz. La forma de onda en sus inicios es de tipo emergente y en su parte final presentan un decaimiento lento. En general, estas señales siempre son registradas por las cuatro estaciones de la red del volcán Ticsani dependiendo de la intensidad de la señal.

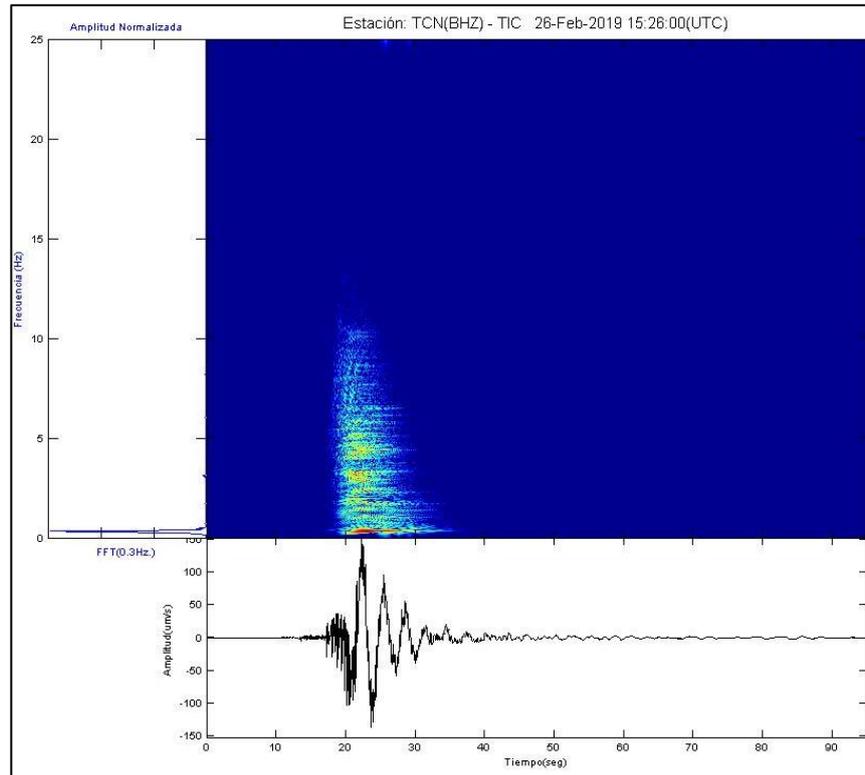


Figura 18.- Ejemplo de sismograma y espectrograma de un sismo de tipo Híbrido registrado en el volcán Ticsani el 26 de febrero de 2019 a las 15:26 UTC, componente Z.

#### 4.2 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 1999

Se realizó el análisis de formas de onda y espectros de frecuencias de los datos sísmicos registrados por la Red Sísmica Nacional del IGP en 1999. La estación de referencia utilizada fue TOQ; se logró identificar entre el 1 de marzo al 31 de mayo de 1999 un total de 193 eventos de tipo Volcano-Tectónico Distales. A pesar de la distancia de la estación TOQ al volcán Ticsani fue posible identificar claramente los tiempos de arribo de las ondas P y S.

En la figura 19A y 19B se ha ploteado la diferencia de los tiempos de arribo de las ondas P y S ( $t_{S-P}$ ) respecto al tiempo con datos de la estación TOQ para los meses de febrero a junio de 1999. Se observó claramente una agrupación de eventos entre el 6 y 11 de mayo con un total de 71 sismos con diferencia de tiempos de arribo de las ondas S-P entre 7 y 8 segundos, incluido el sismo del 7 de mayo que tuvo una magnitud de M4.1. Es importante señalar que este evento fue el más energético, identificado como el evento *mainshock*, cuyo epicentro se localizó a 5 km al SSE de Calacoa y fue seguido de una serie

de réplicas denominadas *aftershocks*. Debido a la diferencia de tiempos de arribo y la triangulación de la Red Sísmica Nacional para el cálculo de parámetros hipocentrales del sismo del 7 de mayo, esta agrupación correspondió a una importante actividad sísmica registrada en la región del volcán Ticsani. Esta actividad estuvo asociada principalmente al fracturamiento de rocas.

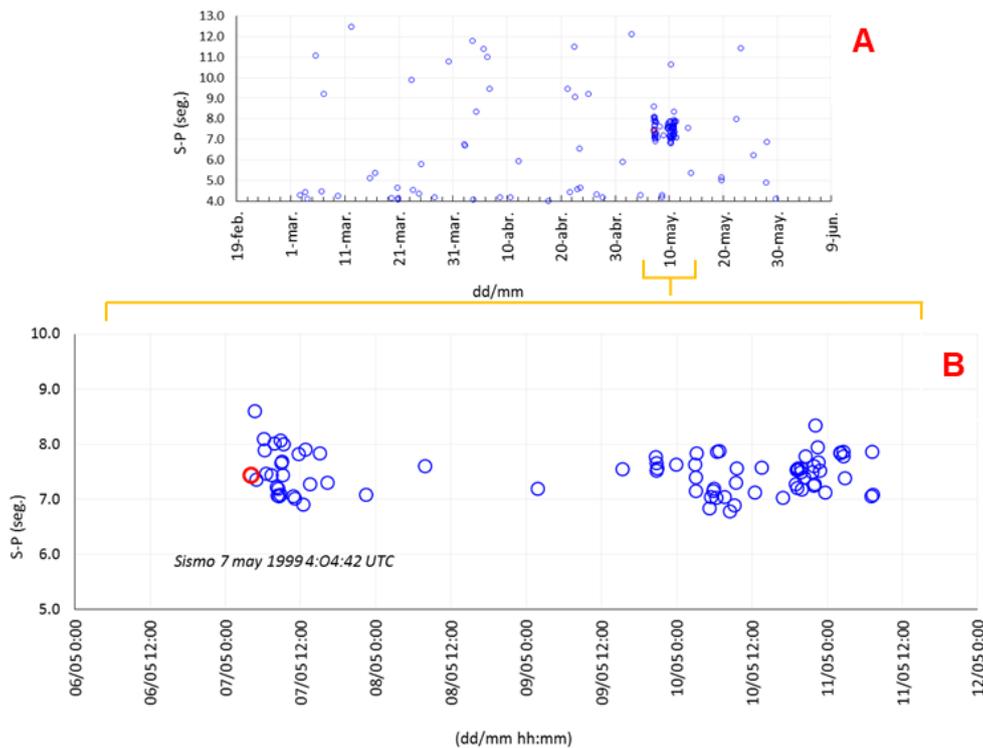


Figura 19.- A: diferencia de tiempos de arribo de las ondas S y P de eventos registrados entre febrero y junio de 1999. B: diferencia de tiempos de arribo desde el 6 al 12 de mayo de 1999. El sismo del 7 de mayo está representado con un círculo rojo. Nótese que se observan dos agrupaciones luego del sismo del 7 de mayo.

### 4.3 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 2005

En el año 2005 ocurrió una importante actividad sísmica en la que destacó el sismo del 1 de octubre de magnitud M5.3, localizado a 8 km al este de la localidad de Calacoa (Tavera, 2006). Se realizó el análisis del espectro de frecuencias y formas de onda de los sismos registrados entre el 12 al 22 de octubre de 2005 en la estación Ticsani (TIC), tras lo cual se identificaron 2570 eventos sísmicos. La sismicidad observada estuvo conformada

principalmente por sismos de tipo Volcano-Tectónico o de fractura. Solo se registraron 35 eventos de tipo Largo periodo (Figura 20).

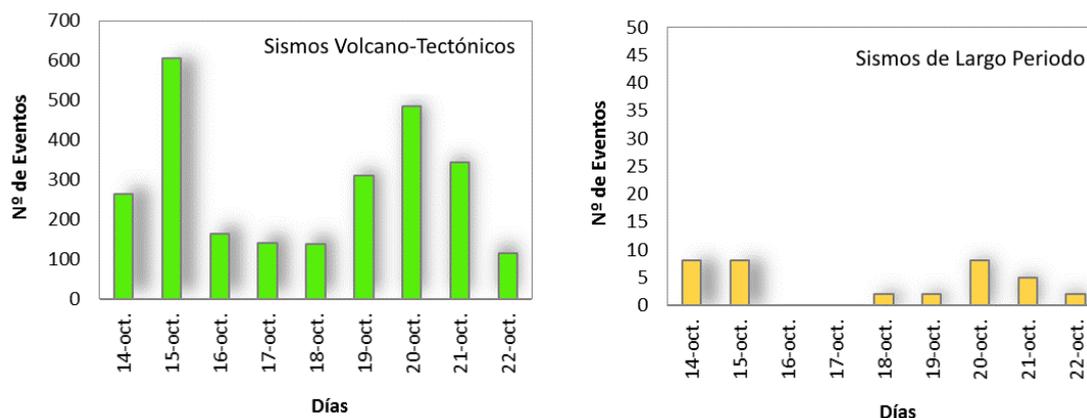


Figura 20.- Histogramas de ocurrencia diaria de (A) sismos de tipo Volcano-Tectónico, (B) sismos de baja frecuencia. Es importante destacar el gran número de sismos de tipo VT) en comparación a los eventos de tipo Largo Periodo (B).

Se ha realizado el cálculo de parámetros hipocentrales de los datos sísmicos obtenidos mediante la red sísmica temporal compuesta de cuatro estaciones con el programa *Hypoellipse* (Lahr, 1999), tras lo que se localizaron 241 eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT). Los resultados tuvieron errores menores a 4.7 km en sus componentes horizontales y verticales, y errores RMS del orden de entre 0.01 y 0.6 segundos. En el periodo de observación los sismos tuvieron magnitudes de hasta M3.6.

En la figura 21 se observa un importante agrupamiento de sismos próximos al domo "3", localizado dentro de la caldera de avalancha del Ticsani. Por otro lado, se observa también un pequeño grupo de sismos que se encuentra a 3 km al SE del volcán. Estos sismos aparentemente siguen un alineamiento orientado hacia el NO-SE. Con respecto a la profundidad, se observa que la distribución de los sismos va desde la superficie hasta los 15 km de profundidad. La mayor concentración de los eventos se encuentra entre los 5 km a 13 km de profundidad respecto al domo reciente.

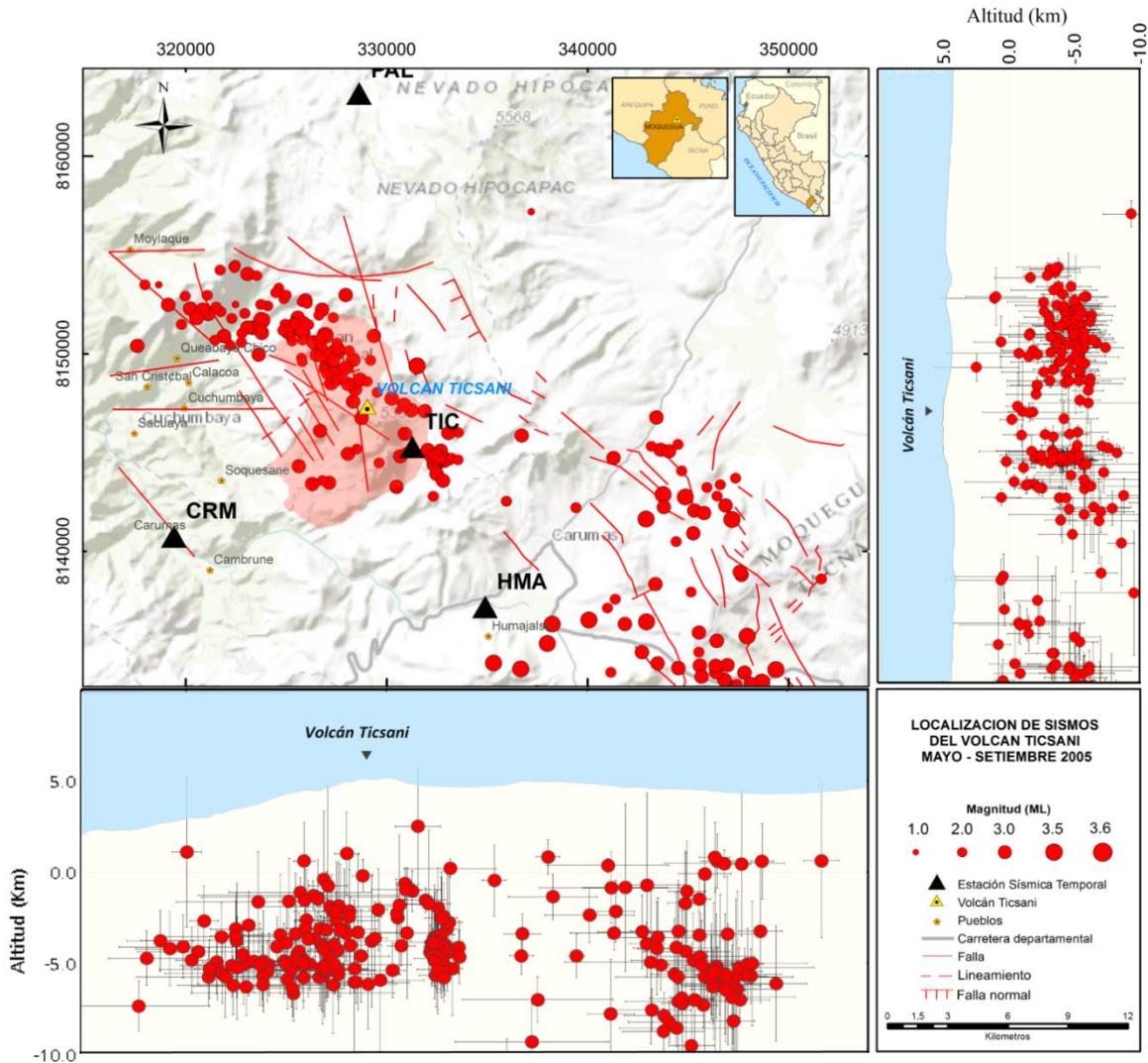


Figura 21.- Distribución de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) ocurridos durante el 14 al 22 de octubre de 2005. El área sombreada de rojo corresponde al volcán Ticsani. Los rasgos estructurales fueron modificados de Lavallée et al., (2009), Gonzales (2009) y Carlotto (2009).

#### 4.4 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN 2006

El análisis de los datos sísmicos adquiridos en la campaña realizada entre el 14 de septiembre al 3 de diciembre de 2006 muestra la ocurrencia de eventos de tipo Volcano-Tectónico con claros arribos de fases P y S. Los eventos sísmicos obtenidos corresponden a la estación sísmica localizada más próxima al domo reciente (TCN). Fueron clasificados un total de 511 eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT), relacionados al fracturamiento de rocas al interior del volcán, y 216 eventos de tipo Largo Periodo (LP), asociados a la circulación de fluidos magmáticos. La distribución temporal muestra que se registraron un

promedio de 6 sismos de tipo VT por día. Los sismos de tipo Largo Periodo (LP) se presentaron en un promedio de 3 sismos por día (Figura 22).

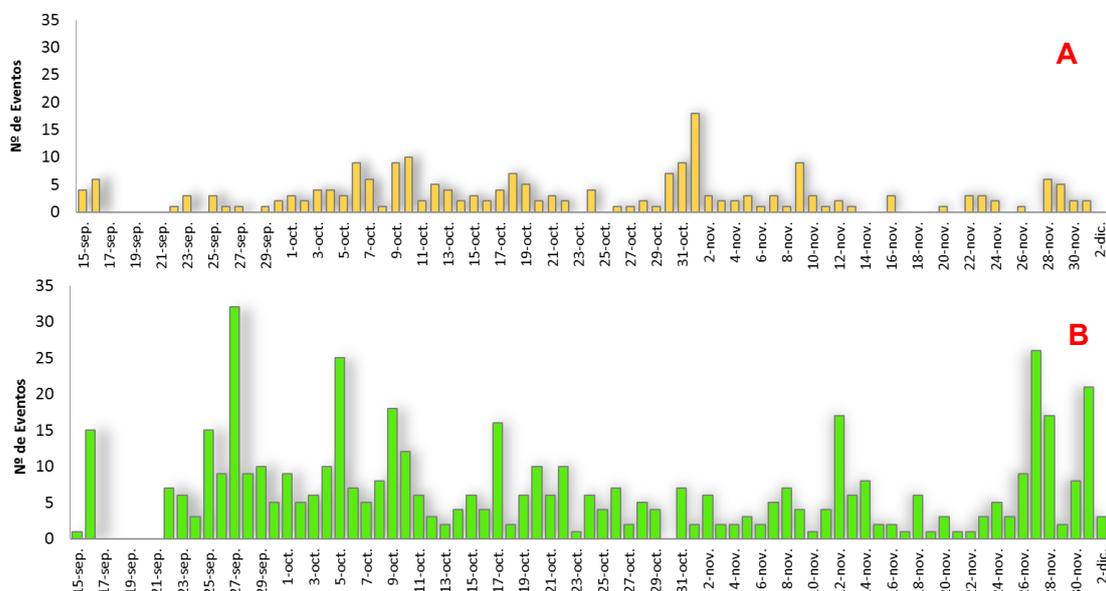


Figura 22.- Histograma de ocurrencia de eventos registrados por la estación TCN el año 2006. A) Sismos de tipo Largo Periodo. B) Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) o de fractura.

#### 4.5 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA DESDE 2014-2019

Desde mayo de 2014, el IGP inicia el monitoreo sismovolcánico de manera permanente del volcán Ticsani. Al inicio se trabajaron con estaciones temporales que permitieron identificar zonas propicias para la instalación de estaciones permanentes. En agosto de 2015, se inicia el monitoreo permanente y en tiempo real del volcán Ticsani. Los datos obtenidos corresponden a la estación de referencia TCN1, elegida por su proximidad al domo reciente “D3”. Los siguientes acápitales permitirán ilustrar el tipo de sismicidad registrada, el modo de ocurrencia de sismos y su distribución espacial y en profundidad.

##### 4.5.1 Estadística de eventos sismovolcánicos

En el periodo 2014-2019 fueron identificados un total de 84 776 eventos sísmicos, con el predominio de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), ligados al fracturamiento de rocas al interior del volcán. En efecto, el 97 % de la sismicidad está constituida por sismos de tipo VT; seguidamente, y en menor

número, por eventos de tipo Tremor con un 1.33 %; los sismos de tipo Largo Periodo (LP) con 0.82 % y, finalmente, pero no menos importante, los eventos de tipo Híbrido con un 0.26 %.

La mayor tasa de sismicidad fue registrada en el año 2016, con 85 eventos de tipo Volcano-Tectónico por día; contrariamente, en 2019 se registró la menor tasa de sismicidad de los últimos 6 años con 9 eventos por día. A lo largo de este periodo, entre septiembre de 2015 hasta agosto de 2016, se puede apreciar el inicio del incremento de la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico, ligada al fracturamiento de rocas al interior del volcán (Figura 23).

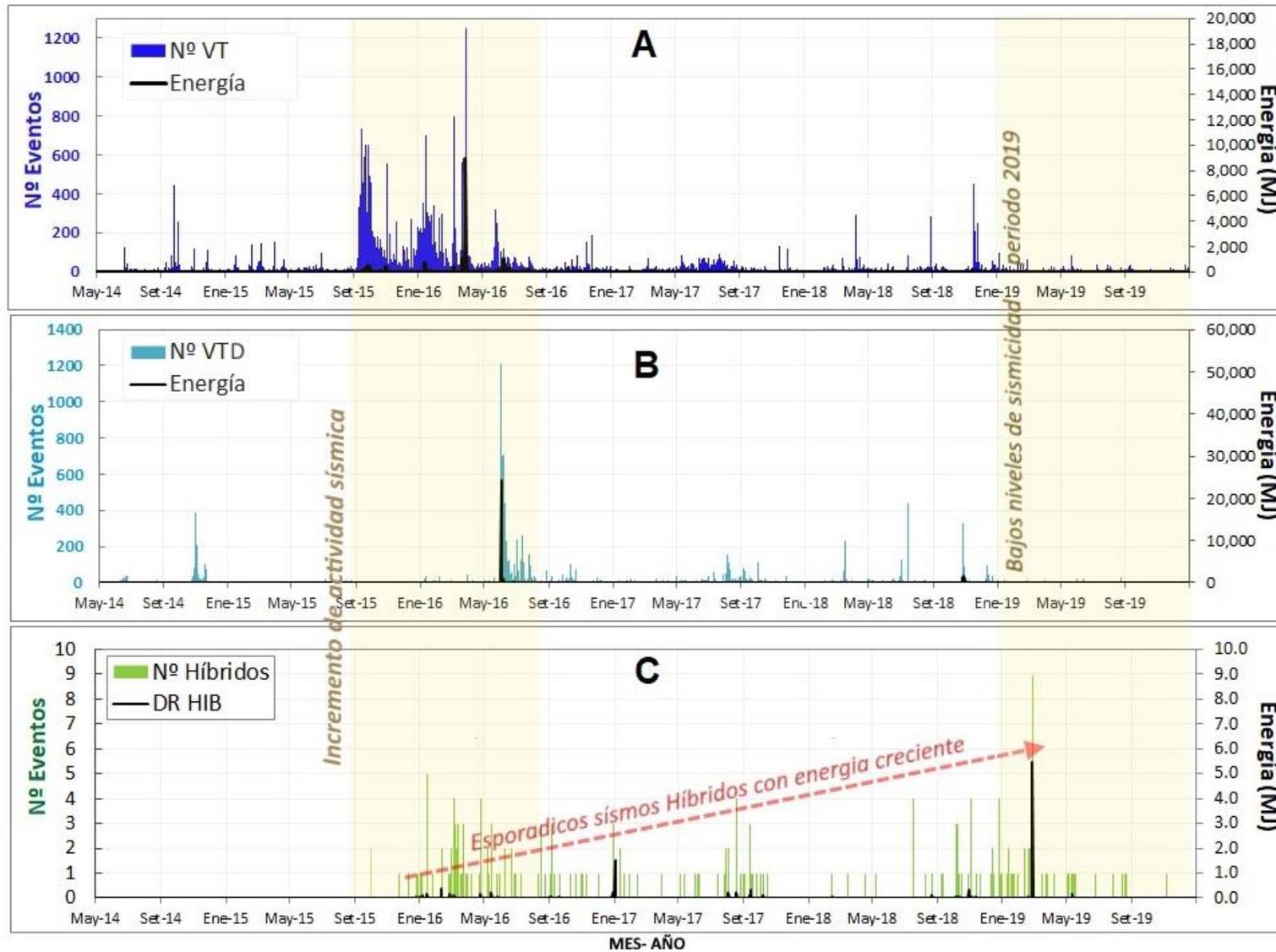


Figura 23.- Estadística del número y tipo de eventos registrados por la estación sísmica TCN1 durante el periodo 2014-2019. Las barras en azul (A) representan la sismicidad de tipo Volcano-Tectónico Proximal (VTP); las barras en celeste (B), los sismos de tipo Volcano-Tectónico Distales (VTD) al volcán Ticsani. Las barras verdes (C) corresponden a sismos de tipo Híbrido.

Entre mayo de 2014 y diciembre de 2019 se han observado dos registros máximos de sismicidad por día en forma de enjambres: el primero registrado el 30 de marzo de 2016 con un total de 1251 sismos de tipo Volcano-Tectónico Proximales (Figura 23A). El segundo ocurrió el 2 de junio de 2016, durante el cual se registraron 1211 sismos de tipo Volcano-Tectónico Distantes (Figura 23B).

El registro de la sismicidad de tipo Híbrido, ligada a la circulación de fluidos volcánicos, fue observado desde septiembre de 2015. Su mayor ocurrencia se observó entre enero y octubre de 2016, así como entre octubre de 2018 y abril de 2019. Los sismos de tipo Híbrido se presentaron de manera esporádica, con una tasa promedio de 3 eventos por mes. La energía observada en el registro de estos eventos presenta una tendencia al incremento, donde destaca el valor de 5 Megajoules (MJ) el día 26 de febrero de 2019. Este mismo día también fue registrado el evento Híbrido más energético de los últimos años, con un valor de 4 MJ (Figura 23C).

Respecto a los sismos de tipo Tremor y de Largo Periodo (LP), que estarían asociados a movimiento de fluidos (vapor de agua y gases volcánicos), estos no proporcionan mayores indicadores de la actividad del volcán Ticsani debido a su ocurrencia esporádica y baja energía.

#### **4.5.2 Distribución espacial de sismos de tipo Volcano-Tectónico**

Uno de los objetivos principales del cálculo de los parámetros hipocentrales es localizar espacialmente los sismos con una gran precisión, es decir, que el cálculo se ajuste lo mejor posible a la realidad. Se ha realizado el cálculo de parámetros hipocentrales para 10 221 eventos de tipo Volcano-Tectónico (VT) a partir de claros arribos de las ondas P y S mediante el software *Hypoellipse* (Lahr, 1999). Para la localización de cada evento se han considerado como mínimo tres estaciones de registro con errores en las componentes horizontales <2.5 km y <5 km en la componente vertical.

Los resultados muestran que la sismicidad en el área del volcán Ticsani alcanzó magnitudes de hasta M4.4. Asimismo, se aprecia que esta sismicidad se distribuye en seis agrupamientos o focos sísmicos que alcanzan profundidades de hasta 23 km (Figura 24, perfiles E-O y N-S). El agrupamiento de sismos **A** se concentra a 9 km al NO del Ticsani y próximo a la estación MUYQ (3 km). Un segundo agrupamiento **B** se encuentra a 3.5 km también al NO del volcán. El agrupamiento **C** se encuentra próximo al volcán con la particularidad que la sismicidad conforma lineamientos con direcciones N-S y E-O. El cuarto agrupamiento **D** se ubica a 6 km al lado este del Ticsani, y también conforma un lineamiento de dirección N-S. Finalmente, los focos sísmicos **E** y **F**, algo dispersos, se encuentran en el sector ESE del Ticsani (Figura 24). En general, los agrupamientos sísmicos siguen un lineamiento NO-SE acorde con el sistema regional de fallamiento.

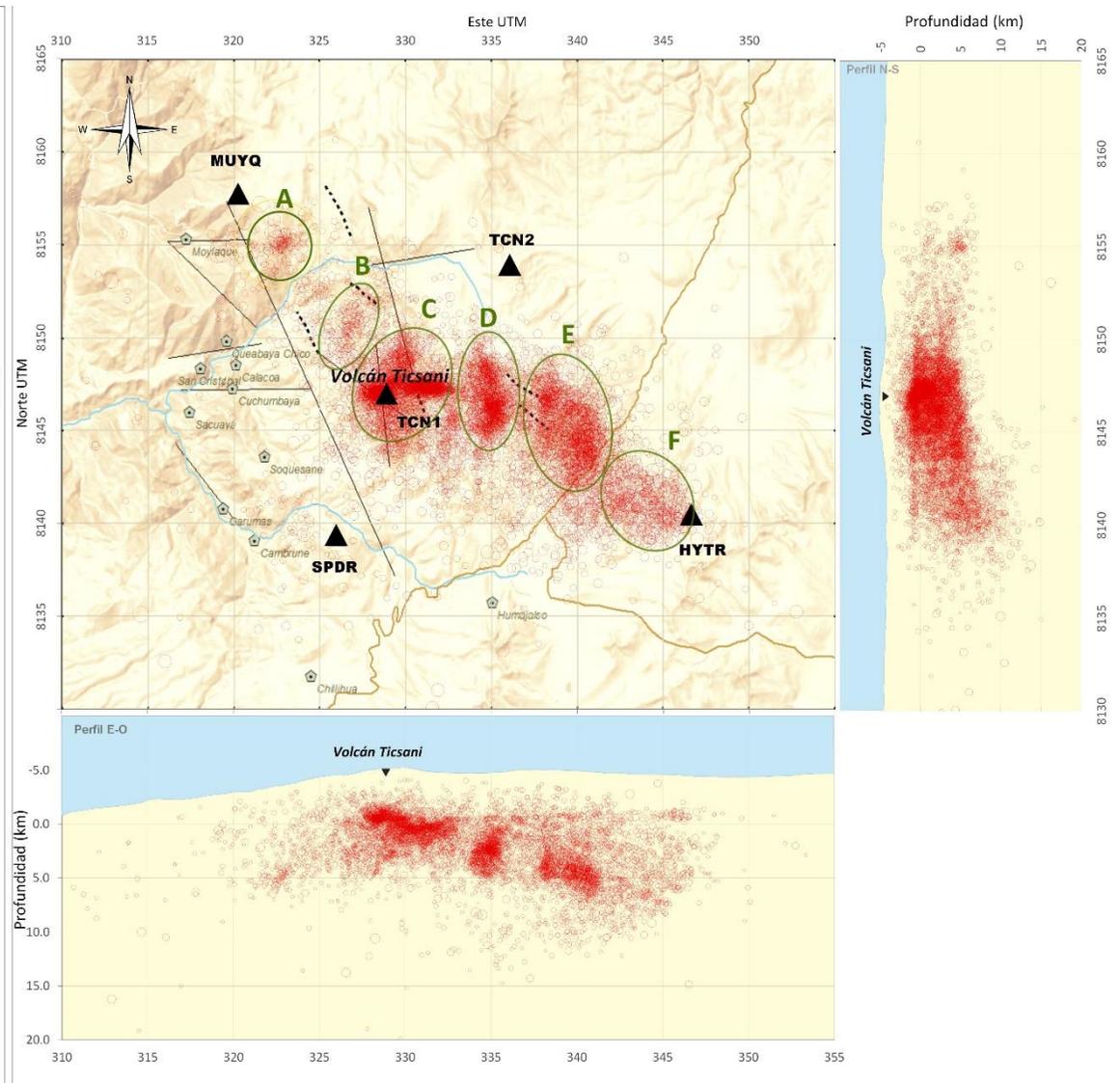


Figura 24.- Mapa de sismicidad 2014-2019 del volcán Ticsani y perfiles E-O y N-S.

Se ha realizado otro mapa de localización de sismicidad 2014-2019 (Figura 25) que muestra sismos próximos al volcán Ticsani con una mayor precisión y exactitud. Para ello, se utilizaron eventos registrados a partir de cuatro estaciones y dentro de una apropiada cobertura azimutal ( $\text{Gap} < 168^\circ$ ). Para la elaboración de este mapa se localizaron un total de 837 sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) mediante el software *Hypoinverse* (Klein, 1989), con errores de hasta 3.3 km en la componente horizontal y 4.3 km en la componente vertical. La distribución sísmica espacial (vista en planta) muestra parte de la agrupación **C** debajo del domo reciente "D3" del volcán Ticsani, a profundidades de hasta 13.7 km. También se observa una pequeña agrupación de sismos hacia el SE del Ticsani, representada por el círculo discontinuo pequeño en color verde (Figura 25).

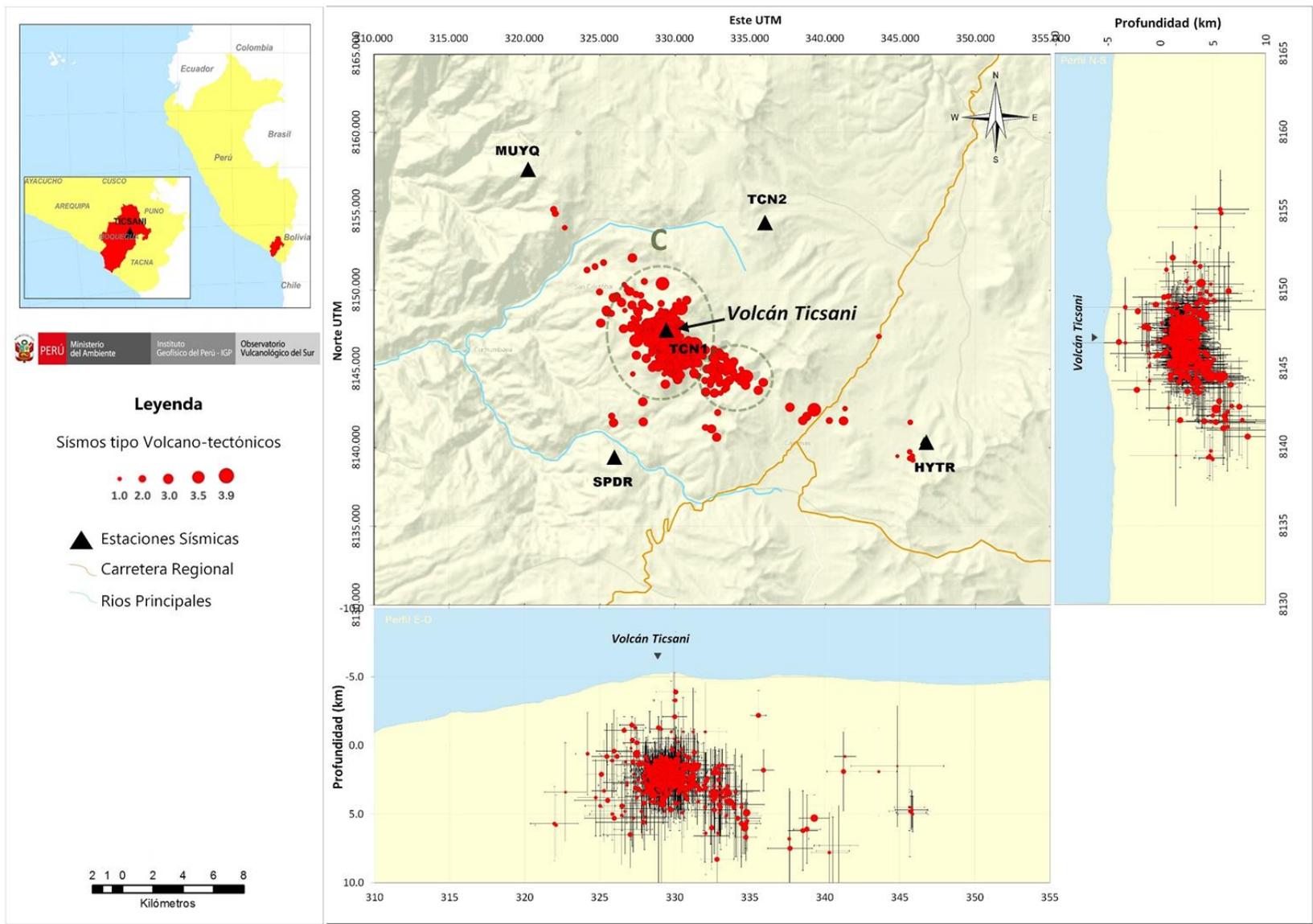


Figura 25.- Sismos de tipo Volcano-Tectónico próximos al volcán Ticsani, y perfiles E-O y N-S, registrados durante 2014-2019.

### **4.5.3 Enjambres sísmicos**

Corresponden a agrupamientos de sismos desarrollados en una misma área y durante un tiempo relativamente restringido. El agrupamiento de sismos en espacio y tiempo puede proporcionar información valiosa acerca de la fuente que los origina. Un enjambre sísmico caracterizado por el incremento de la tasa de sismicidad sin un sismo principal es denominado *mainshock* (Mogi, 1963).

Una importante característica de la actividad sísmica en el volcán Ticsani observada en este periodo es la ocurrencia de enjambres de sismos de tipo Volcano-tectónico (Figuras 26 y 27). Desde junio de 2014 hasta fines de 2019 se han registrado al menos 88 enjambres sísmicos constituidos por miles de sismos de tipo Volcano-Tectónico (Figura 28). La duración de los enjambres es variable; sin embargo, se han observado enjambres que alcanzaron hasta 24 horas de duración, especialmente entre septiembre de 2015 y mayo de 2016 (Figura 28). Uno de los días de mayor incidencia de enjambres de sismos fue el 30 de marzo de 2016 con más de 1200 sismos. En el año 2019 se ha observado una mayor ausencia de este tipo de actividad tanto en número como en duración, lo que refleja los bajos niveles de actividad sísmica registrados en este periodo.

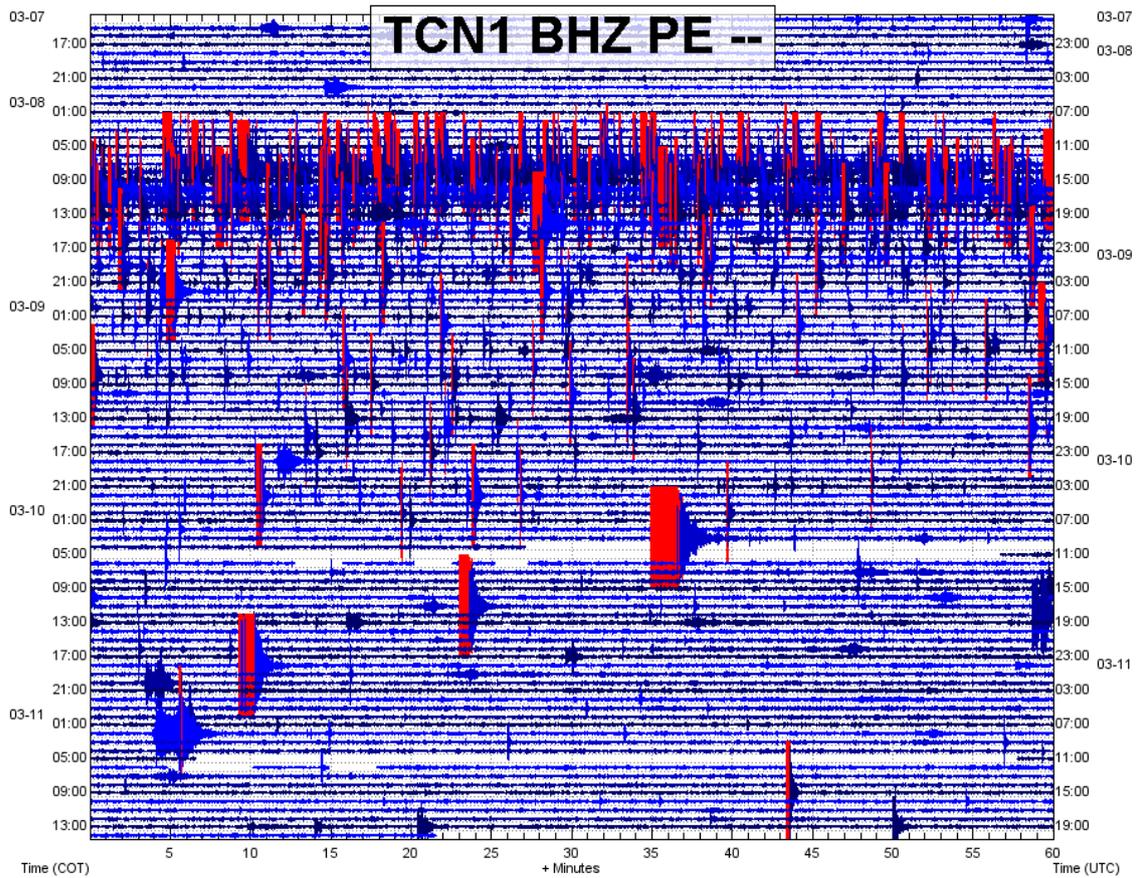


Figura 26.- Sismograma de la estación sísmica TCN1 que muestra un ejemplo de enjambre sísmico registrado los días 8 y 9 de marzo de 2016.

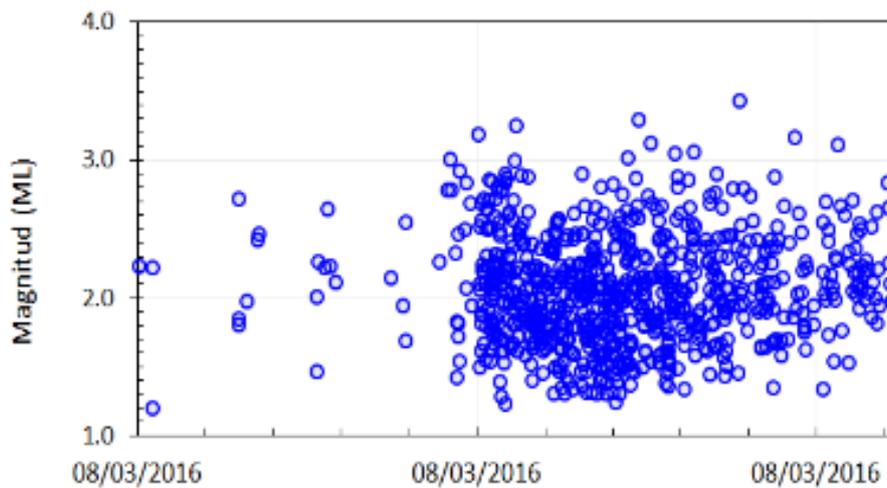


Figura 27.- Magnitudes de sismos registrados durante un enjambre sísmico ocurrido el 8 de marzo 2016 en la región del volcán Ticsani.

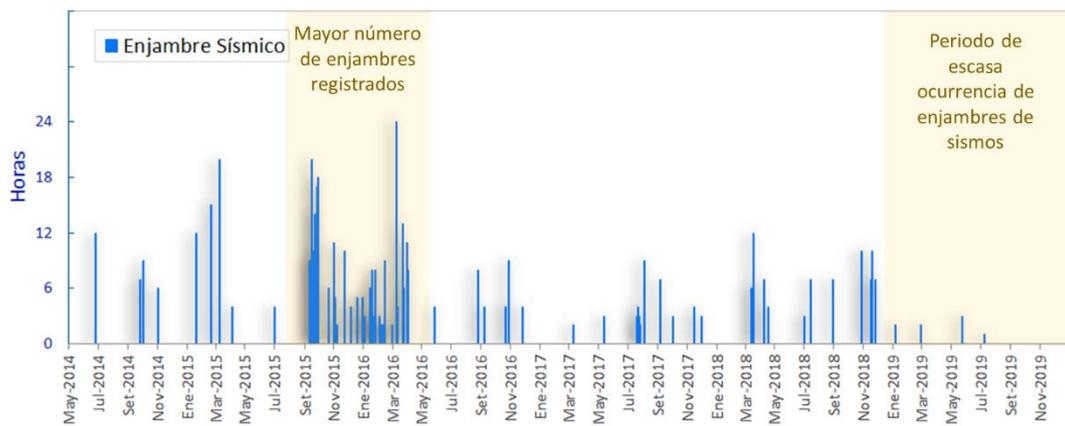


Figura 28.- Ocurrencia de enjambres sísmicos en la zona del volcán Ticsani durante mayo de 2014 y diciembre de 2019.

#### 4.5.4 Mecanismos focales

Los sismos más energéticos pueden ser registrados en estaciones relativamente lejanas que están a más de 50 km de distancia del Ticsani, como las redes sísmicas del volcán Ubinas y Misti o la Red Sísmica Nacional. Para identificar la naturaleza de los esfuerzos predominantes en la zona del volcán Ticsani, se ha realizado el cálculo de mecanismos focales para los sismos del año 2014 localizados bajo el domo reciente del Ticsani. Se ha realizado el perfil BB' sobre la vista de planta, tras lo que se observó sismicidad alineada con un buzamiento muy próximo a los 70° (Figura 29).

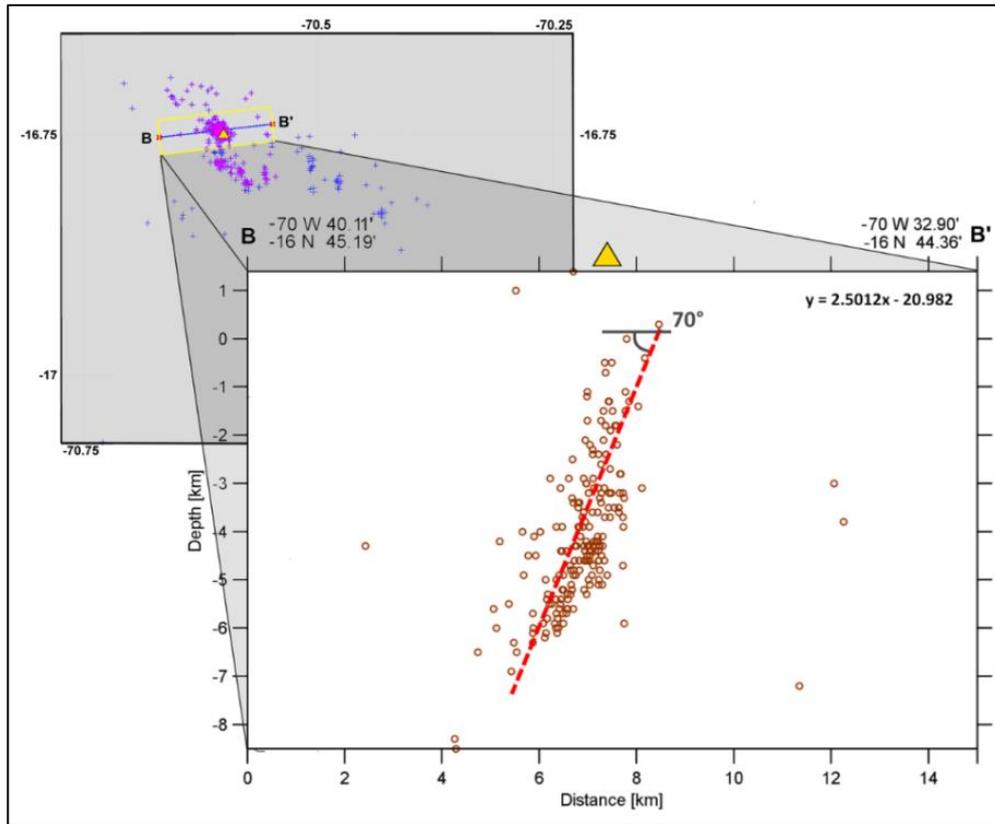


Figura 29.- Perfil BB' realizado sobre el domo reciente "D3", en el que se observa que los hipocentros se alinean con un ángulo de 70° entre la horizontal y la línea de tendencia (línea discontinua roja).

Mediante el software SEISAN (Havskov, 1997), y utilizando datos de las estaciones de los volcanes Ticsani, Ubinas, Misti y de la Red Sísmica Nacional, se obtuvieron cuatro soluciones correspondientes a cuatro sismos ubicados próximos al domo "D3". Los sismos presentan mecanismos focales equivalentes a un fallamiento de tipo normal con planos orientados en dirección norte-sur, con cierta componente transcurrente en algunos casos (Figura 30).

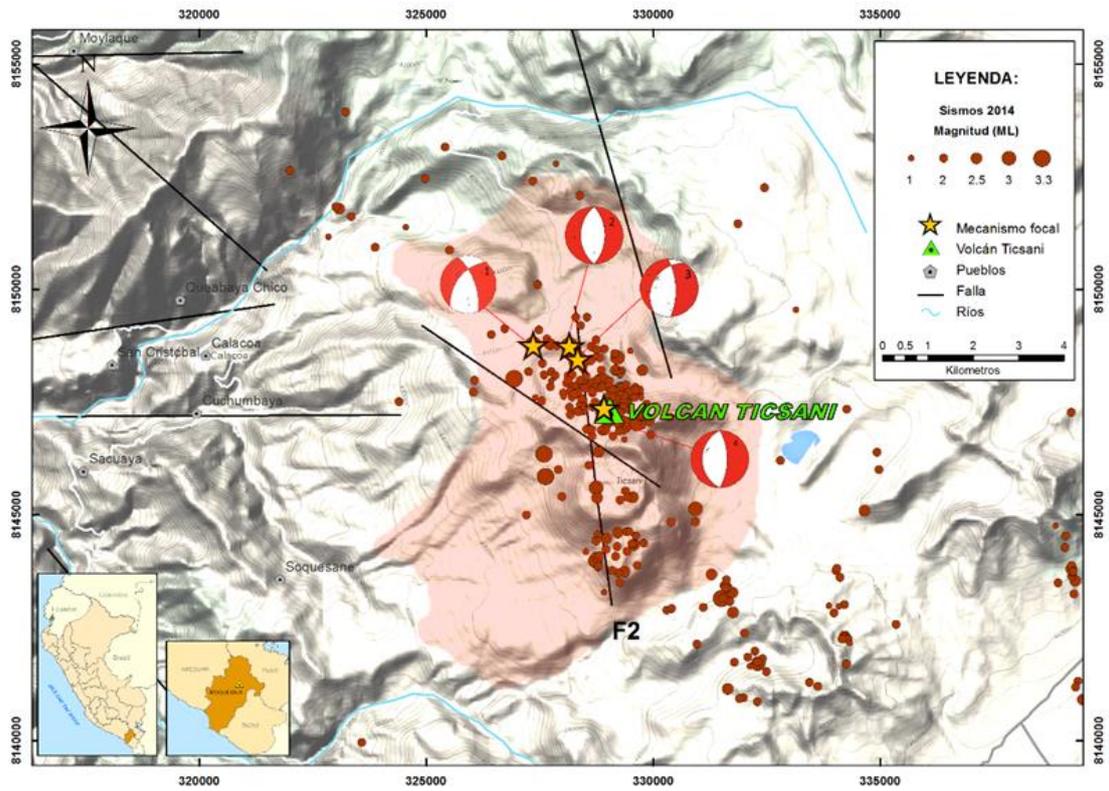


Figura 30.- Mapa sísmico y mecanismos focales de los principales sismos registrados en el volcán Ticsani en 2014. Se observan también las fallas determinadas por Lavallée et al., (2009), donde destaca la falla F2 de dirección NO-SE. El área del volcán Ticsani ha sido sombreado de color rojo.

## **CAPITULO V: DISCUSIONES**

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos respecto al análisis de la sismicidad registrada en el periodo 1999-2019 en el área del volcán Ticsani; además, se aborda el tipo de sismicidad, aparición de focos sísmicos, el modo de ocurrencia de sismos y su relación con la dinámica interna del volcán Ticsani y, finalmente, la presencia de fallas activas.

### **5.1 APARICIÓN Y RECURRENCIA DE NUEVOS FOCOS SÍSMICOS**

El monitoreo permanente de la actividad sismovolcánica en la zona del volcán Ticsani, además de identificar agrupamientos de sismos, permitió realizar el análisis sobre el tipo de sismicidad, su evolución en el tiempo, distribución, recurrencia y/o reiteración en determinadas áreas con fines de prevención y mitigación de desastres.

Desde el año 2014 hasta 2019 se observa la ocurrencia, extinción y reaparición de focos sísmicos en el área del volcán Ticsani, tal como se aprecia en las figuras 31 y 32.

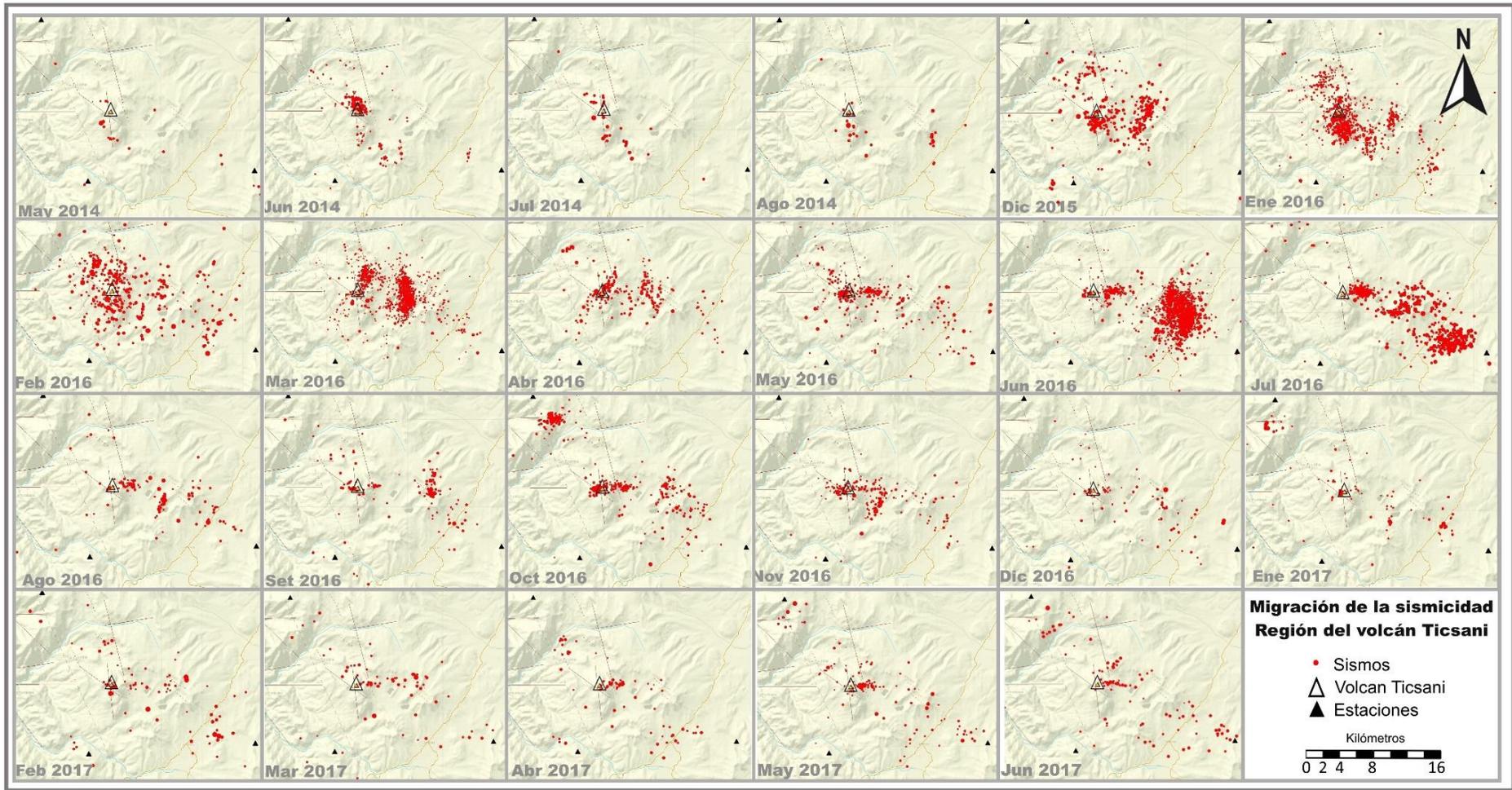


Figura 31.- Aparición y recurrencia de focos sísmicos en la región del volcán Ticsani (mayo de 2014-junio de 2017). Se observan las agrupaciones de sismos proximales y distales al volcán Ticsani.

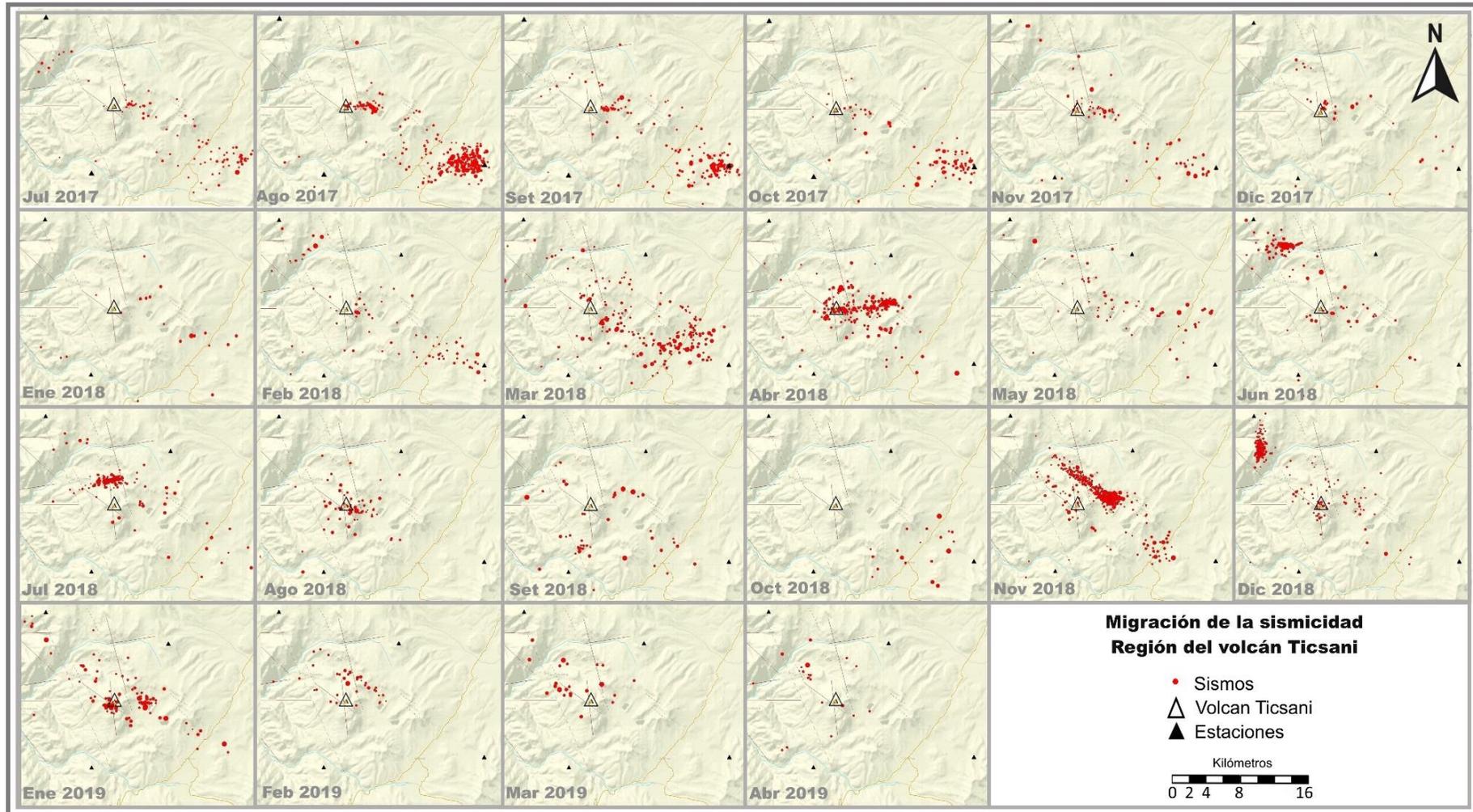


Figura 32.- Aparición y recurrencia de focos sísmicos en la región del volcán Ticsani (mayo de 2014-junio de 2017). Se observan las agrupaciones de sismos proximales y distales al volcán Ticsani.

Al menos en siete ocasiones se distinguió una recurrencia de sismos bajo el volcán Ticsani: junio de 2014, diciembre de 2015, marzo de 2016, octubre de 2016, abril de 2018, agosto de 2018 y enero de 2019 (Figuras 31 y 32); los eventos más energéticos alcanzaron magnitudes de más de M4.0. Por otro lado, al menos en seis ocasiones (mayo de 2016, octubre de 2016, abril de 2017, agosto de 2017, abril de 2018 y enero de 2019) se observó a 3.5 km al este del Ticsani un pequeño foco de sismicidad. Ambos focos de sismicidad próximos al volcán Ticsani forman parte de la agrupación **C** (Figura 24).

Parte de la sismicidad observada en 2005 también se observó bajo el Ticsani. Asimismo, Lavallée et al., (2009) identificaron una falla "F2" de orientación NO-SE que cruza los domos del volcán Ticsani. Es probable que un gran número de sismos observados en esta zona estén asociados a la activación de esta falla.

Entre los 5 km y 14 km al este y sureste del volcán Ticsani, respectivamente, se han observado al menos en cuatro ocasiones una recurrencia de la sismicidad. Los epicentros de estos sismos forman parte de las agrupaciones de sismos **D** y **E**. Los sismos observados conforman orientaciones N-S y E-O, probablemente asociados a un fallamiento superficial no descrito y/u observado en superficie.

A 17 km al sureste del Ticsani también se observó al menos en dos ocasiones la ocurrencia repetitiva de sismicidad. Esta zona corresponde a los epicentros de los sismos de la agrupación **F**. Es preciso señalar que en 2005 se observó en esta zona una sola y amplia subsidencia de forma elíptica de ~6 cm de variación en la vertical (Jay et al., 2013; Gonzales et al., 2006). La sismicidad observada en la zona probablemente está asociada a mecanismos generados por esta subsidencia. Finalmente, también se observó la recurrencia de sismos entre los 2.5 km y 10 km al norte y noroeste del volcán Ticsani (agrupaciones **A** y **B** de la figura 24). Esta zona también presentó actividad sísmica en 2005, asociada a la actividad de fallas superficiales debido a la tectónica local (Tavera, 2006).

El análisis de la recurrencia de sismos frecuentemente observados en forma de enjambres sísmicos puede proveer información importante sobre la dinámica de los fluidos al interior de la corteza terrestre (Yoshida & Hasegawa, 2018). La sismicidad distal y proximal al

volcán Ticsani, evaluada y monitoreada durante los últimos años, es signo de intranquilidad que podría ser interpretada como actividad precursora del inicio de un probable proceso eruptivo, según modelo propuesto por White (2011). Según White (2011), la sismicidad distal debe a la transmisión de presiones de fluidos bajo o cerca del edificio volcánico. Además, afirma que la aparición de esta sismicidad puede ocurrir días o años antes del inicio de actividad eruptiva. Como se ha observado en el volcán Ticsani, se registra sismicidad de tipo Volcano-Tectónico (VT) Distal y Proximal que conforma focos sísmicos al menos desde 2005 hasta la actualidad.

## **5.2 MODO DE OCURRENCIA DE SISMOS DE TIPO VOLCANO-TECTÓNICO (ENJAMBRES)**

Los enjambres sísmicos muchas veces son inherentes a ambientes volcánicos (McNutt, 2000) y denotan influencia de fluidos magmáticos en las proximidades de fallas activas y pueden ser precursores de procesos eruptivos (White & McCausland, 2016).

Una importante característica de la actividad sísmica en el volcán Ticsani es la ocurrencia de enjambres sísmicos (Figura 33). A continuación, se describe la secuencia de sismos registrados en la zona del volcán Ticsani entre 1999 y 2005 y se hace una comparación con los enjambres representativos registrados en el periodo 2014-2019.

El 7 de mayo de 1999 (Figura 33-1) se observa una secuencia de sismos *mainshock* y *aftershock*, es decir, la ocurrencia de un sismo principal de mayor magnitud con el posterior registro de réplicas. Esta actividad sísmica fue atribuida a procesos de deformación de tipo extensivo, similares a los procesos que ocurren en zonas de cordillera (Aguilar, 2001).

Posteriormente, el 1 de octubre de 2005 a las 22:19 UTC se registraron sismos en la zona del volcán Ticsani (Tavera, 2006) (Figura 33-2), donde sobresalen dos sismos de magnitudes similares (M5.9). Cabe mencionar que varias horas antes y después de la ocurrencia del sismo principal se registraron numerosos sismos de magnitudes menores a M5.0. Esta distribución o secuencia temporal corresponde a un enjambre de sismos.

En 2014 y 2015, la red de monitoreo permanente del IGP instalada en el volcán Ticsani registró centenares de sismos (Figura 33-3 y 33-4) sin la presencia de un sismo principal o desencadenante. Esta sismicidad corresponde a la ocurrencia de sismos en enjambre que, en más de una ocasión, alcanzaron las 24 horas de registro continuo (Figura 28).

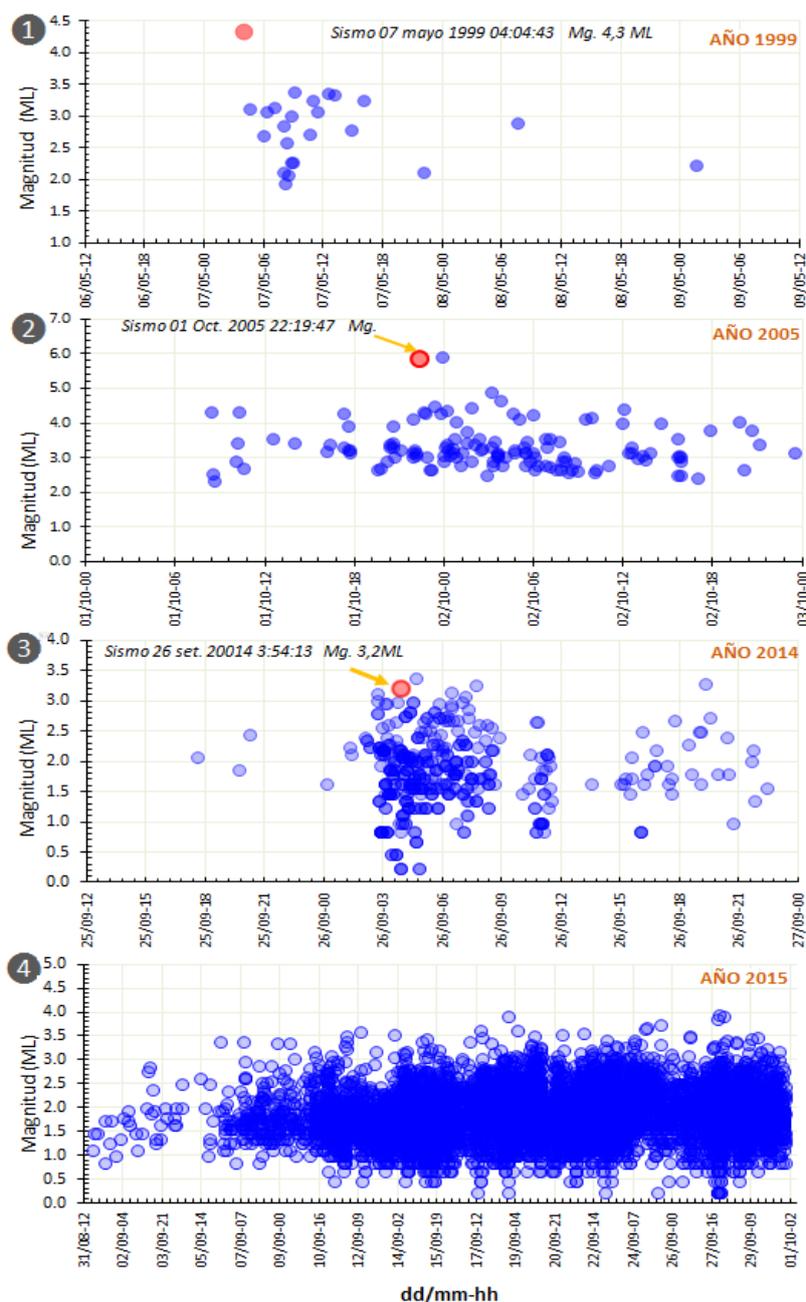


Figura 33.- Sismicidad registrada en la región del volcán Ticsani: (1) Secuencia mainshock-aftershock en 1999; (2) Enjambre sísmico del año 2005; (3) Enjambre sísmico de septiembre de 2014; (4) Enjambre sísmico de septiembre de 2015.

El análisis realizado sobre los sismos de tipo Volcano-Tectónico que se presentaron en forma de enjambres sísmicos en el área del volcán Ticsani, indica que hay esfuerzos que producen rupturas de rocas al interior del volcán, posiblemente ligados al ascenso de magma, lo cual es detonante de los enjambres sísmicos estudiados. Además, tal posibilidad se sustenta en la distribución espacial de los sismos que se concentran principalmente en el área que ocupa el volcán o en áreas muy próximas a él y en las magnitudes de los sismos que son comparables entre sí.

### **5.3 SISMICIDAD DE MUY BAJAS FRECUENCIAS DE TIPO HÍBRIDO**

Generalmente, la ocurrencia de sismos de tipo Híbrido está asociada a movimientos de fluidos magmáticos (Buurman & West, 2013) y, a veces, preceden a una erupción volcánica. Las frecuencias de los eventos de tipo Híbrido registrados en el volcán Ticsani, en comparación con los volcanes Ubinas y Sabancaya, se encuentran por debajo de 1 Hz, es decir, tienen frecuencias muy bajas.

En el volcán Ticsani se han registrado sismos de tipo Híbrido notables por su gran energía. En efecto, en algunas ocasiones se han observado señales tan energéticas que alcanzaron los 4 MJ y se registraron en estaciones situadas a más de 150 km de distancia del Ticsani, en las redes sísmicas de los volcanes Misti y Sabancaya. Al menos tres eventos presentaron este gran alcance: el sismo del 10 de febrero de 2016 ocurrido a las 22:14 UTC, el sismo del 2 de enero de 2017 registrado a las 01:25 UTC y, finalmente, el sismo del 26 de febrero de 2019 a las 15:26 UTC que fue registrado por la red sísmica del volcán Coropuna, tal como se observa en la figura 34.

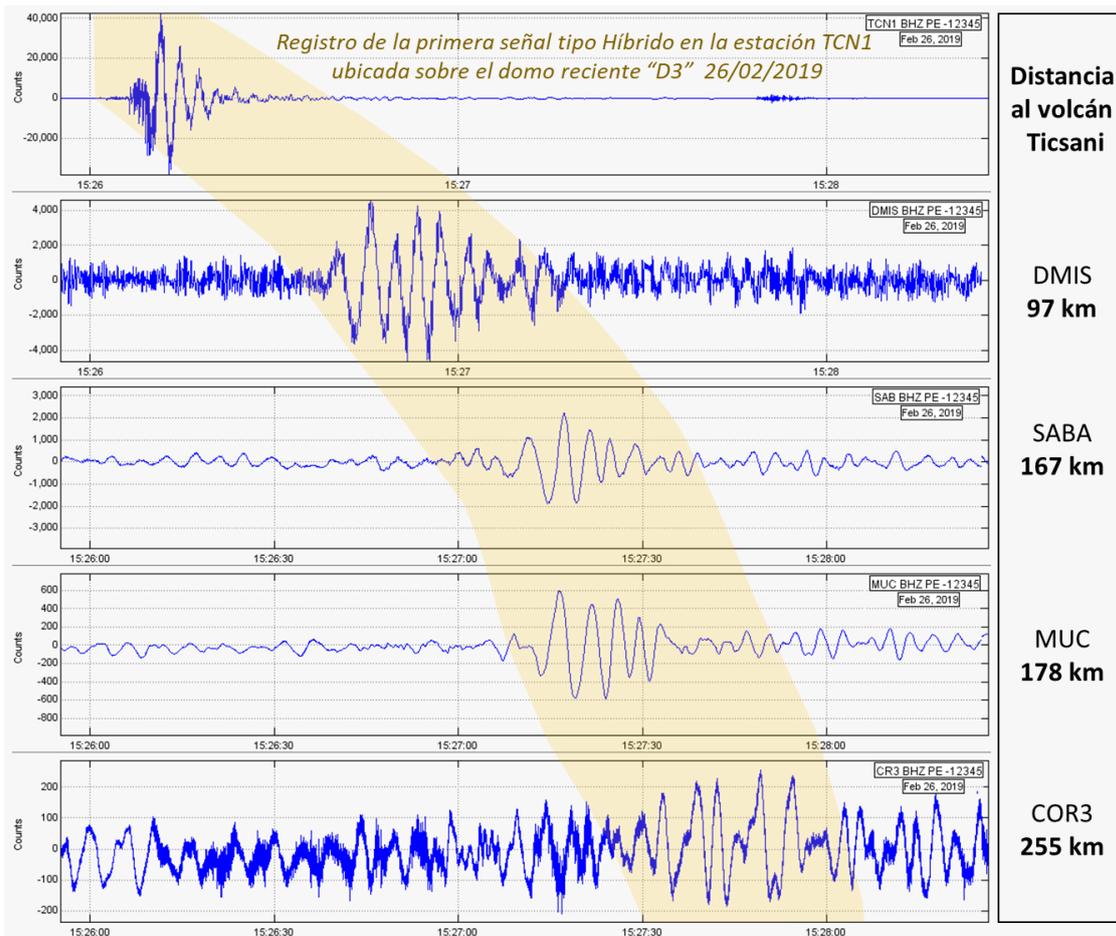


Figura 34.- Registro del sismo de tipo Híbrido observado el 26 de febrero de 2019 a las 15:26 UTC por las redes de monitoreo del volcán Ticsani, volcán Misti (estación DMIS), volcán Sabancaya (estaciones SABA y MUC) y volcán Coropuna (estación COR3). También se presenta el alcance en distancia de este sismo (columna derecha). La sombra amarilla señala la llegada del sismo de tipo Híbrido en las distintas estaciones de monitoreo.

El análisis realizado se basa en el arribo de sus altas frecuencias, y ha dado como resultado la determinación de parámetros hipocentrales. En efecto, los eventos se encuentran localizados muy próximos al volcán Ticsani, dentro de los focos de sismicidad con profundidades de hasta 8 km respecto al cráter del Ticsani.

Este tipo de sismicidad ha sido observado también en otros volcanes en actividad como Ubinas (Moquegua) y Sabancaya (Caylloma, Arequipa) a nivel muy superficial y en escenarios muy próximos a una explosión; sin embargo, en el caso del volcán Ticsani este tipo de señales se encuentran a un nivel más profundo, además de que este volcán aún no ha presentado un periodo eruptivo reciente. Debe señalarse que este tipo de sismicidad

está asociado a movimiento de fluidos magmáticos. Esta información sirve como línea de base respecto a señales de intranquilidad que vienen registrándose en el volcán Ticsani respecto a un probable proceso eruptivo.

#### 5.4 LA ACTIVIDAD SÍSMICA VERSUS LA DINÁMICA INTERNA DEL VOLCÁN TICSANI

Se ha realizado un esquema (Figura 35) tomando como base el modelo general propuesto por Fournier (1999) para explicar de manera sucinta la aparente dinámica interna que viene ocurriendo al interior del volcán Ticsani. En este esquema se han integrado las características sísmicas observadas en los últimos años.

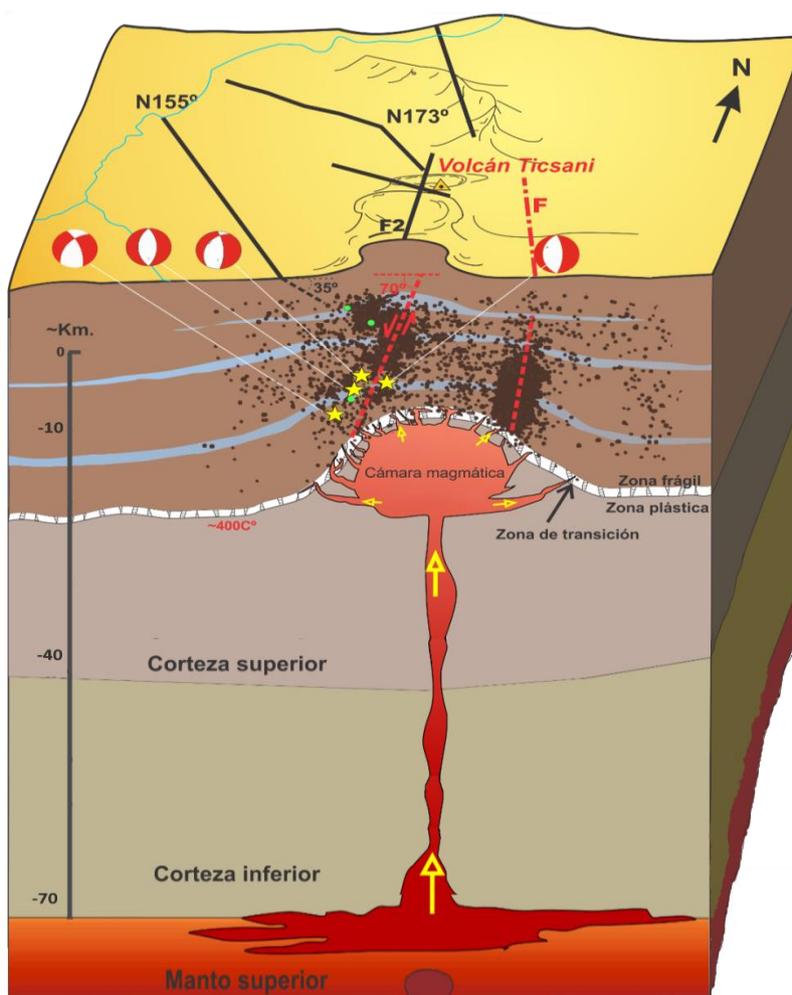


Figura 35.- Esquema modificado de Fournier (1999) que explica la generación de los sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) en el volcán Ticsani debido a probables intrusiones o ascenso de magma. Los círculos en verde representan a los sismos de tipo Híbrido.

Los sismos de tipo Híbrido o de bajas frecuencias registrados en las inmediaciones del volcán Ticsani constituyen indicios de ascenso o circulación de magma. Es muy probable que mientras el magma asciende hacia la superficie va abriendo el conducto y genera sismicidad bajo el macizo volcánico. White y McCausland (2016) estiman que la circulación de fluidos del sistema hidrotermal puede transmitir la presión hasta decenas de kilómetros de distancia favoreciendo la aparición de sismicidad de tipo Volcano-Tectónico Distal, tal como se observa en la región del volcán Ticsani.

Una falla activada por esta sismicidad es la falla F2 descrita por Lavallée et al., (2009) y otras probables fallas, como "F", que no han sido documentadas, pero se observan en el esquema. Cada pulso de intrusión o ascenso de magma transmite presión a las fallas tectónicas preexistentes a varios kilómetros de distancia del Ticsani, lo que favorece la aparición de focos de sismos VT distales en forma de enjambres sísmicos. Esto significa que los conductos internos que llegan hasta la zona de cráter están taponados o cerrados y presentan alto grado de obstrucción.

En general, en 2019 la actividad sísmica del volcán Ticsani alcanzó niveles bajos, reflejada en el registro mínimo de enjambres sísmicos. Sin embargo, al cabo de algunos meses o años la actividad sísmica que ocurre en el Ticsani nuevamente podría incrementarse e, incluso, dar inicio a un nuevo proceso eruptivo. Es por ello que resulta importante continuar con el monitoreo permanente y en tiempo real de este macizo volcánico para alertar de manera oportuna a las autoridades para la toma de decisiones.

## CONCLUSIONES

- El Ticsani es un volcán activo que en los últimos 10 000 años ha presentado al menos tres erupciones de tipo subpliniano y freatomagmáticas. Hace 400 años presentó una erupción explosiva que emitió depósitos de lapilli de pómez.
- En las últimas dos décadas, se ha registrado sismicidad recurrente en las inmediaciones de dicho volcán, principalmente de tipo Volcano-Tectónico, asociada al fracturamiento de rocas y ligada a la actividad de fallas activas que llegaron a ocasionar daños en centros poblados como Calacoa, San Cristóbal, etc. También se ha observado sismicidad de tipo Volcano-Tectónico que se presenta en forma de enjambres sísmicos desde 2005.
- Desde 2015, se vienen registrando sismos de tipo Híbrido muy energéticos entre 8 km y 12 km de profundidad del cráter del volcán Ticsani, relacionados al movimiento de magma. Además, en menor número, se han observado sismos de tipo Largo Periodo y Tremor posiblemente relacionados a la circulación de fluidos magmáticos.
- Durante el periodo 2014-2019, el 97 % de sismos ocurridos y registrados en la zona del Ticsani fueron de tipo Volcano-Tectónico; el 1.3 %, de tipo Tremor; el 0.8 %, de Largo Periodo y, el 0.3 %, de tipo Híbrido. La sismicidad de tipo Volcano-Tectónico presentó magnitudes de hasta M4.4 y profundidades de hasta 20 km; esta sismicidad es recurrente. Asimismo, en general, los focos sísmicos siguen un lineamiento NO-SE acorde con el sistema de fallamiento regional.
- Probablemente, la intensa actividad sísmica registrada en el volcán Ticsani, con la ocurrencia de sismos de tipo Híbrido, estaría relacionada a aportes o ascenso de magma, lo que generaría presiones (presurización del sistema) que actúan bajo el volcán y que son transmitidas a distancias lejanas al edificio volcánico: esto propiciaría la generación de enjambres de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT).
- A la fecha de realización de este informe, el volcán Ticsani presenta actividad sísmica por debajo de los niveles observados en 2015 y 2016; sin embargo, no se

descarta la posibilidad de presentarse un incremento de su actividad como se ha observado en años anteriores.

## **RECOMENDACIONES**

- Dado que el Ticsani es un volcán activo y existen posibilidades de reactivación volcánica, es necesario trabajar en temas de prevención mediante la elaboración de planes de contingencia por erupción volcánica.
- Realizar simulacros de evacuación por erupción volcánica para que la población y autoridades conozcan las acciones que deben emprender para prevenir daños o efectos en la población.
- Tomar en cuenta las recomendaciones impartidas en los boletines y reportes emitidos por el IGP y las autoridades de Defensa Civil.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de mayo de 1999 (MW=4.0). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 91 (2001) p.69-80.
- Buurman, H., and M. E. West (2013), Magma fracture and hybrid earthquakes in the conduit of Augustine Volcano, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 6038–6042, doi:10.1002/2013GL057864
- Byrdina, S., Ramos, D., Vandemeulebrouck, J., Masias, P., Revil, A., Finizola, A., y otros. (2013). Influence of the regional topography on the remote emplacement of hydrothermal systems with examples of Ticsani and Ubinas volcanoes, Southern Peru. (P. Shearer, Ed.) *Earth and Planetary Science Letters*, 152-164.
- Carlotto, V. (2009). Puesta en evidencia de fallas activas mediante fotografías aéreas en la región de Huaytire-Laguna Suches, Moquegua, Sur del Perú. Archivo técnico INGEMMET, 5p.
- Chouet B. (1996). Long-period volcano seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. *Nature* 380 (6572): 309 - 316.
- Cruz, J. (2016). Actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (Moquegua) para el periodo mayo - setiembre del 2014. Tesis de grado profesional. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa - Perú, 159p.
- Cruz, J., O. Macedo, J. Del Carpio, L. Ali, W. Alvarado, R. Centeno, J. Concha, R. Chijcheapaza, L. Macedo, A. Malpartida, V. Montesinos, N. Limachi, N. Puma, J. Torres, J. Vilca, K. Vargas, L. Velarde. Estado actual de la actividad del volcán Ticsani, resultados del monitoreo y vigilancia 2014-2018. Informe técnico nro. 01. Servicio Vulcanológico Nacional. IGP.
- Delacour, A., Gerbe, M. C., Thouret, J. C., Wörner, G., & Paquereau-Lebti, P. (2007). Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69(6), 581-608.
- De Silva, S. L., & Francis, P. W. (1991). *Volcanoes of the central Andes* (Vol. 219). Berlin: Springer-Verlag

- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Perú. *Jour. Of South American Earth Sciences*, 4, p. 13-24.
- Fournier, R. (1999). Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. *Bulletin of the society of economic Geologists*, p. 1205-1208.
- García, W., & Guevara, C. (1998). *Geología del Cuadrángulo de Huaytire*. INGEMMET, mapa en versión digital, Lima.
- Gonzales, K., Froger, J., Rivera, M., & Audin, L. (2006). Deformación co-sísmica producida por el sismo Mb=5.4 del 01 de octubre de 2005 (Carumas-Moquegua), detectada por interferometría radar - InSAR. In XIII Congreso peruano de Geología. Vol, 2005, pp. 488-489.
- Gonzales, K., Froger, J.-L., Audin, L., & Macedo, O. (2009). Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por interferometría Radar – Insar. *Sociedad Geológica del Perú SGP*.
- Grange, F. (1983). *Etude sismotectonique détaillée de la subduction lithosphérique au Sud Pérou*. These pour docteur 3e cycle Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble, p. 400.
- Havskov, Jens, & Lindholm, C. (1997). *The Seisan Earthquake Analysis Software for the IBM Pc and Sun. Version 6.0*. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway.
- Ibáñez, J., & Carmona, E. (2000). Sismicidad volcánica. *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica, Serie Casa de los Volcanes*, 7, 269-282.
- INEI (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados, Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas* ([https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1541/index.htm](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm))

- Jay, J., Pritchard, M., Aron, F., Delgado, F., Macedo, O., & Aguilar, V. (2013). Volcano-tectonic interactions at Sabancaya and other Peruvian volcanoes revealed by InSAR and seismicity. American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts V51E-2735.
- Johnson, J. B., & Aster, R. C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(3-4), 334-354.
- Kissling, E., Kradolfer, U., & Maurer, H. (1995). Program VELEST user's guide-Short Introduction. Institute of Geophysics, ETH Zurich.
- Klein, F.W, 1989, HYPOINVERSE, a program for VAX computers to solve for earthquake locations and magnitudes, U.S. Geological Survey Open-File Report 89-314, 59 pp.
- Lahr, J. C. (1999). HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern. Denver, Colorado: US Geological Survey. p. 119.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (2009) 253–264.
- Lee, W. H. K., Bennett, R. E., & Meagher, K. L. (1972). A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration (p. 28). US Department of the Interior, Geological Survey.
- Macedo, O., Taipe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., y otros. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú (IGP)--Instituto Geofísico UNSA-Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Arequipa - Perú., mayo 2016, 75 p.
- Mamani, M., Wörner, G., & Thouret, J. C. (2008). Tracing a major crustal domain boundary based on the geochemistry of minor volcanic centres in southern Peru. In 7th International Symposium on Andean Geo dynamics: Paris, Institut de

recherché pour le développement and Université Nice Sophia Antipolis, Extended abstract (pp. 298-301).

- Mariño, J. (2002). Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Peru). 160.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima.
- McNutt, S. (2000). Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego, Pp. 1015-1034.
- Minakami, T. (1974). Seismology of volcanoes in Japan, Physical Volcanology, Eds. L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla, Elsevier, Amsterdam. Pp.1-27.
- Mogi, K. (1963). Some discussions on aftershocks, foreshocks, and earth-quake swarms: the fracture of a semi finite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. Bull. Earthq. Res.Inst., 41, 615–658.
- Norabuena, E. O., Dixon, T. H., Stein, S., & Harrison, C. G. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. Geophysical Research Letters, 26(22), 3405-3408.
- Shimozuru, D. (1971). A seismological approach to the prediction of volcanic eruptions. In The surveillance and prediction of volcanic activity: A review of methods and techniques (p. 19).
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). Volcanoes of the world. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press, Berkeley.
- Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)—South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. Journal of South American Earth Sciences, 11(3), 211-215.
- Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Thouret, J.-C., Davila, J., Eissen, J., 1999. Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru," Geology, vol. 27, no. 5, pp. 435–438.

- Villegas, J. C. (2009). Modelos de velocidad unidimensionales para las regiones del Norte, Centro y sur del Peru, a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S de sismos locales. Tesis de ingeniero, 97.
- Wadati, K., & Oki, S. (1933). On the travel time of earthquake waves. (Part II). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 11(1), 14-28.
- White R., & McCausland W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309 (2016) 139–155. Published by Elsevier B.V.
- White, R. (2011). Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. *Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting*, 11-15 September 2011, Erice, Italy.
- Yoshida, K., & Hasegawa, A. (2018). Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6), 5000-5017.