

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SISMO DE CALACOA (OMATE-MOQUEGUA) DEL 6 DE MAYO DE 1999 (MW=4.0)

Víctor AGUILAR¹, Hernando TAVERA², Isabel BERNAL², Héctor PALZA¹ & Roberto KOSAKA¹

¹ Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa

² CNDG-Sismología del Instituto Geofísico del Perú

E-mail: vaguilar@ec-red.com; jtavera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

En este estudio se analiza y evalúa los parámetros hipocentrales del “Sismo de Calacoa” ocurrido el 6 de Mayo de 1999 (Mw=4.0), sus características y los efectos del mismo. La información a utilizarse proviene de una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones portátiles del Instituto Geofísico de la UNSA (IGUNSA) y cuatro digitales de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP). El sismo de Calacoa ha sido localizado a 7 km al NE de la localidad del mismo nombre y sobre la proyección en esa dirección, de la falla de Calacoa. El foco del sismo presenta una profundidad de 6.5 km y una magnitud de 4.0 Mw. La intensidad máxima de IV-V ha sido evaluada en las localidades de Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista y Quebaya. A partir del análisis espectral se ha obtenido un momento sísmico escalar de 2×10^{22} dina-cm y un radio de fractura de 1000 metros. La distribución espacial y en profundidad del sismo de Calacoa y de algunas réplicas, sugiere un área de ruptura de 8x13 km; sin embargo, no se ha observado en superficie ninguna traza de falla. El sismo de Calacoa y sus réplicas, tuvieron su origen en los procesos de deformación superficial del tipo extensivo, los mismos que frecuentemente se producen en las zonas altas de la Cordillera Andina.

ABSTRACT.- ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE CALACOA EARTHQUAKE (OMATE, MOQUEGUA) OF MAY 6TH, 1999 (Mw=4.0)

In this study we analyze and evaluate the focal parameters of the “Calacoa Earthquake” occurred on May 6th, 1999 (Mw=4.0), their characteristics and effects. The information comes from a temporary seismic network composed by three portable stations of the Geophysical Institute of the UNSA (IGUNSA) and four digital stations of the National Seismic Network (RSN) Geophysical Institute of the Peru (IGP). The Calacoa Earthquake has been located 7 km to the NE of the locality of the same name and on the projection, in that direction of the Calacoa fault. The hypocenter had a depth of 6.5 km and a magnitude of 4.0 Mw. A maximum intensity of IV-V occurred in the localities of Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista and Quebaya. From spectral analysis, we obtained a seismic moment of 2×10^{22} dina-cm and a fracture radio of 1000 meters. The space and depth position the Calacoa earthquake and of some aftershocks suggests a rupture area of 8x13 km; however, no evidence of fault has been observed in surface. The Calacoa earthquake and its aftershocks had their origin in the shallow deformation processes of the extensive type that are frequently produced in the high zones of the Andean Cordillera.

INTRODUCCION

La actividad sísmica de Perú tiene su origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, presente de Norte a Sur en su borde Oeste, con una velocidad relativa del orden 8–10 cm/año (Minster y Jordan, 1978). Como resultado de este proceso continuo, en el continente se ha formado la Cordillera Andina en diferentes etapas orogénicas. La alta velocidad de acoplamiento existente entre estas dos placas, puede ser evaluada si se cuantifica la ocurrencia frecuente de sismos de magnitud elevada a lo largo de su contacto (entre la fosa y la línea de costa) y en el interior del continente, aunque la periodicidad y tamaño de estos últimos, sea menor a los primeros.

En la región Sur de Perú, la Cordillera Andina presenta una altura del orden de 5,000 m y un ancho de aproximadamente 450 km. Según su geomorfología, esta región puede ser dividida en cinco unidades paralelas a la cordillera (Mégard, 1978; Suárez et al, 1983; Tavera y Bufo, 1998): la zona costera, la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental y la Zona Subandina. Esta morfología controla el alto índice de sismicidad, presente a diferentes niveles de profundidad y cuyas características principales han sido analizadas y discutidas anteriormente por diversos autores (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Bufo, 1998; Aguilar et. al., 2000; Tavera y Bufo, 2001).

La sismicidad relacionada directamente con la

deformación de la corteza continental en la región Sur de Perú, presenta focos superficiales ($h \leq 60$ km) y magnitudes mb menores a 6.5. En la Figura 1, se observa que el número de sismos con foco superficial es mayor frente a la línea de costa, los mismos que podrían estar asociados principalmente al proceso de subducción; mientras que en el interior del continente, el número es menor y aunque estos se distribuyen de manera dispersa, en general son debidos a la reactivación esporádica de algunos sistemas de fallas distribuidos en los Altos Andes (más de 3,000 metros de altura) y en la zona Subandina (Suárez et al, 1983; Sébrier et al., 1987; Macharé y Leureyro, 1991). En los Altos Andes los sismos alcanzan profundidades menores a 30 km, siendo la frecuencia de ocurrencia de los mismos (magnitud moderada, ~ 5.0 mb), menor con relación a otras zonas de mayor índice de sismicidad (zonas de subducción y Subandina). En la región Sur de Perú, los sismos de foco superficial se distribuyen principalmente próximos o sobre algunos sistemas de fallas localizados en los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa y Apurímac (Figura 1). En los alrededores de la localidad de Calacoa, no se observa la presencia de sismos con foco superficial y magnitud moderada; sin embargo, no se descarta el hecho de que ocurran sismos de magnitudes pequeñas, los mismos que debido a la falta de redes sísmicas locales no pueden ser registrados ni localizados. En general, los sismos con foco superficial presentan frecuentemente magnitudes menores y como son debidos a fallas locales, sus efectos en superficie suelen ser tan grandes como los producidos en la zona de costa por sismos asociados al proceso de subducción.

El 6 de Mayo de 1999, a las 23 horas y 04 minutos (hora local), ocurrió un sismo de foco superficial y magnitud moderada en las proximidades de la localidad de Calacoa, distrito de San Cristobal, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Este sismo, denominado "Sismo de Calacoa", afectó principalmente a las localidades de Calacoa y Cuchumbaya, siendo originalmente un sismo típico de los que ocurren en los Altos Andes de Perú; es decir, magnitud moderada y alto grado de destrucción. Además de su magnitud moderada, el sismo presentó características importantes como estar asociado a la posible reactivación de una falla local, la profundidad superficial de su foco y un área restringida de intensidad máxima. Después de ocurrido el sismo de Calacoa y durante un período de 8 días, se produjo un importante número de réplicas que generaron pánico y desesperación en la población de la localidad de Calacoa y alrededores. En este estudio se analiza y evalúa los parámetros hipocentrales del "Sismo de Calacoa", sus características y efectos. La información utilizada proviene de una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones portátiles del IGUNSA y cuatro digitales de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del IGP.

CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS

La región Sur del Perú se caracteriza por ser la de mayor potencial sísmico y su máxima expresión en superficie se pone en evidencia con la presencia de algunas fallas geológicas, de diferentes longitudes, distribuidas en el interior del continente y cuyas características

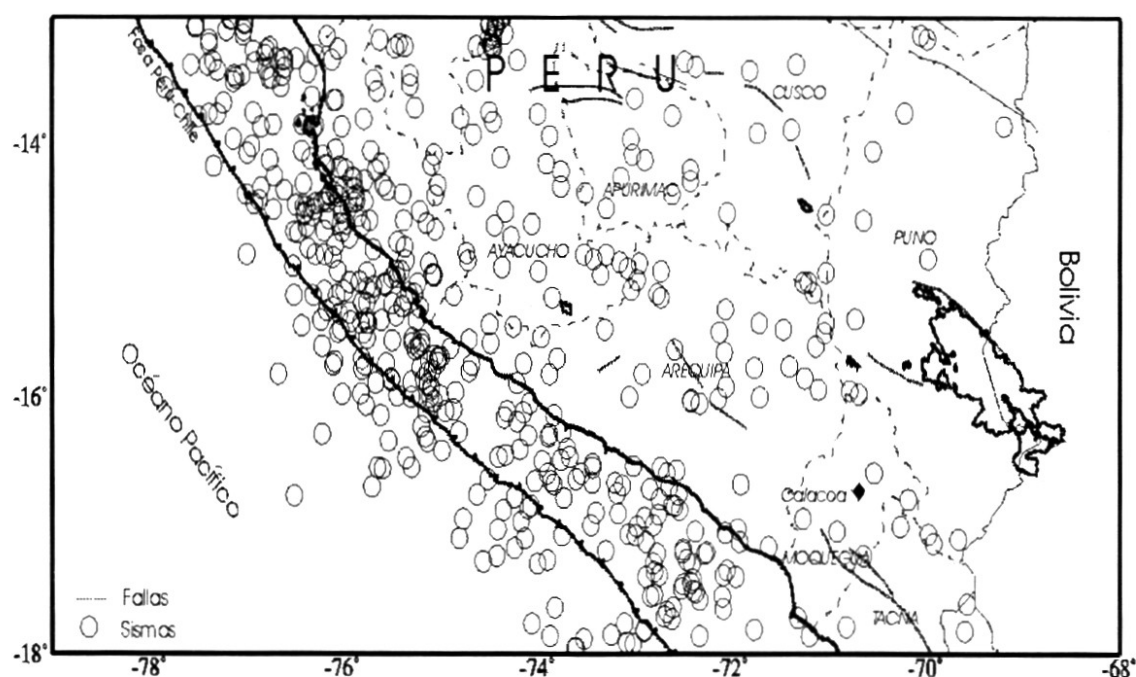


Figura 1.- Sismicidad superficial ($h \leq 60$ km) presente en la región Sur de Perú para el período 1970-2000 ($mb \geq 4.0$) según el Catálogo Sísmico del IGP. Las trazas de falla corresponden a Macharé y Leureyro (1991).

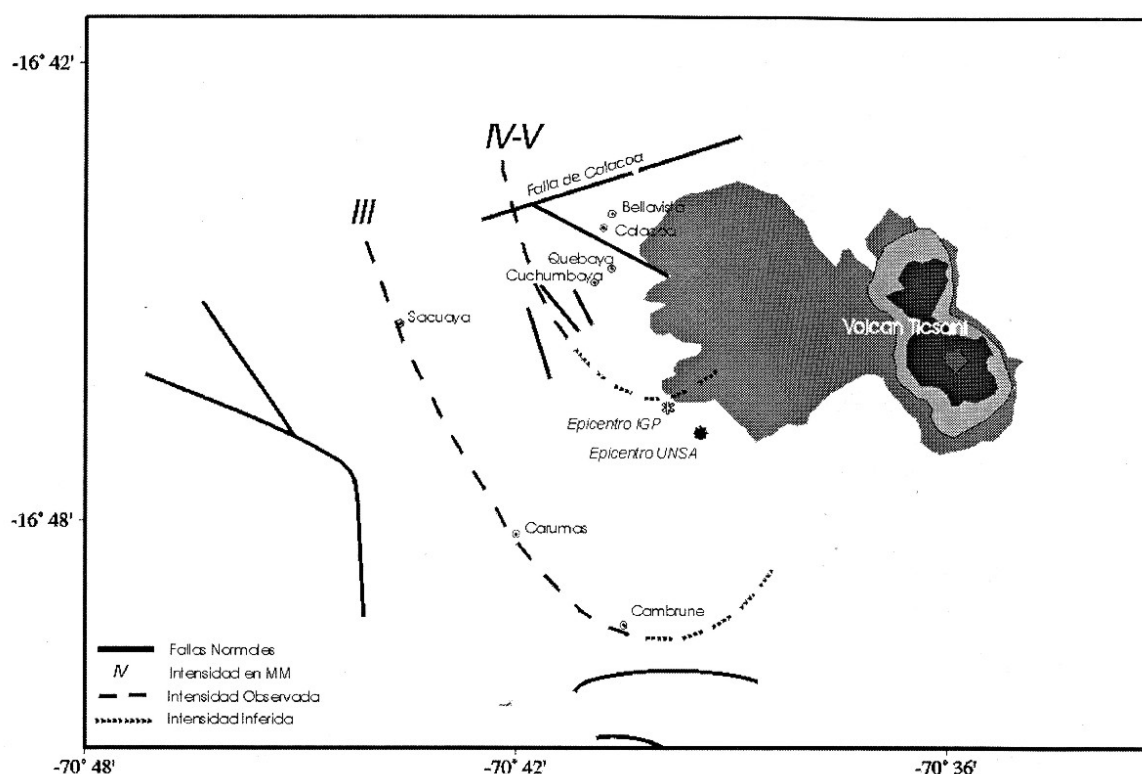


Figura 2.- Principales elementos tectónicos presentes en el área de Calacoa y del volcán Ticsani. Las líneas discontinuas indican las intensidades en la escala Mercalli Modificada. Las estrellas indican el epicentro preliminar del sismo de Calacoa obtenido por el IGP (en blanco) y por el IGUNSA (en negro).

dependen del tipo de esfuerzo actuante (compresión o tensión). En esta región, el área de Calacoa ha sido afectada por deformaciones pequeñas asociadas al lento levantamiento de la Cordillera Andina, el mismo que ha producido en superficie la formación de fallas de corta longitud (Figura 2). En general, estas fallas producen sismos de magnitud pequeña; es decir, prácticamente imperceptibles para la población, pero también pueden generar sismos de magnitud moderada o enjambres sísmicos en períodos de tiempo muy cortos afectando en gran porcentaje a las viviendas débiles, las mismas que son típicas de estas regiones (viviendas de quinchá y piedra).

En la Figura 2, se observa que en el área de Calacoa las fallas de corta longitud, en general, corresponden a procesos extensivos propios de zonas o áreas ubicadas en los Altos Andes. De estas fallas, la de Calacoa se ubica a 1 km al Norte de la localidad del mismo nombre con una orientación NE-SW y una longitud de 7 km. Asimismo, parte de este sistema se ubica a 0.3 km, al Sur de Calacoa con orientación NW-SE sobre una longitud de 4 km aproximadamente, la misma que corta a la anterior en su extremo SW. Otros sistemas de fallas están ubicados al SW de la localidad de Cuchumbaya con una orientación NW-SE y longitudes de 0.8, 1.7 y 1.9 km. Cerca a las localidades de Sacuaya, Cambrune y Carumas, puede identificarse 2 sistemas de fallas de longitud mayor, las mismas que no tiene relación con las deformaciones locales presentes en los alrededores de Calacoa. La reactivación de estas fallas, debido a la ocurrencia de sismos, es poco

frecuente; sin embargo, debido a la longitud de las mismas y a su proximidad a algunas localidades, cuando ésta ocurre produce destrucción y algunas veces pérdidas humanas.

EL SISMO DE CALACOA DEL 6 DE MAYO DE 1999

Parámetros Hipocentrales

El epicentro del sismo de Calacoa fue localizado por el IGP y por el IGUNSA a 5 y 6 km al SSE de la localidad del mismo nombre, distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua (Figura 2). Este sismo de carácter local, tuvo una magnitud moderada del orden de 3.8 mb (IGP) y 4.1 M_L (IGUNSA). Las localizaciones epicentrales obtenidas por el IGP y el IGUNSA se presentan en la Tabla 1, siendo estas bastante relativas debido a que fueron obtenidas a partir de la diferencia de tiempos de llegada $T_s - T_p$ (distancia epicentral) y de las características del movimiento de la partícula del suelo utilizando la información de las estaciones TOQ (IGP) y ARE (IGUNSA), ambas de 3 componentes (Z, N-S y E-W). Por lo tanto, la confiabilidad de los resultados depende básicamente de las características del registro del sismo en las tres componentes de la estación y de la amplitud de la primera onda (P) que llega a la misma. Al no existir mayor información, el IGP y el IGUNSA utilizaron ambas localizaciones en las evaluaciones preliminares del sismo de Calacoa.

Tabla 1.- Parámetros hipocentrales del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999.

Hora Local	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag.	Institución
23 04 59.40	-16.780°	-70.660°	Superficial	4.1 M _L	IGUNSA
23 04 58.10	-16.775°	-70.665°	Superficial	3.8 mb	IGP
23 04 42.58	-16.728°	-70.612°	6.5	4.0 Mw	Este estudio

Intensidades Sísmicas

La evaluación de las intensidades producidas por el sismo de Calacoa, fue realizada mediante encuestas por teléfono inmediatamente después de ocurrido el sismo. La información fue proporcionada por personal de las municipalidades, puestos de salud, policiales y personas naturales de las localidades de Carumas, Calacoa, Cuchumbaya, Sacuaya, Quebaya, Bellavista y Cambrune. La información recopilada fue interpretada utilizando la Escala Mercalli Modificada (MM), la misma que presenta las siguientes características:

Intensidad IV-V. Las localidades de Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista y Quebaya fueron las más afectadas en sus viviendas debido a que estas, en su mayoría, estuvieron construidas con material rústico (adobe y piedras). Las personas salieron a las calles llenas de pánico debido al movimiento continuo del suelo.

Intensidad III. En las localidades de Cambrune, Carumas, y Sacuaya se observó menor daño en las viviendas; sin embargo, en algunos tramos de la carretera Carumas-Calacoa se produjo el desprendimiento de algunos bloques de piedras de diferentes tamaños.

Intensidad II. El sismo fue sentido suave por algunas personas en las ciudades de Arequipa y Tacna.

En la Figura 2, se presenta el mapa de intensidades del sismo de Calacoa, elaborado a partir de la información descrita anteriormente. En la figura se observa que las isosistas presentan, de manera aproximada, una forma elíptica y sugieren que el epicentro del sismo se ubicó al norte de las localidades de Calacoa y Bellavista.

Momento Sísmico Escalar y Radio de Fractura

Debido al tamaño moderado del sismo de Calacoa, éste fue registrado por pocas estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP, siendo la ubicada en la localidad de Toquepala (TOQ) la que presenta registros de buena calidad (distancia epicentral 64 km). Los registros del sismo obtenidos de esta estación, fueron utilizados para estimar el momento sísmico escalar y el radio de fractura del sismo de Calacoa a partir del espectro de amplitud del desplazamiento de la onda P. Para la aplicación de esta metodología debe suponerse que el proceso de ruptura obedece a una cizalla y si se considera una fractura de tipo circular, la parte plana del espectro será equivalente al momento sísmico escalar ($\Omega_0 = M_0$) y la frecuencia esquina (f_c), inversamente proporcional a las dimensiones de la fuente (Aki, 1967; Brune, 1970).

En la Figura 3 se presenta el espectro obtenido

para onda la P a partir de su registro en las componentes vertical (Z) y horizontal (NS) de la estación TOQ. Una vez identificada la parte plana del espectro (Ω_0) y la frecuencia esquina (f_c), el momento sísmico escalar es calculado utilizando la relación definida por Keilis-Borok (1960) y Stavrakakis et al, (1991) en 2×10^{22} dina-cm (M_0); mientras que, el radio de fractura es estimado en 1000 metros (r_0) a partir de la relación de Brune (1970).

Conocidos el momento sísmico escalar y el radio de fractura, la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$), el desplazamiento medio (Δu) y la magnitud energía (M_w) fueron calculados a partir de las relaciones establecidas por Brune (1970) y Kanamori (1977). Así, para el sismo de Calacoa se obtiene una caída de esfuerzos de 8 bars, un desplazamiento medio de 2 cm y una magnitud energía de 4.0 Mw.

Red Sísmica Temporal

El sismo de Calacoa, al igual que otros sismos de carácter superficial, fue seguido de un gran número de sismos de magnitudes pequeñas comúnmente llamados réplicas. A fin de registrar estas réplicas, el IGUNSA procedió a instalar una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones sísmicas portátiles en los alrededores de la localidad de Calacoa y del volcán Ticsani, tratando en lo posible de triangular la zona epicentral probable (identificada a partir de la ubicación preliminar y la intensidad máxima del sismo de Calacoa). Los puntos seleccionados para la instalación de las estaciones sísmicas se presentan en la Figura 4, éstas fueron del tipo portátil con sismómetros de período corto de una sola componente (sensor vertical SS-2) y registro analógico a razón de 120 mm/minuto (papel ahumado). El control de tiempo se realizó con un reloj interno previamente calibrado con la Hora Universal GMT en el IGUNSA.

Las estaciones sísmicas portátiles funcionaron de manera ininterrumpida durante los días 12, 13 y 14 de Mayo de 1999, tiempo después del cual fueron retiradas debido a que la frecuencia de los sismos disminuyó considerablemente. Contrariamente, las estaciones sísmicas de la región Sur (permanentes) y que integran la Red Sísmica Nacional se encontraron operativas durante todo el período de crisis sísmica; sin embargo, debido a que estas se ubican en puntos alejados del área de interés, no pudieron registrar el total de las réplicas (Figura 4). La información obtenida de esas estaciones, ha sido utilizada básicamente para evaluar las características del sismo principal. Las coordenadas geográficas y características de las estaciones sísmicas portátiles y digitales se presentan en la Tabla 2.

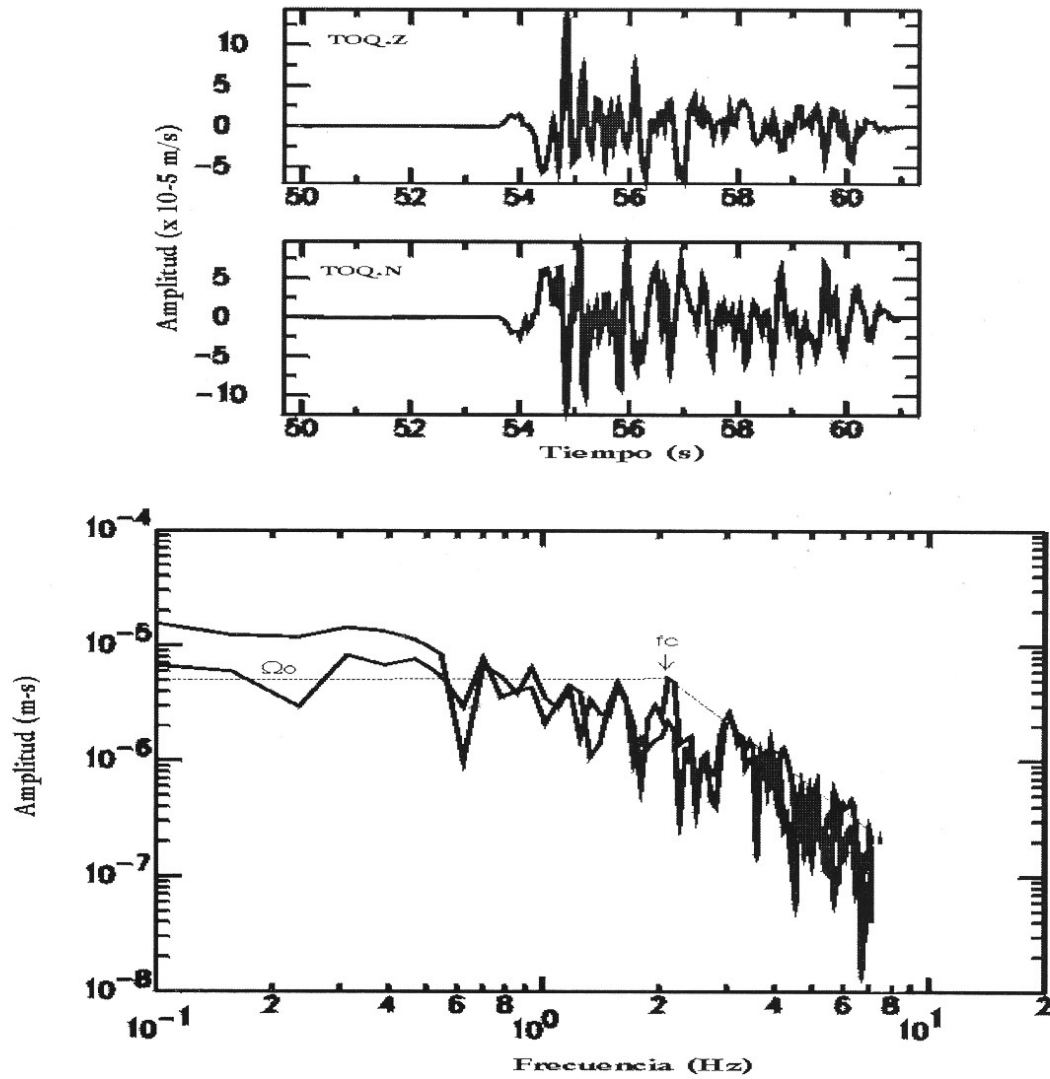


Figura 3.- Registros del sismo de Calacoa en la estación de Toquepala (TOQ) y espectro de amplitud de la onda P para las componentes vertical (Z) y horizontal (N-S).

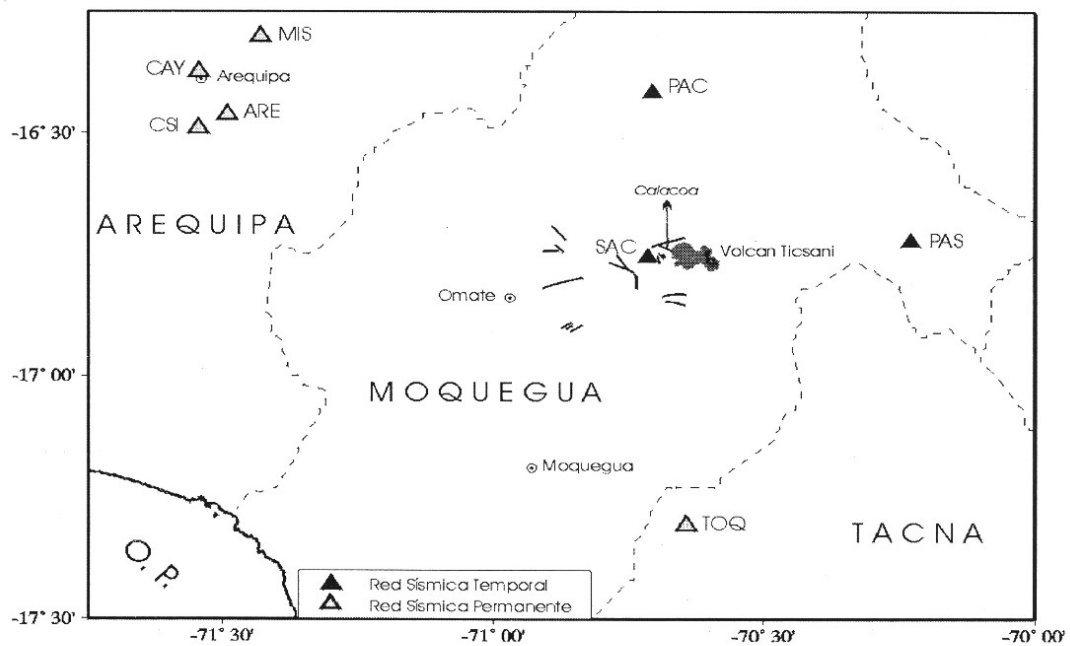


Figura 4.- Distribución de las estaciones sísmicas que integran la red sísmica temporal del IGUNSA (triángulos en negro) y la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP (triángulos en gris). O.P. indica Océano Pacífico.

Tabla 2.- Coordenadas geográficas y características de las estaciones sísmicas temporales y permanentes utilizadas en el estudio del sismo de Calacoa.

Estación y Código	Latitud	Longitud	Tipo	Tipo-Registro	Institución
Sacuaya, SAC	-16.757°	-70.715°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Pachas, PAC	-16.416°	-70.707°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Pasto Grande, PAS	-16.725°	-70.230°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Arequipa, ARE	-16.462	-71.491	Benioff	Analógico 3C	IGUNSA
Toquepala, TOQ	-17.307°	-70.643°	BB	Digital 3C	IGP
Misti, MIS	-16.301°	-71.430°	BB	Digital 3C	IGP
Cayma, CAY	-16.376°	-71.545°	SP	Digital SP	IGP
Cerro San Ignacio, CSI	-16.494°	-71.547°	SP	Digital SP	IGP

3C = Tres componentes

SP = Periodo Corto

BB = Banda Ancha

Réplicas

El análisis preliminar del total de las réplicas registradas en la estación sísmica ARE (IGUNSA), permitió observar que entre los días del 6 al 13 de Mayo, el número mayor de réplicas se produjo en los días 7 y 10; mientras que, en días posteriores la frecuencia de las mismas fue totalmente irregular, tal como se muestra en la Figura 5. El número de réplicas registradas por esta estación es similar al reportado por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Perez-Pacheco, 2000). Algunas de estas réplicas, fueron sentidas en las localidades de Carumas, Pachas y Sacuaya con intensidades menores a III en MM.

A fin de calcular los parámetros hipocentrales de las réplicas del sismo de Calacoa, se procedió a realizar la lectura de las fases P y S de todos los eventos sísmicos registrados por las estaciones portátiles del IGUNSA y por la Red Sísmica Nacional para el período comprendido entre los días del 6 al 15 de Mayo de 1999. La lectura de los tiempos de llegada de las fases P y S, necesarios para la localización del sismo, ha sido realizada con errores del orden de 0.1 y 0.3 segundos respectivamente, siendo este mayor para la onda S debido a los rápidos cambios en la frecuencia de la señal, lo cual dificultó su identificación. La correlación de los tiempos de llegada del total de las fases sísmicas correspondientes a las réplicas registradas

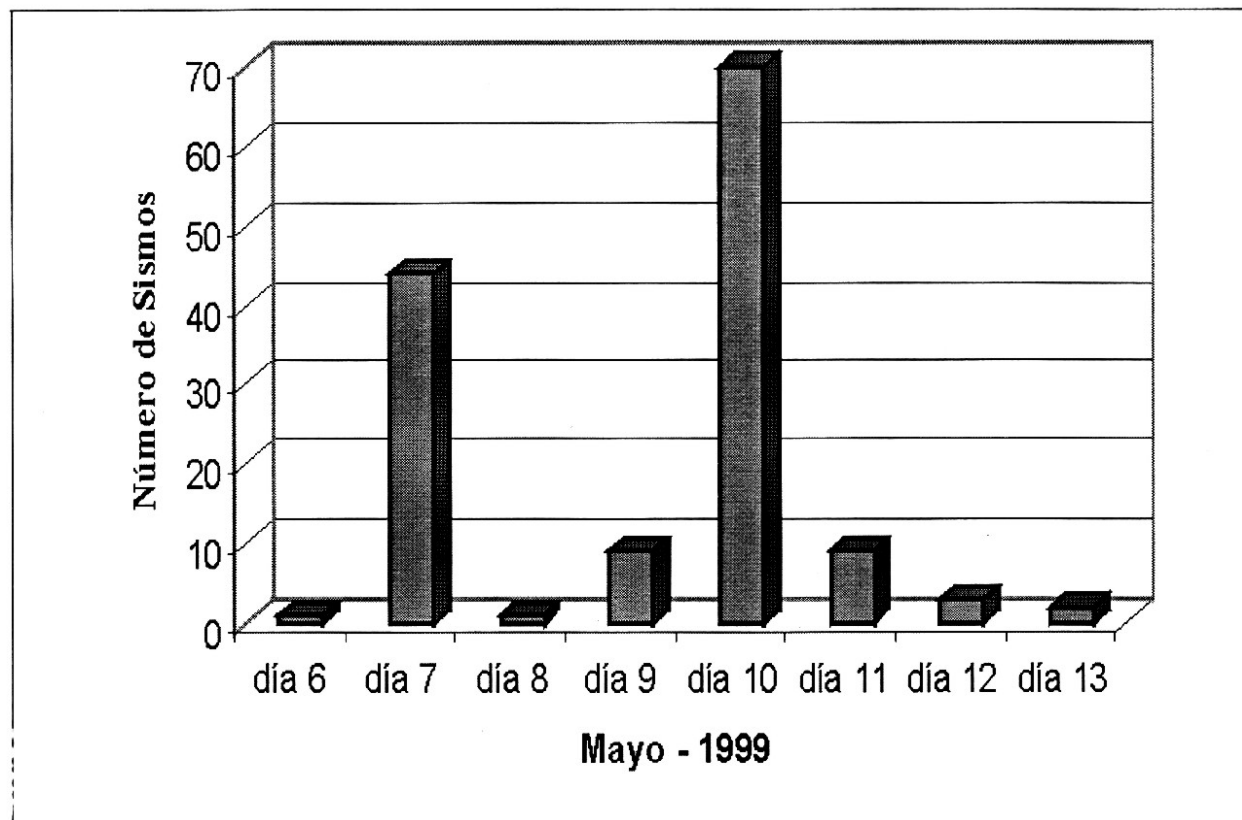


Figura 5.- Histograma del número de réplicas del sismo de Calacoa registradas en la estación sísmica ARE del IGUNSA.

por ambas redes, ha permitido seleccionar únicamente 6 sismos, los mismos que presentan 3 lecturas de onda P y al menos 2 para la onda S. El resto de los sismos fueron registrados en una o dos estaciones; por lo tanto, debido a la falta de un número mayor de fases, no pudieron ser localizados.

Para la localización de las réplicas se utilizó el algoritmo EPI (Rodríguez, 1994) y el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al., (1986) y Lindo (1993), el mismo que ha sido ampliamente utilizado en estudios de microsismicidad realizados en la región andina del Perú Central (Tabla 3). A fin de corregir la velocidad de las ondas S, se ha construido la curva de Wadatti con las lecturas del total de las réplicas registradas en las estaciones del IGUNSA y del IGP (Figura 6), siendo el

valor de $V_p/V_s = 1.77$ similar al obtenido por Dorbath et al., (1986) y Lindo (1993). Los parámetros hipocentrales de las réplicas analizadas en este estudio se presentan en la Tabla 4.

Para estimar la magnitud de las réplicas, se ha procedido a leer la duración de sus registros en las estaciones de la red sísmica portátil a fin de utilizar la ecuación definida por Klein (1978),

$$M_L = -1.1 + 2 * \log(D) + 0.0007(\Delta)$$

donde, M_L es la magnitud local, D la duración del registro del sismo en segundos y Δ la distancia epicentro-estación. Las 6 réplicas, consideradas en este estudio, presentaron magnitudes locales menores a $3.5 M_L$.

Tabla 3.- Modelo de distribución de velocidades utilizado en este estudio.

Vp (km/seg.)	Profundidad (km)
6.0	0-25
6.8	25-55
8.0	> 55

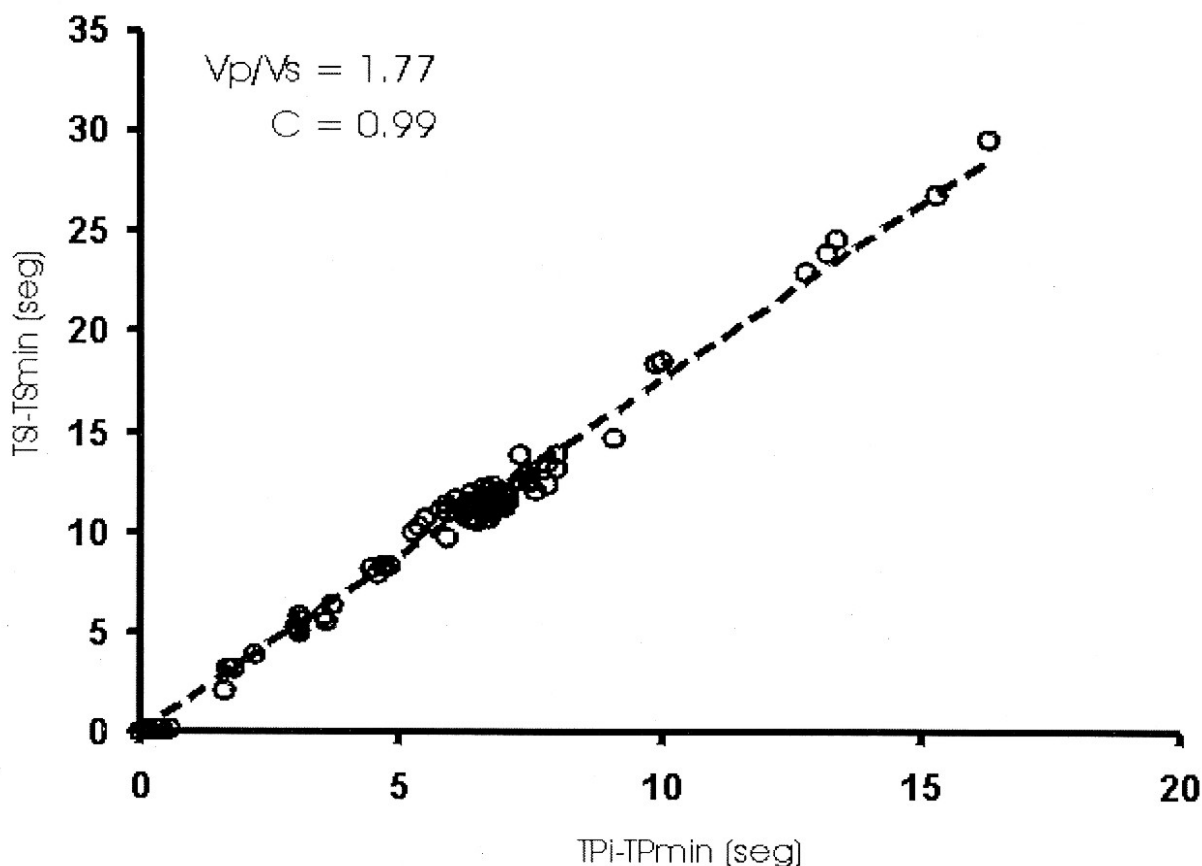


Figura 6.- Curva de Wadatti construida con el total de las réplicas del sismo de Calacoa registradas por las estaciones temporales de la UNSA y permanentes del IGP. V_p/V_s corresponde a la relación de velocidades y C el coeficiente de correlación del ajuste.

Tabla 4.- Parámetros hipocentrales de las réplicas analizadas y localizadas en este estudio.

Fecha .dd mm.aa	Hora Origen .hh mm ss.ss	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag. (M _L)
13 05 1999	00 39 33.39	-16.6815°	-70.4217°	6.0	3.5
13 05 1999	03 00 26.24	-16.7337°	-70.6325°	11.5	2.8
13 05 1999	03 02 31.20	-16.6937°	-70.6036°	4.6	2.1
13 05 1999	05 21 20.47	-16.6767°	-70.6116°	3.0	1.9
13 05 1999	15 42 48.43	-16.6765°	-70.6117°	4.5	2.1
14 05 1999	06 51 50.47	-16.6828°	-70.6087°	4.0	2.1

Relocalización del Sismo Principal

Tal como se describió anteriormente, el sismo de Calacoa fue registrado por las estaciones de la red sísmica permanente (MIS, CSI, CAY, TOQ y ARE), todas ubicadas en la región Sur y si se considera la distribución azimutal de estas estaciones, así como sus distancias epicentrales (estación-zona epicentral), prácticamente sería imposible localizar el sismo utilizando esta información y los algoritmos tradicionales (Figura 4). A fin de evaluar la localización preliminar obtenida para el sismo de Calacoa por el IGP y el IGUNSA, a continuación se sigue dos procedimientos simples utilizando información de la Red Sísmica Nacional y temporal.

El primer procedimiento considera analizar y evaluar el movimiento de la partícula de la onda P en el registro del sismo en tres direcciones: Z, N-S y E-W. En general, las ondas de volumen contienen un alto grado de polarización lineal y el movimiento de la partícula a la llegada de una onda coincide con el azimut de propagación de la energía contenida en las ondas de compresión (onda P). Esta característica permitiría determinar el azimut si se analiza el registro de la onda en sus tres componentes (Z, NS y EW). Si se asume que $u_j = (u_{jN}, u_{jE}, u_{jZ})$ es el movimiento de la partícula en el instante j para la onda P, el azimut estación-epicentro puede ser determinado con la composición en el plano N-E de los distintos puntos u_{jN} , u_{jE} obtenidos para diferentes instantes de tiempo j para la misma fase, formándose una recta que puede ser ajustada por mínimos cuadrados. Evidentemente, el vector resultante tiene dos sentidos y produce una ambigüedad de 180° en la solución, la misma que puede ser salvada si se utiliza información de estaciones sísmicas literalmente opuestas, tal como es el caso del presente estudio y para el cual no es necesario calcular la distancia epicentral (Ts-Tp), debido a que la intersección de los vectores indicaría la ubicación del epicentro del sismo. A fin de aplicar este procedimiento, se ha utilizado el registro del sismo de Calacoa en las tres componentes de las estaciones MIS y TOQ (Z, NS, EW), ambas ubicadas en los extremos Norte y Sur de la zona epicentral y a distancias de 90 y 64 km respectivamente (Figura 4). En la Figura 7, se muestra los gráficos correspondientes a la polarización de la onda P en las componentes horizontales de estas estaciones, así como la orientación de los vectores estación-epicentro

para las estaciones MIS y TOQ. Obsérvese que dichos vectores se cortan en un punto ubicado en las coordenadas -16.68° y -70.58°; es decir, a 11 km al NE de la localidad de Calacoa, próximo a la falla del mismo nombre, lo cual sugiere que el sismo podría haber tenido su origen en la reactivación de esta falla.

Un segundo procedimiento para localizar el sismo de Calacoa, permite considerar los tiempos Ts-Tp de las réplicas registradas por las estaciones sísmicas temporales y digitales, además de la información obtenida de las estaciones MIS, CSI, CAY y ARE para el sismo principal (Figura 4). Del total de las réplicas, únicamente la ocurrida el 13 de Mayo a 03 horas y 00 minutos fue registrada por las estaciones del IGUNSA (SAC, PAC y PAS) y del IGP (TOQ). Para esta réplica, las diferencias entre el tiempo de llegada de las fases S y P (Ts-Tp) a las estaciones SAC, PAC y PAS son de 1.8, 4.3 y 5.8 segundos respectivamente, similar al promedio obtenido para el Ts-Tp de las 6 réplicas localizadas previamente. Asimismo, en el registro de la estación de TOQ la misma réplica presenta una diferencia Ts-Tp de 7.5 segundos, prácticamente igual a la observada en el registro del sismo de Calacoa. A fin de proceder a recalcular el hipocentro del sismo, al algoritmo EPI se le adicionó una subrutina que permite generar los tiempos teóricos de llegada de las ondas P y S, desde un hipocentro hipotético a las estaciones SAC, PAC y PAS a partir del tiempo origen del sismo principal y del valor Ts-Tp obtenido para la réplica del 13 de Mayo (03h00m). El hipocentro teórico presenta una profundidad de 10 km y sus coordenadas corresponden a un punto que indica la ubicación promedio del total de las réplicas localizadas en este estudio. Una vez creada la base de datos, se le adicionó la información obtenida de las estaciones MIS, CSI, CAY y ARE. El algoritmo EPI reinicia el proceso de localización realizando un número mayor de iteraciones a fin de buscar reducir los valores en las residuales de las ondas P y S, especialmente para las estaciones SAC, PAC y PAS. Una vez obtenidos los valores mínimos para las residuales, el algoritmo procede a realizar el cálculo de los parámetros hipocentrales del sismo y entregar la solución final en función del mínimo valor de ajuste para la raíz media cuadrática (RMC). Así, el resumen de la mejor solución obtenida para el hipocentro del sismo de Calacoa se presenta en la Tabla 5 y en la Figura 8. Según estos

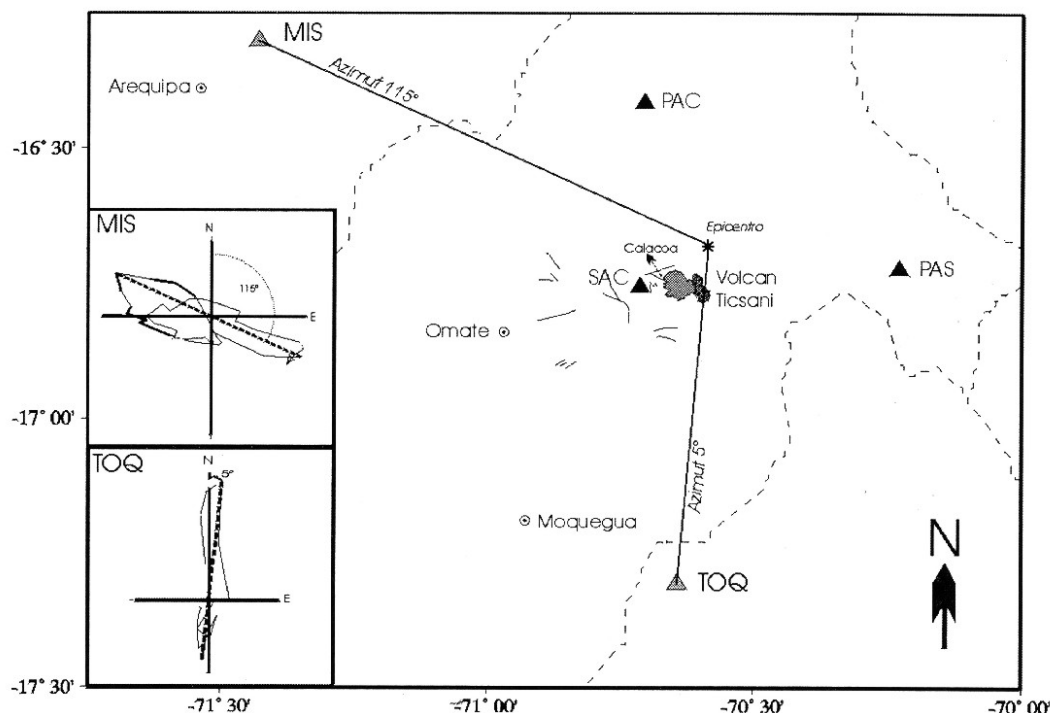


Figura 7.- Cálculo del acimut estación_epicentro del sismo de Calacoa a partir del movimiento de la partícula de la onda P registrada en las estaciones MIS y TOQ. La intersección de los vectores indica la ubicación del epicentro del sismo (estrella).

resultados, el epicentro se localizaría a 7 km al NE de la localidad de Calacoa; es decir, próximo al punto definido por la intersección de los vectores de acimut estación-epicentro (Figura 7) y totalmente opuesto a la ubicación epicentral obtenida inicialmente por el IGP y el IGUNSA. El foco del sismo se ubicaría a una profundidad de 6.5 km.

INTERPRETACION

Los sismos que ocurren en el interior del continente y específicamente en los Altos Andes (> 3,000 m s.n.m.), se deben principalmente a procesos de deformación superficial de carácter local, de ahí que la longitud de las fracturas o fallas visibles en superficie sean de longitudes pequeñas. El "Sismo de Calacoa" tiene su origen en este tipo de procesos y a la falta de redes sísmicas locales, este y otros sismos similares frecuentemente no son registrados por estaciones que integran redes regionales y si lo son, la información no es de buena calidad y útil para localizar el sismo. En este caso, el uso de redes sísmicas temporales permiten registrar sismos de menor tamaño (microsismicidad y réplicas), los mismos que en general ayudan en la interpretación de los procesos complejos que acompañan a este tipo de deformaciones. Asimismo, en los Altos Andes, los sismos se producen cerca de la superficie y de ahí que a pesar de su magnitud moderada, puedan ser sentidos con intensidades relativamente altas. Este es el caso del "sismo de Calacoa".

Las réplicas del sismo de Calacoa, localizados en este estudio (Figura 8), así como del sismo principal (estrella), se ubican en el extremo derecho de la estructura

de mayor longitud del sistema de fallas de Calacoa, sugiriendo que estos se habrían producido debido al fracturamiento o reactivación de esta falla sobre una longitud de 8 km en dirección NE. De las 6 réplicas localizadas, cuatro se ubican en el extremo oriental de la falla reactivada indicado la posible parada de la ruptura; mientras que, las otras dos sugieren la continuidad en la ruptura de la falla de Calacoa.

Los métodos utilizados en este estudio para relocalizar el sismo de Calacoa, permitieron ubicar el epicentro a 7 y 11 km al NE de la localidad del mismo nombre, sobre la prolongación de la traza de la falla de Calacoa. Estas localizaciones epicentrales, son totalmente opuestas a la obtenida por el IGP y el IGUNSA. De acuerdo a la información utilizada y procedimientos seguidos en este estudio para relocalizar el hipocentro del sismo de Calacoa, se asume que los valores obtenidos con el segundo método definen mejor la ubicación del epicentro del sismo de Calacoa. Esta nueva ubicación es coherente con las máximas intensidades observadas y con la distribución de las réplicas en dirección NE. El momento sísmico ($M_0 = 2 \times 10^{22}$ dina-cm) y la magnitud energía ($M_w = 4.0$) obtenidos a partir del análisis espectral ponen en evidencia el tamaño moderado del sismo de Calacoa (Figura 3); mientras que, los valores para la caída de esfuerzos (8 bars) y desplazamiento medio (2 cm) son coherentes con los estimados para sismos de magnitudes similares ocurridos en zonas de deformación continental (Tavera et al, 2000; Tavera et al, 2001).

En el extremo superior de la Figura 8, se muestra una sección vertical con el total de las réplicas y sismo principal localizados en este estudio, según la línea AA'.

Tabla 5.- Parámetros hipocentrales del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999. GMT= Tiempo Universal, Esta = código de la estación, Distan=distancia epicentral, Azm=azimut estación-epicentro, TPCal=tiempo teórico onda P, P/S-Seg=tiempo de llegada de la onda P/S, P/S-Res=residual onda P/S, W=peso de la lectura.

Sismo Calacoa

Fecha: 07 Mayo 1999 Hora Origen (GMT): 04h 04m 42.58s

Latitud: $-16.728^{\circ} \pm 0.1$ km

Longitud: $-70.612^{\circ} \pm 0.0$ km

Profund: 6.5 km ± 0.2 km

Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
TOQ	64.6	183	114	11.2	53.8	0.0	0	62.4	-0.0	0
CAY	106.9	291	113	18.5	61.1	0.0	0	75.3	-0.0	0
CSI	103.1	285	113	17.8	60.4	-0.0	0	0.0	0.0	0
MIS	99.3	298	113	17.2	59.8	0.0	0	0.0	0.0	0
ARE	98.3	287	113	17.0	59.6	0.0	0	72.7	0.0	0
SAC	11.0	256	127	2.3	44.8	-0.0	0	46.7	0.0	0
PAC	36.0	343	115	6.3	48.9	-0.0	0	53.8	-0.0	0
PAS	40.4	90	115	7.1	49.7	0.0	0	55.2	0.0	0
rmc = 0.02										

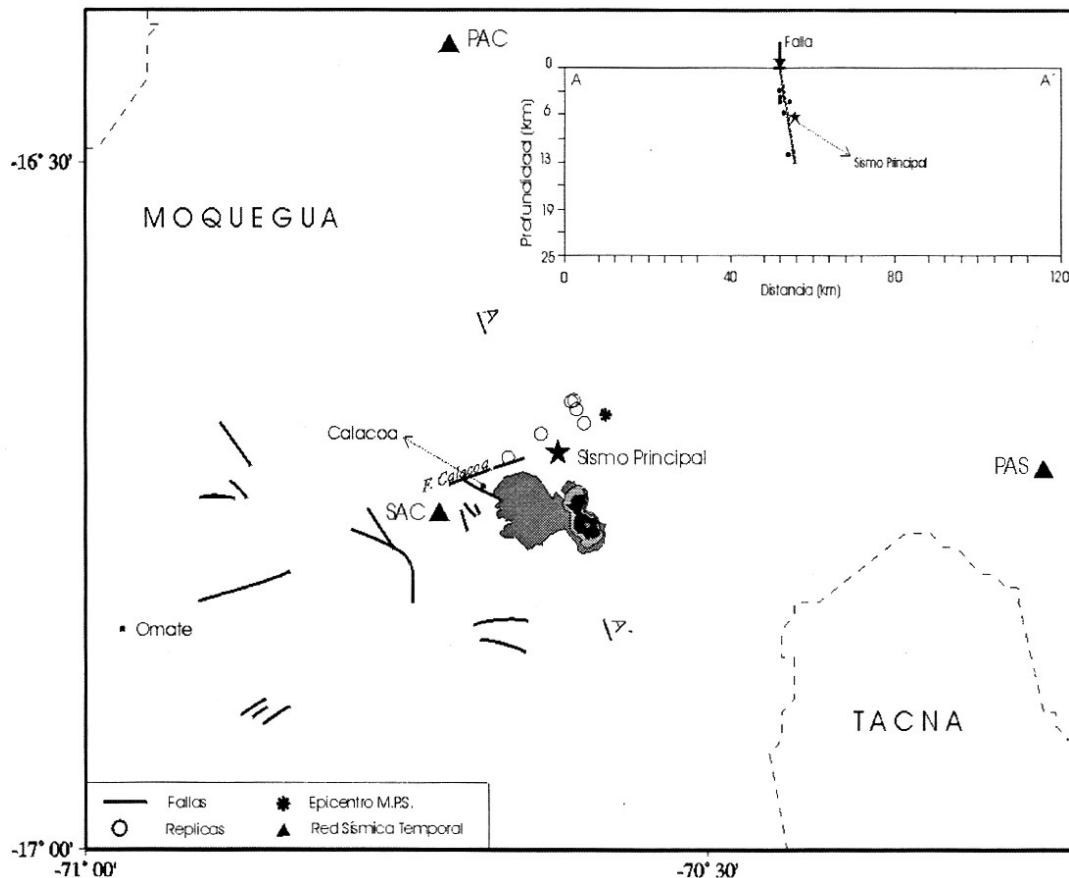


Figura 8.- Principales elementos tectónicos en el área de Calacoa, distribución de las réplicas (círculos) y del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999 (estrella). El asterisco indica el epicentro obtenido a partir del movimiento de la partícula de la onda P (M.P.S.). En la parte superior se muestra una sección vertical en función de la profundidad de los focos sísmicos según la dirección A-A'.

Obsérvese que las réplicas se distribuyen siguiendo una línea de pendiente alta en dirección SE hasta alcanzar una profundidad del orden de 13 km, siendo el sismo principal localizado en la parte media del total del área afectada por la ruptura. Estos resultados ponen en evidencia el carácter superficial de las deformaciones presentes en esta zona.

Los resultados obtenidos en este estudio, son un ejemplo de la importante deformación superficial presente en áreas relativamente pequeñas, las mismas que producen sismos de magnitud moderada con la consecuente ocurrencia de un número importante de réplicas durante períodos de tiempo muy cortos. Asimismo, estas deformaciones puntuales permiten que las intensidades máximas se concentren en áreas pequeñas, siendo prácticamente imperceptibles a distancias mayores.

Actualmente, es difícil prevenir a las poblaciones afectadas por el sismo de Calacoa sobre la recurrencia de este tipo de fenómeno, debido a que se requiere de instrumentos de alta sensibilidad instalados cerca de la zona de interés. Al igual que Tavera y Perez-Pacheco (2000), los resultados obtenidos en este estudio, permiten descartar totalmente la posibilidad de que esta sismicidad haya sido producida por la reactivación del volcán Ticsani, tal como se difundió en su momento por los medios informativos y por los pobladores de las localidades afectadas.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación de las características del sismo de Calacoa, así como de algunas de sus réplicas utilizando información obtenida de una red sísmica temporal (IGUNSA) y de la Red Sísmica Nacional (IGP), han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

El sismo de Calacoa fue de carácter netamente local y foco superficial ($h = 6.5$ km), de ahí su magnitud moderada (4.0 Mw) y área pequeña de intensidad máxima (IV-V en MM). Este sismo fue localizado a 7 km al NE de la localidad del mismo nombre sobre la proyección, en esa dirección, de la falla de Calacoa. El sismo presenta un momento sísmico escalar equivalente a 2×10^{22} dina-cm.

La distribución espacial de las réplicas localizadas en este estudio, sugiere que la ruptura presentó una longitud de 8 km en dirección NE y una profundidad del orden de 13 km. La distribución de las réplicas en función de la profundidad de sus focos, es sobre un plano de ruptura ligeramente inclinado en dirección SE.

Se descarta totalmente la posibilidad de que el sismo y sus réplicas hayan sido debidos a la reactivación del volcán Ticsani.

Los parámetros finales del sismo de Calacoa son:

Fecha:	06 de Mayo de 1999
Hora Origen:	23:04:42.85 (Hora Local)
Latitud Sur:	-16.728
Longitud Oeste:	-70.612
Profundidad:	6.5 km

Magnitud:	4.0 Mw
Momento Sísmico:	2×10^{22} dina-cm
Io Máxima:	IV-V en MM
Desplazamiento medio:	2 cm
Caída de Esfuerzos:	8 bars
Radio de Fractura:	1000 metros

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Director Técnico del IGP, Dr. Hernán Montes por el apoyo brindado a fin de poder realizar el presente estudio, así como facilitar la estancia de uno de los autores (V.A.) en el CNDG-Sismología. A la Sra. Ivonne Perez-Pacheco por realizar el análisis de las réplicas del sismo de Calacoa registrados por las estaciones de la Red Sísmica Nacional y al Ing. J. Gómez por sus comentarios y sugerencias. Finalmente, al personal del Instituto Geofísico de la UNSA que participaron en los diversos trabajos de campo. Publicación N°006-2001-CNDG-IGP.

BIBLIOGRAFIA

AGUILAR V., ESCALANTE C., MINAYA A., TICONA, J., BERROCAL J. & FERNANDEZ C. (2000).- Estructura y Actividad del Volumen Sísmico en la zona de Subducción en el Sur del Perú ($13^{\circ}\text{S} - 18.5^{\circ}\text{S}$). 31 International Geological Congress, Agosto - 2000, Rio de Janeiro, Brasil.

AKI K. (1967).- Scaling law of energy spectrum. *J. Geophys. Res.*, 72, 1217-1231.

BARAZANGI M. & ISACK L. (1976).- Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.

BRUNE J. (1970).- Tectonics stress and spectra of seismic shear waves. *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.

CAHILL T. & ISACKS B. (1992).- Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.

DORBATH C., DORBATH L., CISTERNAS A. & DEVERCHÉRE J. (1986).- On crustal seismicity of the Amazonian foothill of the Central Peruvian Andes. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1023-1026.

DORBATH L., DORBATH C., JIMENEZ E. & RIVERA L. (1991).- Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 13-24.

GARCÍA W. (1978).- Geología e los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huatire, Mazo Cruz y Pizacoma. *Boletín N° 29, INGEMMET*, Lima-Peru, 45 p.

- KANAMORI H.** (1977).- The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 82, 2981-2987.
- KEILIS-BOROK V.** (1960).- Investigation of the mechanism of earthquakes. *Soc. Res. Geophys.*, 4, 29.
- KLEIN F.** (1978).- Hypocenter location program Hypoinverse., U.S. Geological Survey, *Open File Report.*, 78-694.
- LINDO R.** (1993).- *Seismotectonique des Andes du Pérou Central: Apport des données sismologiques de haute précision.* Tesis Doctoral. Universidad Louis-Pasteur de Strasbourg, Francia, 300 p.
- MACHARÉ J. & LEUREYRO J.** (1991).- Mapa Neotectónico del Perú. Instituto Geofísico del Perú y Centro Regional de Sismología para América del Sur.
- MÉGARD M.** (1978).- Etude géologiques des Andes du Pérou Central. *Mem. ORSTOM*, 86, 310 pp.
- MINSTER J. & JORDAN T.** (1978).- Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83, 5331-5334.
- RODRIGUEZ S.** (1994).- EPI, programa de cálculo epicentral., Instituto Geofísico del Perú, Informe Interno, 12 p.
- SÉBRIER M., MERCIER J., MACHARÉ J., BONNOT D. & CABRERA J.** (1985).- Quaternary normal and reverse faulting and state stress in the central Andes of southern Peru. *Tectonics.*, 4, 739-780.
- STAUDER W.** (1975).- Subduction of the Nazca under Peru as evidenced by focal mechanisms and by seismicity. *J. Geophys. Res.*, 80, 1053-1064.
- STAVRAKAKIS G., BLIOMA S. & GOUTIS C.** (1991).- Dynamics sources parameters of the 1981 Gulf of Corinth earthquakes. *Tectonophysics*, 185, 261-275.
- SUAREZ G., MOLNAR P. & BURCHFIEL B.** (1983).- Seismicity, fault plane solution, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *J. Geophys. Res.*, 88, 10403-10428.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- Sismicidad y Sismotectónica de Perú. En: Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica; Buforn, E. y Udías A. (eds.), Física de la Tierra, Univ. Complutense de Madrid, 10, 187-219.
- TAVERA H. & PEREZ-PACHECO I.** (2000).- Análisis del enjambre sísmico de Calacoa (Moquegua) de Mayo 1999. X Congreso Peruano de Geología Lima 19-22 de Julio 2000.
- TAVERA H., VILCAPOMA L. & MILLONES J.** (2000).- El Terremoto de Chuschi-Quispillacta (Ayacucho) del 31 de Octubre de 1999 (Mw=4.5). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 89, 13-20.
- TAVERA H., BUFORN E., BERNAL I. & ANTAYHUA J.** (2001).- Análisis de los procesos de ruptura de los terremotos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú). Enviado al Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (2001).- Source Mechanism of Earthquake in Peru. *Journal of Seismology*, (in press).