

Mecanismo Focal del Terremoto de Nazca (Perú) del 12 de noviembre de 1996 ($M_w = 7.7$)

Hernando Tavera*
Elisa Buforn**
Ivonne Pérez-Pacheco*

Abstract

On November 12, 1996, an earthquake of magnitude 7.7 M_w occurred in front of the Nazca Ridge, South of the Peruvian Central region, its origin has been associated with the subduction process of the Nazca plate under the South American plate. The focal mechanism parameters of the earthquake are determined from the P-wave polarity and body-wave modeling method (P and SH-wave). The focal mechanism corresponds to an inverse fault with fault planes oriented in direction NW-SE, with a dip in the NE direction, next to the horizontal ($\delta = 16^\circ$). The focus depth is estimated to be 18 km. The source time function (STF) has a 50 second duration and a scalar seismic moment of 4.4×10^{20} Nm. It describes a complex rupture process associated with three points of energy release on the same fault plane, two of them having greater size than the third one. Focal mechanisms computed for three aftershocks, of magnitude greater than 5.4 mb, present similar characteristics to the principal earthquake and suggest three rupture stop points located at depths of 11, 21 and 25 km and distributed on a fault plan with a 24° dip in the NE direction. The rupture processes of these aftershocks are simple and of short duration. The earthquake of 1996 is the sixth of the large earthquakes that occurred in the Central Peru region since the 1940s. This inter-plate earthquake is located in the same area where the August 24, 1942 ($M_w = 8.2$) earthquake occurred: in front of the Nazca Ridge, showing the important role that this structure plays in earthquake generation in the region. The results obtained for the 1942 and 1996 earthquakes suggest that the last earthquake is a repetition of the first one.

* CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú.

** Departamento de Geofísica, Universidad Complutense de Madrid.

Resumen

El 12 de noviembre de 1996, se produce un terremoto de magnitud 7.7 Mw frente a la Dorsal de Nazca al sur de la región central de Perú, siendo su origen asociado al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Los parámetros del mecanismo focal del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca), son determinados a partir de la polaridad de la onda P y modelización de ondas de volumen para una fuente puntual a distancias telesísmicas (ondas P y SH). El mecanismo focal corresponde a una falla inversa con planos de falla orientados en dirección NW-SE, siendo el plano con buzamiento al NE próximo a la horizontal ($\delta = 16^\circ$). La profundidad del foco ha sido estimada en 18 km. La función temporal de la fuente sísmica (STF) tiene una duración de 50 segundos y momento sísmico escalar de 4.4×10^{20} Nm y describe un proceso complejo de ruptura asociado a tres puntos de liberación de energía sobre el mismo plano de falla, siendo los dos últimos de mayor tamaño. Los mecanismos focales calculados para tres réplicas de magnitud mayor a 5.4 mb, presentan características similares al terremoto principal y sugieren tres puntos de parada de la ruptura, los mismos que se localizan a profundidades de 11, 21 y 25 km distribuidos sobre un plano de falla con buzamiento de 24° en dirección NE. Los procesos de ruptura de estas réplicas son simples y de corta duración. El terremoto de 1996 se constituye como el sexto de los grandes terremotos ocurridos en la región central de Perú desde 1940. Este terremoto de tipo interplaca, se localiza en la misma área donde ocurrió el terremoto del 24 de agosto de 1942 (Mw = 8.2); es decir, frente a la Dorsal de Nazca y pone en evidencia el rol importante que cumple esta estructura en la generación de terremotos en esta región. Los resultados obtenidos para los terremotos de 1942 y 1996, sugieren que este último es repetitivo del primero.

Introducción

En el borde oeste de América del Sur, se producen terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia debido al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana (Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill e Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1997; Tavera y Buforn, 1998). El Perú es parte de esta región y en los últimos 60 años ha sido afectado por 5 terremotos de gran magnitud ($M_w \geq 7.0$), los mismos que presentaron procesos complejos de ruptura probablemente acondicionados por la presencia de la Dorsal de Nazca y la Fractura de Mendaña en los extremos de la región central de Perú (Figura 1). De norte a sur se puede indicar los siguientes terremotos (Beck y Ruff, 1989; Beck y Nishenko, 1990; Swenson y Beck, 1996): 17 de octubre de 1966 ($M_w = 8.0$); 31 de mayo de 1970 ($M_w = 7.8$), 24 de mayo de 1940 ($M_w = 7.8$), 3 de octubre de 1974 ($M_w = 8.0$) y 24 de agosto de 1942 ($M_w = 8.1$). Estos terremotos han generado diversas áreas de ruptura perfectamente configuradas

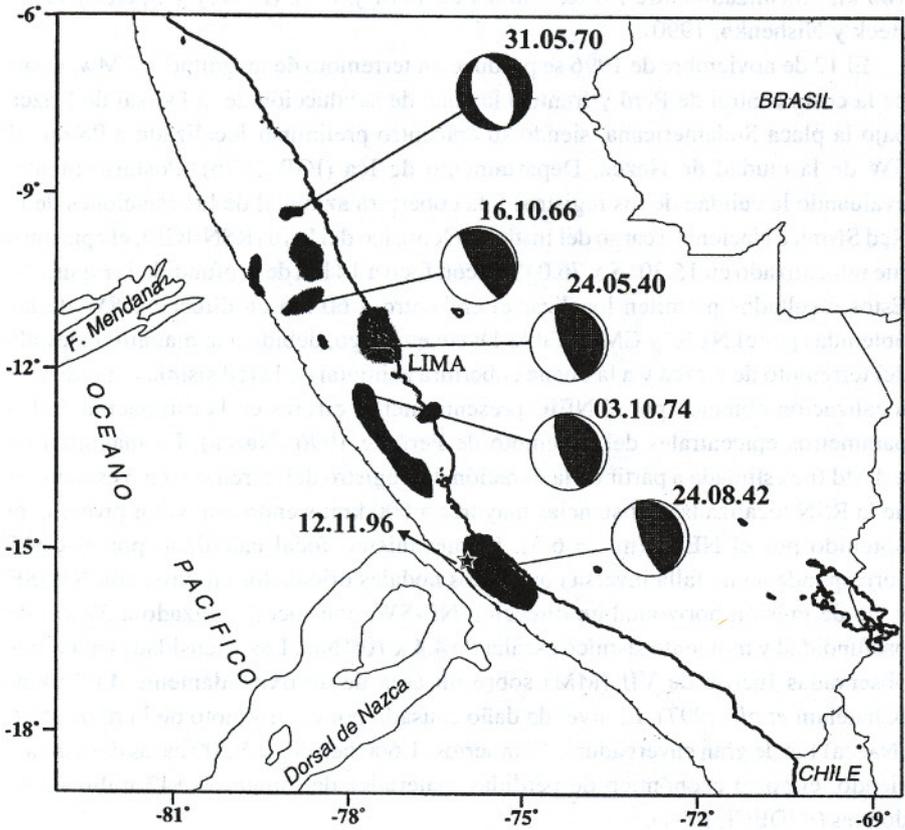


Figura 1. Mapa de distribución epicentral y áreas de fractura de terremotos de magnitud elevada ($M_w \geq 7.0$) ocurridos en la región central de Perú desde 1940 a la fecha (Kelleher, 1972; Beck y Ruff, 1989). Se ha representado el hemisferio inferior de la esfera focal. Los cuadrantes en negro indican compresión y los blancos dilatación. La estrella corresponde a la localización final del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca), según el Instituto Geofísico del Perú.

a partir de la distribución de sus réplicas, con longitudes del orden de 150 km aproximadamente (Beck y Nishenko, 1990; Dorbath *et al.*, 1990) y el estudio de sus procesos de ruptura han permitido definir las características del contacto de las placas en la región central de Perú. Por otro lado, la distribución espacial de las áreas de ruptura sugiere la presencia de un "gap" sísmico de aproximadamente 100 km, localizado entre los terremotos de 1974 y 1942 (Dewey y Spence, 1979; Beck y Nishenko, 1990).

El 12 de noviembre de 1996 se produce un terremoto de magnitud 7.7 Mw, al sur de la costa central de Perú y frente a la zona de subducción de la Dorsal de Nazca bajo la placa Sudamericana, siendo su epicentro preliminar localizado a 98 km al SW de la ciudad de Nazca, Departamento de Ica (IGP, 1996). Posteriormente, evaluando la calidad de los registros y la cobertura azimutal de las estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú (RSN-IGP), el epicentro fue relocalizado en 15.30° S x 76.04° W con foco a 14 km de profundidad (Figura 1). Estos resultados permiten localizar el epicentro a 60 km en dirección SW de las obtenidas por el NEIC y CMT (Tabla 1); sin embargo, debido a la magnitud elevada del terremoto de Nazca y a la buena cobertura azimutal de la red sísmica mundial, la localización obtenida por el NEIC presenta menos errores en la estimación de los parámetros epicentrales del terremoto de Perú de 1996 (Nazca). La magnitud de 6.4 Md fue estimada a partir de la duración del registro del terremoto en 5 estaciones de la RSN localizadas a distancias mayores a 500 km; siendo este valor próximo al obtenido por el NEIC ($m_b = 6.5$). El mecanismo focal calculado por el CMT corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NW-SE y eje de presión horizontal en dirección NE-SW, con foco localizado a 37 km de profundidad y momento sísmico escalar de 4.4×10^{20} Nm. Las intensidades máximas observadas fueron de VII (MM) sobre un área de aproximadamente 4,000 km² (Chatelain *et al.*, 1997). El nivel de daño causado por el terremoto de Perú de 1996 (Nazca) fue de gran envergadura, 17 muertos, 1,600 heridos y 5,200 casas destruidas; siendo, el costo económico de pérdidas materiales del orden de \$42 millones de dólares (INDECI, 1997).

El terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca) fue seguido por un importante número de réplicas con magnitudes $m_b \geq 3.0$ durante los primeros 90 días (82 réplicas), los mismos que espacialmente configuran un área de ruptura de aproximadamente 13,000 km² (Figura 2). Durante las primeras 48 horas de ocurrido el terremoto principal, se produjeron tres réplicas de magnitudes $m_b \geq 5.4$ localizadas a 17 km ($m_b = 5.5$), 64 km ($m_b = 5.5$) y 24 km ($m_b = 5.4$) al norte, sureste y noroeste del sismo principal. En la Tabla 2 se presentan los parámetros epicentrales de estas réplicas según el NEIC y en la Figura 2 su distribución espacial.

La importancia del terremoto de Perú de 1996 (Nazca), radica en que se localiza en la misma área donde ocurrió el terremoto de 1942 (8.2 Mw), el mismo que se caracterizó por presentar un proceso complejo de liberación de energía con evidente

Tabla 1
Parámetros del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca)
 (*) localización preliminar y (**) final del epicentro del terremoto

Fuente	T. Origen hh.mm.ss	Lat. (grados)	Lon.	Prof. (km)	Mag.
IGP*	16:59:39	-15.47	-75.94	46	6.3 Md
IGP**	16:59:37	-15.30	-76.04	14	6.4 Md
NEIC	16:59:38	-14.99	-75.67	33	6.5 mb
CMT	17:00:15	-15.09	-75.37	37	7.7 Mw

IGP: Instituto Geofísico del Perú.

NEIC: National Earthquake Information Center.

CMT: Centroid Moment Tensor.

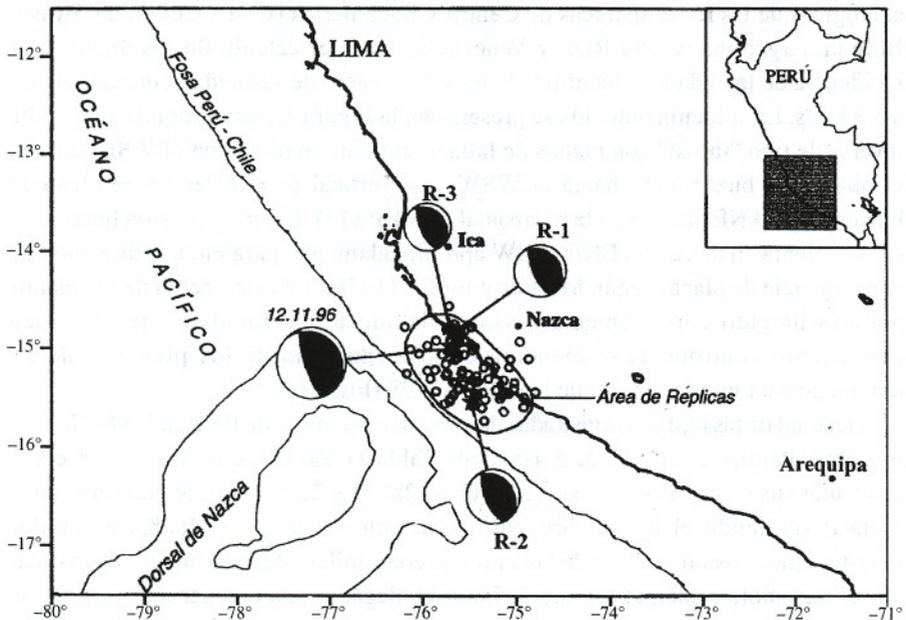


Figura 2. Mapa de localización epicentral de las réplicas del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) según el NEIC ($mb \geq 3.0$). Las estrellas indican los epicentros del terremoto de Nazca y de sus réplicas de magnitud mayor ($mb \geq 5.4$). R-1 = réplica del 13 de noviembre, 02h41m GMT ($mb = 5.5$); R-2 = réplica del 13 de noviembre, 12h32m GMT ($mb = 5.5$) y R-3 = réplica del 14 de noviembre, 11h44m GMT ($mb = 5.4$). La línea continua encierra un área de ruptura de 13,000 km². Se ha representado el hemisferio inferior de la esfera focal. El cuadrante en negro indica compresión y el blanco dilatación.

propagación de la ruptura en dirección sur. En este estudio, se calculan los parámetros del mecanismo focal del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor a partir de la distribución de la polaridad de la onda P y modelado de ondas de volumen. Asimismo, se analizan las características de los procesos de ruptura de los terremotos de 1942 y 1996 y su relación con el "gap" sísmico definido por McCann *et al.* (1979) para la región central de Perú.

Orientación de los planos de falla

La orientación de los planos de falla del terremoto de Perú de 1996 (Nazca), fue calculada a partir de la distribución de la polaridad de la onda P según la metodología desarrollada por Brillinger *et al.* (1980) y Udias y Buforn (1988). El total de los datos utilizados incluye 61 lecturas de polaridad del registro de la onda P en las estaciones sísmicas digitales de la red mundial (IRIS, GEOSCOPE y GEOFON) y analógicas de las redes sísmicas de Centro y Sudamérica (Chile, Colombia, Brasil, Bolivia, Argentina, Costa Rica y Venezuela). Para el cálculo de los ángulos de incidencia de la onda P se ha utilizado un semiespacio de velocidad constante igual a 6.8 km/s. La solución obtenida se presenta en la Figura 3 y corresponde a una falla inversa de tipo "thrust" con planos de falla orientados en dirección NW-SE; siendo, el plano con buzamiento hacia el WSW casi vertical ($\delta = 77^\circ \pm 4$) y el otro con buzamiento al NE próximo a la horizontal ($\delta = 16^\circ \pm 13$). El eje de presión horizontal (P) se orienta en dirección ENE-WSW aproximadamente, paralelo a la dirección de convergencia de placas según Minster y Jordan (1978). La orientación de los planos nodales ha sido correctamente ajustada debido a que los datos de polaridad permitieron controlar la orientación de al menos uno de los planos nodales, obteniéndose una proporción de acierto de 0.98 (Figura 3).

Del total de las réplicas registradas después del terremoto de Perú de 1996 (Nazca), tres presentaron magnitudes de 5.4-5.5 mb (Tabla 2). Para estas réplicas se procedió a calcular sus mecanismos focales a partir de 28, 25 y 22 lecturas de polaridad de la onda P siguiendo el mismo procedimiento anterior. Los resultados obtenidos muestran mecanismos focales de falla inversa con similar orientación y características que el terremoto principal (Figura 3, Tabla 3), llegándose a obtener una proporción de acierto para cada réplica mayor a 0.95. Los planos nodales con buzamiento hacia el WSW presentan ángulos de $66^\circ \pm 12$, $68^\circ \pm 11$ y $69^\circ \pm 10$ y los que buzan hacia el NE de $22^\circ \pm 11$, $24^\circ \pm 13$ y $25^\circ \pm 14$, los mismos que varían entre 6° y 10° en relación con los obtenidos para el terremoto de Perú de 1996 (Nazca).

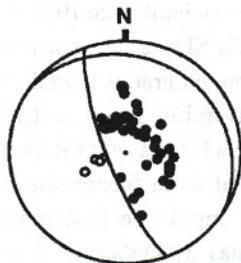
Modelización de ondas de volumen

La técnica de modelar la amplitud y la forma de las ondas de volumen para una fuente puntual a distancias telesísmicas ($30^\circ < \Delta < 90^\circ$), ha sido aplicada para ajustar

Tabla 2
Parámetros de las tres réplicas de magnitud mayor del terremoto
el 12 de noviembre de 1996 (Nazca)

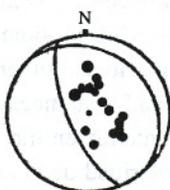
No.	Fecha (dd.mm.aa)	T. Origen (hh.mm.ss)	Lat. (grados)	Long.	Prof. (km)	Mag. (mb)
R-1	13.11.96	02:41:39.9	-14.84	-75.67	33	5.5
R-2	13.11.96	12:32:09.7	-15.54	-75.48	33	5.5
R-3	14.11.96	11:44:06.7	-14.78	-75.72	33	5.4

a. 12.11.96

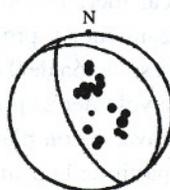


φ° δ° λ°
A : 159 ± 12 77 ± 4 81 ± 25
B : 304 ± 24 16 ± 13 124 ± 34
N = 61 P.A. = 0.98

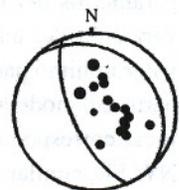
b.



13.11.96 (R-1)



13.11.96 (R-2)



14.11.96 (R-3)

Figura 3. Mecanismo focal obtenido a partir de la polaridad de la onda P para el terremoto de Perú de 1996, Nazca (a.) y de sus réplicas de magnitud mayor (b.). Se ha representado el hemisferio inferior de la esfera focal. Los círculos en negro corresponden a las compresiones y los blancos a las dilataciones. φ° = azimut, δ° = buzamiento, λ° = ángulo de deslizamiento, N = número de lecturas y P.A. = proporción de aciertos. Otros, ver Figura 2.

la orientación de los planos de falla, profundidad del foco, momento sísmico escalar y función temporal de la fuente sísmica del terremoto de Peru de 1996 (Nazca) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor. Para tal objetivo se utiliza la metodología desarrollada por Nabelek (1984). Los registros teóricos han sido generados utilizando un semiespacio de velocidad constante similar al utilizado en el cálculo de los ángulos de incidencia de la onda P y por la combinación de las fases directas (P y S) y reflejadas en la superficie libre (pP, sP y sS). Las amplitudes de los registros teóricos fueron corregidas por el factor de expansión geométrica y por la atenuación del medio, utilizando el operador de Futterman ($t^* = 1$ para la onda P y $t^* = 4$ para la onda SH). Asimismo, a todos los registros se les asignó un peso en función de su distribución azimutal sobre la esfera focal, de tal manera que mayor peso le corresponde a las estaciones aisladas en relación con las que se encuentran agrupadas. Finalmente, la función temporal de la fuente sísmica es construida a partir de una serie de triángulos isósceles cuyo número y duración fueron seleccionados previamente.

Para realizar la modelización del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca), se ha seleccionado 15 registros de onda P y 8 de onda SH de las estaciones que integran la Red Sísmica Mundial, los mismos que fueron integrados a fin de realizar la modelización en desplazamiento. La rutina de inversión se inicia fijando la orientación de la fuente obtenida a partir de la polaridad de la onda P, siendo los parámetros libres, la profundidad y la función temporal de la fuente sísmica. Por experiencia se sabe que pequeñas variaciones en el ángulo de deslizamiento y profundidad del foco producen distorsión en las formas de onda de los registros teóricos; por lo tanto, después de un número determinado de iteraciones, todos los parámetros del mecanismo focal fueron fijados y luego se procedió a evaluar la variación del ángulo de deslizamiento y profundidad del foco hasta obtener un valor mínimo para el RMS de la solución de 0.44 (Figura 4). La solución obtenida a partir del modelado de ondas de volumen se presenta en la Figura 5 y su mecanismo focal corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NW-SE, similar al obtenido a partir de la distribución de la polaridad de la onda P (Tabla 3). En general, el ajuste entre las amplitudes de los registros teóricos y observados es buena para todas las estaciones, a excepción de RPN (P) y PPT (P) que debido a su localización en islas del Océano Pacífico, presentan ruido de baja amplitud generado por el mar; sin embargo, las fases principales están bien correlacionadas (P, pP, sP, S, sS). En los registros de las estaciones de ASCN, SHEL y SUR se observan pulsos de pequeña amplitud 20 segundos después de la llegada de la onda P y cuyo origen podría deberse a un efecto de directividad durante el proceso de la ruptura en dirección de la estación VNDA, tal como sugiere la distribución espacial de las réplicas (Figura 2).

La función temporal de la fuente sísmica del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) es compleja y muestra que el proceso de ruptura es debido a tres fuentes de liberación

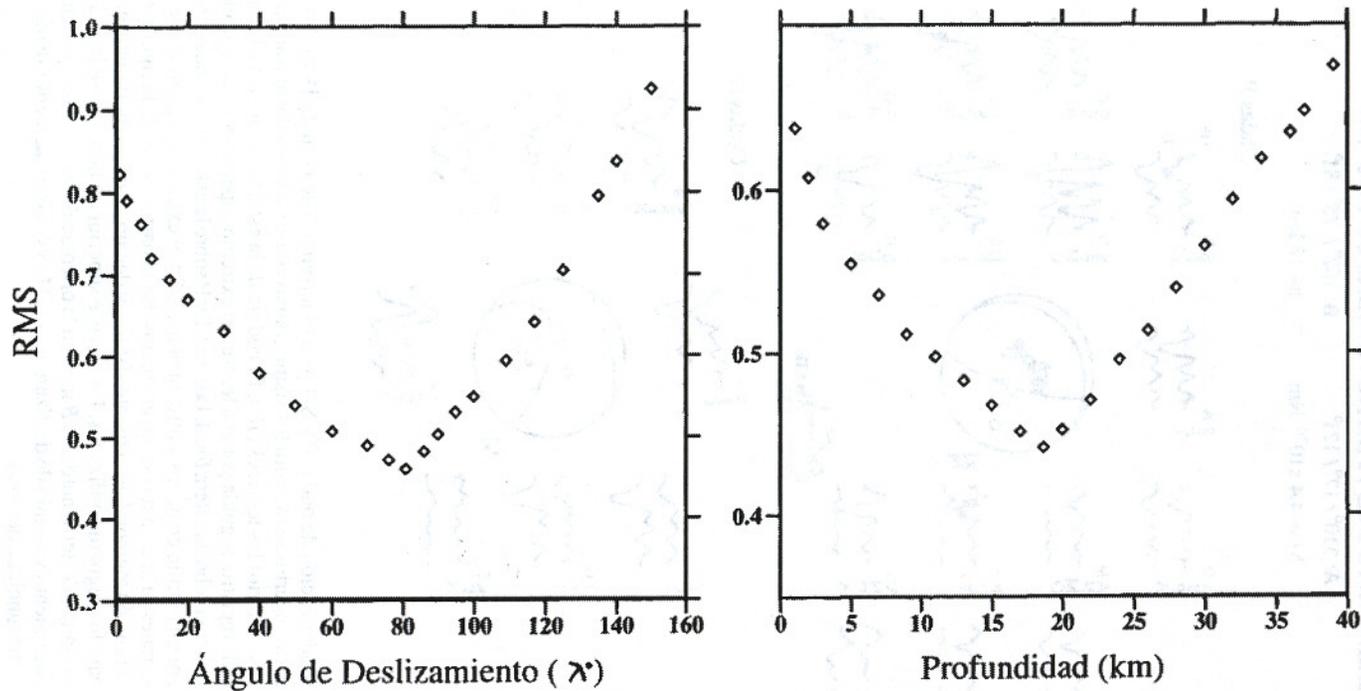


Figura 4. Determinación del ángulo de deslizamiento y profundidad del foco para el terremoto de Perú de 1996 (Nazca), a partir de la variación del RMS durante la modelización de ondas de volumen.

TERREMOTO DEL 12 DE NOVIEMBRE DE 1996 (Mw = 7.7)

A: $310^{\circ} / 17^{\circ} / 12^{\circ}$ B: $162^{\circ} / 75^{\circ} / 81^{\circ}$ $M_0 = 4.4 \times 10^{20}$ Nm

h = 18 km

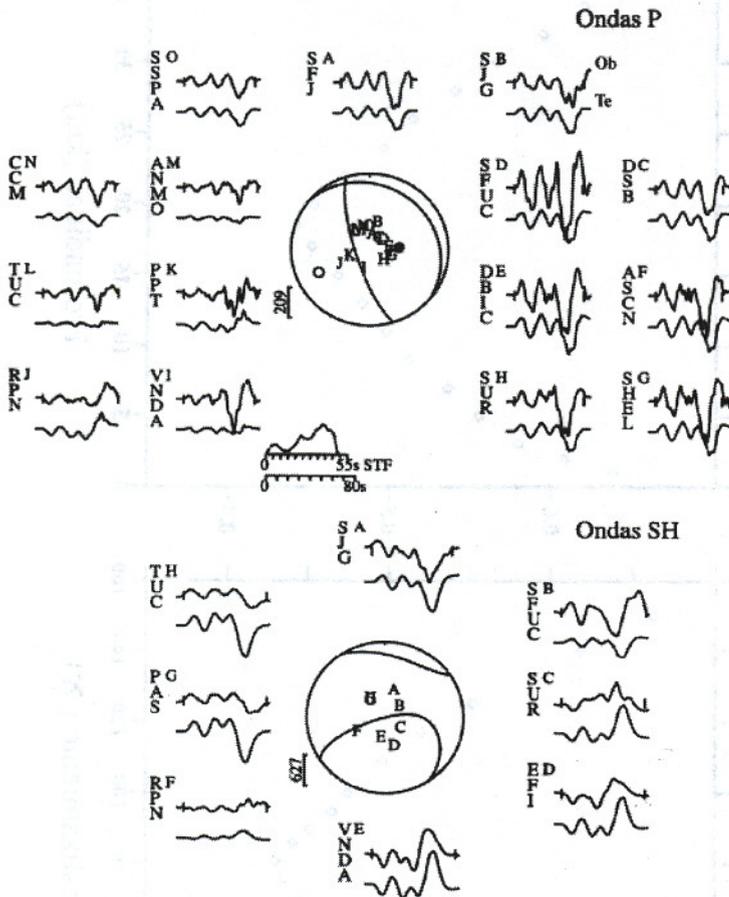


Figura 5. Modelización de ondas P y SH para el terremoto de Perú de 1996 (Nazca). En la parte superior se muestra los sismogramas observados en desplazamiento (*Ob.*) y en la inferior los teóricos (*Te.*). El código de la estación se indica a la izquierda de cada registro, seguida por una letra en el extremo superior derecho que identifica su posición sobre la esfera focal. Los ejes T y P sobre la esfera focal, están representados por un círculo en negro y otro en blanco. En el extremo inferior de la esfera focal se muestra la escala vertical en micras. En la parte central de la figura, se presenta la función temporal de la fuente sísmica y debajo, la escala horizontal en segundos para los registros utilizados. En la parte superior de la figura se indica la fecha y magnitud del terremoto. *A* y *B* indican la orientación de los planos nodales (azimut, buzamiento y ángulo de deslizamiento), *M₀* y *h* son el momento sísmico escalar y la profundidad del foco.

Tabla 3
Parámetros del mecanismo focal del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca)
y de sus tres réplicas de magnitud mayor
R-1 = réplica del 13 de noviembre, 02h41m GMT; R-2 = réplica del 13 de noviembre,
12h32m GMT y R-3 = réplica del 14 de noviembre, 11h44m GMT

Método		Orientación φ°	Planos δ°	Nodales λ°	Prof. (km)	Mo (Nm)
<i>SISMO 12-11-96</i>						
Polaridad de la onda P	A:	159±12	77±4	81±25		
	B:	304±24	16±13	124±34		
Modelización	A:	162	75	81	18	4.4 x 10 ²⁰
	B:	310	17	121		
CMT	A:	175	64	68	37	4.4 x 10 ²⁰
	B:	312	33	127		
<i>Réplica R-1</i>						
Polaridad de la onda P	A:	157±24	69±10	82±28		
	B:	315±30	22±11	111±47		
Modelización	A:	157	69	82	25	1.6 x 10 ¹⁸
	B:	315	22	111		
CMT	A:	158	88	113	38	1.3 x 10 ¹⁸
	B:	252	23	4		
<i>Réplica R-2</i>						
Polaridad de la onda P	A:	156±29	66±12	82±30		
	B:	317±31	25±4	107±43		
Modelización	A:	156	66	82	11	2.8 x 10 ¹⁸
	B:	317	25	107		
CMT	A:	163	81	100	15	1.4 x 10 ¹⁸
	B:	296	13	44		
<i>Réplica R-3</i>						
Polaridad de la onda P	A:	156±29	68±11	82±21		
	B:	316±39	24±13	108±35		
Modelización	A:	156	68	82	21	3.2 x 10 ¹⁷
	B:	316	24	108		
CMT	A:	171	71	112	18	2.9 x 10 ¹⁷
	B:	299	29	42		

φ° = Azimut, δ° = Buzamiento, λ° = Ángulo de deslizamiento y Mo = Momento sísmico escalar.

de energía sobre el mismo plano de falla con duraciones de 15, 14 y 19 segundos. Este proceso de ruptura se inicia con una lenta liberación de la energía asociada a la primera fuente, siendo liberada la mayor cantidad de energía por las dos últimas fuentes. La duración total de la ruptura es de 50 segundos con un momento sísmico escalar de 4.4×10^{20} Nm. La buena correlación entre las fases reflejadas en la superficie libre, teóricas y observadas, permitió ajustar la profundidad del foco en 18 km.

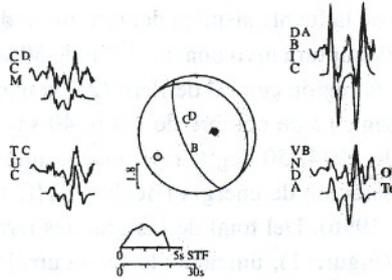
Asimismo, tres de las réplicas de magnitud mayor ocurridas durante las primeras 48 horas (Tabla 2), fueron modeladas utilizando 4 registros en velocidad de la onda P para cada réplica. La rutina seguida es la misma que para el terremoto principal y el proceso de inversión se dio por concluido cuando se obtuvieron valores menores a 0.29 para el RMS. Las soluciones obtenidas se presentan en la Figura 6 y los mecanismos focales corresponden a fallas inversas con idénticas orientaciones que las obtenidas a partir de la polaridad de la onda P (Figura 3). La correlación entre los registros teóricos-observados es buena y el ajuste logrado entre las fases reflejadas en la superficie libre, teóricas y observadas, ha permitido calcular la profundidad de los focos de cada réplica en 25, 11 y 21 km respectivamente. Asimismo, la función temporal de la fuente sísmica para cada réplica es simple y con duraciones de 4, 9 y 3 segundos respectivamente. El momento sísmico escalar para la primera réplica es de 1.6×10^{18} Nm, para la segunda de 2.8×10^{18} Nm y para la tercera de 3.2×10^{17} Nm (Figura 2).

Discusión

El mecanismo focal del terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor calculados a partir de la polaridad de la onda P y modelización de ondas de volumen, son prácticamente idénticos (Figura 2) y similares a los obtenidos por otros autores para otros terremotos ocurridos frente a la costa central de Perú (Figura 1). Las soluciones para los mecanismos focales, son próximas a las obtenidas por el CMT, únicamente para la primera réplica se observan diferencias de 63° y 107° para el azimut y ángulo de deslizamiento de uno de los planos de falla (Tabla 3). El momento sísmico escalar del terremoto principal es de 4.4×10^{20} Nm, equivalente a una magnitud de energía de $M_w = 7.7$, similar al obtenido por el CMT; mientras que la profundidad del foco es menor y mejor ajustada a partir del modelado de ondas de volumen. A partir de la relación $M_0 = \mu SD$ (μ , rigidez del medio igual a 3.3×10^{10} Nm⁻² y A, área de la falla), el desplazamiento medio (D) a lo largo de la falla puede ser estimado considerando el área de réplicas de la Figura 2 ($S = 13,000$ km²). Así, para el terremoto de Perú de 1996 (Nazca) se obtiene un desplazamiento medio de 1 metro; sin embargo, creemos que debido a la heterogeneidad del proceso de ruptura del terremoto, este valor para el desplazamiento no es del todo real, pero sugiere que éste se ha producido sobre toda el área de réplicas. El

RÉPLICA DEL 13 DE NOVIEMBRE DE 1996 (R-1)

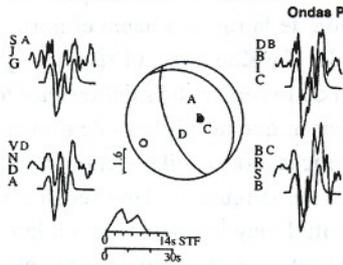
A: 314° / 22° / 111° B: 157° / 69° / 82°
M₀ = 1.6x10¹⁸ Nm h = 25 km



a.

RÉPLICA DEL 13 DE NOVIEMBRE DE 1996 (R-2)

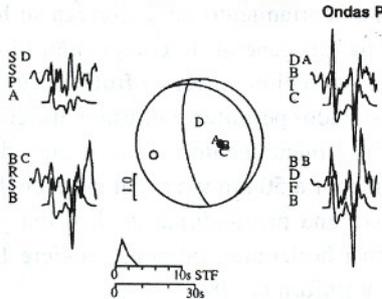
A: 318° / 25° / 107° B: 157° / 66° / 82°
M₀ = 2.8x10¹⁸ Nm h = 11 km



b.

RÉPLICA DEL 13 DE NOVIEMBRE DE 1996 (R-3)

A: 316° / 24° / 108° B: 156° / 67° / 82°
M₀ = 3.2x10¹⁷ Nm h = 21 km



c.

Figura 6. Modelización de ondas P para las réplicas de magnitud mayor del terremoto de Perú de 1996 (Nazca). En la parte superior se muestra los sismogramas observados en velocidad (*Ob.*) y en la inferior los teóricos (*Te.*). *a*) réplica del 13 de noviembre, 02h41m GMT; *b*) réplica del 13 de noviembre, 12h32m GMT y *c*) réplica del 14 de noviembre, 11h44m GMT. Otros, ver Figura 5.

momento sísmico escalar calculado para cada una de las réplicas, permite estimar magnitudes de energía de 6.1, 6.2 y 5.6 Mw, respectivamente.

La función temporal de la fuente sísmica del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) muestra que su proceso de ruptura tuvo una duración de 50 segundos, similar a otros terremotos ocurridos en la región central de Perú (24 de mayo de 1940, 30 seg.; 24 de agosto de 1942, 40 seg.; 17 de octubre de 1966, 40 seg.; 31 de mayo de 1970, 60 seg.; 3 de octubre de 1974, 50 seg.), los mismos que se caracterizan por su complejo proceso de liberación de energía (Beck y Ruff, 1989; Langer y Spence, 1995; Swenson y Beck, 1996). Del total de los grandes terremotos ocurridos en la región central de Perú (Figura 1), únicamente los ocurridos en 1942 y 1974 han mostrado una clara propagación de su área de ruptura, sobre el mismo plano de falla, similar al observado para el terremoto de 1996; sin embargo, todas las áreas de ruptura tienden a distribuirse entre la Fractura de Mendaña y la Dorsal de Nazca poniendo en evidencia que ambas unidades se comportan como dos grandes barreras que controlan la propagación de la ruptura hacia el norte y sur de la región central de Perú, tal como sugieren Ruff y Kanamori (1980) y Lay *et al.* (1989).

La distribución espacial de los epicentros del terremoto principal y de sus réplicas (Figura 2), permite observar que las réplicas de mayor magnitud se localizan en los extremos del área de réplicas, dos de ellas detienen la propagación de la ruptura hacia el norte y una hacia el sur (Figura 2). Una sección vertical, en dirección NE-SW de las réplicas de magnitud mayor se presenta en la Figura 7a (línea A-A' en la Figura 7b) y se observa que éstas se distribuyen junto al terremoto de Nazca sobre una línea de pendiente igual a 24° hasta una profundidad máxima de 25 km y que correspondería al extremo norte del área de réplicas (Figura 2), siendo esta profundidad posiblemente mayor en el extremo sur. La proyección de los ejes P horizontal del sismo principal y de sus réplicas de magnitud mayor (Figura 7b), muestran que el máximo acortamiento de la corteza se ha realizado en dirección ENE-WSW, similar al patrón general de compresión observado a partir de otros terremotos ocurridos en esta región (Tavera y Buforn, 1997; Tavera, 1998; Tavera y Buforn, 1998). Estos resultados permiten confirmar que en la región central de Perú, la placa de Nazca subduce inicialmente con un ángulo de inclinación de 20° - 25° hasta una profundidad menor a 50 km y a partir de la cual el ángulo de inclinación aumenta a 30° - 35° hasta una profundidad de 120 km y luego la sismicidad se distribuye de manera casi horizontal, tal como sugiere Langer y Spence (1995), Tavera (1998) y Tavera y Buforn (1998).

La distribución espacial de las áreas de ruptura de los últimos cinco terremotos ocurridos en la región central de Perú, muestran que entre las áreas de los terremotos del 24 de agosto de 1942 y 3 de octubre de 1974, se localiza una zona de aproximadamente 150 km de longitud que permanece irrompible (McCann *et al.*, 1979; Beck y Nishenko, 1990). El terremoto de Perú de 1996 y su área de réplicas se distribuyen sobre la misma área de ruptura del terremoto de 1942; por lo tanto, la

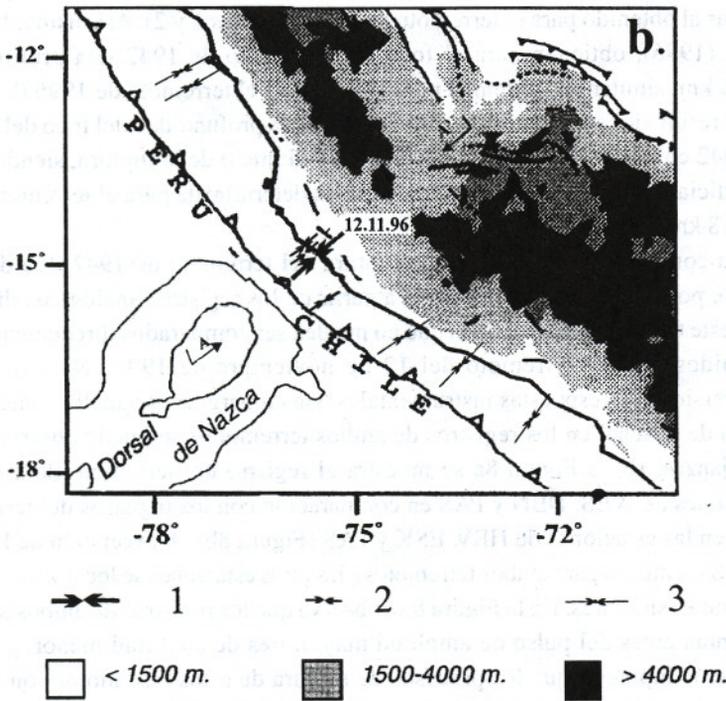
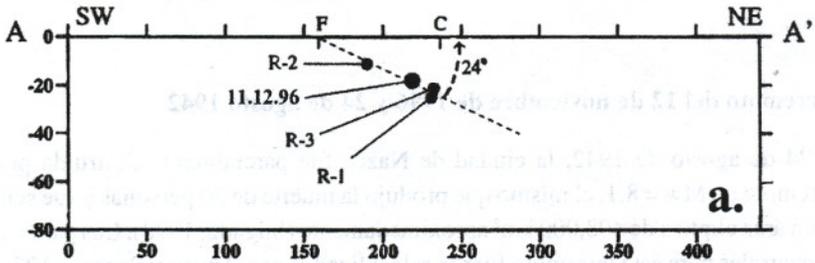


Figura 7. a). Sección vertical en función de la profundidad para los focos del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) y de sus réplicas de magnitud mayor (línea A-A' en la Figura 7b). F = fosa Perú-Chile y C = línea de costa. Otros, ver Figura 2.
 b). Proyección horizontal de los ejes de presión (P) obtenidos a partir del mecanismo focal de los terremotos analizados en este estudio. 1 = terremoto de Perú de 1996 (Nazca), 2 = réplicas del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) y 3 = otros terremotos según Tavera y Buforn (1998) y Tavera (1998). La topografía de la región viene representada por zonas en blanco (menos de 1,500 m), gris claro (entre 1,500-4,000 m) y negro (mayor a 4,000 m). Las líneas en el interior del continente indican fallas inversas y normales.

zona localizada al norte de la Dorsal de Nazca (Figura 1), aún permanece sin romperse.

Terremoto del 12 de noviembre de 1996 y 24 de agosto 1942

El 24 de agosto de 1942, la ciudad de Nazca fue parcialmente destruida por un terremoto de $M_w = 8.1$, el mismo que produjo la muerte de 30 personas y fue sentido en un área elíptica de $408,000 \text{ km}^2$ aproximadamente (Silgado, 1978). Los parámetros epicentrales para este terremoto fueron relocalizados por Dewey y Spence (1979) en $15.2^\circ \text{ S} \times 75.3^\circ \text{ W}$, próximo a la localización del terremoto de 1996 (Tabla 1). El mecanismo focal del terremoto de 1942 fue calculado por Swenson y Beck (1996) a partir del modelado de ondas de volumen, siendo este mecanismo de tipo "thrust" similar al obtenido para el terremoto de 1996 (Figuras 1 y 2). Asimismo, Swenson y Beck (1996), obtienen para el foco del terremoto de 1942 una profundidad de 30-35 km; similar a la obtenida por el CMT para el terremoto de 1996 ($h = 37 \text{ km}$). Estos resultados sugieren la posibilidad de que la profundidad del foco del terremoto de 1942 corresponda a la del centroide y no al inicio de la ruptura, siendo éste más superficial; es decir, del mismo orden que la determinada para el terremoto de 1996 ($h = 18 \text{ km}$).

La complejidad del proceso de ruptura del terremoto de 1942, fue descrita en detalle por Swenson y Beck (1996) a partir de los registros analógicos disponibles para este terremoto, los mismos que no pueden ser comparados directamente con los obtenidos para el terremoto del 12 de noviembre de 1996 (Nazca), debido a la diversidad de respuestas instrumentales; sin embargo, si se analiza únicamente la forma de la señal en los registros de ambos terremotos, se puede observar algunas semejanzas. En la Figura 8a se muestra el registro del terremoto de 1942 en las estaciones de WES, DBN y PAS en comparación con los registros del terremoto de 1996 en las estaciones de HRV, ESK y PAS (Figura 8b). A excepción de la estación de PAS (la misma para ambos terremotos), las otras estaciones se localizan a distancias y azimutes similares. En la Figura 8 se observa que los registros de ambos terremotos presentan antes del pulso de amplitud mayor, tres de amplitud menor, pudiéndose aceptar la hipótesis que los procesos de ruptura de estos terremotos son similares. Asimismo, para un mismo tren de onda, la duración del terremoto de 1942 es un 15-20% mayor que el terremoto de 1996, poniendo en evidencia que este último ha liberado menor energía y por lo tanto, le corresponde una magnitud menor. El momento sísmico escalar del terremoto de 1942 ha sido estimado por Swenson y Beck (1996) en $10\text{-}25 \times 10^{20} \text{ Nm}$ ($M_w = 7.9\text{-}8.2$), mayor que el obtenido en este estudio para el terremoto de 1996 ($M_o = 4.4 \times 10^{20} \text{ Nm}$, $M_w = 7.7$). La función temporal de la fuente sísmica del terremoto de 1942 es compleja y presenta tres puntos de liberación de energía sobre el mismo plano de falla (Swenson y Beck, 1996), similar a la obtenida en este estudio para el terremoto de Perú de 1996 (Nazca).

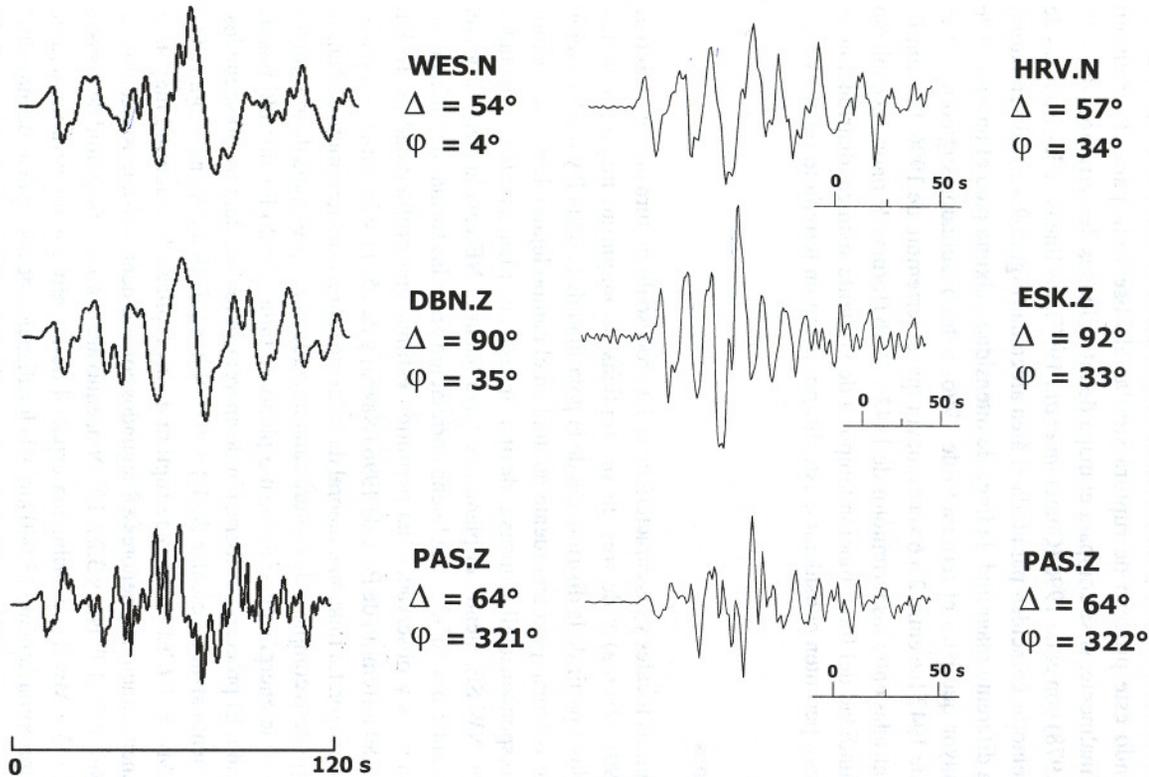


Figura 8. Registros de formas de onda de los terremotos del 24 de agosto de 1942 (a) y 12 de noviembre de 1996 (b). En la parte inferior de los registros se muestra la escala horizontal en segundos. Al costado del código de cada registro se indica con la letra N, la componente nort-sur y con Z la componente vertical. Δ y φ corresponden a la distancia epicentral y azimut en grados.

El poco número de réplicas localizadas por el NEIC y relocalizadas por Dewey (comunicación personal en Swenson y Beck, 1996) para el terremoto de 1942 (Figura 9a), describen una probable propagación bilateral de la ruptura, menor hacia el norte del epicentro (40 km) y mayor en dirección SE (100 km) (Swenson y Beck, 1996), siendo este proceso de ruptura similar al observado para el terremoto de 1996. Finalmente, si se compara el mapa de intensidades del terremoto de 1942 (Silgado, 1978) con el de 1996 (Chatelain *et al.*, 1997), las líneas de las isosistas de ambos terremotos coinciden para toda el área afectada (Figura 9 a-b); sin embargo, debido a la diferente magnitud, la línea de intensidad máxima para el terremoto de 1942 es mayor que para el terremoto de 1996. Estos resultados sugieren que el terremoto de 1942 fue entre 2 a 6 veces mayor que el terremoto de 1996. Las similitudes encontradas entre los terremotos de 1942 y 1996 (formas de onda, mecanismo focal, profundidad del foco, función temporal de la fuente sísmica, distribución de intensidades), permiten considerar a este último, como un terremoto repetitivo del primero.

Conclusiones

Los paramentos focales y las características del proceso de ruptura del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor, han sido determinados a partir de la distribución de la polaridad de la onda P y modelización de ondas de volumen para una fuente puntual en el campo lejano. Los mecanismos focales corresponden a fallas inversas de tipo "thrust" con planos nodales orientados en dirección NW-SE, siendo el plano que buza hacia el NE casi horizontal y con variaciones entre $\delta = 16^\circ$ - 22° . La buena correlación entre las formas de onda de los registros teóricos y observados, ha permitido estimar una profundidad de 18 km para el foco del terremoto de Perú de 1996 (Nazca) y de 25, 11 y 21 para sus réplicas de magnitud mayor. La función temporal de la fuente sísmica del terremoto de Nazca, sugiere un proceso complejo de ruptura caracterizado por la presencia de tres puntos de liberación de energía sobre el mismo plano de falla, siendo los dos últimos de mayor tamaño. El proceso de liberación de energía se realiza durante 50 segundos, con un momento sísmico escalar de 4.4×10^{20} Nm, equivalente a una magnitud de energía de $M_w = 7.7$. El proceso de ruptura de las réplicas de magnitud mayor, es simple y tienen duraciones menores a 8 segundos con momentos sísmicos escalares de 1.6×10^{18} Nm, 2.8×10^{18} Nm y 3.2×10^{17} Nm, equivalentes a una magnitud de energía de 6.1, 6.2 y 5.6 M_w . La distribución espacial de las réplicas muestra un área de ruptura de aproximadamente 13,000 km² y la localización de las réplicas de magnitud mayor sugieren la presencia de tres puntos de parada de la ruptura, localizados a 17, 24 y 64 km al norte y sur del epicentro del terremoto de Nazca. Estas réplicas y el terremoto de Nazca se distribuyen en función de la profundidad de sus focos, sobre un plano de falla con buzamiento de 24° en dirección NE hasta una profundidad de 25 km, la

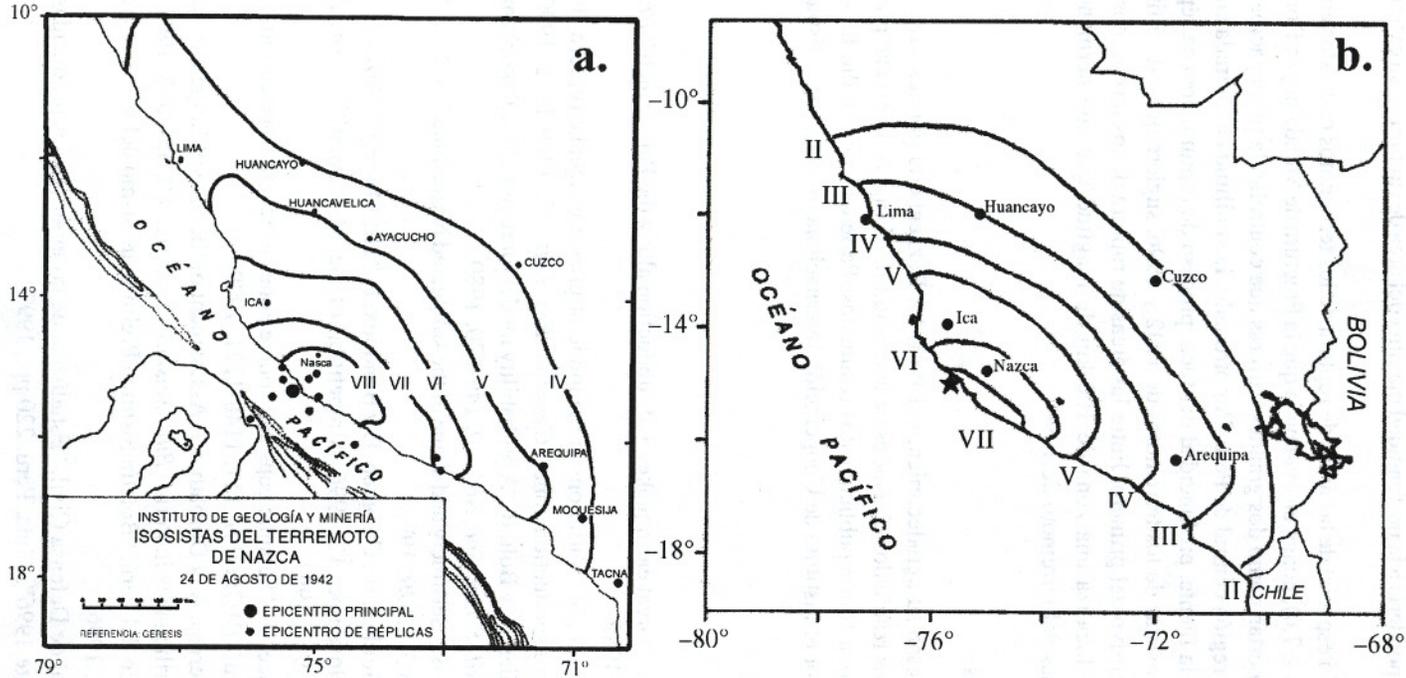


Figura 9. Mapas de intensidad en la escala Mercalli Modificada (MM) para los terremotos del 24 de agosto de 1942 (a) según Silgado (1978) y 12 de noviembre de 1996 (b) según Chatelain *et al.* (1997). El círculo grande y la estrella indican la localización de los epicentros de los terremotos de 1942 y 1996. Los círculos pequeños corresponden a las réplicas del terremoto de 1942 relocalizadas por Dewey (en Swenson y Beck, 1996) y Kelleher (1972).

misma que correspondería a la profundidad máxima del área de ruptura en su extremo norte.

La distribución espacial de las áreas de ruptura de los terremotos ocurridos entre 1940 y 1996 ($M_w \geq 7.0$), ponen en evidencia que la Fractura de Mendaña y la Dorsal de Nazca se comportan como dos grandes barreras que controlan la propagación de las rupturas en la región central de Perú. Por otro lado, la similitud encontrada entre la orientación de la fuente, profundidad del foco, proceso de ruptura, área de réplicas y líneas de isosistas de los terremotos de 1942 y 1996, sugiere que este último terremoto es repetitivo del primero. Entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1942 y 1974, se localiza una zona de 100 km de longitud que aún permanece irrompible después del terremoto de 1996.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Prof. M. Bezzeghoud por sus sugerencias y críticas a los resultados obtenidos en este estudio. Al Ing. A. Giesecke por su apoyo e incentivo, a fin de publicar estos resultados. Parte de este estudio ha sido subvencionado por el Instituto de Cooperación Internacional del Gobierno Español (ICI).

Referencias

- Beck, S. y Ruff, L. "Great earthquakes and subduction along the Peru trench," *PEPI*, 57, 199-224, 1989.
- Beck, S. y Nishenko, S. "Variations in the mode of great earthquake rupture along the central Peru subduction zone," *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1969-1972, 1990.
- Brillinger, D.; Udias, A. y Bolt, B. "A probability model for regional focal mechanism solutions," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 149-170, 1980.
- Cahill, T. e Isack, B. "Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate", *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529, 1992.
- Chatelain, J.L.; Guillier, B.; Gueguen, P. y Bondoux, F. "The $M_w = 7.7$ Nazca (Peru) earthquake, November 12, 1996: A repetition of the 1842 event?," *Seism. Res. Lett.*, 68, 917-922, 1997.
- Dewey, J. y Spence, W. "Seismic gaps and source zones of recent large earthquakes in coastal Peru," *PAGEOPH*, 117, 1148-1171, 1979.
- Dorbath, L.; Cisternas, A. y Dorbath, C. "Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 551-576, 1990.
- Instituto Geofísico del Perú. "Boletín Sísmico Preliminar, Sismo del 12 de noviembre de 1996", 1996.
- Instituto Nacional de Defensa Civil, "Estadística de las emergencias producidas en el Perú durante 1996", Lima, Perú, 220 pp., 1997.

- Kelleher, J. "Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions," *J. Geophys. Res.*, 77, 2087-2103, 1972.
- Langer, C. y Spence, W. "The 1994 Peru earthquake series," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85, 665-687, 1995.
- Lay, T.; Astiz, L.; Kanamori, H. y Chistensen, D. "Temporal variations of large intraplaca earthquakes in coupled subduction zones," *PEPI*, 54, 258-312, 1989.
- McCann, W.; Nishenko, S.; Sykes, L. y Krause, J. "Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries," *PAGEOPH*, 117, 1082-1147, 1979.
- Minster, J. y Jordan, T. "Present-day plate motions," *J. Geophys. Res.*, 83, 5331-5334, 1978.
- Nabelek, J. "Determination of earthquakes source parameters from inversion of body waves," Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology, 320 pp., 1984.
- Rodríguez, L. y Tavera, H. "Determinación con alta resolución de la geometría Wadati-Benioff en la región central de Perú", *Rev. Bras. Geofis.*, 9, 141-159, 1991.
- Ruff, L. y Kanamori, H. "Seismicity and the subduction process," *PEPI*, 23, 240-252, 1980.
- Silgado, E. "Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Bol. 3, Serie C, Instituto de Geología y Minería, Lima-Perú, 133 pp., 1978.
- Swenson, J. y Beck, S. "Historical 1942 Ecuador and 1942 Peru subduction Earthquakes, and Earthquakes Cycles along Colombia-Ecuador and Peru Subduction Segments," *PAGEOPH*, 146, 67-101, 1996.
- Tavera, H. "Mecanismo focal de terremotos de Perú y Sismotectónica," Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 400 pp., 1998.
- Tavera, H. y Buforn, E. "Seismic sources of earthquakes in Peru. *Annales of Geophysicae*, Part. I," vol. 15, EGS XXII, Vienne, Italy, April 21-25/1997, C15, 1997.
- . "Sismicidad y Sismotectónica de Perú", en: *Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica*; Buforn, E. y Udias A. (eds.), Física de la Tierra, Univ. Complutense de Madrid, 10, 187-219, 1998.
- Udias, A. y Buforn, E. "Single and joint fault-plane solution from firts motion data," en: D. Doornbos, *Seismological Algorithms*, Academic Press, Londres, 1988.