

VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Abril, 2002.

ANÁLISIS DEL TERREMOTO DEL SUR DEL PERU, 23 DE JUNIO 2001, Mw=8.4 UTILIZANDO DATOS LOCALES

Diana Comte¹, Rubén Boroschek², Hernando Tavera³, Louis Dorbath⁴, David Portugal³,
Michel Frogneux⁵, Henri Haessler⁵, Hernán Montes³, Isabel Bernal³, Yanet Antayhua³,
Henry Salas³, Adolfo Inza³, Simeón Rodríguez³, Bianca Glass⁶, Eduardo Correa⁶,
Carlos Meneses⁶, Iván Balmaceda⁶, Alicia Cruz⁶

¹ Dpto. de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago

² Dpto. de Ing. Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago

³ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

⁴ IRD, Institut de Recherche pour le Developpement, Francia

⁵ Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Strasbourg, Francia

⁶ Centro Sismológico, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile

RESUMEN

Se analiza la secuencia de réplicas del mayor terremoto a nivel mundial de los últimos 25 años, que corresponde al ocurrido en el sur del Perú el 23 de Junio de 2001, Mw=8.4, utilizando datos sismológicos obtenidos con redes locales de observación y monitoreo. Se discute la sismicidad histórica, principalmente lo relativo a la estimación de las magnitudes determinadas con parámetros macrosísmicos, considerando que dichas magnitudes no incluyen particularmente el efecto de sitio y la directividad del proceso de ruptura. Se concluye que el terremoto de 2001 es equivalente al de 1784 y no al de 1868, que es el mayor reportado en el sur del Perú. El área de réplicas determinada con datos de la red mundial y con observaciones locales indica que el segmento comprendido entre Ilo y Tacna permanece intacto. Finalmente se indica que considerando la ocurrencia del terremoto de Antofagasta ocurrido en 1995 y el terremoto del sur del Perú de 2001, la probabilidad de ocurrencia de un sismo mayor en la brecha sísmica del norte de Chile ha aumentado, sin embargo dicho próximo evento no será necesariamente equivalente al último de la serie, vale decir al de 1877.

SUMMARY

The aftershock sequence of the larger earthquake of the last 25 years all over the world, the 23 June, 2001 Mw=8.4 southern Peru earthquake, using locally recorded data. The estimation of the magnitudes of the historical seismicity is analyzed, mainly focused in the sense that this estimation do not consider the site effect and the directivity of the source rupture. The 2001 southern Peru earthquake is equivalent to the 1784 one, and it is not the repetition of the 1868 earthquake. The

aftershock area determined with local and global data shows that the Ilo-Tacna segment remain intact. Finally, considering the occurrence of the Antofagasta, 1995 and the southern Perú, 2001 earthquakes, the probability of having a large earthquake in the northern Chile seismic gap is increased, however, the magnitude of the next event in this area will not be necessarily as big as the last occurred in the area, that is the 1877 one.

INTRODUCCIÓN

La zona sur del Perú, al igual que toda la costa oeste del continente Sudamericano se encuentra sometida al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental de América del Sur, a una velocidad promedio de convergencia del orden de 7.8 cm/año. Este proceso de subducción permite que se acumule energía a lo largo del contacto sismogénico interplaca, generando un fuerte acoplamiento y por ende grandes terremotos asociados. En particular, la región de estudio ha experimentado grandes terremotos destructivos a lo largo de su historia, cabe mencionar los sismos de subducción ocurridos en 1513, 1604, 1687, 1784 y 1868 (Tabla 1) y por lo tanto, el área de ruptura asociada al entonces último terremoto de 1868 había sido identificada como una brecha sísmica de importancia y próxima a la ruptura (Ref. 1, 2, 3). Es importante destacar que los sismos históricos mencionados no son equivalentes ni en magnitud, ni en las áreas comprometidas, aunque todos ellos afectaron el sur del Perú. En la Tabla 1 se reproducen los parámetros determinados por Dorbath et al. (Ref. 2) y se agregaron los datos del sismo de 2001. Se puede observar, que al igual que en otras zonas a nivel mundial, es evidente la existencia de modos variables de ruptura, por lo tanto, los terremotos de subducción no son equivalentes en las áreas involucradas, ni en las energías liberadas a lo largo del tiempo, y aunque existe un proceso a través del cual se acumula energía en el contacto interplaca, dicha energía es liberada de formas distintas en los eventos mayores que las afectan.

TABLA 1

Año	Largo de ruptura (km)	Altura tsunami local (m)	Mw
1582	80	1-2	7.5
1604	450	10-15	8.7
1687	150 (?)		8.0
1715	75		7.5
1784	300	2-4	8.4
1868	500	14	8.8
2001	300	7-8	8.4

EL TERREMOTO DEL 23 DE JUNIO DE 2001, Mw= 8.4

El terremoto del 23 de Junio de 2001, de magnitud Mw=8.4, ha sido clasificado como el sismo más grande de los últimos 25 años y compromete una longitud de ruptura del orden de los 300 km a lo largo de la costa del sur del Perú, entre Ocoña e Ilo. Las réplicas más importantes se encuentran en la Figura 1 y Tabla 2, donde la réplica mayor ocurrió el 7 de Julio con una magnitud Mw=7.6 frente a las costas de Ilo; es interesante destacar que la réplica del 5 de Julio corresponde a un mecanismo y profundidad focal diferente al resto de la secuencia, este evento es de carácter

tensional y tiene una profundidad que permite definir la extensión a lo largo del plano de ruptura del orden de 60 km.

TABLA 2

Fecha	Hora Origen (UT)	Latitud	Longitud	Mw
01-06-23	20:33	-16.26	-73.64	8.4
01-06-23	21:27	-17.18	-72.64	6.1
01-06-26	04:18	-17.75	-71.65	6.8
01-07-05	13:53	-16.09	-73.99	6.6
01-07-07	09:38	-17.54	-72.08	7.6

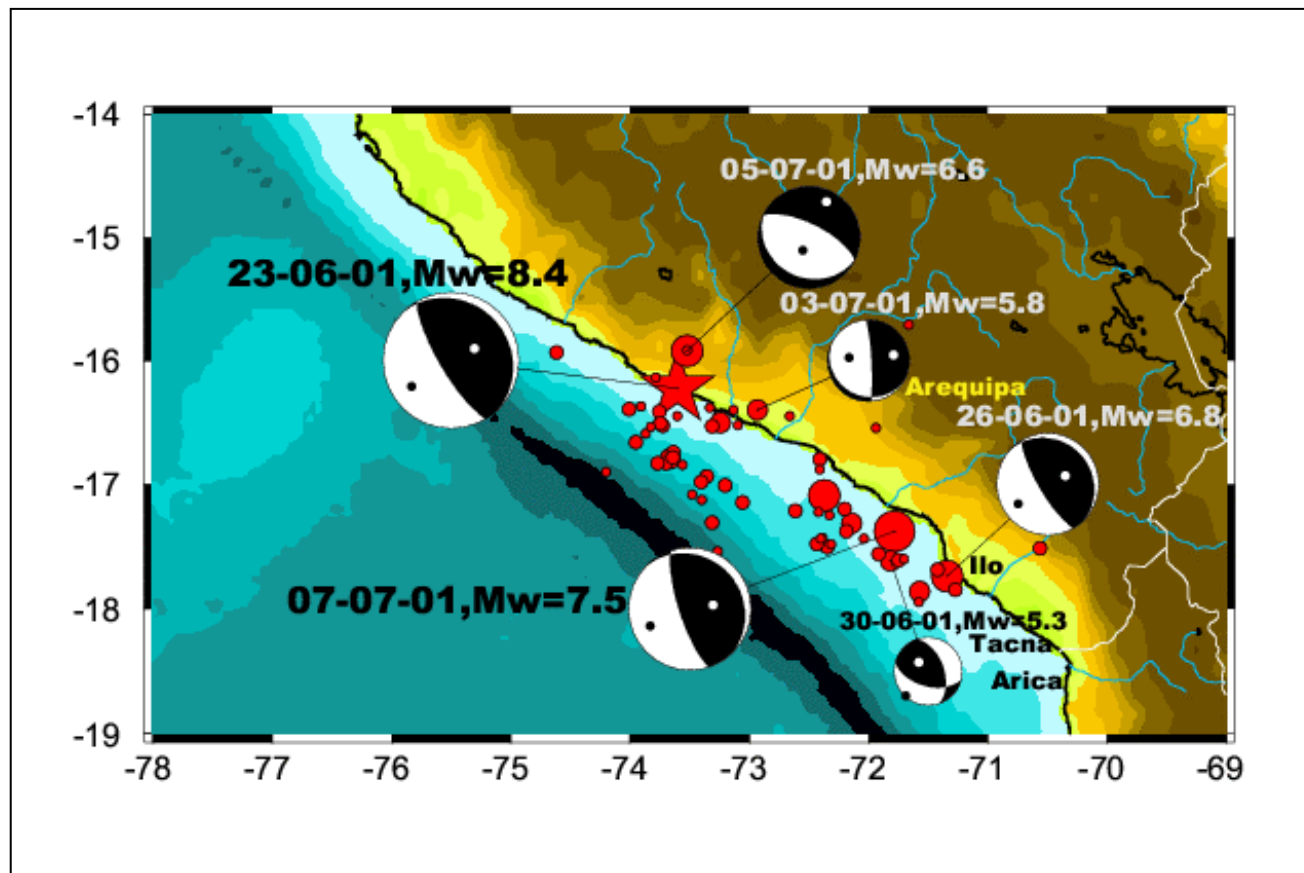


Figura 1.- Distribución de las réplicas mayores asociadas al terremoto del sur del Perú del 23 de Junio de 2001. Se incluyen además los mecanismos focales determinados por Harvard.

El sismo principal presentó una fuerte directividad hacia el sur, a lo largo de la costa y en dirección perpendicular a la de la convergencia en la zona. Los reportes indican del orden de 75 personas fallecidas producto del terremoto, incluyendo 26 personas muertas debido al tsunami asociado, que además registra la desaparición de otras 64 personas; hubo aproximadamente 2700 personas damnificadas, 17.500 casas destruidas y 35.550 casas dañadas en el área Arequipa-Camaná y Tacna. En el norte de Chile fue sentido con gran intensidad a pesar de encontrarse a más de 400 km de distancia, las intensidades de las ciudades más importantes son las siguientes: Arica VII, Iquique VI, Calama IV-V y Tocopilla II-III. En la zona epicentral hubo observaciones de

tsunami cuyas variaciones alcanzaron del orden de los 7 m y la inundación alcanzó más de 1 km desde la costa. El Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile reportó variaciones promedio del nivel medio del mar del orden de 2.5 m en Arica, 1.5 m en Iquique y 1 m en Coquimbo.

El efecto de este evento en el norte de Chile también fue registrado instrumentalmente por la red de acelerógrafos que posee la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en la Zona. Las aceleraciones y velocidades máximas registradas y la demanda sobre estructuras impuestas por este evento son comparativamente mayores considerando la distancia a la ruptura (Ref. 5).

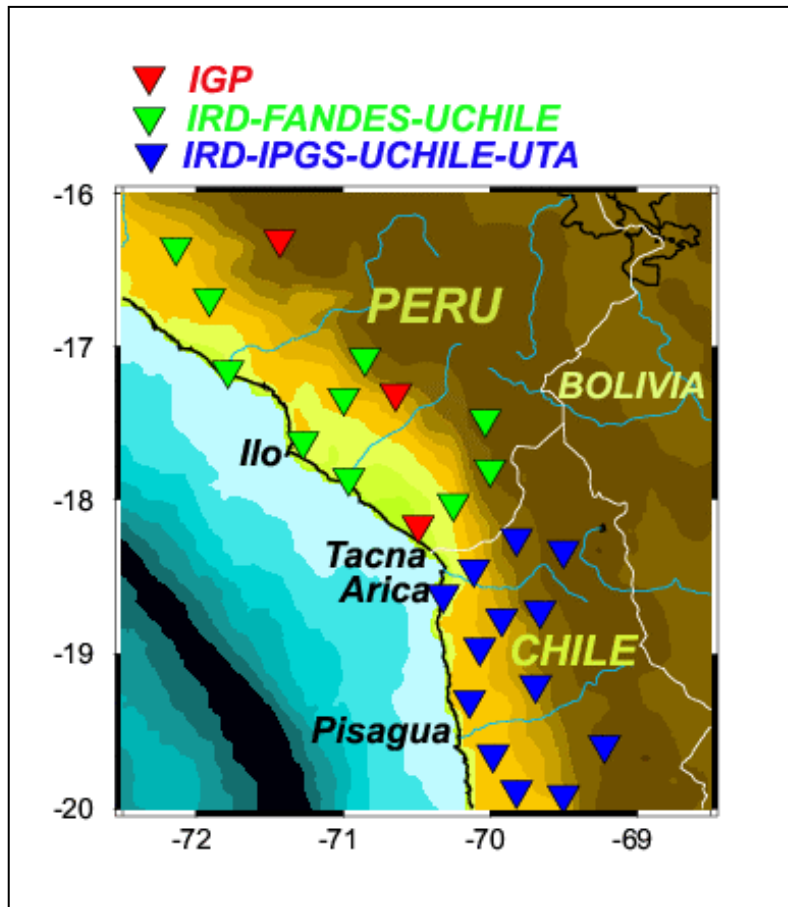


Figura 2.- Distribución de las estaciones sismológicas permanentes y temporales en la zona de estudio.

El análisis detallado de la secuencia de réplicas del terremoto del sur del Perú fue posible debido a la instalación de una red sísmica temporal de estaciones sismológicas que se extendió a lo largo de la zona costera en los distritos de Arequipa y Moquegua, complementando la red permanente Peruana de estaciones sismológicas. (Figura 2). La red temporal incluyó las 10 estaciones de tres componentes de período corto de la U. de Chile-Fundación Andes-IRD-Francia y 7 estaciones banda ancha del Instituto Geofísico del Perú. Dicha red operó durante las primeras semanas después de la ocurrencia del sismo principal y registró las réplicas más importantes incluyendo la mayor de ellas ocurrida el 7 de Julio de 2001, $M_w=7.5$. Los mecanismos focales de la secuencia de réplicas corresponden a fallamientos típicos de subducción, sin embargo también se observan eventos extensionales, el de mayor magnitud corresponde a la réplica

del 5 de Julio de 2001, $M_w=6.6$. La distribución de la sismicidad con respecto a la profundidad permite una definición detallada de la zona de Wadati-Benioff. La determinación hipocentral de la sismicidad ubicada cerca del límite político entre Chile y Perú fue realizada utilizando los datos registrados por la red permanente de monitoreo de Arica, norte de Chile.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En términos generales, la determinación del área de ruptura de un terremoto es un parámetro difícil de determinar y cuando se cuenta con datos instrumentales, el procedimiento usual es asociar

el área de réplicas con el área de ruptura del evento sísmico, entendiendo que el área de réplicas puede ser mayor que el de ruptura. Con ausencia de datos instrumentales y contando exclusivamente con las descripciones de los daños asociados a los terremotos históricos, la determinación de las áreas de ruptura posee un error aún mayor, porque por una parte la densidad de población no necesariamente es homogénea a lo largo del área involucrada y por otra parte, el efecto de sitio y una posible directividad en el proceso de ruptura, podrían perturbar notoriamente la determinación del tamaño del terremoto en cuestión.

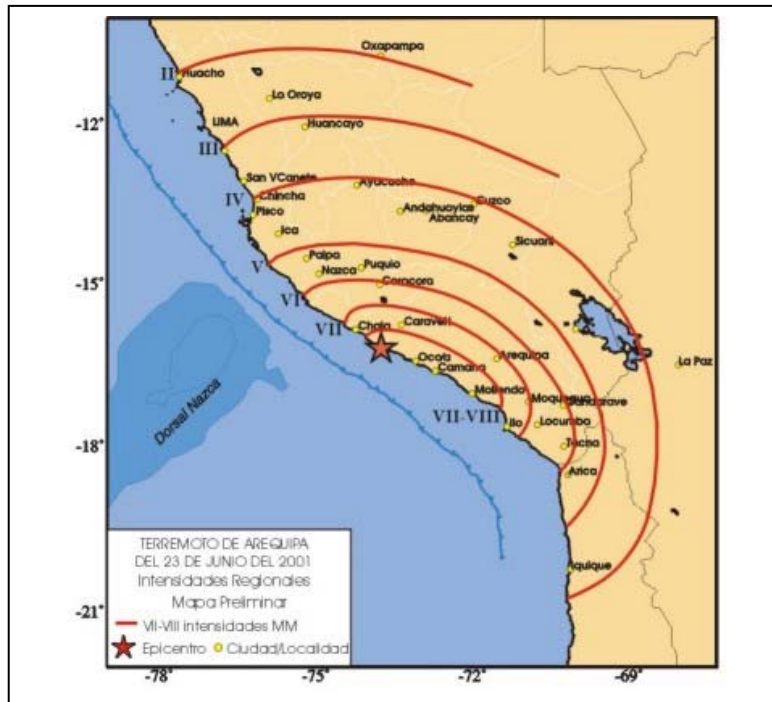
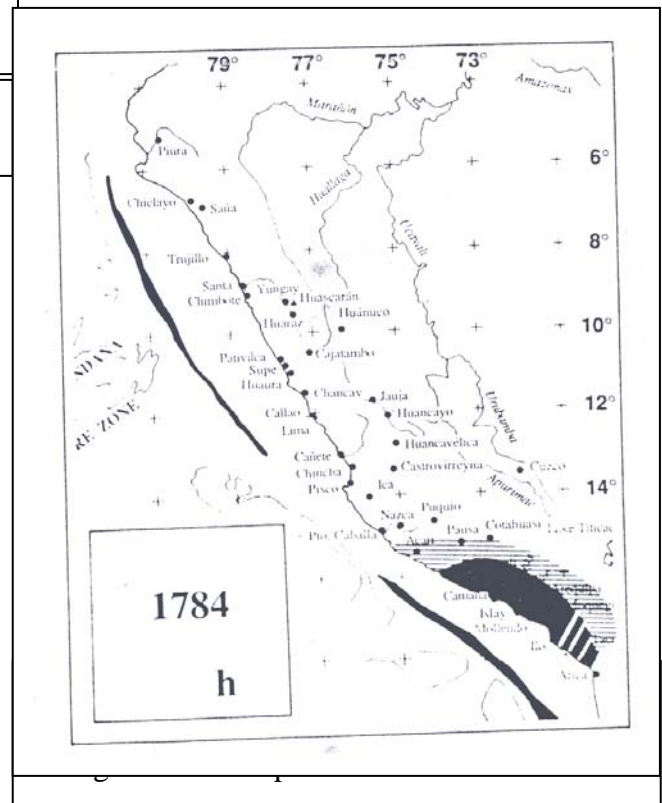


Figura 3.- Isosistas determinadas por Tavera et al. (Ref. 4) para el sismo del 23 de Junio, 2001

El área de réplicas determinada con registros instrumentales y la distribución de daños entregada por el Instituto Geofísico del Perú y por Tavera et al. (Figura 3, Ref. 4) del terremoto de 2001 es muy similar a la descrita por Dorbath et al. (Figura 4, Ref. 2) para el terremoto de 1784, determinada a partir de parámetros macrosísmicos y difiere de la descripción entregada por los registros históricos para los daños asociados al terremoto de 1868.

Aunque la descripción de los daños del terremoto de 1868 es una de las más completas de los grandes terremotos que afectaron el sur del Perú, hay dos elementos que son difíciles de discriminar en el sentido

En el caso del terremoto del sur del Perú de 2001, existen registros instrumentales y utilizando tanto los eventos mayores registrados por la red mundial de estaciones sismológicas, como los datos de las redes locales, el área de réplicas asociada es aproximadamente la misma y se extiende entre el límite sur del terremoto previo de subducción ocurrido en 1996 de magnitud $M_w=7.7$, e Ilo, quedando en evidencia que el segmento comprendido entre Ilo y Tacna permanece aún intacto, aunque participó en la ruptura del gran terremoto de 1868.



de contribuir al daño observado y por lo tanto, en la estimación de la magnitud del mismo. Uno de ellos es la ocurrencia del maremoto destructor asociado al terremoto de 1868, que en el caso de los terremotos de 1784 y 2001 los efectos de los maremotos asociados fueron de carácter más moderado y con efectos destructivos muy localizados. El otro aspecto se refiere al efecto de sitio en las zonas involucradas, en el caso del sismo de 2001 las intensidades y aceleraciones máximas observadas al sur del área de ruptura (Tacna y Arica, por ejemplo) son muy elevadas considerando la distancia de dichas ciudades con respecto al inicio de la ruptura; y el último aspecto está relacionado con el fenómeno de directividad que favorece un proceso de focalización de la energía liberada causando mayores intensidades en la dirección preferencial de la ruptura, y en el caso del terremoto de 2001 se observa una fuerte directividad hacia el sur (Ref. 6).

Por lo tanto, aunque parece evidente que el terremoto del sur del Perú de 2001 no es equivalente al ocurrido en 1868, los resultados obtenidos del análisis de este terremoto sugieren que la magnitud del terremoto de 1868 debería ser revisada a la luz de los antecedentes mencionados. De igual forma, sería muy interesante el realizar una re-evaluación de la magnitud del terremoto de 1877 que afectó el norte de Chile, considerando que se están realizando estudios de efectos de sitio en esta región.

Finalmente, la ocurrencia de los eventos de 1995 en Antofagasta ($M_w=8.0$) y de 2001 en el sur del Perú, sugieren un aumento de la probabilidad de ocurrencia de un sismo mayor en el norte de Chile, donde se encuentra la brecha sísmica asociada al evento de 1877, sin embargo, el próximo terremoto de subducción que afectará la zona norte del territorio nacional no necesariamente será equivalente al terremoto de 1877.

AGRADECIMIENTOS

La red sismológica de intervención se obtuvo a través del proyecto Fundación Andes C13502. Este trabajo fue parcialmente financiado a través del proyecto FONDECYT 1020104.

REFERENCIAS

1. Nishenko, S., Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal, *J. Geophys. Res.*, 90, 3589-3615, 1985;
2. Dorbath, L., A. Cisternas, C. Dorbath., Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576, 1990
3. Comte, D. y M. Pardo, Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4, 23-44.1991
4. TaveraH., E. Buforn, I. Bernal, Y. Antayhua y L. Vilacapoma, The Arequipa (Perú) earthquake of June 23, 2001, *J. of Seismology*, in press, 2002
5. Boroschek, R. Comte, D., Morales, A. "Características del terremoto de Ocoña del 23 de Junio de 2001", VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, 2002.
6. Dewey, J, and J. Bariola, Preliminary observations of the southern Peru earthquake of June 23, 2001: The earthquake and aftershock activity, *EERI Special Earthquake Report*, November 2001.