

***Daños:*** En esta ciudad se presentaron los mayores daños por el sismo de Arequipa, precisamente en la zona caracterizada por Lázares (1994), como de alto riesgo sísmico, que mostró amplificaciones de hasta 5 veces en promedio en una banda de frecuencias entre 2 y 8 Hz. Este mismo comportamiento se puede observar en el espectro de respuesta de aceleraciones del registro del evento principal (Fig.5) el cual muestra una demanda sísmica en promedio de 0.6g en ambas direcciones para una banda de periodos de estructuras de 0.1 a 0.7 s. Esto explica los daños muy severos a edificaciones de adobe (Fig. 16), tanto antiguas (en promedio de 100 años y ubicadas en la zona monumental) y las recientes (en promedio 20 años y ubicadas en las zonas periféricas). Estas últimas se ubican en zonas de topografía con pendientes fuertes, aumentando el efecto de sitio

Por otro lado, colegios de concreto reforzado construidos antes de la vigencia del último código sismorresistente (1997) sufrieron daños moderados a severos, sobre todo de columna corta. En la Fig. 18 se muestra este efecto, probablemente por la mayor amplificación observada en SANA; donde un colegio cerca de esta estación presentó daños graves de columna corta, a diferencia de otra, cerca de la estación AYAC, donde se tuvo menor amplificación relativa, el colegio se comportó adecuadamente. Colegios construidos con el código sismorresistente vigente se comportaron satisfactoriamente.

### ***Ciudad de Tacna***

***Efectos de sitio:*** Nuevamente en esta ciudad los daños observados después del sismo, coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994), quien, con base a estudios geológicos y de inspección realizada a los diferentes tipos de vivienda (adobe, albañilería con techo flexible, albañilería semi-resistente y albañilería resistente) divide en ocho sectores a la ciudad de Tacna y de acuerdo a los daños observados y al porcentaje del tipo de vivienda en cada una de estos sectores, clasifica a la ciudad en riesgo sísmico medio y alto. En la Fig. 19 se muestra esta clasificación, así como los sitios donde se instalaron los acelerógrafos (círculos oscuros). En la zona de alto riesgo, se instalaron tres estaciones (NUEV, TUPA y HOSP), y otras tres en la zona de riesgo sísmico medio (CENT, UNJB y PALM), y uno más, en una zonas donde se tiene prevista la expansión de la ciudad, denominada como CONO SUR (CANO).

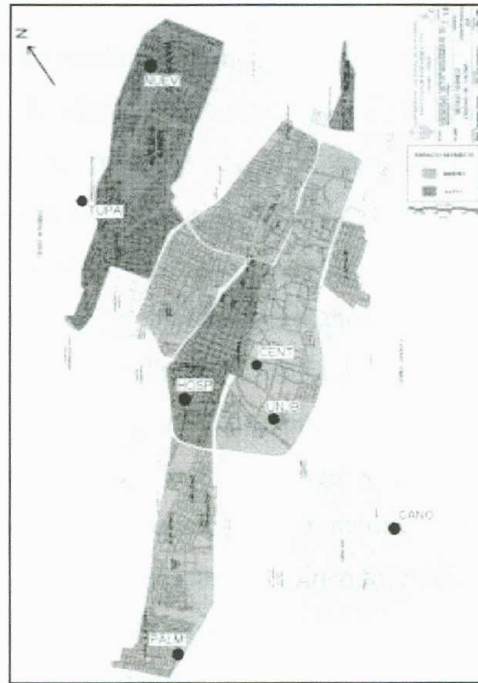


Fig. 19. Mapa urbano de la ciudad de Tacna, que muestra dos zonas con diferente nivel riesgo sísmico (Lázares, 1994) Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. PALM, estación de referencia.



Fig. 20. Ciudad de Tacna. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. PALM, estación de referencia. Comparación de seis registros (una por cada estación) de dos réplicas de diferente magnitud.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 20 (mapa urbano de la ciudad de Tacna), se ha graficado, en cada uno de las seis estaciones mencionadas, registros de dos réplicas de magnitudes similares. Si observamos sus amplitudes, vemos que tres de ellas muestra una amplitud menor (CANO, TUPA y PALM), por lo que, se aplicó a cada una de ellas el método de Nakamura, con el objeto de seleccionar la estación que tenga el menor efecto de sitio, y así tomarlo como estación de referencia. En la parte inferior de la Fig. 21, se muestran los resultados para las componentes horizontales de las tres estaciones mencionadas. Cada razón espectral es el promedio de cinco réplicas analizadas con el método de Nakamura. La razón espectral que presentó menor amplificación fue la de PALM, graficada con línea gruesa. Finalmente, tomando como estación de referencia este promedio espectral, se aplicó el método EP a las otras seis estaciones, cuyos resultados se muestran en la parte intermedia y superior de la Fig. 21, donde nuevamente se ha graficado con línea gruesa la estación de referencia (PALM) y con líneas delgadas el promedio de las razones espectrales obtenidas para cada componente horizontal y cada estación. En forma general, se observa un comportamiento similar a los efectos de sitio observados en la ciudad de Arequipa, ya que en este caso, tres lugares (TUPA, UNJB, HOSP) analizados muestran amplificaciones relativas mayores a 10 veces hacia frecuencias bajas (0.3 a 10 Hz), mientras que la estación NUEV, muestra una amplificación mayor a 10 veces hacia altas frecuencias (2.0 a 10 Hz). A diferencia de las estaciones de CENT y CANO, cuyas amplitudes son menores a 10 veces pero en la misma banda de frecuencias (0.3 a 10 Hz )

Por lo tanto, si comparamos estos resultados con la zonificación de Lazares (1994), observamos una correspondencia buena con las zona clasificada como riesgo sísmico alto y las mayores amplificaciones relativas observadas en HOSP, TUPA y NUEV. En cuanto a la zona clasificada como riesgo sísmico medio, la amplificación observada en la estación UNJB, no corresponde con esta zona, por lo que sería deseable una revisión de esta zona. Así también, la zona cercana a la estación de referencia (PALM), puede ser reclasificada como de riesgo sísmico bajo. Por otro lado, podemos observar que la zona conocida como CONO SUR, probablemente puede ser clasificada como de riesgo sísmico medio, por la respuesta de la estación CANO.

**Daño:** Viviendas de adobe ubicados en la zona antigua sufrieron daños severos (estación CENT). Las de ladrillos y bloques de concreto auto-construidas de dos y tres pisos localizados cerca de las estaciones NUEV y UNJB sufrieron colapso total y parcial (Fig.22). Estos daños corroboran las amplificaciones observadas hacia altas frecuencias en casi todos los lugares analizados, así como defectos estructurales en su diseño; entre otros: baja densidad de muros (primer piso blando), torsión y mecanismo viga fuerte-columna débil. Como en Arequipa, edificaciones de concreto reforzado flexibles tuvieron daños en su tabiquería como el caso del hospital Hipólito Unanue (HOSP). Y así como en Moquegua, varios colegios sufrieron daños por columna corta.

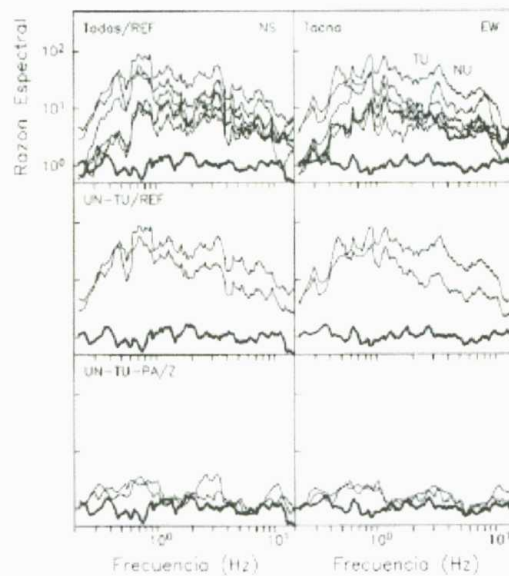


Fig. 21. Parte superior, resultados para las componentes NS y EW del efecto de sitio en las siete estaciones. Linea gruesa, estación de referencia. Lineas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior,



Fig.22. Izquierda, vivienda ubicado cerca de estación NUEV. Derecha, vivienda ubicado cerca de estación UNJB.

### ***Ciudad de Ilo***

***Efectos de sitio:*** En esta ciudad los daños observados después del sismo, no coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994), quien, siguiendo el mismo procedimiento, clasifica a la ciudad de Ilo en riesgo sísmico bajo y medio. En la Fig. 23 se muestra esta clasificación, así como los sitios donde se instalaron los acelerógrafos (círculos oscuros). Dos en la zona de riesgo medio, y uno en la zona donde se tiene prevista la expansión de la ciudad, denominada como PAMPA INALÁMBRICA (BRI5), donde se observaron la mayoría de los daños.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 24 (mapa urbano de la ciudad de Ilo), se ha graficado, en cada uno de las tres estaciones mencionadas, registros de una réplicas. Si observamos sus amplitudes, vemos que dos de ellas (CARI y MAGI) muestra una amplitud mucho menor que la instalada en la zona de expansión (BRI5). Esto se debe, a que estas dos estaciones se encuentran sobre roca. Esto es corroborado al aplicar el método Nakamura a seis réplicas registradas en estas dos estaciones. En la parte superior de la Fig.25 se muestra este análisis; mientras que en la parte inferior, se presenta el resultado de aplicar el método EP a la estación BRI5. La amplificación observada en este lugar es aproximadamente menor a 5 veces en un rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz.

***Daños:*** Los daños se concentraron en viviendas de ladrillos de arcilla ubicados en la zona de expansión, probablemente debidas al efecto de sitio observado en este lugar (BRI5), así como defectos estructurales similares a los encontrados en Tacna siendo moderados a severos.

**Ciudad de Camaná:** En esta ciudad solamente se pudo analizar un solo lugar ubicado en el Hotel Premier, donde registramos 9 réplicas, a los cuales se le aplicó el método de Nakamura. En la Fig. 26 se muestra este resultado, donde podemos notar que el promedio presenta una amplificación (de los resultados anteriores se puede mencionar que esta amplitud esta subvaluada) de 4 veces aproximadamente entre 2 y 8 Hz. Se observaron daños leves a moderados en algunas viviendas.

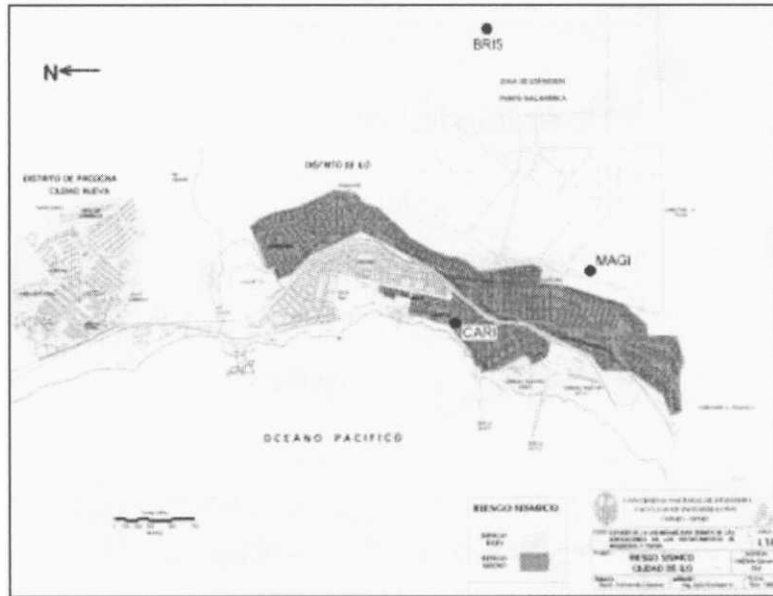


Fig. 23. Mapa urbano de la ciudad de Ilo, que muestra dos zonas con diferente nivel riesgo sísmico (Lázares, 1994) Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CARI y MAGI estaciones en roca.

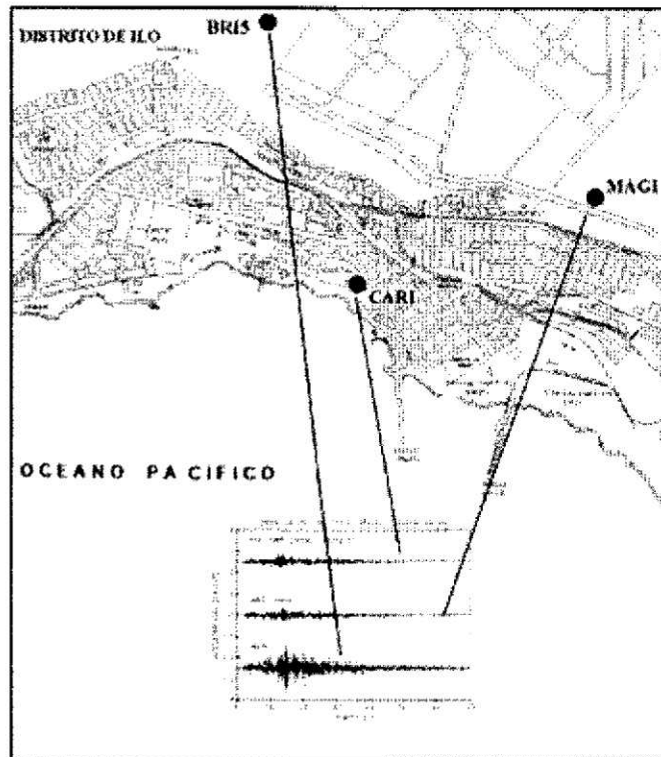


Fig. 24. Ciudad de Ilo. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CARI y MAGI, estaciones de referencia. Parte inferior, comparación de tres registros (una por cada estación) de una réplicas del sismo de Arequipa.

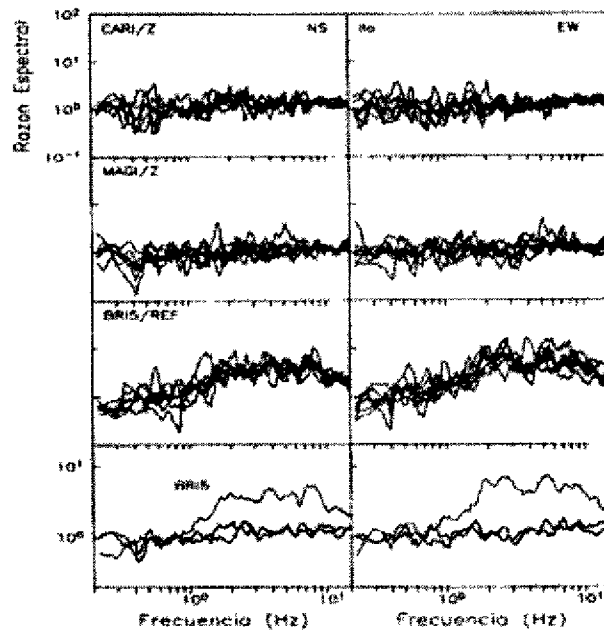


Fig. 25. Las primeras cuatro gráficas muestran los resultados de aplicar el método de Nakamura a CARI y MAGI. La quinta y sexta gráfica los resultados de aplicar el método de EP a la estación BRIS. Parte inferior, resultados del efecto de sitio en la estación BRIS.

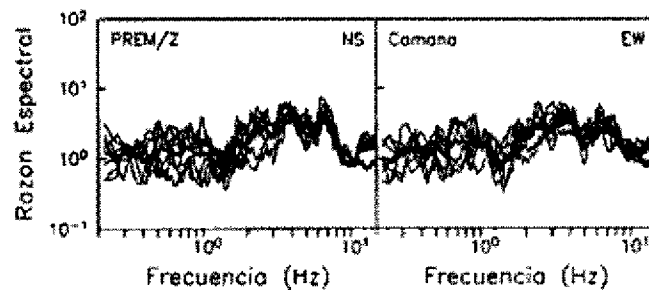


Fig. 26. Resultados de aplicar el método de Nakamura en las componentes NS y EW, en la estación PREM, de la ciudad de Camaná. Líneas delgadas, razones espectrales individuales. Línea gruesa, promedio de las razones espectrales

## Conclusiones

- El terremoto de Arequipa, Perú del 23 de junio del 2001 ( $M_l=6.9$ ,  $M_s=7.9$ ,  $M_w=8.4$ ) de fallamiento inverso y con profundidad de 38 km, se localizó en la costa del Pacífico frente a la ciudad de Ocoña, Arequipa. Se reportó un maremoto local (ola de 8 a 10 m de altura, Tavera et al., 2001) en la localidad de la Punta, Camaná.
- La agencia EIC, reporta una falla inversa de bajo ángulo ( $M_0=2.2 \times 10^{21}$  Nm,  $az=309$ ,  $buz=21$  y  $corr=61$ ), que se propagó hacia el extremo sureste formando dos zonas de

liberación máxima de energía: la primera alrededor del evento principal y la segunda al sureste concentrada en las coordenadas 17.5° S y 72.0° W

- El área de ruptura (300 x 100 km, aproximadamente) presenta un estrangulamiento en su parte central provocada por la ausencia de réplicas. Esta ausencia se deba probablemente a la coincidencia de esta zona con las áreas de ruptura de dos sismos recientes (16/02/1979, Ms=6.9 y 03/04/1999, Ms=6.8). Esta área fue estimada a partir de la distribución de 101 réplicas localizadas y reportadas por USGS National Earthquake Information Center (NEIC) ( $M > 4$ ), ocurridas durante los primeros 21 días después del sismo principal.

- De acuerdo a la distribución de las réplicas y los daños observados muestra una gran directividad hacia el sureste.

- Esta zona presenta un periodo de recurrencia de aproximadamente 100 años (Dorbath et al, 1991).

- La aceleración máxima del sismo de Arequipa registrada en suelo blando en la ciudad de Moquegua fue de 284 gales en la dirección EW, y su duración de la etapa intensa llegó a ser más de medio minuto. El espectro de respuesta muestra una demanda sísmica en promedio de 0.6g en ambas direcciones para una banda de periodos de estructuras de 0.1 a 0.7 s (CISMID-UNI).

- Se propone la siguiente ley de atenuación para el sur del Perú:  $\text{Log}(A_{\text{max}}) = 1.3 + 0.3M - \text{Log}R - 0.0031R$ ,  $\sigma = 0.4$ .

- Las curvas de igual intensidad (MM), desarrolladas por el IGP (Tavera *et al.*, 2001) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), presentan una intensidad de VIII como el valor más alto observado, e intensidades de VII para las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna.

- El método de Nakamura muestra deficiencias en cuanto a su amplificación, al ser comparada con el método estándar en cuatro de las ciudades analizadas. Sin embargo, el método fue indispensable para seleccionar sitios de referencia con un mínimo de efectos de sitio en las ciudades de Moquegua y Tacna.

- Debido al problema de no tener el mismo registro de la réplica en la estación de suelo blando y la de referencia, se modificó el método estándar (llamándola *método estándar-promedio, EP*), que consiste en obtener un espectro de Fourier-promedio de varias réplicas en la estación de referencia, el cual será utilizado como espectro maestro para obtener las razones espectrales individuales en cada una de las estaciones seleccionadas.



- En la ciudad de Arequipa, el estudio se realizó en base a los daños observados después del temblor y a la propuesta de microzonificación sísmica realizado por Zenon (1991), que divide a la ciudad de arequipa en cuatro zonas sísmicas. Los valores de amplificación relativa obtenidos en ocho sitios concuerdan en forma general con las zonas propuestas. Los periodos dominantes obtenidos por Zenon y los obtenidos en este trabajo, presentan diferencias en cuanto a sus valores, en especial hacia bajas frecuencias, ya que la excitación de estos suelos con sismos provocan bandas de amplificación y no frecuencia dominante estrechas.

- En la ciudad de Moquegua, aún cuando la estación de referencia no fue la adecuada, los resultados obtenidos demuestran que: i) las zonas clasificadas con riesgo sísmico medio y alto, presentan amplificaciones relativa muy parecidas, alrededor de 5 veces en una banda de frecuencias entre 2 y 8 Hz.; ii) de acuerdo a los resultados observados en la estación SANA, la zona de las Pampas de San Antonio, debe ser clasificada como zona de alto riesgo sísmico; iii) de acuerdo a los resultados observados en la estación CHEN, probablemente esta zona sea la adecuada para el futuro crecimiento de la ciudad de Moquegua, sin embargo se recomienda realizar mas mediciones con registros de movimientos débiles en diferentes puntos de esta zona.

- En la ciudad de Tacna, al comparar estos resultados con la zonificación de Lazares (1994), observamos una correspondencia buena con las zona clasificada como riesgo sísmico alto y las mayores amplificaciones relativas observadas en HOSP, TUPA y NUEV. En cuanto a la zona clasificada como riesgo sísmico medio, la amplificación observada en la estación UNJB, no corresponde con esta zona, por lo que seria deseable una revisión de esta zona. Así también, las zona cercana a la estación de referencia (PALM), puede ser reclasificada como de riesgo sísmico bajo. Por otro lado, podemos observa que la zona conocida como CONO SUR, probablemente puede ser clasificada como de riesgo sísmico medio, por la respuesta de la estación CANO.

- En la ciudad de Ilo, los daños observados después del sismo, no coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994). Los daños se observaron en la zona de expansión de la ciudad (Pampa Inalámbrica, BRI5) cuya amplificación observada en este lugar es aproximadamente menor a 5 veces en un rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz.

- En forma general, los daños en las edificaciones responden a los efectos de sitio encontrados en las cinco ciudades. Edificaciones de mampostería de sillar, adobe y

ladrillos o bloques de concreto, sufrieron daños severos, colapsos parciales y totales. Las de sillar ubicadas en suelos rocosos no sufrieron daños. Edificios de concreto reforzado flexibles presentaron daños en los muros de tabiquería. Colegios de concreto reforzado, construidas antes del la última norma de diseño sísmico (1997), sufrieron daños severos por la presencia de columnas cortas. Las construidas con la última norma se comportaron satisfactoriamente.

### **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento al Ing Héctor Palsa Árias-Barajona del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, por su apoyo en el trabajo de campo, así como al CISMID, Municipalidad Provincial de Moquegua. y Universidad Nacional Jorge Basadre, Tacna.

### **Bibliografía**

- Aguilar, Z. (1991). Microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, CISMID-Laboratorio de Geotécnia, Lima, Perú, pp.176.
- Boyd, T. M., J. A. Snoke, I. S. Sacks y A. Roodríguez (1984). High -resolution determination oof the Benioff zone geometry beneath Southern Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 559-568.
- Cotrado, D. y Y. Siña (1993). Microzonificación sísmica de la ciudad de Tacna, Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna, Facultad de Ingeniería, Tacna, Perú, pp.
- Cuenca, J (1993). Modelación de ondas P y SH en el suroeste del Perú y determinación de Tips en el Perú, Tesis de maestría UNAM, México, p112.
- Dewey, J. F. y S. H. Lamb (1992). Active tectonics of the Andes. *Tectonophysics*, 205 (1-3), 79-95.
- Dorbath, L., A. Cisternas and C. Dorbath (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 551-576.
- Field, E.H., K. Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1127-1143
- Grange, F. P. Cunninham, J. Gagnepain, D. Hartzfield, P. Molnar, L. Ocola, A. Rodríguez, S. W. Roecker, J. M. Stock y G Suárez (1984). The configuration f the seismic zone and the doowgoing slab in the southern Peru, *Geophys. Res Lett.*, 11, 38-41.
- Lázares, L.F. (1994). Estudio de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en los departamentos de Moquegua y Tacna, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú, pp.286.
- Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.

- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1995). Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca Resultados con registros de temblores y mediciones de microtemblores, *Revista de Ingeniería Sísmica*, 50, México, 1-13.
- Lomnitz, C. (1970). Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955, *Geolog.Rundsch*, 59, 938-960.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974). Inst Geol. Min , Lima, 131 pp.
- Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena, and R. Quaas (1988). A study of relative amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site, *Earthquake Spectra*, 4, 653-674.
- Tavera, H, E. Buforn, I.Bernal, Y. Antayhua and L. Vilcapoma (2001). The Arequipa (Perú) earthquake of June 23, 2001, *Journal of Seismology*, submitted.
- Zegarra, L, A., San Bartolomé y Daniel Quiun (2001). Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica, Serie DI-SIC-2001-07,08,09, Pontificia Universidad Católica del Perú, Dpto. de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Lima, Perú, pp 44..