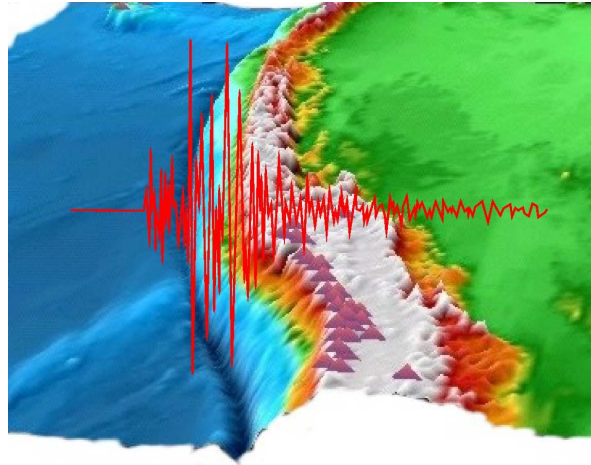




INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU
Dirección de Sismología - CNDG



El Sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9Mw)
Departamento de Ica - Perú

(Informe Preliminar)

Hernando Tavera
Isabel Bernal
Henry Salas

Lima-Perú
Agosto, 2007

Dr. Hernando Tavera. Investigador Científico, Director de Sismología-CNDG
MsC. Isabel Bernal. Asistente de Investigación - Sismología
Sr. Henry Salas. Centro Nacional de Datos - Sismología

Personal Participante:

CNDG-Sismología

Lic. Cesar Jimenez
Lic. Jose Millones
Bach. Simeón Rodriguez
Bach. Efrain Fernandez
Sra. Ivonne Perez-Pacheco
Sra. Consuelo Aguero
Bach. Luz Arredondo
Bach. Rocio Parillo
Bach. Carmen Talavera
Bach. Sheyla Yauri
Bach. Bilha Herrera
Bach. Geremias Moncca

Redes Geofísicas

Ing. Jorge Espinoza
Ing. David Portugal
Ing. Rubén Villafani
Ing. Adolfo Inza
Sr. Edmundo Vila

INDICE

PARTE I : ASPECTOS SISMOLOGICOS

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- EL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO, 2007
 - 2.1- Parámetros Hipocentrales
 - 2.2.- Intensidades
 - 2.3.- Orientación de la Fuente
- 3.- REPLICAS
- 4.- COMPLEJIDAD DE LA FUENTE SISMICA
- 5.- TSUNAMI
- 6.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES
 - Bibliografía

PARTE II : ACELERACIONES MAXIMAS

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- ACELERACIONES MÁXIMAS
- 3.- ESPECTROS DE RESPUESTA
 - 3.1.- Departamento de Ica
 - 3.2.- Departamento de Lima
- 4.- CONCLUSIONES
 - Bibliografía

PARTE I : ASPECTOS SISMOLOGICOS

1.- INTRODUCCION

La actividad sísmica presente en el Perú tiene su origen en el proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, el mismo que se produce con una velocidad promedio del orden de 7-8 cm/año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999). Este proceso es responsable de la ocurrencia de los sismos que con diversas magnitudes se producen frente a la línea de costa y a profundidades menores a 60 km (Dorbath et al, 1990a; Tavera y Buforn, 2001), todos asociados al contacto sismogénico interplaca. Estos sismos son muy frecuentes en el tiempo y en un año es posible registrar la ocurrencia de hasta 60 sismos con magnitudes $M \geq 4.5$ y en general, todos sentidos en las localidades cercanas al epicentro. Los sismos de mayor magnitud ($M_w > 7.0$) han producido importantes daños en áreas relativamente muy grandes como el ocurrido en la región Sur de Perú el 23 de Junio de 2001 ($M_w = 8.2$) que afectó un área de 370x70 km ubicada entre las localidades de Atico (Arequipa) e Ilo (Moquegua). En el interior del continente ocurren sismos con menor magnitud ($M_w < 6.5$) y frecuencia, todos asociados directamente a la deformación de la corteza como producto de la convergencia de placas. También debe considerarse, los sismos que ocurren a profundidades mayores a 61 km que deben su origen a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente y que muy raras veces son sensibles en superficie, siendo un ejemplo de estos sismos el ocurrido el 25 de Setiembre de 2005 ($M_w = 7.2$).

El último gran sismo con origen en el proceso de convergencia de placas, ocurrió el día 15 de Agosto de 2007 con una magnitud de 7.0ML (escala de Richter) y 7.9Mw (escala Momento), denominado como “el sismo de Pisco” debido a que su epicentro fue ubicado a 60 km al Oeste de esta ciudad. El sismo produjo daños importantes en un gran número de viviendas de la ciudad de Pisco (aproximadamente el 80%) y menor en localidades aledañas, llegándose a evaluar una intensidad del orden de VII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Este sismo presenta su epicentro y replicas entre las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en Lima en 1974 (7.5Mw) e Ica en 1996 (7.7Mw). Asimismo, este sismo produjo un tsunami que se originó frente a las localidades ubicadas al sur de la península de Paracas. En este informe preliminar se

presenta y discute los parámetros hipocentrales del sismo, además de realizarse su interpretación sismotectónica.

2.- EL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO, 2007

2.1.- Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales del sismo del 15 de Agosto fueron calculados utilizando información de las estaciones sísmicas de la “Red Sísmica Nacional – IGP” a cargo del Instituto Geofísico del Perú, siendo los valores obtenidos los siguientes (Figura 1):

Tiempo Origen:	23h 40m 58.0 seg. (GMT, Hora Universal)
	18h 40m 58.0 seg. (Hora Local)
Latitud Sur:	-13.67°
Longitud Oeste:	-76.76°
Profundidad:	40 km
Magnitud:	7.0ML (Richter), 7.9Mw (magnitud momento)
Intensidad Máxima:	VII (MM) en Pisco, Chincha, Cañete.
Momento Sísmico:	1.2E+21 N-m (NEIC)

En la Figura 1 se presenta la distribución espacial de los sismos con magnitudes mayores a 4.0ML ocurridos entre los años 1999 y 2006, tanto los de foco superficial (círculos=menor a 60 km) como los de foco intermedio (cuadrados=entre 61 y 350 km). En general, se observa que los sismos superficiales se distribuyen formando dos alineamientos importantes, el primero con epicentros entre la línea de fosa y la costa, estando asociados a la superficie de fricción de placas dentro del proceso de convergencia. El segundo, en el interior del continente alineado en dirección NO-SE con origen en la reactivación esporádica de los principales sistemas de fallas geológicas presentes en el continente. Los sismo de foco intermedio no muestran un patrón en su distribución, pero se observa una concentración de ellos entre la localidad de Chilca y Pisco,

sugiriendo que en esta área se habría incrementando la deformación a niveles de profundidad del orden de 61 a 100 km. Dentro de este contexto, el epicentro del sismo del 15 de Agosto se ubica a 60 km al Oeste de la ciudad de Pisco (Ica), con foco localizado a una profundidad de 40 km; por lo tanto, el sismo tuvo su origen en el proceso de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana.

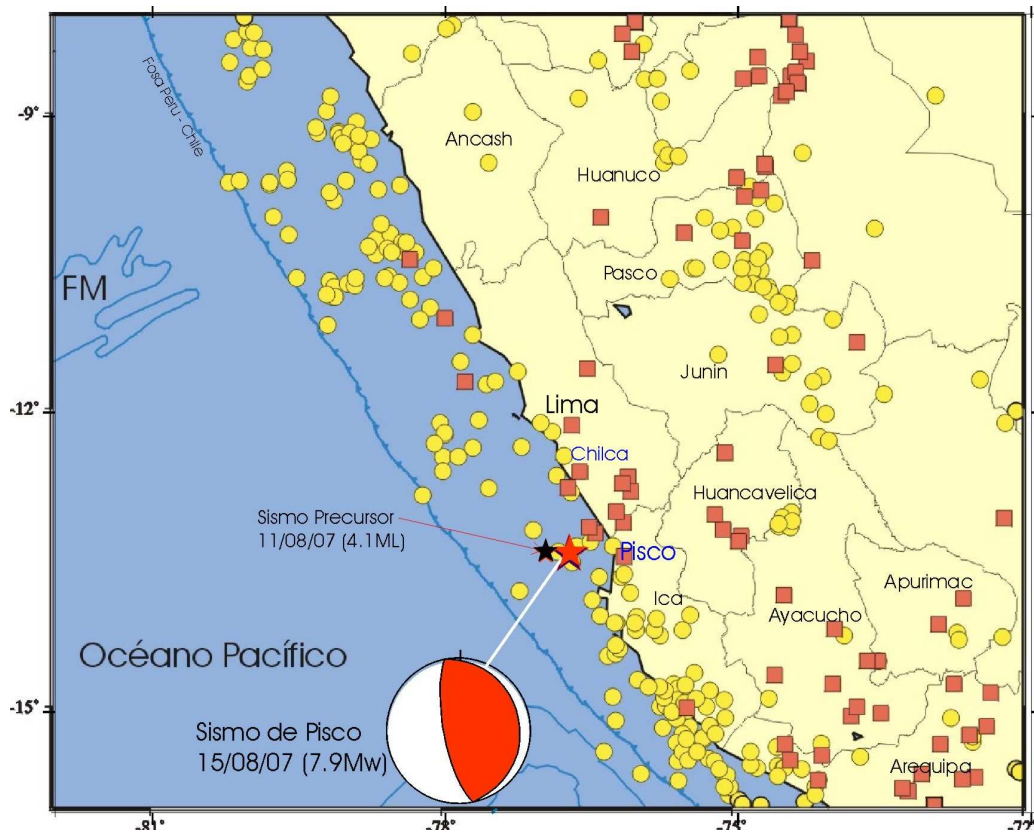


Figura 1.- Distribución espacial de la sismicidad ocurrida en la región central de Perú entre los años 1999 y 2006 ($ML > 4.0$) clasificada en sismos con foco superficial (círculos=menor a 60 km) e intermedios (cuadrados, entre 61 y 350 km). Nótese la agrupación de sismos intermedios entre las localidades de Chilca y Pisco. La estrella en rojo indica el epicentro del sismo del 15 de Agosto y la negra el evento precursor del 11 de Agosto. La esfera representa el mecanismo focal de tipo inverso obtenido con las polaridades de la onda P (cuadrante en rojo indica compresión).

Este sismo de gran magnitud se caracterizó por presentar un evento precursor el día 11 de Agosto a horas 19 con 18 minutos con una magnitud de 4.1ML, el mismo que fue seguido por más de 40 réplicas. El sismo tuvo su epicentro a 77 km al Nor-oeste de Pisco; por lo tanto, no fue sentido por la población. Considerando que la zona es de gran potencial sísmico, la ocurrencia de este sismo precursor de magnitud moderada no puede ser considerado como eminente indicador de la ocurrencia de un sismo de mayor magnitud.

2.2.- Intensidades

Inmediatamente después de ocurrido el sismo del 15 de Agosto, se procedió a realizar evaluaciones de los efectos y daños causados por el sismo en todas las capitales de los departamentos de Perú. Estas evaluaciones se realizaron mediante encuestas vía línea telefónica a dos o tres personas de cada ciudad y/o localidad y la información obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (Figura 2). La descripción más resaltante de los daños y efectos se describe a continuación:

.- Localidades de Pisco, Chincha y Cañete (Imax=VII MM): El sismo fue sentido fuerte produciendo el desplome de viviendas e iglesias de adobe y quincha, además de otras de material noble con posibles fallas estructurales. Se observaron la presencia de licuación de suelos a lo largo de la costa y la formación de grietas en la carretera Panamericana Sur con desniveles de hasta 1.5 metros. El sismo produjo pánico y desesperación en la población. Las líneas de fluido eléctrico y de telefonía colapsaron completamente, además las de distribución de agua potable.

.- Ciudad de Lima (Imax=V-VI MM): El sismo fue sentido fuerte permitiendo que las viviendas oscilaran por largo tiempo, al igual que los postes de alumbrado público y árboles. Se produjo pánico general en las personas que salieron a las calles de manera masiva. En el Callao se han observado la presencia de grietas y rajaduras en paredes correspondientes a viviendas de

material noble. Este mismo tipo de daño fue observado en algunas viviendas de Lima pero de manera aislada, así como daños en viviendas de adobe deterioradas por su antigüedad.

.- Localidades de Yauyos (Lima), Huaytara (Huancavelica) (Imax= VI MM): El sismo fue sentido fuerte generando pánico en la población, además de producir daños importantes en viviendas de adobe y parciales en otras de material noble.

.- Ciudades de Huaraz y localidades de Canta, Puquio, Chala, entre otras. (Imax=IV MM): El sismo fue sentido fuerte por la población pero no produjo daños de ningún tipo en viviendas.

.- Ciudades de Pucallpa y Cusco (Imax=III MM): El sismo fue sentido con movimientos largos por varios minutos produciendo alarma parcial en la población.

.- Ciudades de Arequipa y Chiclayo (Imax=II MM): El sismo fue sentido leve por varios minutos produciendo alarma parcial en la población.

Según la Figura 2, el área de mayor destrucción se encuentra dentro de un radio de 150 km con centro en el epicentro del sismo y en general, se observa que el sismo tuvo un radio de percepción de 600 km en dirección Nor-oeste, de 400 km en dirección Sur-este y de 300 km en dirección Este. Estas diferencias pueden ser atribuidas a lo siguiente: a). en dirección Sur-este la atenuación es mayor debido a la presencia de la Cordillera Costanera que aparece cerca de la Península de Paracas para extenderse hasta el departamento de Tacna, b). en dirección Este, la Cordillera de los Andes atenúa fuertemente la energía irradiada, siendo aceptable que en su borde occidental la atenuación sea menor y por ende producirse daños importantes en algunas localidades y c) en la dirección Nor-oeste la atenuación de la energía es menor debido a la ausencia de la Cordillera Costanera y a la presencia de una superficie plana compuesta por material sedimentario con gran contenido de arena que se extiende hasta la ciudad de Piura aproximadamente.



Figura 2.- Mapa de intensidades regionales en la escala Mercalli Modificada para el sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9Mw).

2.3.- Orientación de la Fuente

La orientación preliminar para la fuente del sismo de Pisco fue obtenida utilizando información de los primeros movimientos de la onda P registrados en las estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú y en otras de las redes sísmicas de Chile, Bolivia, Ecuador, Brasil, Colombia y Argentina.

En la Figura 1 se presenta el mecanismo focal obtenido para el sismo de Pisco, siendo este de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NO-SE y ejes de presión (P) en dirección NE-SO ($\varphi_1=325^\circ, \delta_1=28^\circ, \lambda_1=90^\circ; \varphi_2=172^\circ, \delta_2=67^\circ, \lambda_2=90^\circ$). De acuerdo a la profundidad del foco sísmico (40 km) y a la solución obtenida para la orientación de la fuente, el sismo de Pisco tuvo su origen en el mecanismo de fricción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso de convergencia. La solución obtenida para la fuente sísmica es similar a los mecanismos propuestos para otros sismos ocurridos en la región centro y sur como los de 1940, 1942, 1966, 1974, 1996 y 2001 (Figura 3), todos con magnitudes mayores a 7.5Mw.

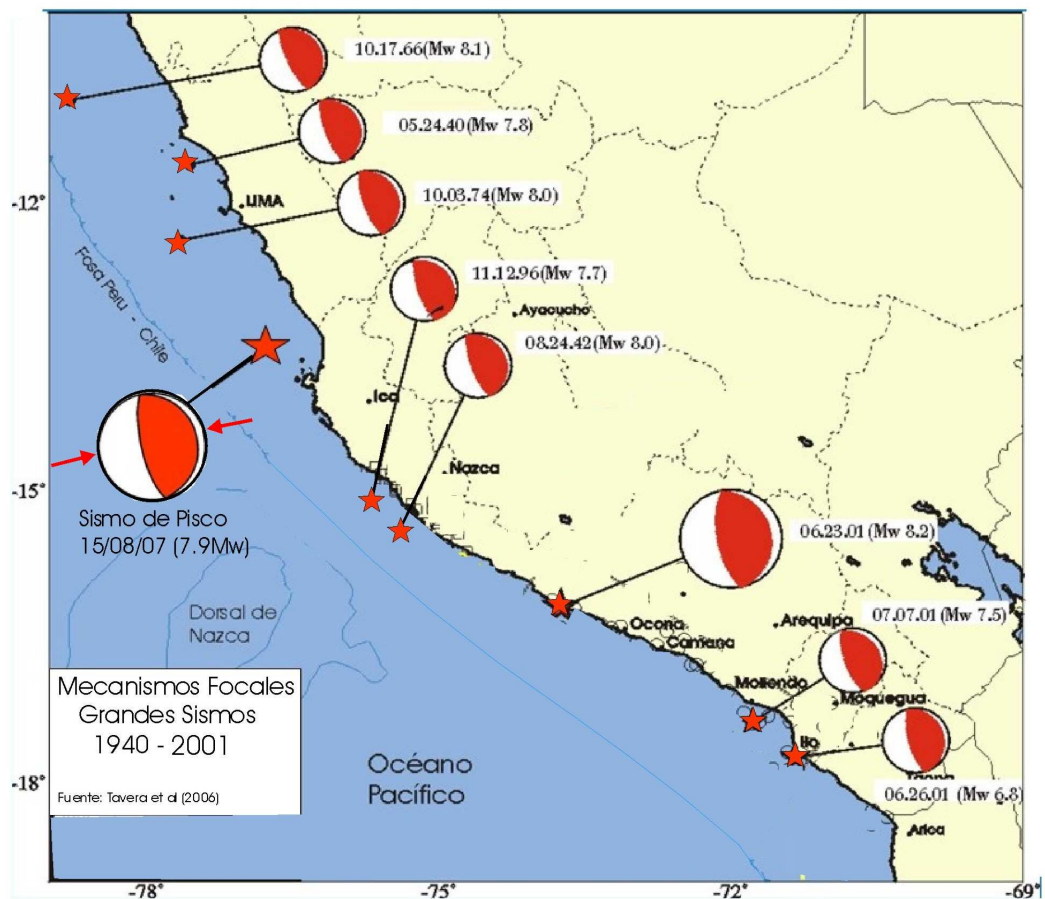


Figura 3.- Mecanismos focales para sismos de gran magnitud ocurridos en las regiones centro y sur de Perú entre los años 1940 y 2007, todos con origen el proceso de convergencia de placas. Obsérvese que todos los mecanismos presentan la misma forma y describen el desarrollo de procesos compresivos con planos nodales orientados en dirección NO-SE y ejes de presión (P) en dirección NE-SO en promedio (flechas rojas).

3.- REPLICAS

Después de ocurrido el sismo principal, hasta el día 27 de Agosto de 2007, las estaciones sísmicas de Guadalupe y Zamaca (GUA-ZAM) ubicadas a 125 y 180 km del epicentro han registrado aproximadamente 3060 replicas y de las cuales, solo 18 fueron sentidos por la población de las localidades de Pisco, Cañete e Ica con intensidades mayores a III en la escala Mercalli Modificada. Los parámetros hipocentrales de estas réplicas se indican en la Tabla 1.:

Tabla 1. Parámetros hipocentrales de las replicas de mayor magnitud que siguieron al sismo de Pisco.

Fecha	Tiempo GMT	Latitud S°	Longitud O°	Prof. km	Mag. ML	Intensidad (MM)
16-08-2007	04:24	13.64	76.85	40	6.0	IV Pisco, II Lima
16-08-2007	05:16	14.37	76.79	14	6.2	V Pisco
16-08-2007	06:10	14.21	76.38	26	5.0	IV Pisco, II Lima
16-08-2007	09:02	14.31	76.39	39	4.9	III Pisco
16-08-2007	11:35	14.47	76.33	40	5.6	III-IV Ica, Pisco
16-08-2007	15:11	13.42	76.90	33	4.7	III Cañete, II Lima
16-08-2007	22:49	13.61	76.96	44	4.4	III Pisco
17-08-2007	06:18	14.29	76.33	30	4.9	III Ica, II Lima
17-08-2007	13:18	13.61	76.85	23	5.5	IV Cañete, II-III Lima
17-08-2007	15:31	13.44	76.97	53	4.4	III Cañete, II Lima
17-08-2007	21:37	14.40	76.64	46	4.5	III Pisco
18-08-2007	02:52	14.08	76.87	30	4.8	III Cañete, II Lima
19-08-2007	00:56	13.66	76.62	18	5.0	III Pisco, II Lima
19-08-2007	01:22	13.67	76.80	33	5.5	IV Pisco, II Lima
19-08-2007	20:11	13.64	76.69	30	5.7	IV Pisco, II Lima
20-08-2007	21:23	13.83	76.54	39	4.7	III Pisco; II Lima
21-08-2007	20:37	13.75	76.43	51	5.1	III-IV Pisco; II Lima
21-08-2007	21:32	13.60	77.12	26	4.9	II-III Chincha, II Lima

En la Figura 4 se presenta como ejemplos los sismogramas de las estaciones de ZAM y ATH (Cajamarca) correspondiente a las primeras 12 horas de registro después de ocurrido el sismo de Pisco y en ellas se puede observar que prácticamente es difícil identificar y/o analizar cada replica registrada en razón que la señal satura completamente el sismograma. En la Figura 5 se muestra sismogramas de 12 horas de duración correspondientes a la estación Quinsachumpi (QCH) ubicada en el departamento de Huancavelica a 271 km del epicentro y en los cuales se observa la evolución del registro/ocurrencia de replicas entre los días del 15 al 19 de Agosto, siendo mayores en magnitud y numero al día siguiente de ocurrido el sismo, y menores el último día mostrado en la figura. La frecuencia de replicas también puede ser analizada en la Figura 6 cuyo histograma con el número de replicas registradas corresponde a la estación Huancayo (HUA, 237 km del epicentro) durante los días del 15 al 21 de agosto, la misma que muestra claramente el decaimiento típico del numero de replicas asociados a grandes sismos.

Finalmente, en la Figura 7 se presenta la distribución espacial de las réplicas registradas durante los días del 15 al 21 de Agosto, todas con magnitudes mayores e iguales a 3.0ML y profundidades focales menores a 50 km (355 replicas). En general, estas replicas se distribuyen sobre un área de aproximadamente 150x100km alargada en dirección paralela a la costa. Las replicas se distribuyen formando hasta tres agrupaciones, la primera alrededor del epicentro del sismo, la segunda y tercera al sur de la península de Paracas (G1, G2, G3). Estos agrupamientos de replicas indican la presencia de tres puntos de máxima deformación y de acuerdo a su ubicación/distribución, sugieren el desarrollo de un proceso complejo de ruptura. De acuerdo a la ubicación del epicentro del sismo, la energía se habría propagado en dirección SE hasta una distancia del orden de 150 km aproximadamente, pudiendo haberse liberado mayor cantidad de energía frente a la Bahía de La Independencia al sur de la Península de Paracas.

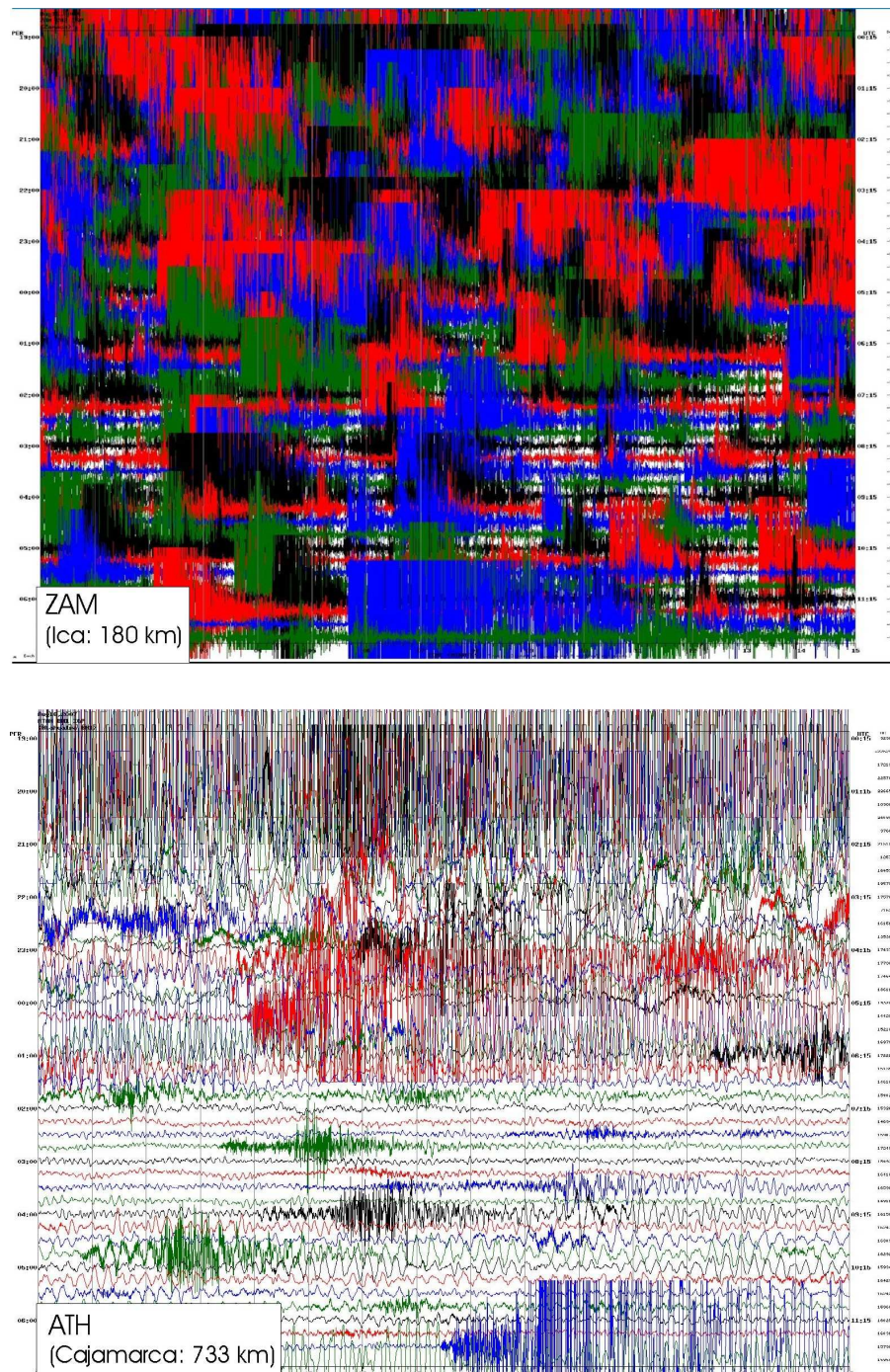


Figura 4.- Sismogramas de las estaciones sísmicas Zamaca (ZAM) y Atahualpa (ATH) para las primeras 12 horas de ocurrido el sismo de Pisco. De acuerdo a la distancia epicentro-estación (indicado en paréntesis), el numero de replicas es mayor en ZAM. Obsérvese que las señales de las replicas presentan sus registros completamente saturados.

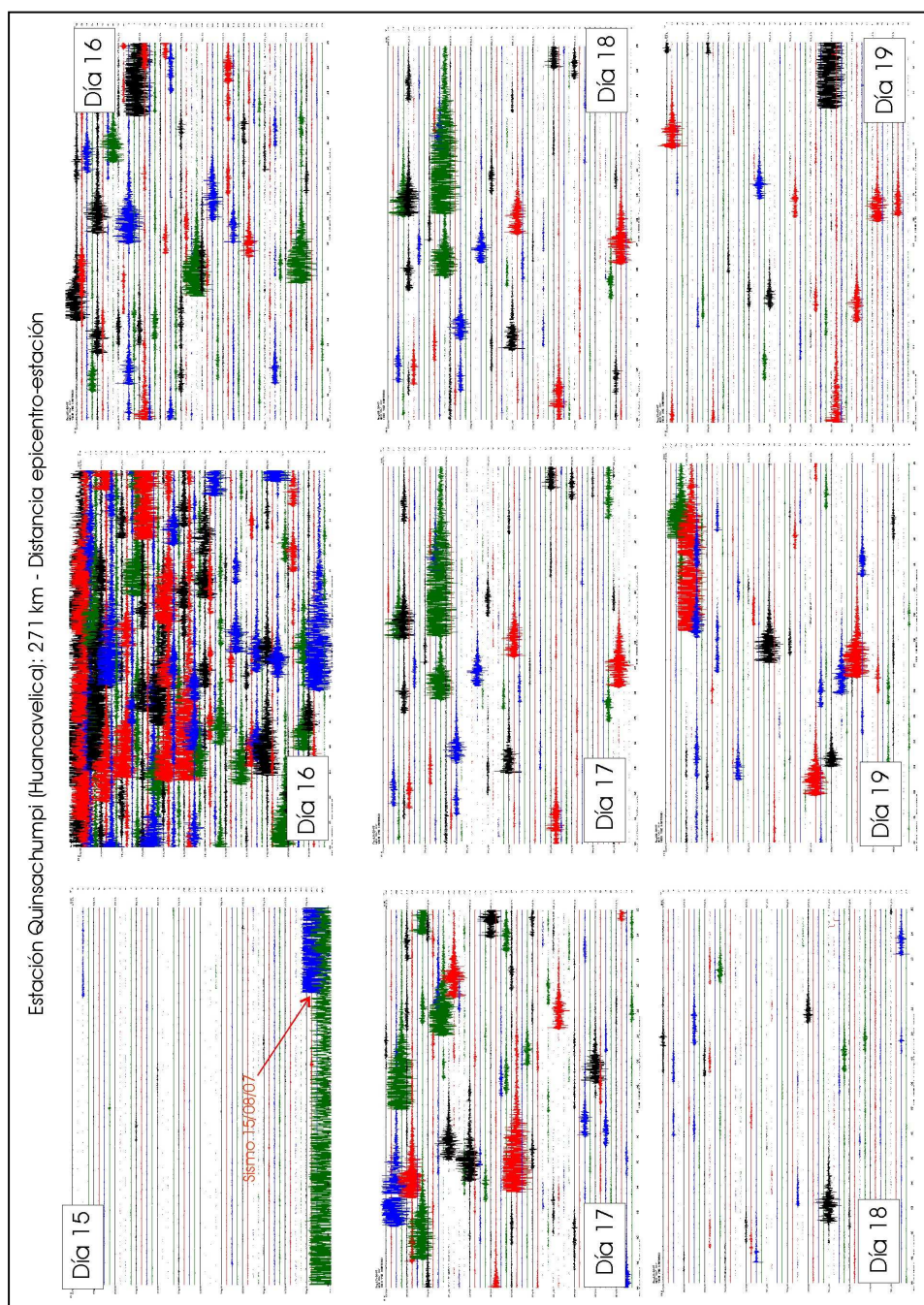


Figura 5.- Sismogramas de la estación Quinsachumpi (QCH), ubicada en Huancavelica a 271 km de distancia epicentro-estación, que muestran la frecuencia del registro del sismo de Pisco y de las réplicas ocurridas entre los días del 15 al 19 de Agosto de 2007. Obsérvese que el numero de réplicas es mayor inmediatamente después de ocurrido el sismo para luego disminuir en el tiempo.

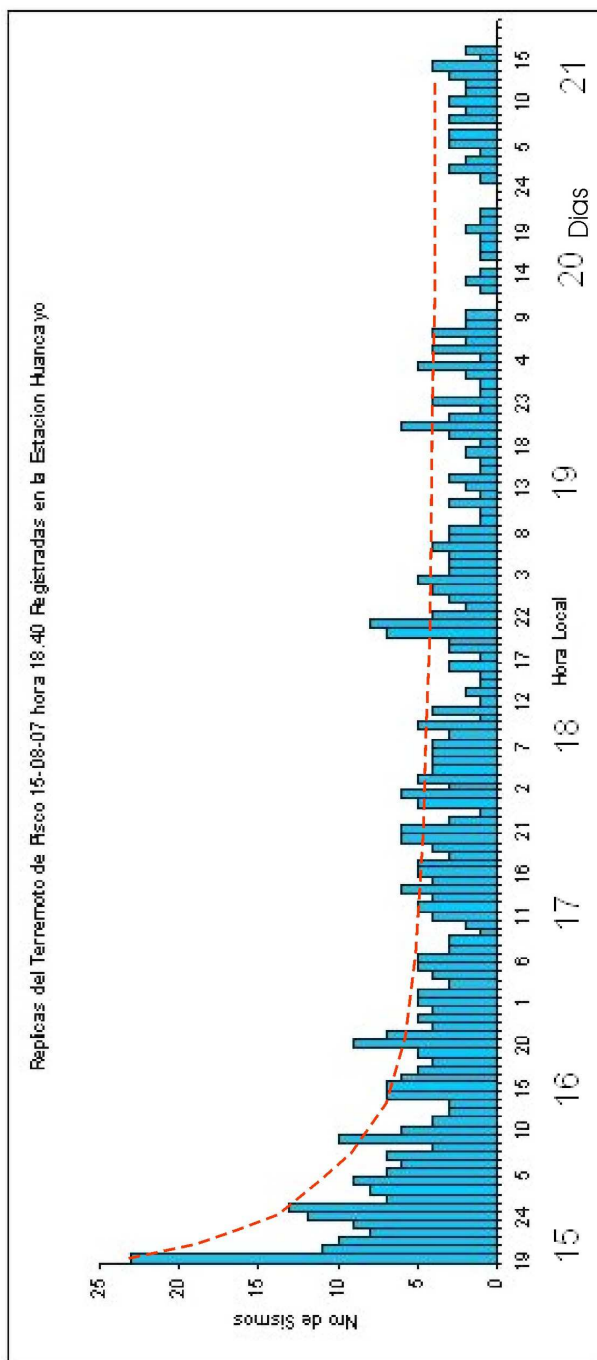


Figura 6.- Grafico de frecuencia sísmica para las réplicas del sismo de Pisco registradas en la estación de Huancayo (HUA, 237 km distancia epicentro-estación) durante los días del 15 al 21 de agosto de 2007.

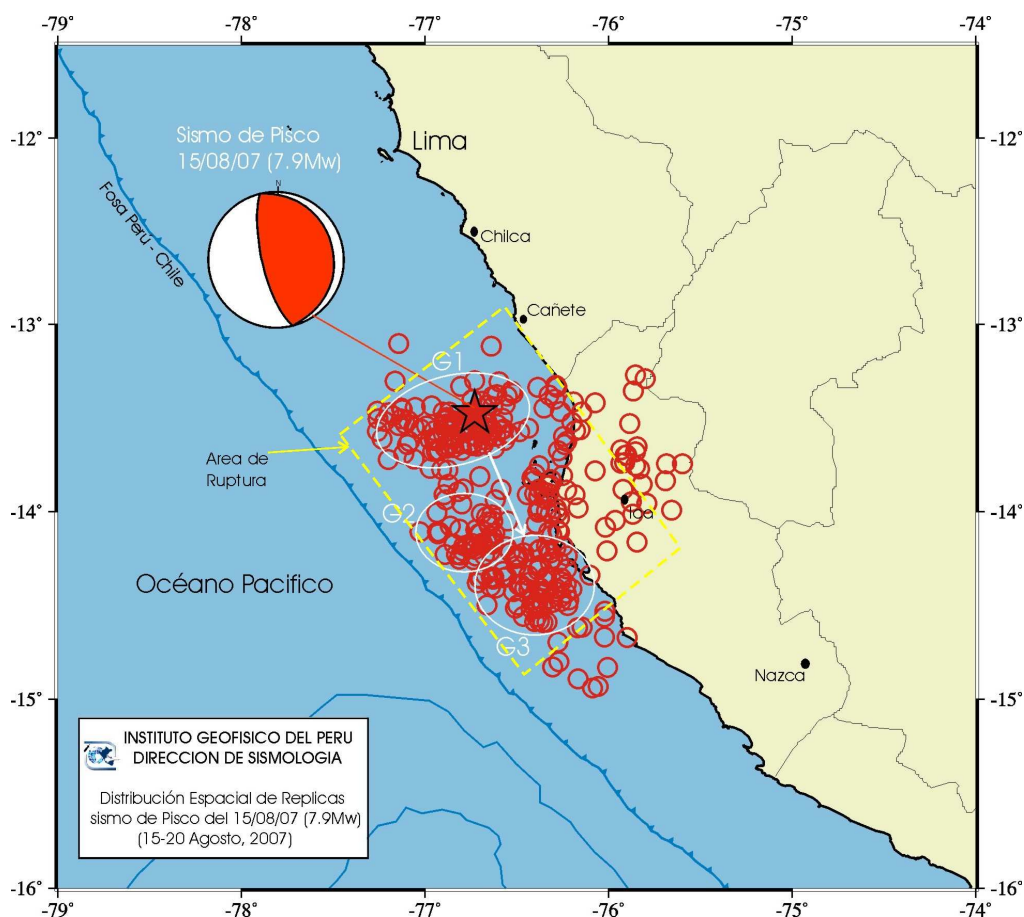


Figura 7.- Distribución espacial de las replicas del sismo de Pisco ocurridas entre los días del 15 al 21 de Agosto de 2007, todas con magnitudes mayores e iguales a 3.0ML. Nótese la presencia de tres agrupamientos importantes (G1, G2, G3) de replicas que sugieren el desarrollo de un proceso complejo de ruptura. El mecanismo focal para el sismo de Pisco es coherente con el tipo de deformación presente en el borde occidental de Perú. La flecha indica la dirección de propagación de la energía y el recuadro de línea discontinua delimita el área de ruptura.

4.- COMPLEJIDAD DE LA FUENTE SISMICA

EL sismo de Pisco presentó dos características importantes, su gran magnitud y gran duración de registro y por ende el tiempo de percepción del sismo por las personas. En relación a su duración, ella esta asociada directamente al complejo proceso de ruptura que experimento el sismo, la misma que puede ser fácilmente analizada en los registros de aceleración y desplazamiento del suelo obtenido a distancias regionales y telesismicas. Por ejemplo, en la Figura 9 se muestra el registro de la aceleración del suelo correspondiente a la componente vertical de la estación Mayorazgo (MAY, 166 km de distancia epicentro-estación) y en el cual se observa la presencia de dos grupos importantes de ondas que llegan con una diferencia de tiempo del orden de 70 segundos aproximadamente. El primero identificado como R1 presenta una aceleración del orden de 25 cm/seg² y el segundo, R2 de 31 cm/seg². Del mismo modo, en los registros de velocidad y desplazamiento para el sismo de Pisco obtenido en la estación ANMO (EEUU, 6040 km distancia epicentro-estación), se observa que el sismo llega a la estación a horas 23 con 50 minutos y 31 segundos, para luego después de 70 segundos llegar otro grupo de ondas correspondiente a otro frente de ruptura con amplitudes mayores, lo cual sugiere que el segundo fue de mayor tamaño. En total, todo el proceso de ruptura habría tenido una duración de 210 segundos; es decir, prácticamente el doble del observado para el sismo del 23 de Junio de 2001 (110 segundos) y que afecto a la región sur de Perú (8.2Mw). Estas características en la señal sísmica confirman el desarrollo de un proceso complejo de ruptura que por su naturaleza pudo haberse propagado de manera unilateral o bilateral.

Al analizar la distribución espacial del sismo principal y sus replicas de mayor magnitud (Tabla 1), en la Figura 10a se observa dos grupos de replicas separados por 100 km en dirección SE con respecto al epicentro. Estos agrupamientos muestran claramente la existencia de dos frentes de ruptura. Por otro lado, utilizando datos telesismicos Chen Ji de la USGS realiza el proceso de inversión de las formas de onda para conocer las dimensiones del vector de deslizamiento sobre el plano de falla. Los resultados obtenidos por este investigador se presentan en la Figura 10b, y en ella se observa en diferentes tonos de color que los máximos

desplazamientos se han producido al sur de la península de Paracas, mas exactamente cerca de la Bahía Independencia (800 cm) coincidiendo completamente con la distribución espacial de las replicas de mayor magnitud. Según Chen Ji, la velocidad del proceso de ruptura fue de 1.4 km/seg, prácticamente un tercio menor de la velocidad promedio estimado para los procesos de ruptura de otros sismos de similar magnitud. En general, estos resultados sugieren que durante la ocurrencia del sismo de Pisco, el proceso de desplazamiento de placas se realizo a una velocidad de 1.4 km/seg con desplazamientos máximos sobre el plano de falla del orden de 800 cm por debajo de la Bahía de la Independencia. Estos máximos valores corresponden a la zona en donde se ha evidenciado la ocurrencia de un tsunami.

Estación Acelerométrica Mayorazgo (MAY): 166 km epicentro-estación

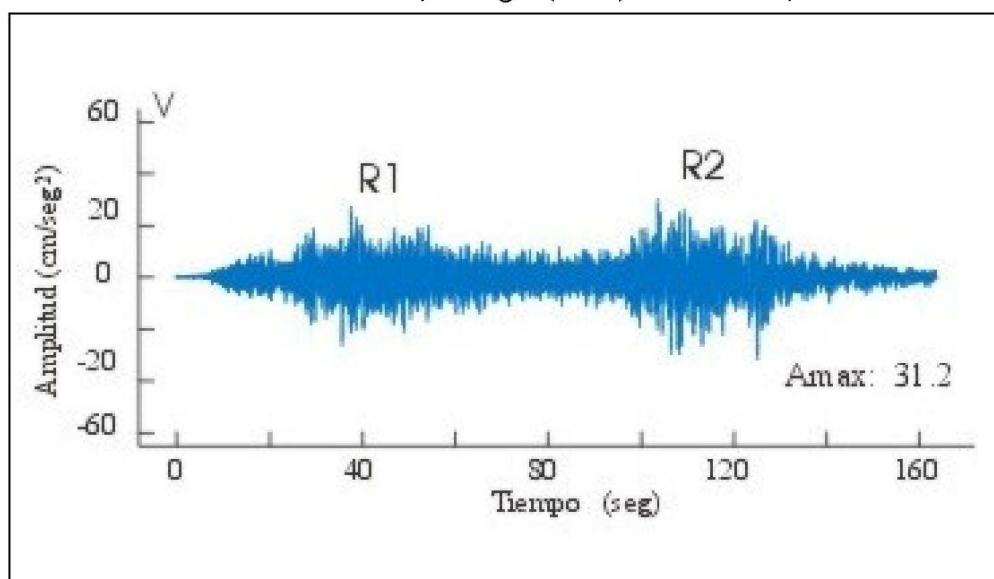


Figura 8.- Registro de aceleración del suelo en la estación Mayorazgo. Las letras R1 y R2 indican los grupos de ondas correspondientes a los dos frentes de ruptura. Amax= 31.2 cm/seg² indica la aceleración máxima registrada en la estación.

Estación ANMO (EEUU): Distancia 6,040 km

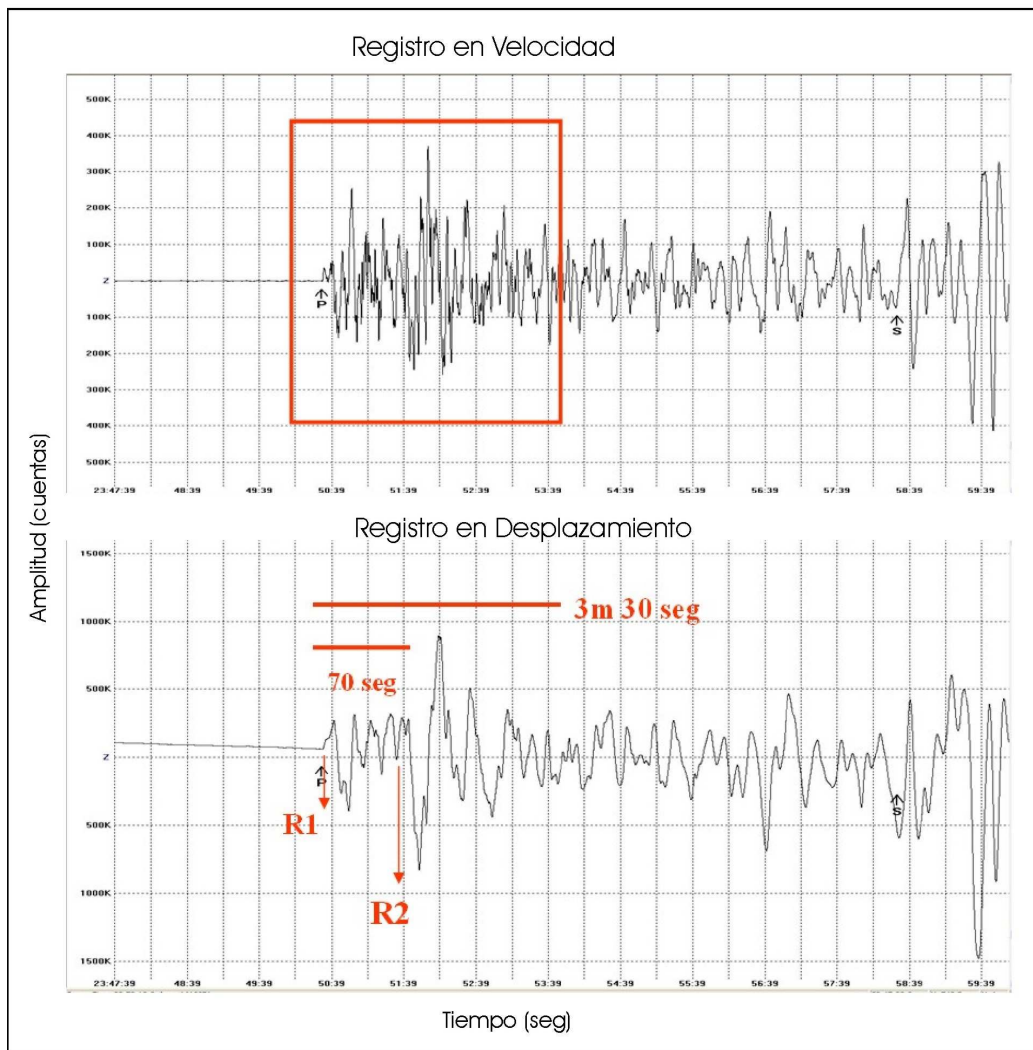


Figura 9.- Registros de velocidad y desplazamiento del suelo obtenidos para el sismo de Pisco en la estación ANMO (EEUU). El recuadro indica el grupo de la onda P. En la parte inferior y sobre el registro en desplazamiento se identifica el arribo de los dos frentes de onda (R1 y R2) separados por 70 segundos. El tiempo de duración de la ruptura es estimado en 210 segundos.

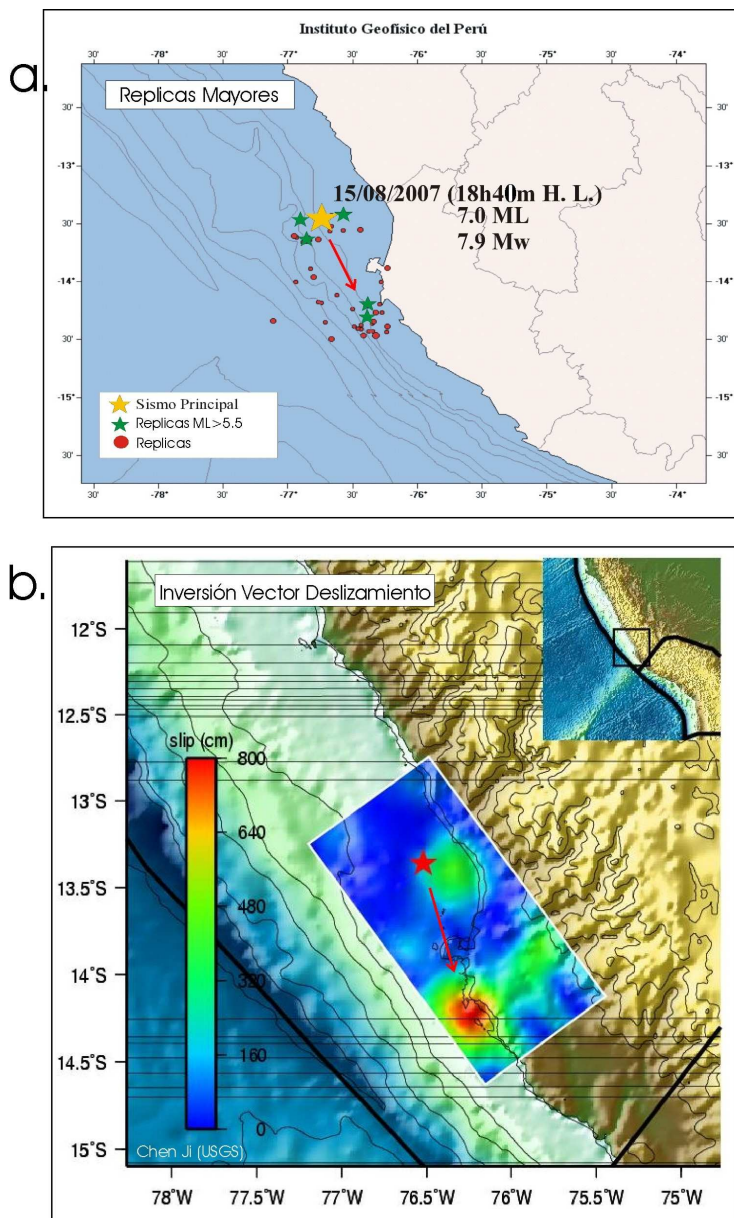


Figura 10.- a). Mapa de distribución de las replicas mayores del sismo de Pisco que muestran las dos concentraciones y áreas de mayor deformación. b). Resultado de la inversión de las formas de ondas a distancias telesismicas realizado por Chen Ji (USGS) para obtener el vector deslizamiento que muestra las áreas de mayor deformación en las cuales se tiene deslizamientos máximos sobre el plano de falla del orden de 800 cm. La velocidad de propagación de la ruptura habría sido del orden de 1.4 km/seg.

5.- TSUNAMI

El sismo de Pisco produjo un tsunami cuyo arribo a la costa de Pisco, Paracas no se pudo determinar con exactitud debido a la poca información existente; sin embargo, visitas posteriores realizadas por el Dr. R. Woodman permite confirmarse que después del sismo se produjo un tsunami que habría alcanzado alturas del orden de 5 metros dañando diversas viviendas de Lagunillas en Paracas (ver http://www.igp.gob.pe/tsunami_sismo.html). Asimismo, pobladores de la zona dieron testimonio de que en la caleta El Chaco la mar se salio aproximadamente 3 cuadras llegando a subir un metro y medio de altura (Sr. J. Villanueva). Del mismo modo, el Sr. O. García del Parque de Reserva Nacional de Paracas indica que la mar se salio e inundo unos 400 metros del mirador de aves y de la infraestructura allí construida. En el caso de Lima, el tsunami inundo por varios metros algunas calles del Callao (Canadá, San Judas Tadeo, Alan García, etc). En la costanera el mar prácticamente inundo toda la vía llevando consigo material orgánico y desprendiendo piedras del frente sedimentario que aparece como un muro de contención y sobre el cual se levanta el distrito de Miraflores (ver Figura 11).



Figura 11. Imágenes que muestran efectos del tsunami del sismo de Pisco en Ica y Lima

6.- DISCUSION Y CONCLUSIONES

El sismo de Pisco corresponde al de mayor magnitud ocurrido en la región central de Perú en los últimos 100 años (7.9Mw), y se caracterizo por presentar un proceso muy complejo de ruptura con evidente propagación unilateral en dirección SE. Los daños producidos por el sismo fueron mayores en la ciudad de Pisco y localidades aledañas afectando básicamente a viviendas de adobe y quincha, y viviendas de material noble con problemas estructurales. La intensidad máxima evaluada en la escala de Mercalli Modificada para la ciudad de Pisco fue de VII.

De acuerdo a la ubicación hipocentral, el sismo de Pisco tuvo su origen en el mecanismo de fricción de placas dentro del proceso de convergencia que se desarrolla en el borde occidental de Perú; es decir, proceso mediante el cual la placa de Nazca se introduce por debajo del continente generando sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. La orientación de los planos de falla y ejes de presión (P) obtenidos a partir del mecanismo focal, son coherentes con la orientación de la fosa y con la dirección de convergencia de placas. De acuerdo a la Figura 12, el sismo de Pisco presenta su epicentro en el área definida anteriormente como laguna sísmica y que se encuentra ubicada entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1996, el primero afecto a la ciudad de Lima y el segundo a Nazca.

El sismo de Pisco presento dos importantes características, primero su gran magnitud (7.9Mw) y la larga duración observada para su proceso de ruptura con evidencias de una propagación unilateral en dirección SE. El análisis de registros obtenidos a distancias regionales y telesísmicas sugiere para el sismo una duración del orden de 210 segundos, prácticamente el doble del observado para el gran sismo del 23 de junio del 2001 (8.2Mw) que afecto a la región sur del Perú (110 segundos). Durante este tiempo, se ha identificado la presencia de dos frentes de ruptura, el primero al inicio del sismo y el segundo 70 segundos después, siendo este último el que libero la mayor cantidad de energía.

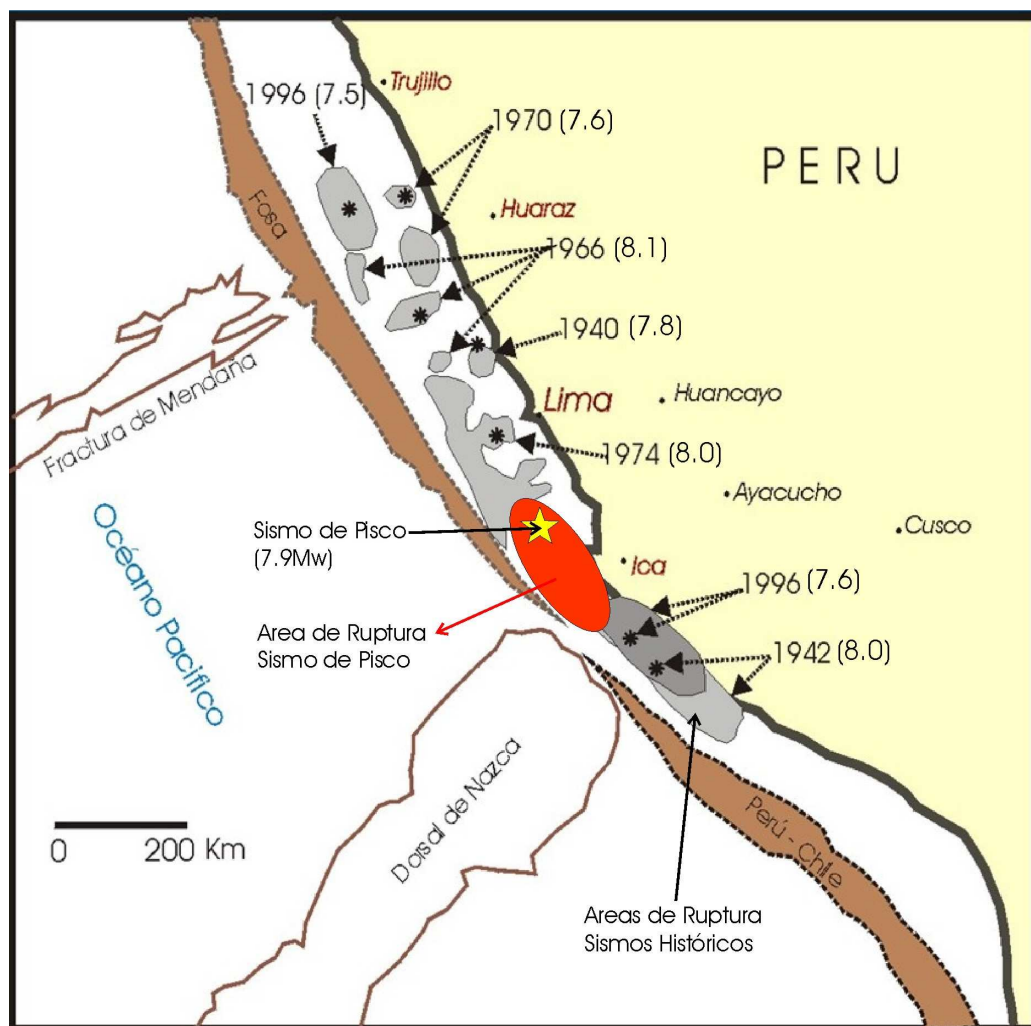


Figura 12.- Distribución de los epicentros y áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en la región central de Perú desde el año 1940 al 2007. El sismo de Pisco y su serie de replicas cubren completamente el gap sísmico que existía entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 (Lima) y 1996 (Nazca).

El sismo de Pisco y su replicas indican un área de ruptura de 150x100 km alargada en dirección paralela a la línea de costa. Por el tamaño del sismo y dimensiones del área de ruptura, se considera que este sismo habría liberado toda la energía acumulada en la laguna sísmica.

En la actualidad, se ha procedido a realizar un estudio más detallado del sismo que incluye el análisis de sus formas de onda a fin de conocer con mayor precisión su proceso y área de ruptura, intensidades locales, características del tsunami y efectos de sitio.

BIBLIOGRAFIA

- CNDG (2002). El Terremoto de la región Sur de Perú del 23 de Junio de 2003 (Editor. H. Tavera), Centro Nacional de Datos Geofísicos, Instituto Geofísico del Perú, 422 p.
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Dorbath, L., Cisternas, A. y Dorbath, C. (1990a). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein S. y Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca_south America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 26, 3405-3408.
- Tavera et al (2006). The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology*, DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2.
- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Perú. *Journal of Seismology*, 5, 519-540.

PARTE II : ACELERACIONES MAXIMAS

1.- INTRODUCCION

El sismo de Pisco fue registrado por un total de 15 acelerómetros pertenecientes a la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP, además de otros acelerómetros del CISMID, SEDAPAL, PUCP y CERESIS. De todos estos acelerómetros, solamente uno se encuentra en el departamento de Ica próximo a la zona epicentral (Pisco) y el resto distribuidos en diversos distritos de Lima Metropolitana (ver Figura 1). La estación Parcona (PCN) se encuentra ubicada en dirección SE a 122 km del epicentro del sismo. Algunas estaciones acelerométricas como GUA (Guadalupe) y LMO (La Molina), la primera ubicada en Ica y la segunda en Lima, no registraron el sismo principal por problemas instrumentales, pero si un número considerable de réplicas que serán analizadas posteriormente.

En el presente estudio, se realiza el análisis de las aceleraciones máximas registradas por las estaciones acelerométricas, además de construir y discutir las características de los espectros de respuesta elaborados para cada componente de registro disponible para el sismo de Pisco.

2.- ACELERACIONES MAXIMAS

En general, el estudio del movimiento del terreno en términos de series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento permite describir las características básicas del fenómeno sísmico en el punto de registro. En tal sentido, cada sismo que es analizado permite disponer de información importante al momento de la toma de decisiones dentro del campo de la ingeniería sísmica. Los registros de aceleración del sismo ocurrido el día 15 de agosto del 2007, fueron corregidos por instrumento y línea base, antes de proceder a identificar los picos máximos de aceleración sin la aplicación de ningún tipo de filtro. En la Figura 1 y Tabla 1, se presenta los valores máximos de aceleración registradas en cada estación acelerométrica.

Según la Figura 2, el sismo del 15 de agosto de 2007, generó aceleraciones máximas del terreno de 488cm/seg² (estación PCN) en la zona cercana al epicentro. Este valor se atenuó con la distancia y en la ciudad de Lima se registraron aceleraciones máximas de 22.1 y 22.5cm/seg² en las estaciones de NNA (Ñaña) y E2 (Estanque 2- Atarjea), ambas ubicadas sobre terreno rocoso. En estaciones ubicadas sobre suelos sedimentarios, como RIN (Rinconada-La Molina) y CALLAO (Callao-Hidrografía de la Marina), las aceleraciones alcanzaron valores máximos de 115.2 y 101.9 cm/seg² respectivamente

En el distrito de La Molina funcionan 3 acelerómetros (LMO, LA MOLINA y RIN), separados por distancias cortas y en las cuales se obtiene valores máximos de aceleración del suelo de 25.3, 69.1 y 115.2 cm/seg² respectivamente. La estación LMO esta ubicada sobre suleo rocoso y la estación RIN sobre relleno sedimentario, lo cual produce la amplificación de las ondas sísmicas; por lo tanto, habría efectos de sitio.

Las estaciones E1 y E2, se encuentran en el distrito de Santa Anita-Atarjea, separadas por una distancia aproximada de 200 metros. Estas estaciones registraron aceleraciones máximas de 54.8 y 20.5cm/seg² respectivamente, estando E2 sobre roca y E1 sobre sedimento.

El resto de estaciones se encuentran distribuidas en el extremo sur de la ciudad de Lima (ANR, CLD-CIP y CER) y presentan valores máximos de 85.26, 58.8 y 58.67cm/seg² respectivamente. Las estaciones distribuidas en el extremo Norte de la ciudad de Lima (PUCP, MAY y CISMID), tienen valores máximos de 67.0, 59.7 y 73.9cm/seg², siendo relativamente próximos a los registrados en el extremo sur de Lima.

Tabla 1. Valores de aceleración máxima (Amax) registrados por las diferentes estaciones acelerométricas distribuidas en las ciudades de Ica y Lima.

Estaciones IGP		Aceleraciones máximas cm/seg ²			Amax
Código	Localidad	Comp. V	Comp. N-S	Comp. E-O	Amax
Est./Ica	Nombres				
PCN	Parcona	301.0	455.0	488.0	488.0
Est/Lima					
MAY	Mayorazgo	31.2	59.7	55.0	59.7
ANC	Ancón	27.8	54.7	58.4	58.4
LMO	La Molina	14.2	21.2	25.3	25.3
NNA	Ñaña	21.6	18.7	22.1	22.1
Estaciones CERESIS					
Est./Lima	Nombres				
RIN	Rinconada	57.7	115.0	111.0	115.0
ANR	A. Nac.R	73.5	65.2	85.3	85.3
CER	Ceresis	37.3	58.0	58.7	58.7
Estación PUCP					
Est./Lima	Nombres				
PUCP	U. Católica	39.69	59.584	67.032	67.032
Estaciones CISMID					
Est/Lima	Localidad				
CISMID	Rímac	32.9	45.1	73.9	73.9
CLD-CIP	San Isidro	33.05	58.8	54.1	58.8
LA MOLINA	La Molina	56.8	69.1	78.7	78.7
CALLAO	DHN	31.6	101.0	95.8	101.0
Estaciones SEDAPAL					
Est./Lima	Localidad				
E1	Atarjea	30.38	49.98	54.88	54.88
E2	Atarjea	11.76	12.74	20.58	20.58

3.- ESPECTROS DE RESPUESTA

Para los registros disponibles del sismo de Pisco se han obtenido sus espectros de respuesta a fin de tener una representación gráfica de la “respuesta elástica máxima del suelo” para una serie de osciladores de un grado de libertad con periodo y amortiguamiento del 5%. En las Figuras 3 y 4, se muestra los registros de aceleración con sus respectivos espectros de aceleraciones absolutas obtenidos en este estudio.

Debido a la complejidad de las formas de ondas que ha caracterizado al proceso de ruptura del sismo de Pisco, se ha visto por conveniente realizar el análisis de los registros considerando los dos frentes de ruptura (grupos de ondas) asociados al complejo proceso de ruptura que ha caracterizado a este sismo y que fue discutido en capítulos anteriores. En cada registro de aceleración, los frentes de ruptura son indicados por R1 y R2 obteniéndose su espectro de respuesta por separado (Figuras 3 y 4). Asimismo, a fin de complementar estos resultados se incluye la información publicada por el CISMID (www.cismid.uni.org/descargas/informe_ica.pdf), Figura 5.

3.1.- Departamento de Ica

En la estación de PCN (Parcona-Ica), el máximo valor de aceleración fue identificado en el registro del grupo R1 (488.0cm/seg^2), siendo coherente con lo observado en los espectros de respuesta obtenidos para R1 y R2 en sus tres componentes. La aceleración máxima espectral para R1 es mayor a 1400cm/seg^2 para un periodo de 0.4 segundos (componente EO) y para R2, menor a 600cm/seg^2 para un periodo de 0.2 segundos (componente Vertical). En este caso, los valores de amplitud espectral y periodos obtenidos para R1 y R2 no coinciden; sin embargo, muestran similitud en su forma. Además, debido a la complejidad de la señal se observa la presencia de picos secundarios de aceleración espectral a diferentes periodos. Por ejemplo, en la componente vertical se observa picos a periodos de 0.2 segundos, para la componente norte-sur

a periodos de 0.2, 0.35 y 0.43 segundos y para la componente este-oeste picos a 0.12 y 0.4-0.5 segundos (ver Figura 3)

3.2- Departamento de Lima

En general, las aceleraciones máximas registradas por las estaciones acelerométricas en la ciudad de Lima se presentan en el grupo de ondas R2 (ver Tabla 1 y Figura2).

Para el distrito de La Molina, la estación RIN presenta una aceleración espectral de 500 cm/seg² para un periodo de 0.3 segundos (este-oeste); mientras que, en la estación LA MOLINA el valor es de 374.4cm/seg² para un periodo de 0.13 segundos (Figura 4). Los diferentes valores de aceleración espectral y periodo se deben a las amplificaciones del movimiento del suelo predominante en RIN por encontrarse sobre suelo sedimentario/arenoso. Los espectros de respuesta en RIN correspondientes a R1 y R2, muestran similitud en la forma de sus curvas con un pequeño desplazamiento de R1 hacia la derecha. La aceleración espectral es mayor en las componentes horizontales de ambas curvas. En la componente vertical, la máxima amplitud espectral se presenta a 0.2 segundos en R1 y R2, en la norte-sur a 0.22 segundos para R2 y una banda de 0.1-0.32 segundos para R1 y finalmente, en la componente este-oeste a 0.3 segundos para R2 y en 0.13-0.21 segundos para R1.

Los espectros de respuesta obtenidos para las estaciones localizadas al extremo sur de la ciudad de Lima (CER, ANR y CLP-CIP), tienden hacia periodos relativamente mayores a lo observado en las estaciones RIN y LA MOLINA. La estación CER, muestra mayor similitud y proximidad en las curvas R1 y R2 para bajos periodos, además de un valor máximo para la aceleración espectral de 200cm/seg² para un periodo de 0.19 segundos en la componente este-oeste, seguido por un valor de 180cm/seg² a 0.7 segundos para su componente norte-sur. Para esta ultima componente, el grupo R1 presenta el máximo valor de aceleración espectral para un periodo de 0.28 segundos y para R2 a 0.28 y 0.7 segundos. En la componente este-oeste la máxima aceleración espectral se presenta en un rango de 0.19-0.3 y 0.6 segundos. En la estación ANR, el máximo valor de aceleración espectral es de 350cm/seg² a periodos de 0.48

segundos en su componente este-oeste, periodos secundarios se presentan a 0.3 y 0.41 segundos en su componente vertical y norte-sur respectivamente. La estación de CLD-CIP, según CISMID, presenta una aceleración espectral máxima de 175cm/seg^2 para un periodo de 0.21 segundos en su componente norte-sur.

Los espectros de respuesta obtenidos para las estaciones ubicadas en el extremo norte de la ciudad de Lima (PUCP, MAY, ANC y CISMID), muestran similitud en las formas de sus espectros de respuesta. Por ejemplo, las estaciones de ANC y MAY presentan aceleraciones espectrales de 220cm/seg^2 para 0.22 segundos para la primera y de 0.2 segundos para la segunda. En las estaciones PUCP y CISMID, el valor máximo de aceleración espectral es de 200cm/seg^2 para un periodo de 0.21 segundos y de 252cm/seg^2 para el periodo de 0.26 segundos respectivamente. Asimismo, para la estación PUCP se observa un pico secundario con un alto valor de aceleración espectral a 0.5 segundos (198cm/seg^2).

Finalmente, los espectros de respuesta obtenidos en los extremos este y oeste de la ciudad de Lima pueden ser analizados con las estaciones NNA y CALLAO. Para NNA se observa similitud entre las curvas R1 y R2 a bajos periodos excepto en la componente norte-sur que presenta máximos valores de aceleración espectral de 65cm/seg^2 a 0.2 segundos para R2 y 54cm/seg^2 a 0.1 segundos para R1. En la estación CALLAO, la aceleración espectral máxima es de 379cm/seg^2 para un periodo de 0.51 segundos, siendo hasta 5 veces mayor que la observada en la estación NNA. Esta diferencia se debe principalmente a la calidad del suelo sobre el cual se encuentran ambas estaciones, NNA sobre suelo rocoso y CALLAO sobre suelo sedimentario.

4.- CONCLUSIONES

En la estación PCN (Parcona-Ica) la aceleración máxima registrada fue de 488 cm/seg² en su componente EO. Esta alta aceleración puede ser debida probablemente a que la estación se ubica sobre suelo sedimentario.

En la ciudad de Lima, las aceleraciones máximas fueron registradas en las estaciones RIN (115.0cm/seg²) y CALLAO (101 cm/seg²), ambas ubicadas sobre suelos compuestos de sedimentos con predominio de arena. Las aceleraciones mínimas fueron registradas en las estaciones NNA, LMO y E2 con valores que fluctúan entre 20-25cm/seg², todas ubicadas sobre suelo rocoso.

Según los espectros de respuesta, la máxima aceleración espectral fue registrada en la estación PCN y corresponde al grupo de ondas R1 (1400cm/seg²) para un periodo de 0.4 segundos. Para R2 la aceleración espectral es del orden de la mitad (600cm/seg²) para un periodo de 0.2 segundos. A diferencia del resto de estaciones, la máxima aceleración espectral corresponde al grupo de ondas R2.

Los diversos valores máximos obtenidos para los espectros de respuesta en R1 y R2 se muestran en la Tabla 2. Según estos resultados, en algunos casos existe clara diferencia en los periodos correspondientes para la máxima aceleración espectral en R1 y R2 (por ejemplo, en PUCP y RIN).

En general, la amplitud de la aceleración espectral es mayor en la componente Este-Oeste.

Tabla 2. Se muestra los valores de aceleración espectral máximos y su periodo por estación. R1 y R2 indican los dos grupos de ondas predominantes para los cuales se realizó su espectro de respuesta individualmente.

Estación	Ruptura	Aceleración Espectral (cm/seg ²)	Periodo (seg.)	Componente del Registro
PCN	R1	1400	0.4	Este-oeste
	R2	600	0.2	Vertical
MAY	R1	140	0.1-0.21	Norte-sur
	R2	220	0.2	Este-oeste
ANC	R1	170	0.22	Este-oeste
	R2	220	0.22	Este-oeste
NNA	R1	54	0.1	Norte-sur
	R2	65	0.2	Norte-sur
RIN	R1	310	0.3	Este-oeste
	R2	500	0.13-0.21	Este-oeste
ANR	R1	250	0.4	Norte-sur
	R2	350	0.48	Este-oeste
CER	R1	150	0.13-0.21	Este-oeste
	R2	200	0.19	Norte-sur
		180	0.7	Norte-sur
PUCP	R1	120	0.72	Norte-sur
	R2	200	0.21	Norte-sur
		198	0.5	Este-oeste

Bibliografía

- CISMID (2007). Reporte preliminar del Sismo de Ica del 15 de agosto de 2007. WEBSITE del CISMID, 9pp.
- PUCP (2007). Sismo del 15 de agosto del 2007. WEBSITE de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 3pp



Figura 1. Mapa con la distribución de las estaciones acelerométricas en las ciudades de Ica y Lima (triángulos y su código). La estrella indica el epicentro del sismo de Pisco. No se dispone de registros para las estaciones GUA y LMO.

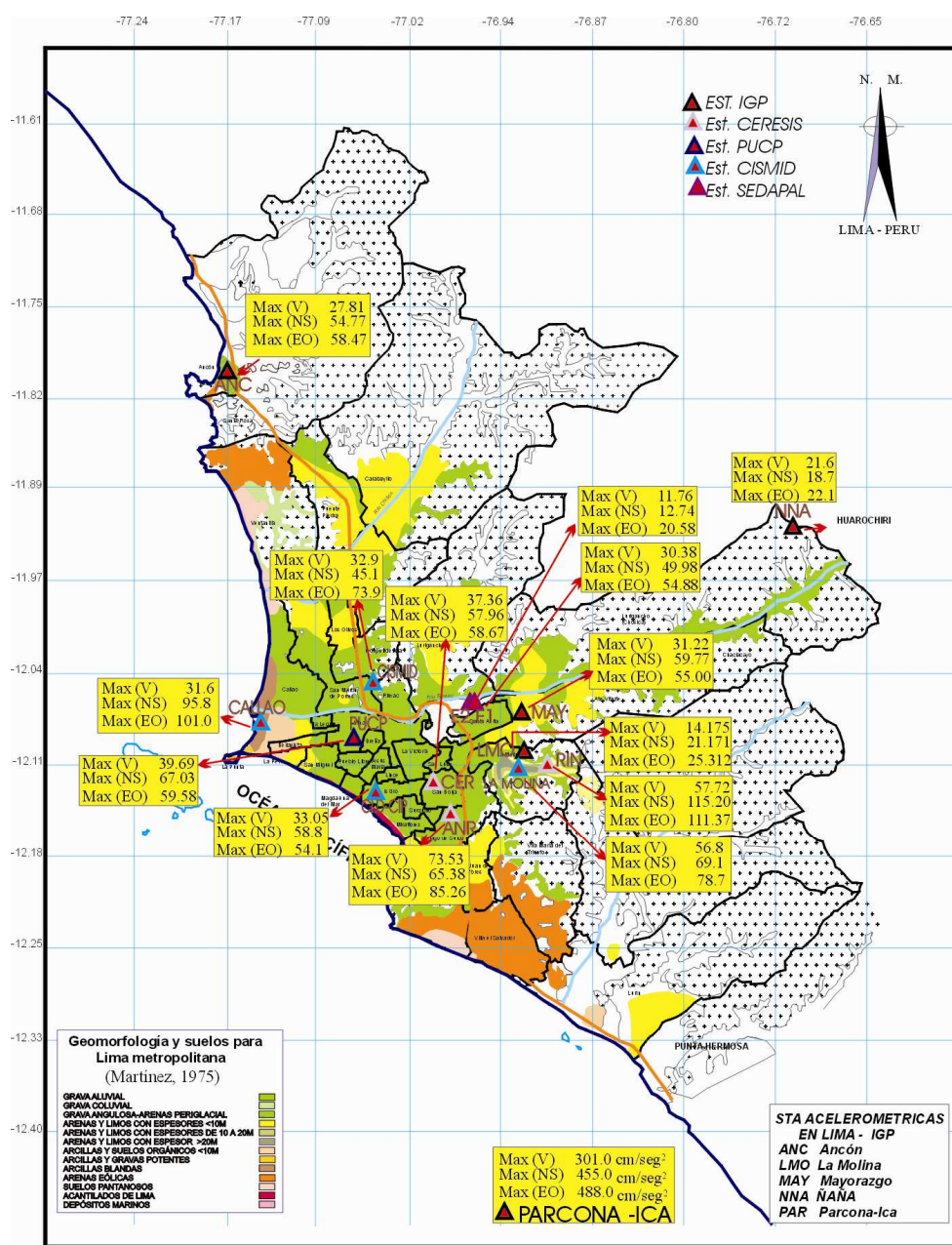


Figura 2. Mapa de la ciudad de Lima con la distribución de las estaciones acelerométricas (triángulos) y sus respectivos valores de aceleración registrados para el sismo de Pisco (15/08/2007) en sus tres componentes. Los colores en el mapa indican el tipo de suelo.

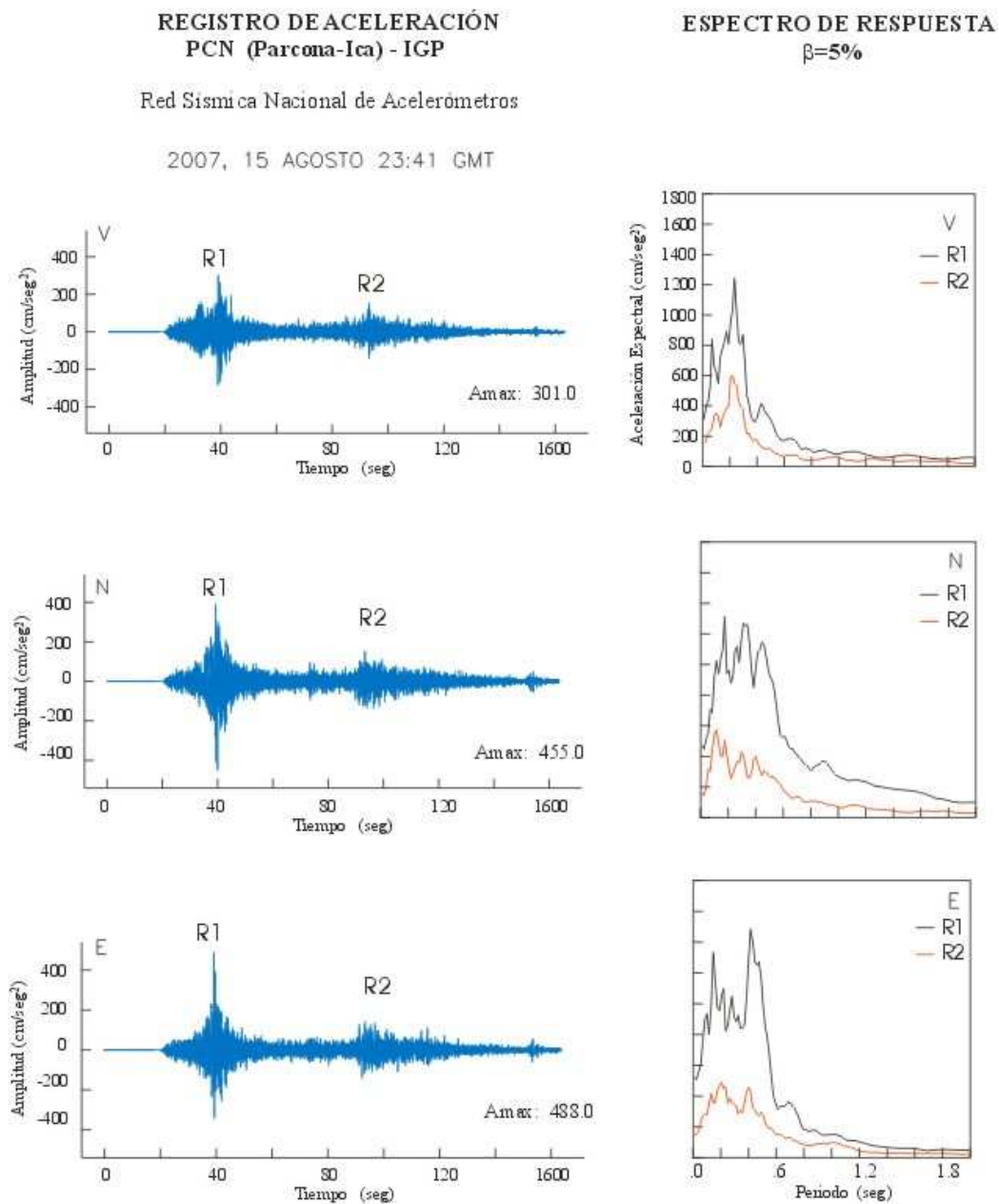


Figura 3. Registro del sismo de Pisco en la estación PCN ubicada en la ciudad de Ica con sus respectivos espectros de respuesta. V, N y E indican las componente vertical, norte-sur y este-oeste de cada registro. R1 y R2, sobre el registro indican los dos grupos de ondas predominantes para los cuales se realizó su espectro de respuestas individualmente indicadas con curvas de color negro y rojo respectivamente.

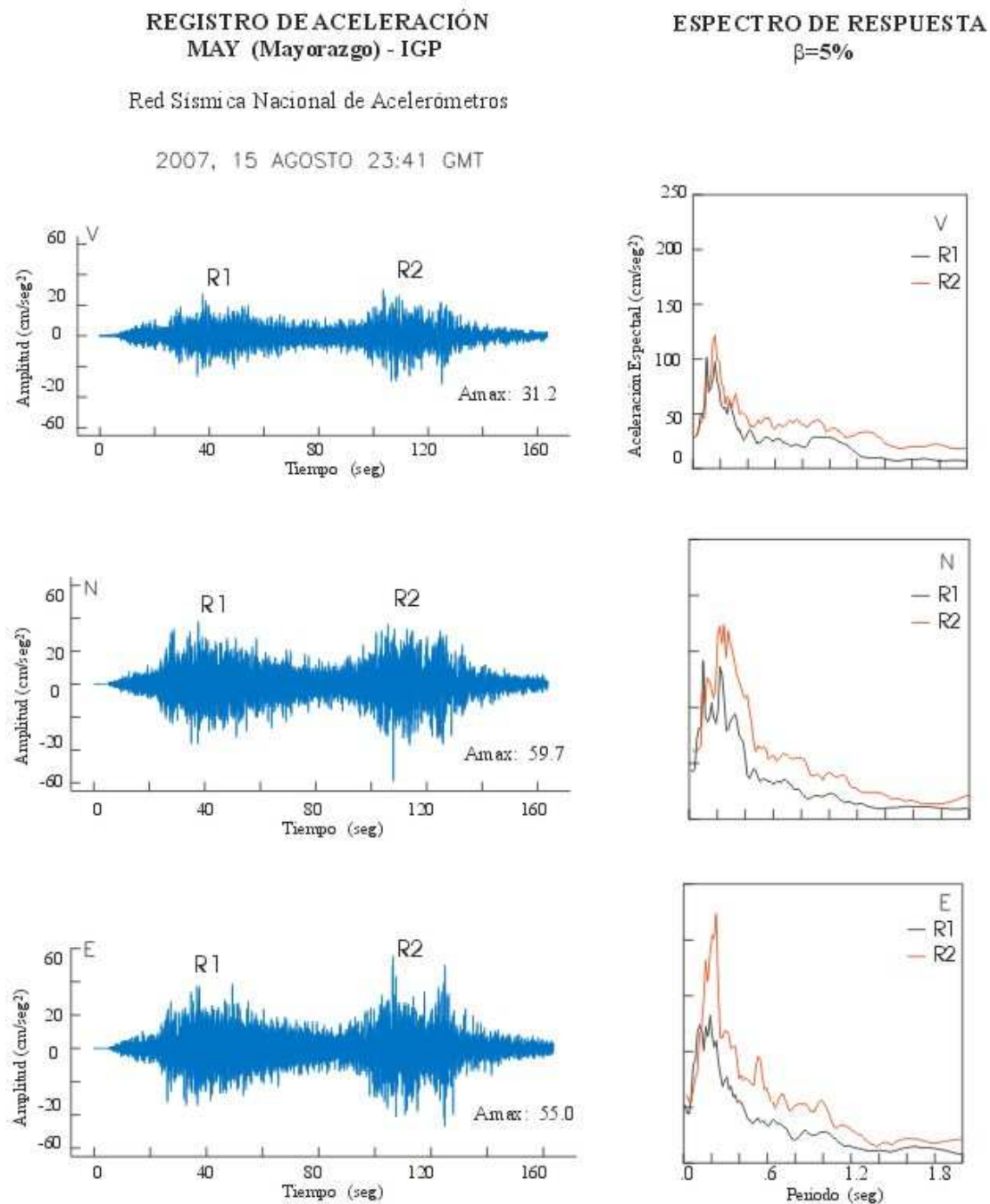


Figura 4. Registro del sismo de Pisco en la estación MAY ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

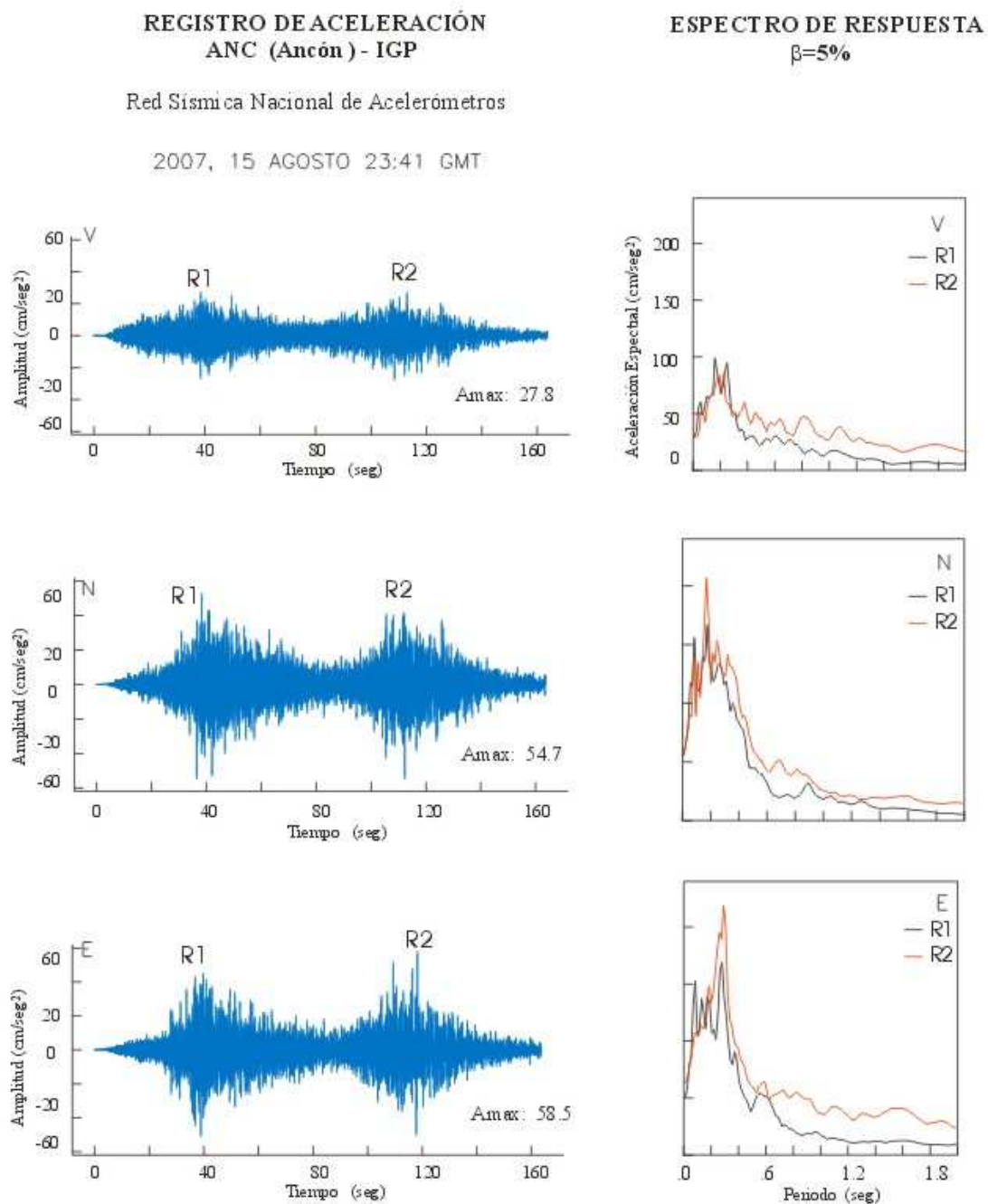


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación ANC ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

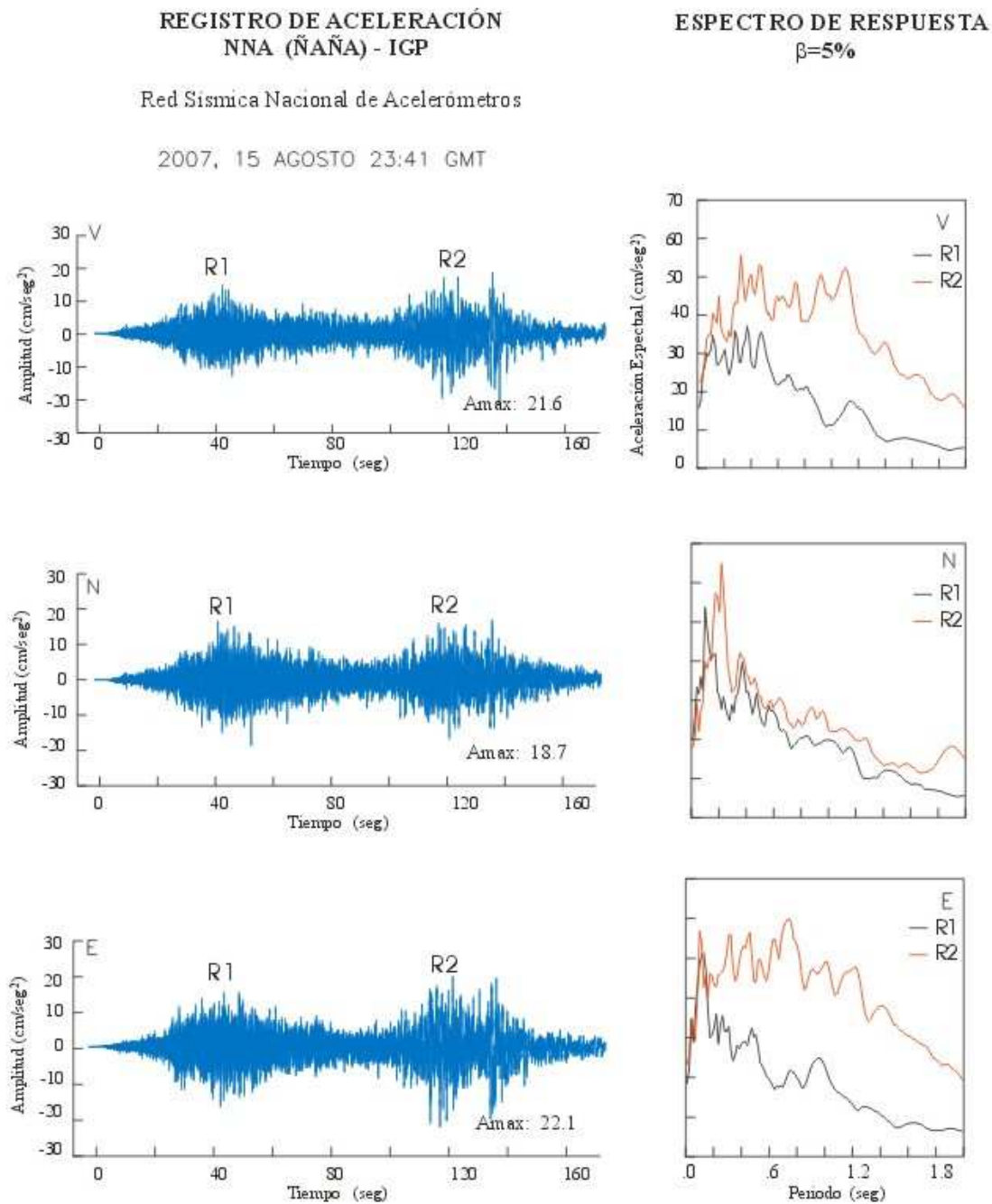


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación NNA ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

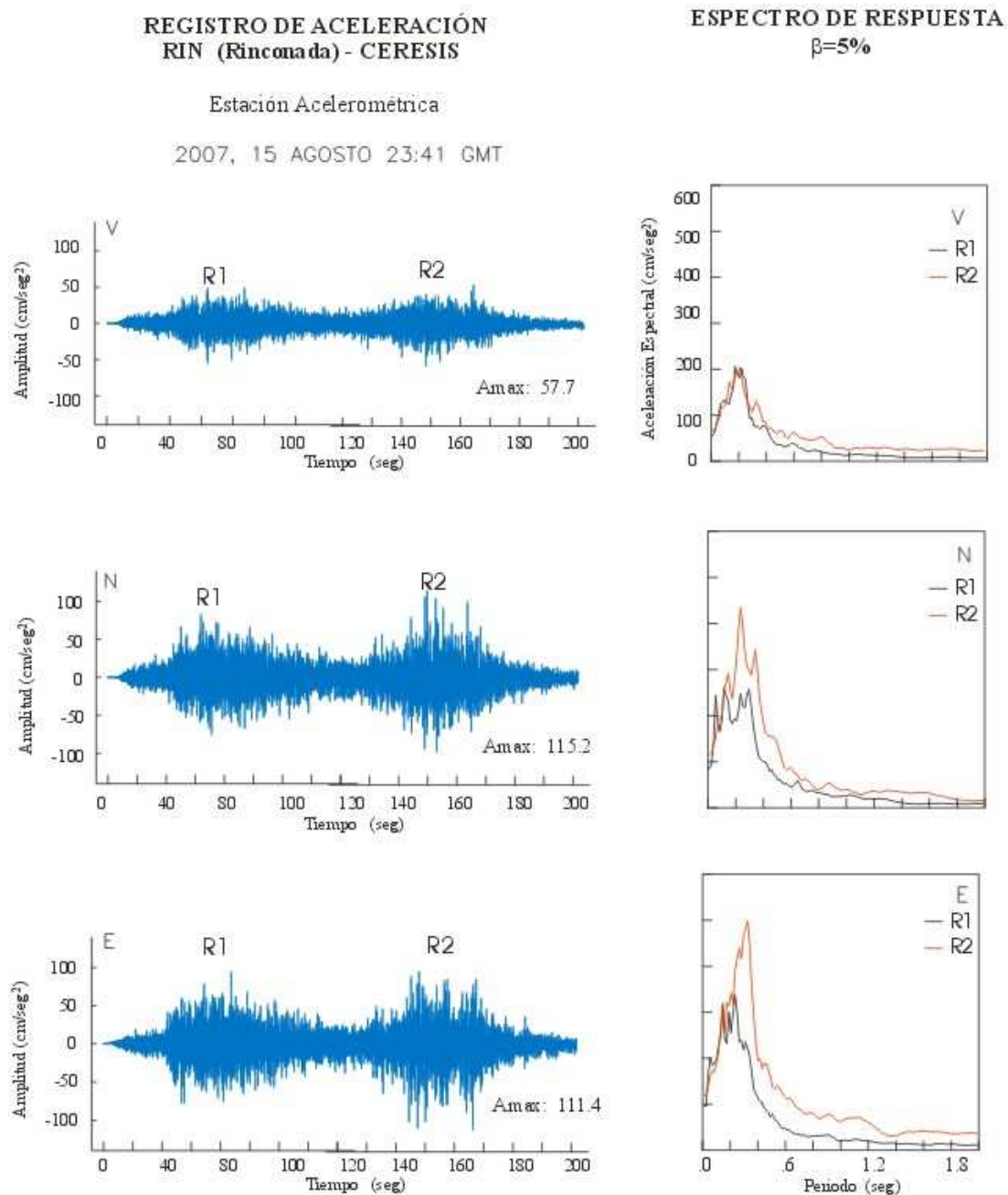


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación RIN ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

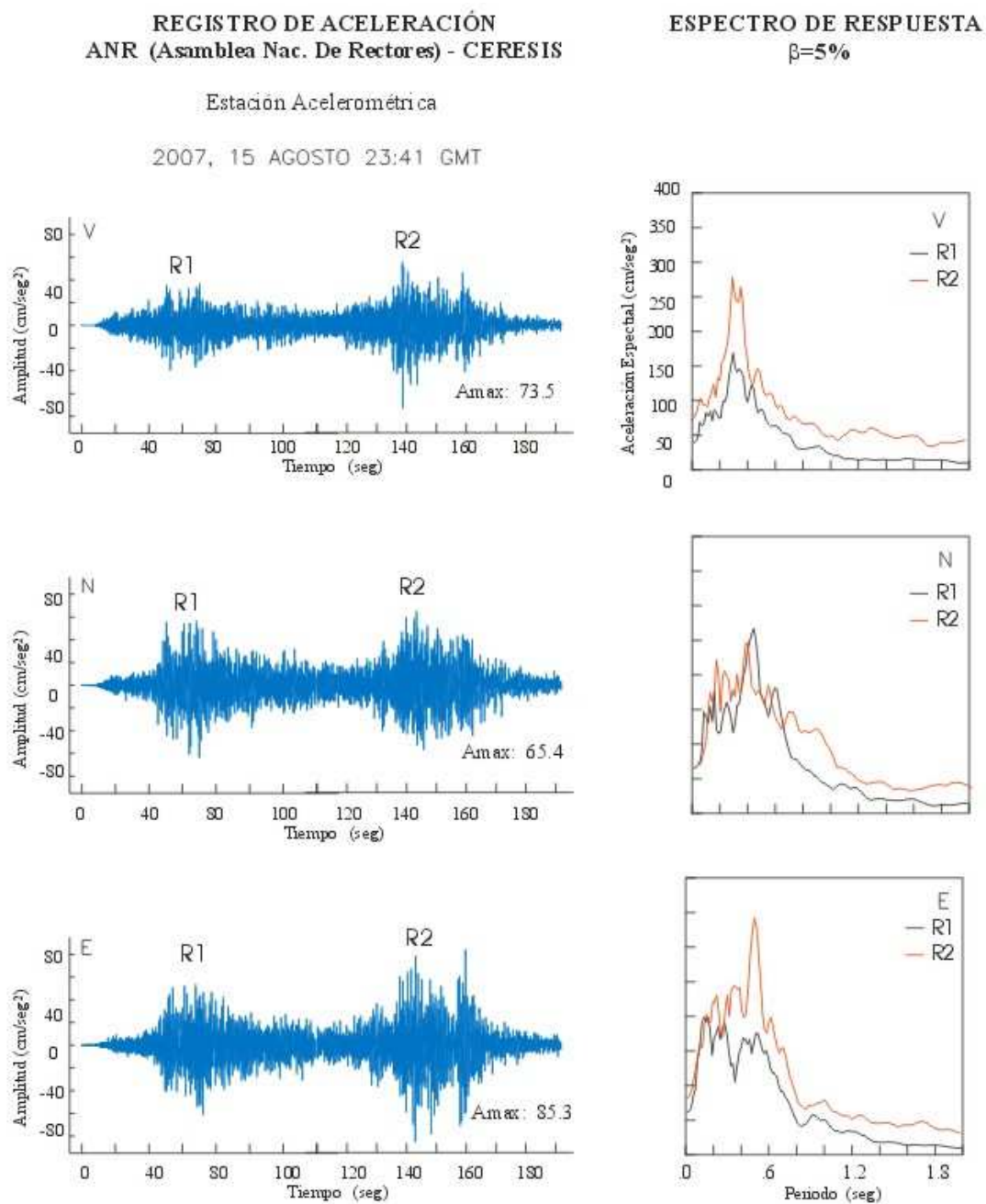


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación ANR ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

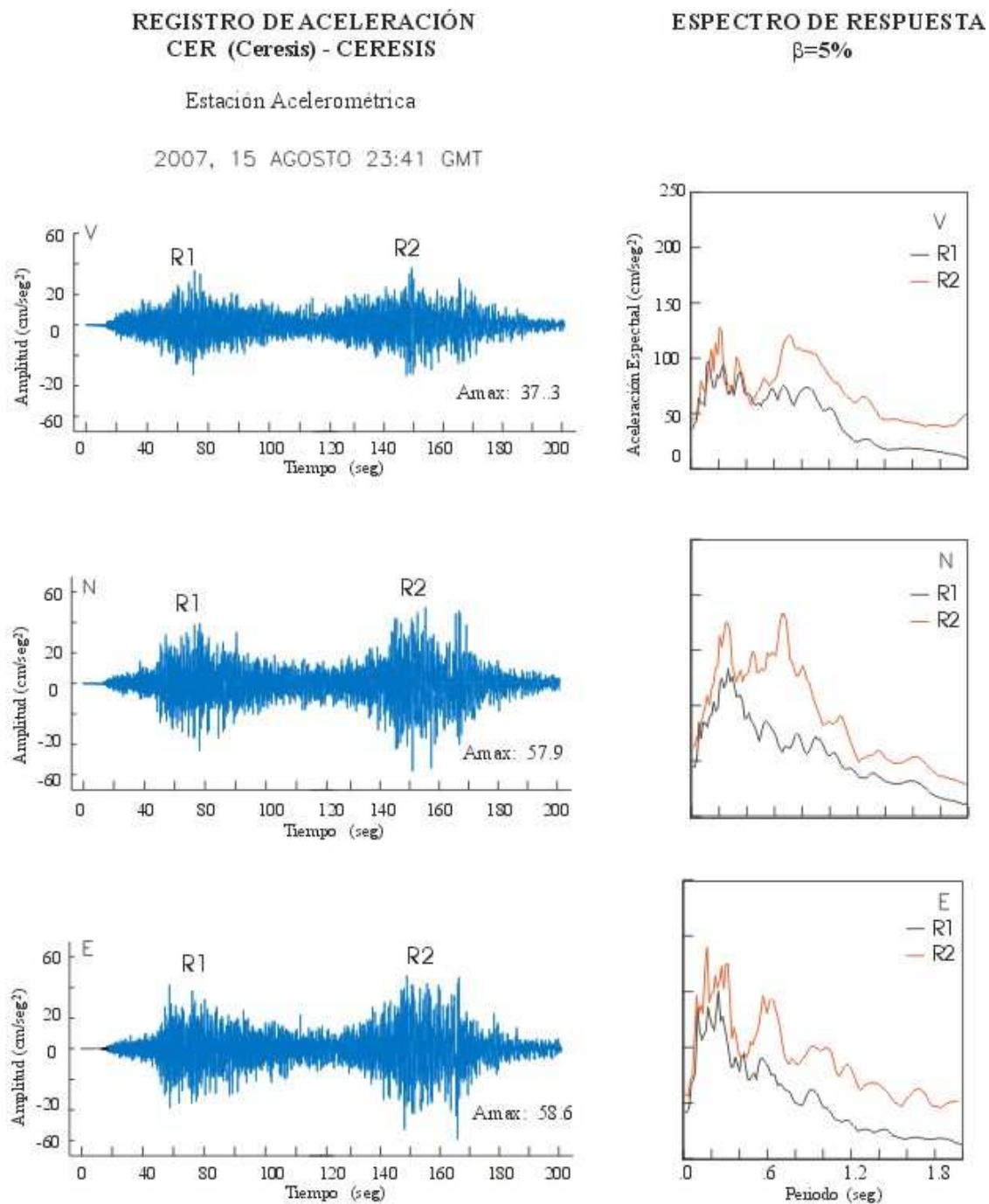


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación CER ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

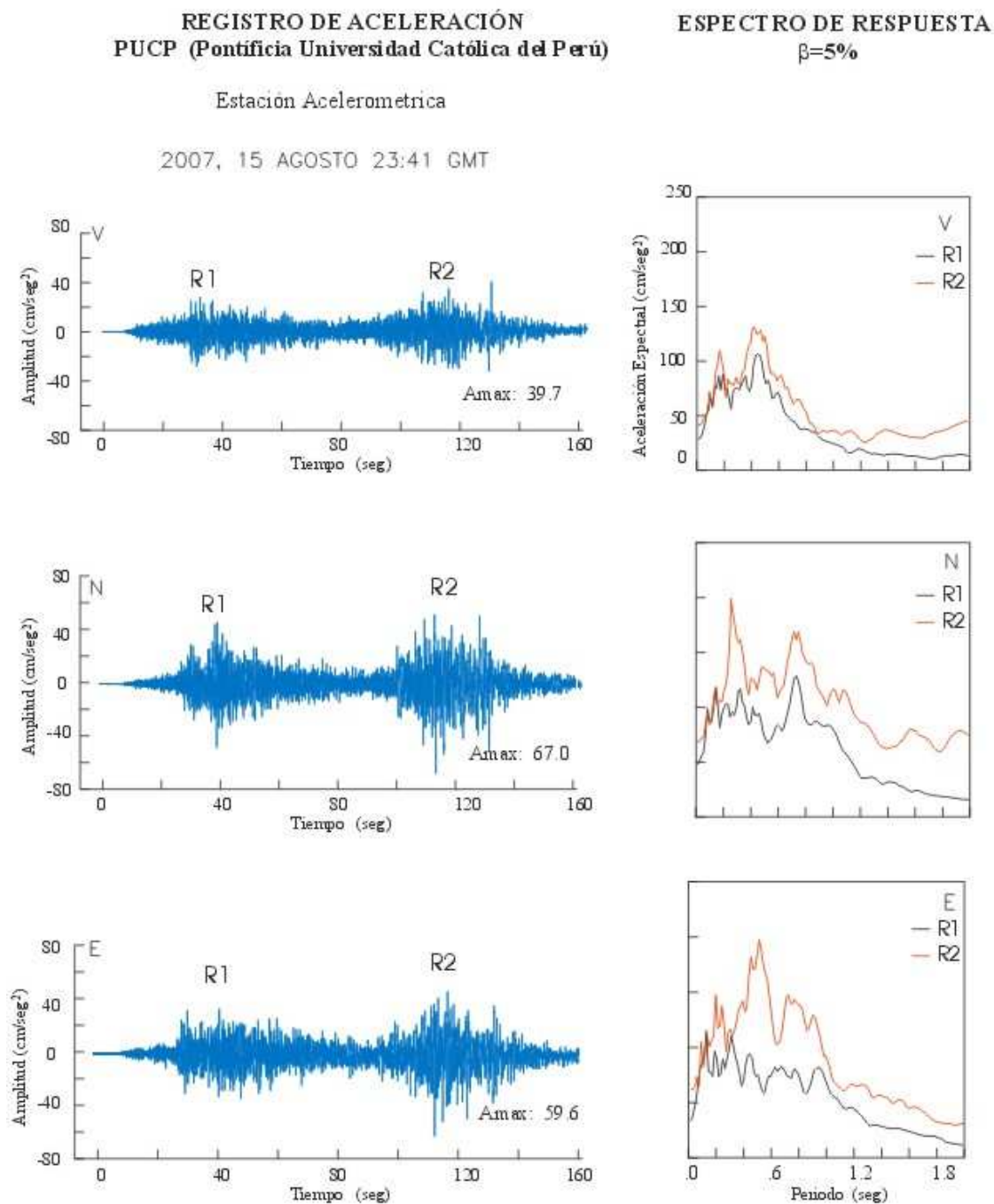


Figura 4. ...Continuación.../ Registro del sismo de Pisco en la estación PUCP ubicada en la ciudad de Lima con sus respectivos espectros de respuesta. Otros ver Figura 3.

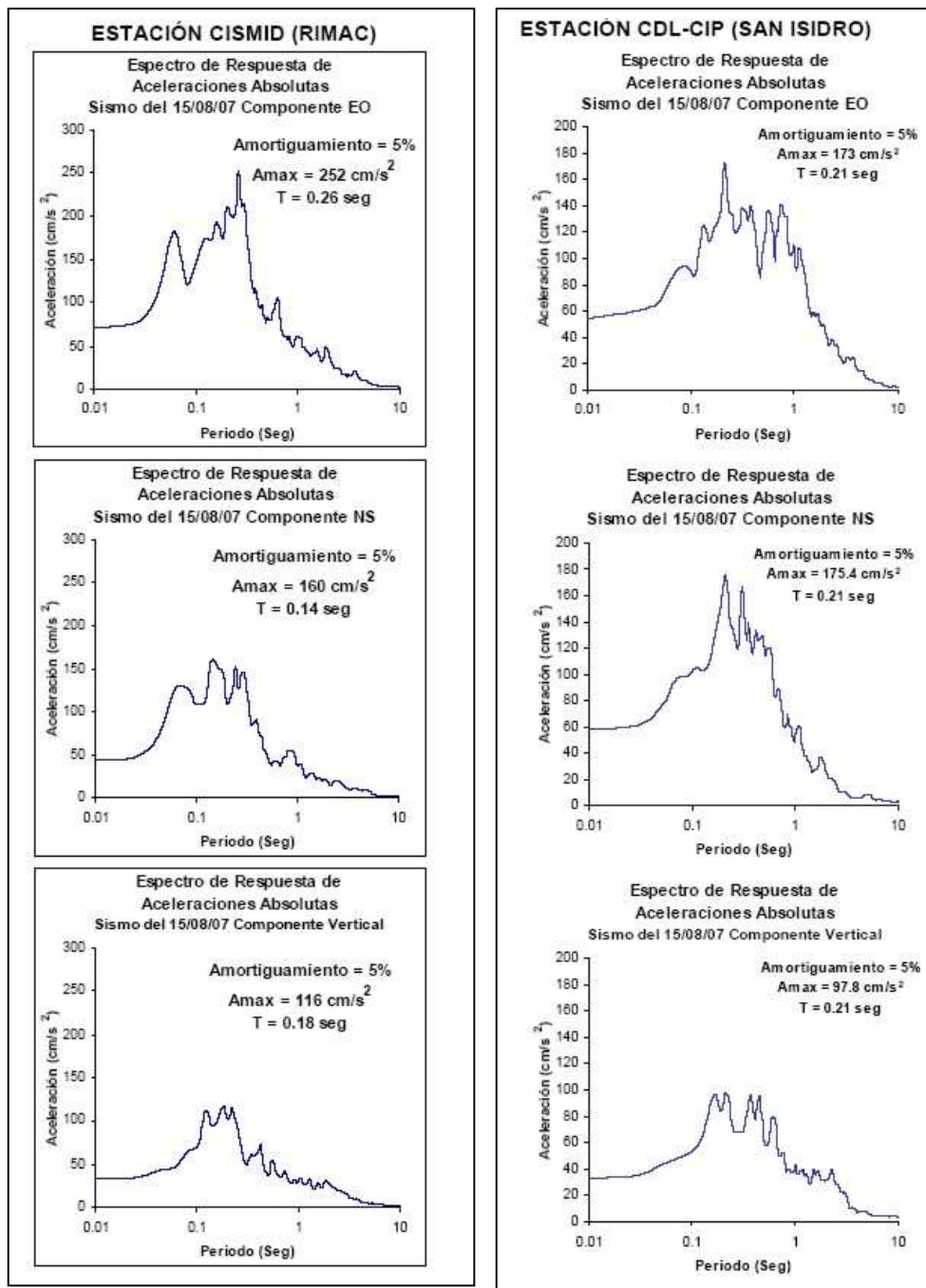


Figura 5. Espectro de respuesta de aceleraciones para las estaciones CISMID y CLD-CIP (CISMID, 2007)

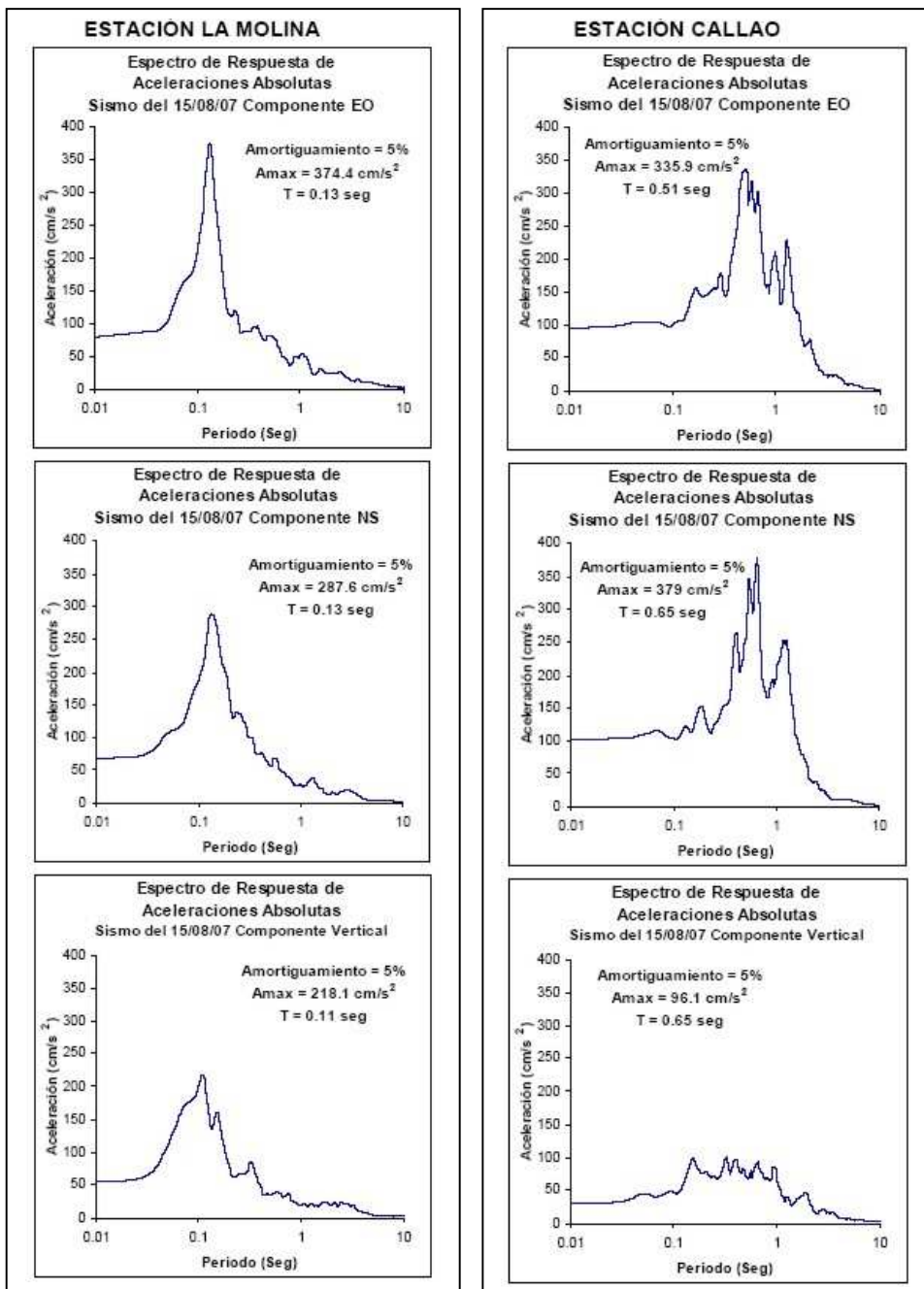


Figura 5. ...Continuación.../ Espectro de respuesta de aceleraciones para las estaciones LA MOLINA y CALLAO (CISMID, 2007).