

# ANALISIS DE TERREMOTOS CHILENOS Y MEJICANOS

Raúl HUSID\*

Roberto GUILOFF\*\*

Saúl ROIZEN\*\*

## RESUMEN

*Se presenta una parte de los resultados obtenidos durante un estudio de acelerogramas de terremotos chilenos y mejicanos, realizado en la sección de Ingeniería Antisísmica del Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile. Se determinaron tiempos de espectro, espectros de respuesta, intensidad espectral de Housner, intensidad de Arias y aceleración cuadrática media en función del tiempo y los correlogramas para todos los acelerogramas considerados.*

*Se comparan algunos de los resultados obtenidos con valores publicados por otros investigadores. Las diferencias encontradas obedecen a que los autores utilizan más valores para el período no amortiguado.*

## INTRODUCCION

Se presenta un resumen de los resultados obtenidos durante una investigación realizada en la Sección Ingeniería Antisísmica del Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile. Se estudiaron seis acelerogramas de terremotos chilenos<sup>1</sup> y ocho acelerogramas de temblores mejicanos<sup>2</sup>.

---

\*Profesor de Dinámica Avanzada y Jefe de la Sección Ingeniería Antisísmica del Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile, Profesor de Ingeniería Antisísmica, Universidad F. Santa María, Valparaíso.

\*\*Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

En la Tabla I se enumeran todos los terremotos que se analizan en este trabajo:

TABLA I

| Nº | Terremoto           | Comp.       | Fecha    | Acelerógrafo | Referencia |
|----|---------------------|-------------|----------|--------------|------------|
| 93 | Santiago            | S 80° W     | 13- 9-45 | U.S.C.G.S.   | 3          |
| 94 | Santiago            | N 10° W     | 13- 9-45 | U.S.C.G.S.   | 3          |
| 95 | Santiago            | S 80° W     | 28- 3-65 | U.S.C.G.S.   | 4          |
| 96 | Santiago            | N 10° W     | 28- 3-65 | U.S.C.G.S.   | 4          |
| 97 | Santiago            | S 80° W     | 26- 9-67 | U.S.C.G.S.   | 4          |
| 98 | Santiago            | N 10° W     | 26- 9-67 | U.S.C.G.S.   | 4          |
| 81 | Torre Lat. Méjico   | N 9° E      | 11- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 82 | Torre Lat. Méjico   | N 81° W     | 11- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 83 | Torre Lat. Méjico   | N 9° E      | 19- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 84 | Torre Lat. Méjico   | N 81° W     | 19- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 85 | Parque Alameda Méj. | N 10° 46' W | 11- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 86 | Parque Alameda Méj. | N 79° 14' E | 11- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 87 | Parque Alameda Méj. | N 10° 46' W | 19- 5-62 | SMAC         | 5          |
| 88 | Parque Alameda Méj. | N 79° 14' E | 19- 5-62 | SMAC         | 5          |

La numeración de los terremotos corresponde a la empleada en la investigación completa sobre el tema, que realizaron los autores del presente trabajo y los ingenieros Alejandro Santolaya, Nagly Gómez, Hernán Medina y Jorge Ríos, y cuyos resultados serán objeto de un volumen especial.

A continuación se presentan los resultados para los terremotos chilenos y los mejicanos (separadamente) en forma análoga a lo descrito por Husid<sup>3</sup>.

### TERREMOTOS CHILENOS

A través de toda su historia, Chile se ha caracterizado por ser un país altamente sísmico, hecho que puede comprobarse hojeando la Historia de la Sismología de Chile, de Federico Greve. A pesar de ello, se han instalado muy pocos instrumentos sísmicos a lo largo del país y, por razones fortuitas, incluso éstos no han registrado los sismos más importantes de este siglo, como, por ejemplo, los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960.

A partir de 1968 se inició la construcción de acelerógrafos en el Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile, con el propósito de contar con una red de instrumentos que permita obtener registros en cualquier terremoto grande futuro. Hasta el momento, ninguno de los acelerógrafos ya instalados ha proporcionado registro alguno.

Los pocos acelerogramas de terremotos chilenos han sido registrados por el acelerógrafo que el U.S.C.G.S. posee en el subterráneo del laboratorio de Física de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile. Lo señalado

anteriormente muestra que se disponen de pocos antecedentes para estudiar las características de terremotos chilenos, de interés para el ingeniero.

### Tiempos de espectro

La determinación de los tiempos de espectro se efectuó para los distintos grados de amortiguamiento considerados y las conclusiones obtenidas son totalmente análogas a aquellas encontradas por Husid<sup>3,4</sup> En las Figs. 1 a 6, se presentan los tiempos de espectro de desplazamiento relativo, velocidad relativa y aceleración absoluta, correspondientes a  $c = 0.05 c_c$ , para los seis acelerogramas en estudio.

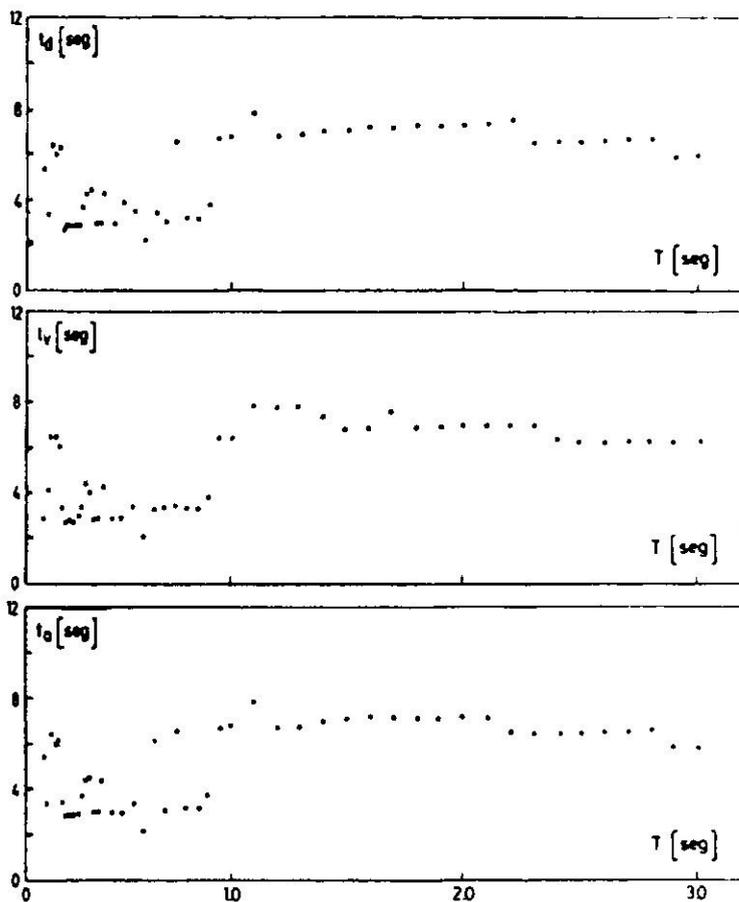


Fig. 1. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 13 de septiembre de 1945. Componente N 10 W.

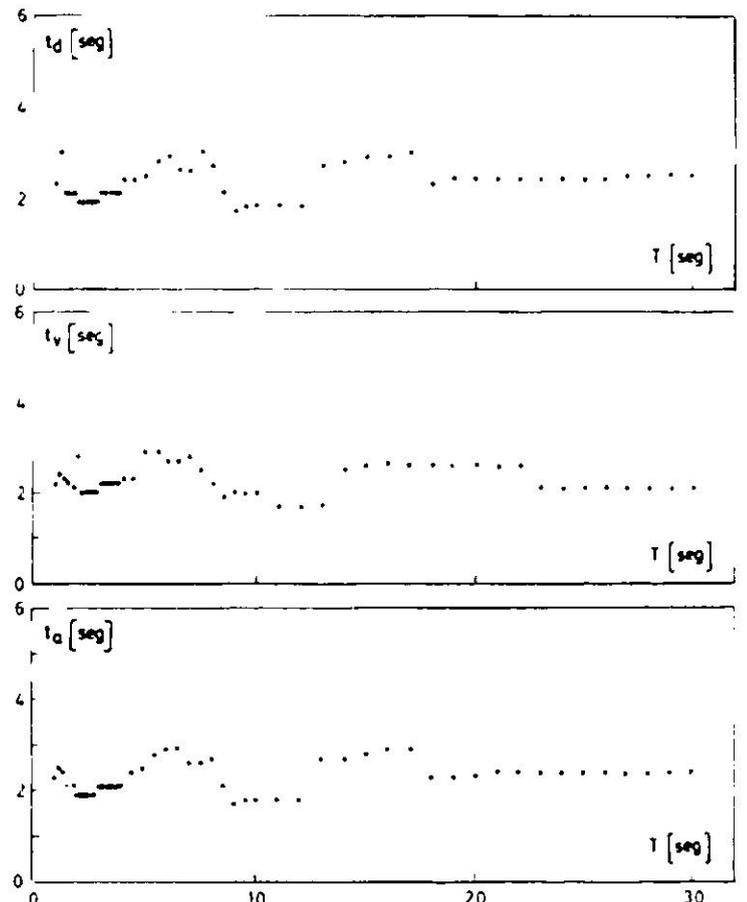


Fig. 2. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 13 de septiembre de 1945. Componente S 80 W.

En un trabajo reciente<sup>5</sup> se analizó la respuesta dinámica de estructuras de un grado de libertad para las dos componentes horizontales del terremoto de Santiago, de marzo de 1965, considerando una duración de 14 segundos. El cálculo de las respuestas se hizo considerando un 5% del amortiguamiento crítico.

Ahora bien, si se observan los gráficos que muestran los tiempos de espectro para  $c = 0.05 c_c$ , correspondientes al terremoto antes mencionado, se puede apreciar el peligro que existe al elegir una duración de 14 segundos para el acelerograma, cuando se quiere determinar las respuestas máximas para diversos períodos.

### Espectros de respuesta

Los espectros de desplazamiento relativo, pseudo-velocidad, velocidad rela-

tiva y aceleración absoluta fueron calculados exactamente para todos los terremotos considerados en este estudio. Los procedimientos utilizados aparecen descritos por Husid<sup>3</sup>.

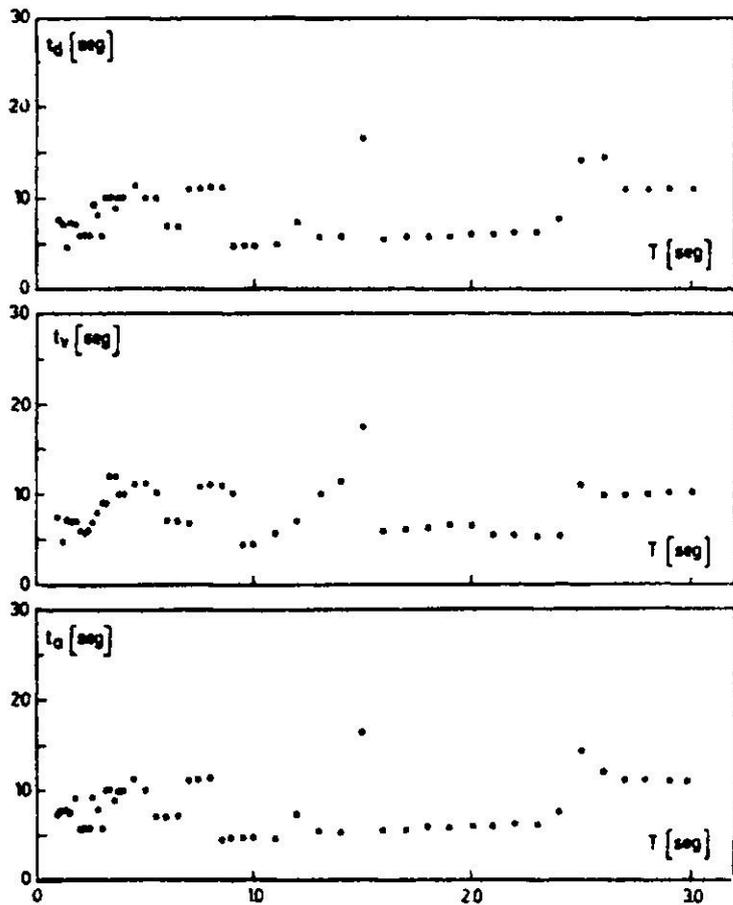


Fig. 3. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 28 de marzo de 1965. Componente N 10 W.

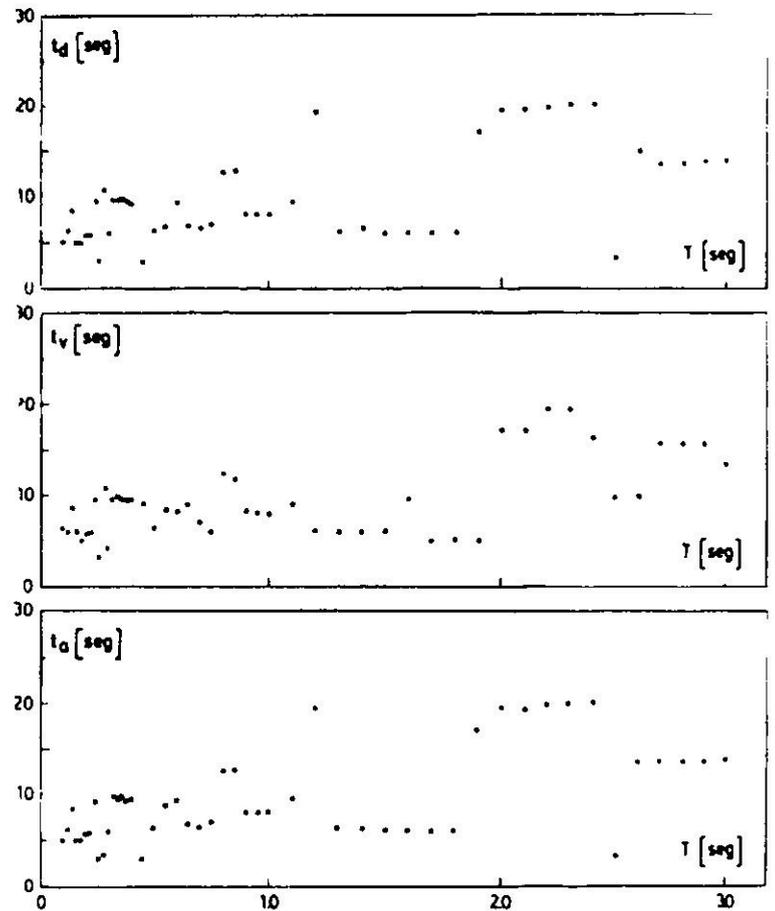


Fig. 4. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 28 de marzo de 1965. Componente S 80 W.

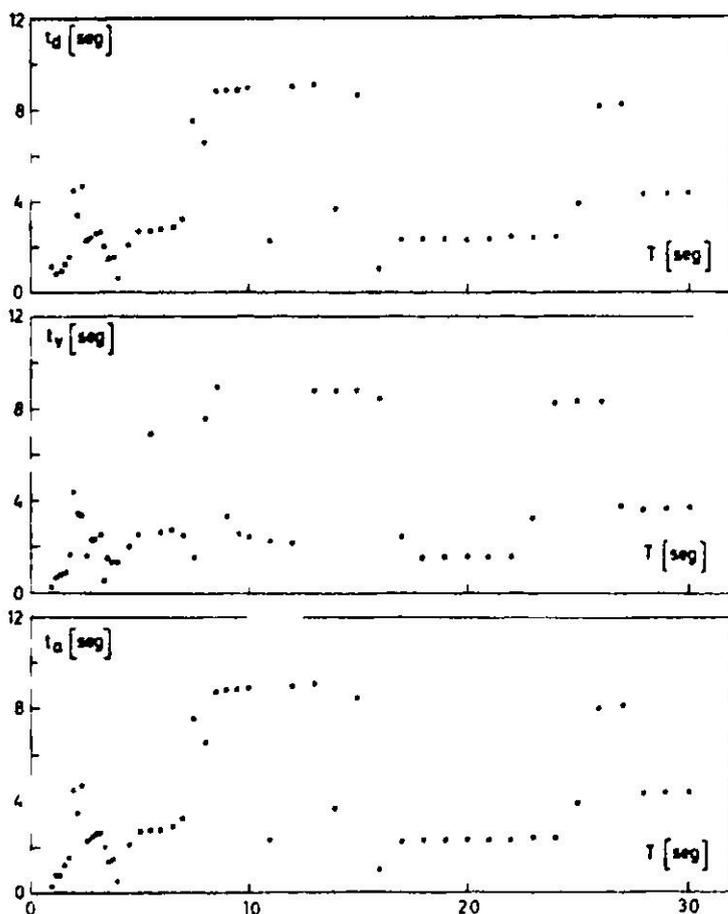


Fig. 5. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente N 10 W.

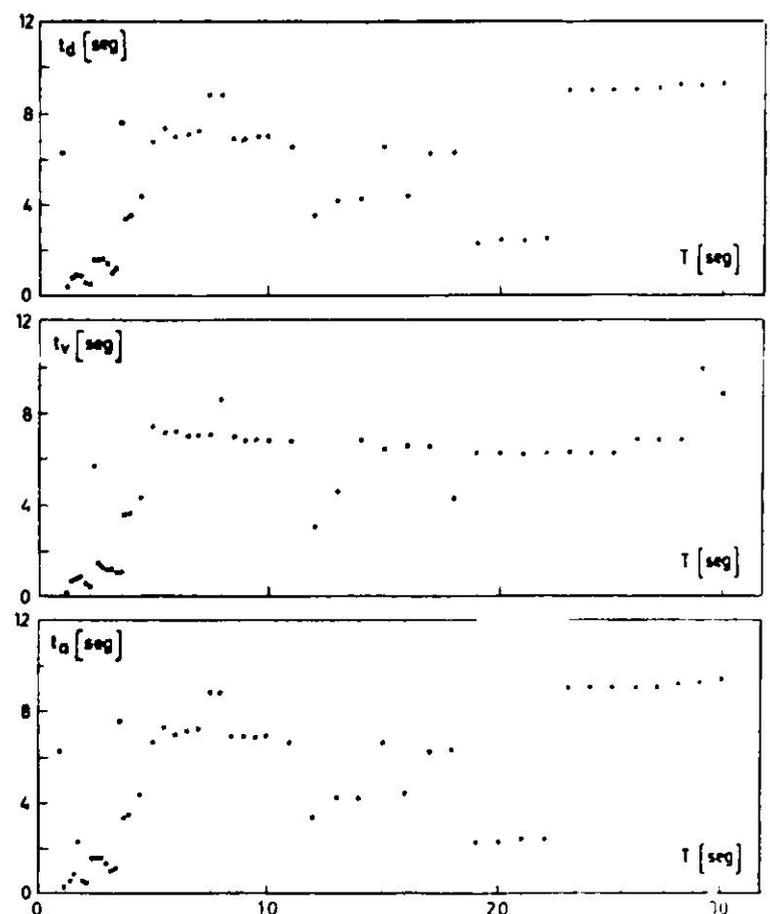


Fig. 6. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente S 80 W.

Considerando que los acelerogramas de terremotos chilenos analizados son los mismos que utilizó Saragoni<sup>6</sup> en un trabajo reciente y tomando en cuenta que él calculó los espectros de aceleraciones absolutas, se ha omitido presentar dichos espectros aun cuando fueron calculados.

### *Intensidad espectral de Housner*

Por las razones señaladas por Husid<sup>3,4</sup> y con el propósito de realizar un primer análisis de la severidad de los terremotos chilenos estudiados, se procedió a calcular la intensidad de Housner para diferentes grados de amortiguamiento. Los resultados encontrados se presentan en la Tabla II, donde además se indica la duración ( $t_f$ ) correspondiente del acelerograma analizado. En ésta puede apreciarse la influencia que tiene el grado de amortiguamiento en la intensidad de Housner, para un acelerograma dado.

TABLA II  
INTENSIDAD ESPECTRAL DE HOUSNER

| Terremoto<br>nº | $t_f$<br>(seg) | $I_H$ (pies)           |                        |                        |                        |                        |
|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                 |                | $\frac{c}{c_c} = 0,00$ | $\frac{c}{c_c} = 0,02$ | $\frac{c}{c_c} = 0,05$ | $\frac{c}{c_c} = 0,10$ | $\frac{c}{c_c} = 0,20$ |
| 93              | 13.8           | 1.45                   | 1.10                   | 0.94                   | 0.80                   | 0.61                   |
| 94              | 11.6           | 1.00                   | 0.73                   | 0.60                   | 0.48                   | 0.36                   |
| 95              | 20.5           | 1.43                   | 0.84                   | 0.62                   | 0.46                   | 0.32                   |
| 96              | 20.0           | 1.89                   | 1.21                   | 0.94                   | 0.75                   | 0.55                   |
| 97              | 9.0            | 0.16                   | 0.11                   | 0.08                   | 0.07                   | 0.05                   |
| 98              | 9.0            | 0.20                   | 0.14                   | 0.11                   | 0.10                   | 0.08                   |

No es posible realizar comparaciones entre los valores de la intensidad de Housner que aquí se presentan con otros de la literatura técnica, dado que esta es la primera vez que se publica la información recién mencionada.

### *Intensidad de Arias y aceleración cuadrática media*

Para cada uno de los terremotos se calculó tanto la intensidad de Arias como la aceleración cuadrática media, ambas, en función del tiempo. Los resultados obtenidos se presentan en las Figs. 7 a 12 y en ellas se puede apreciar que, salvo el terremoto 93, los restantes fueron digitalizados para duraciones menores que las necesarias<sup>3</sup>. De esta forma, si se ubicasen los acelerogramas originales y se digitalizaran para una duración mayor, seguramente se obtendrían espectros de respuesta substancialmente diferentes, sobre todo para amortiguamientos pequeños.

### *Correlogramas*

En vista de que todos los registros de los terremotos chilenos obtenidos hasta

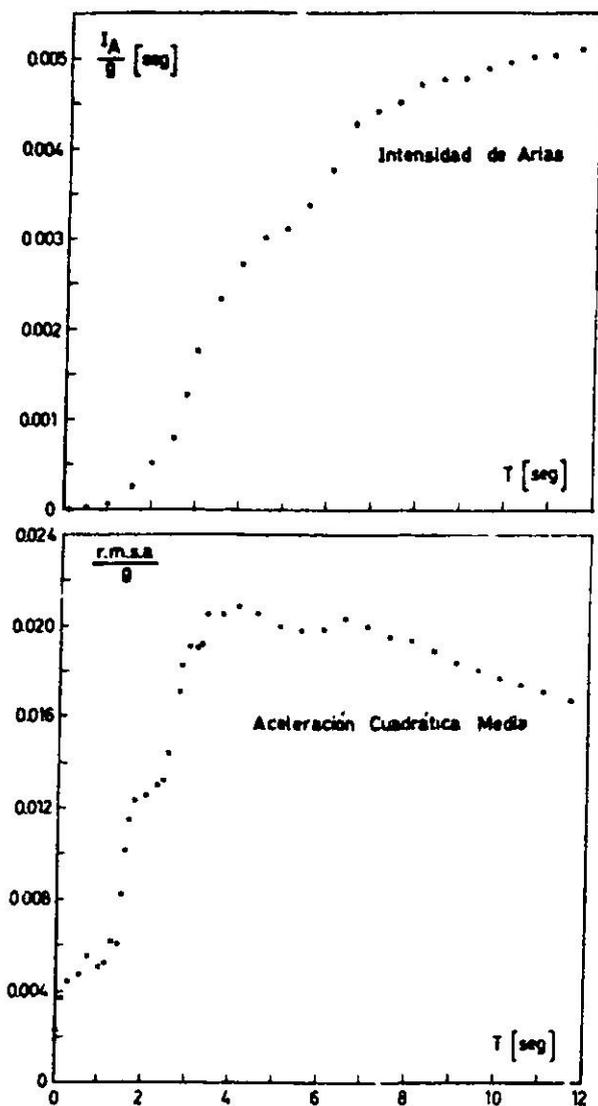


Fig. 7. Terremoto de Santiago, 13 de septiembre de 1945. Componente N 10 W.

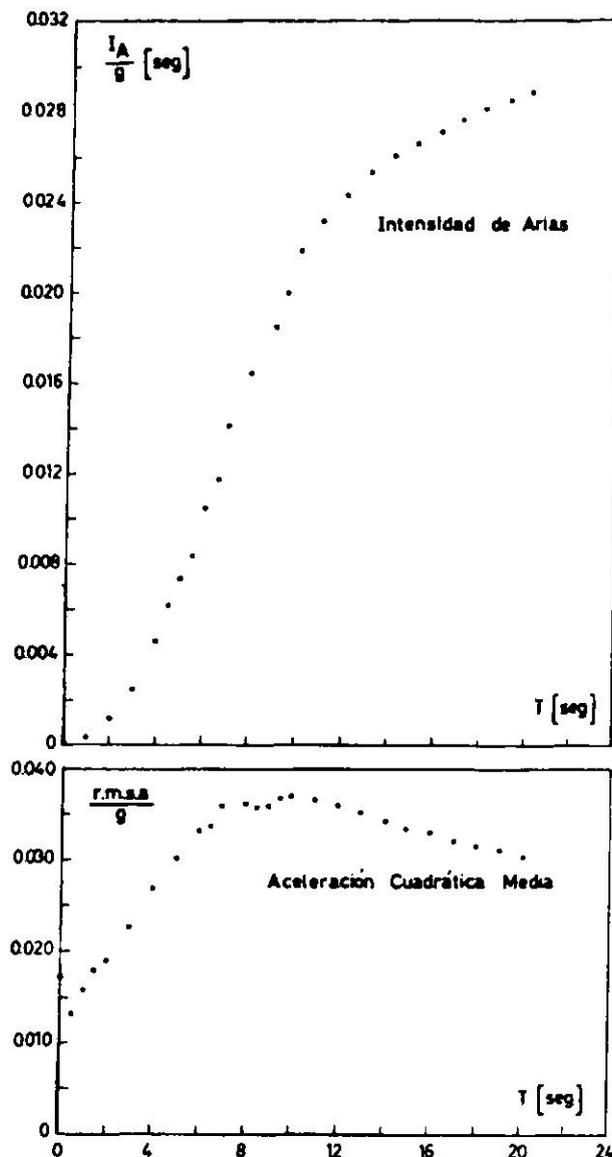


Fig. 9. Terremoto de Santiago, 28 de marzo de 1965. Componente N 10 W.

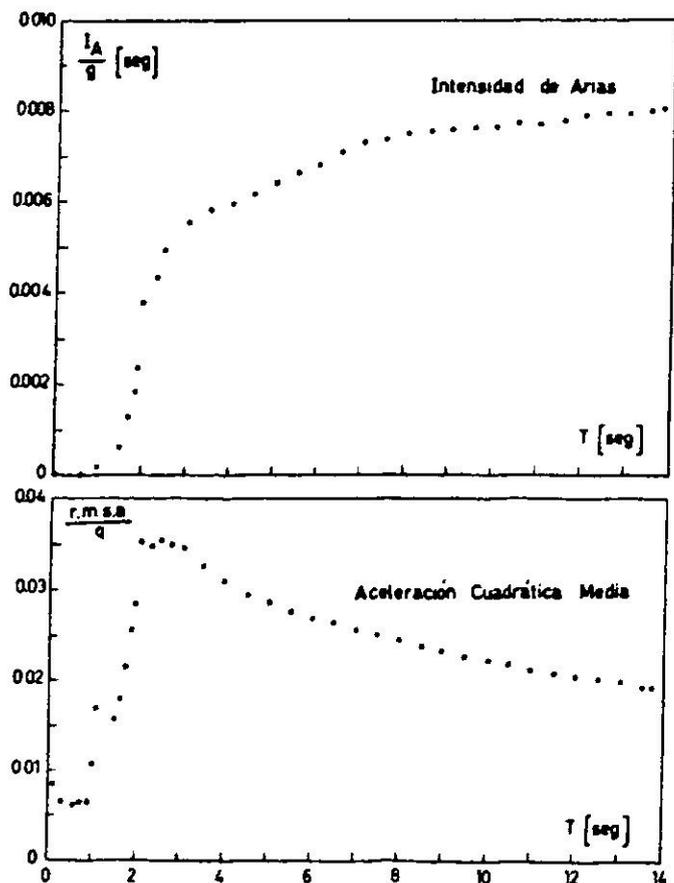


Fig. 8. Terremoto de Santiago, 13 de septiembre de 1945. Componente S 80 W.

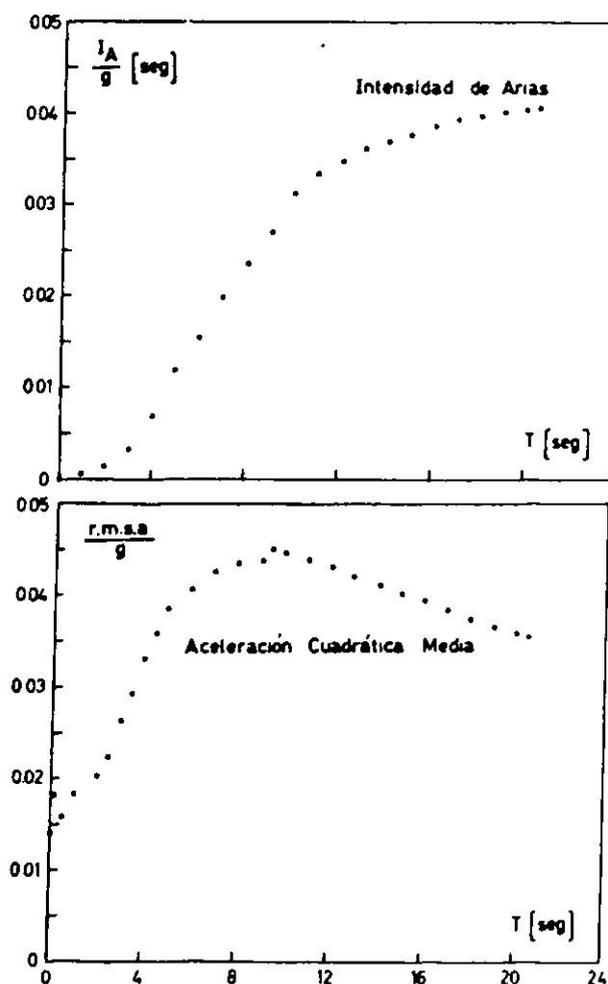


Fig. 10. Terremoto de Santiago, 28 de marzo de 1965. Componente S 80 W.

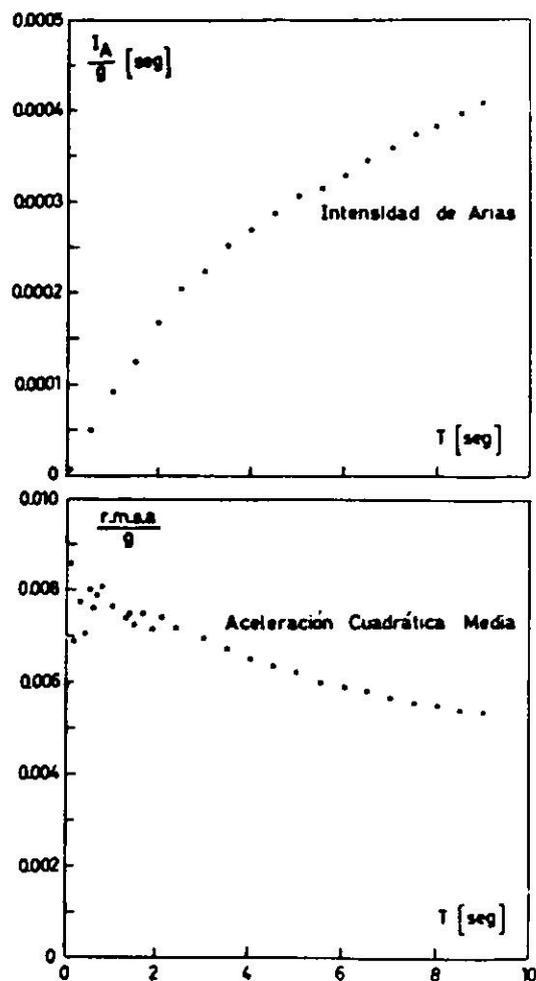


Fig. 11. Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente N 10 W.

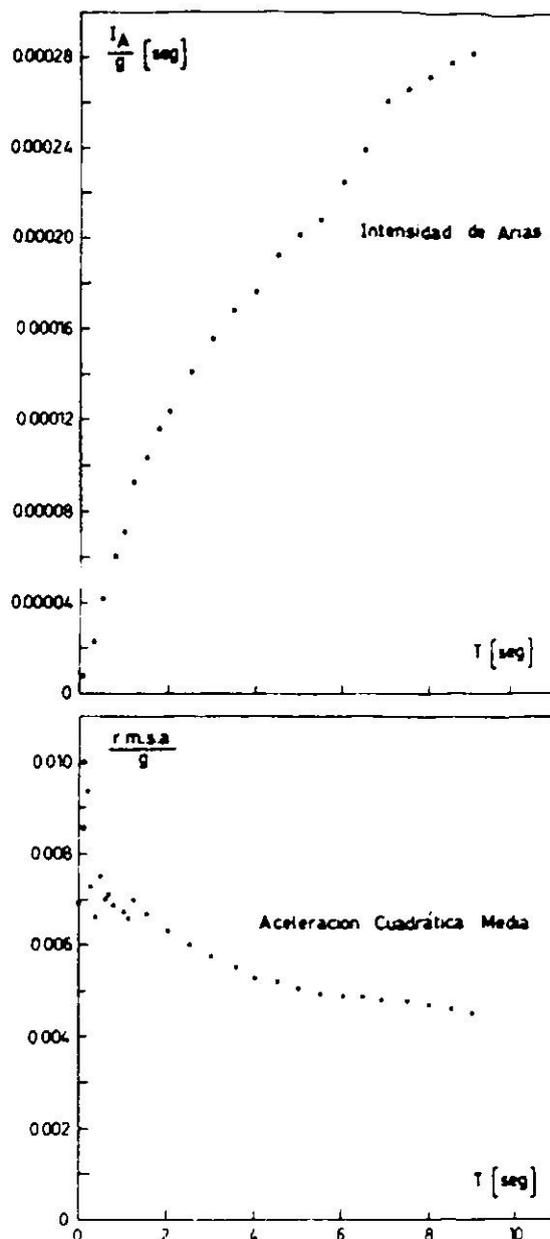


Fig. 12. Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente S 80 W

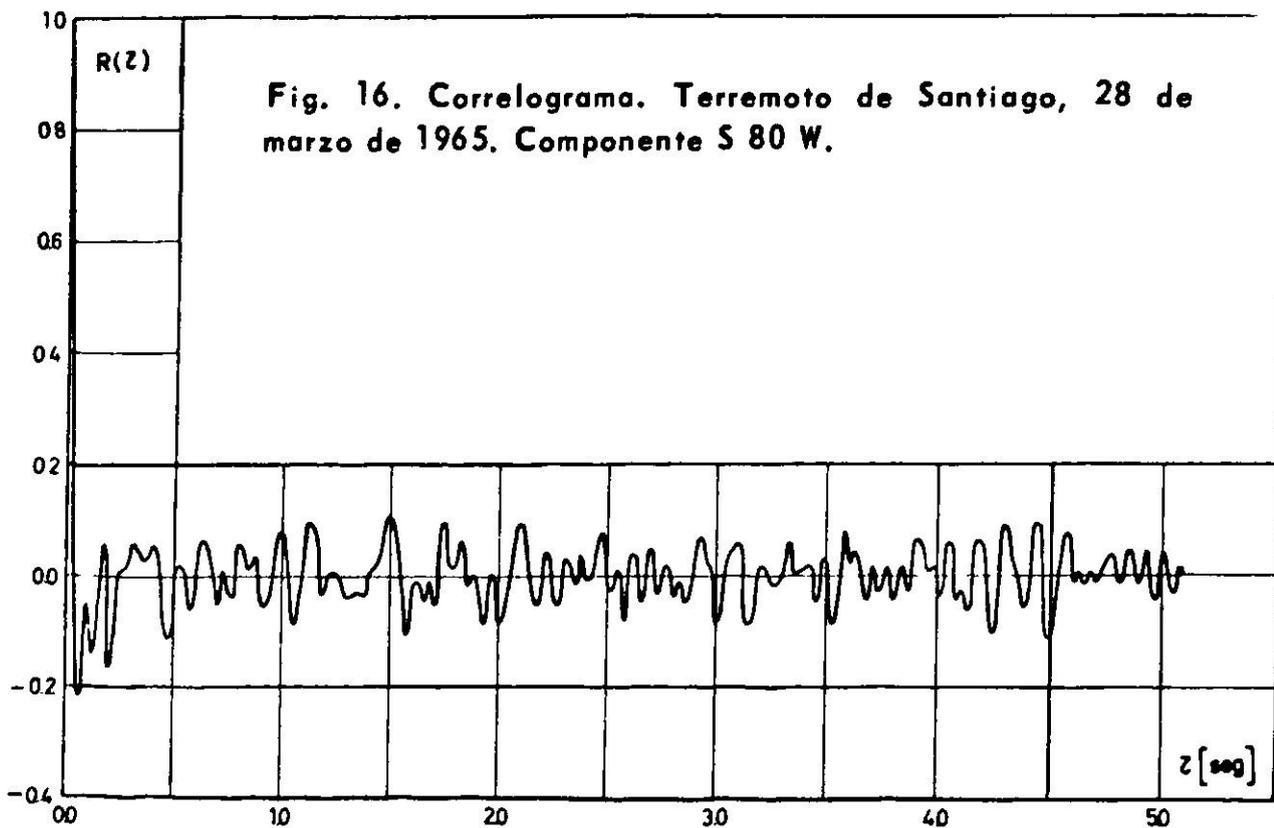
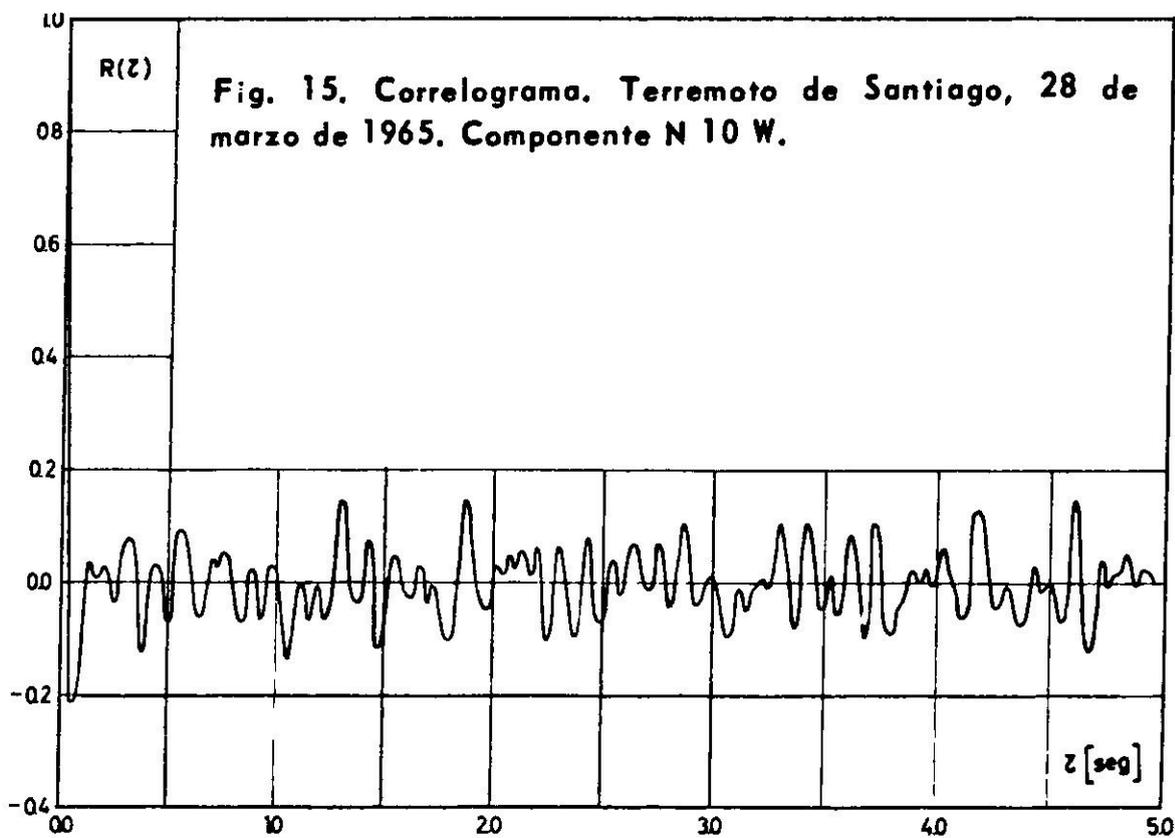
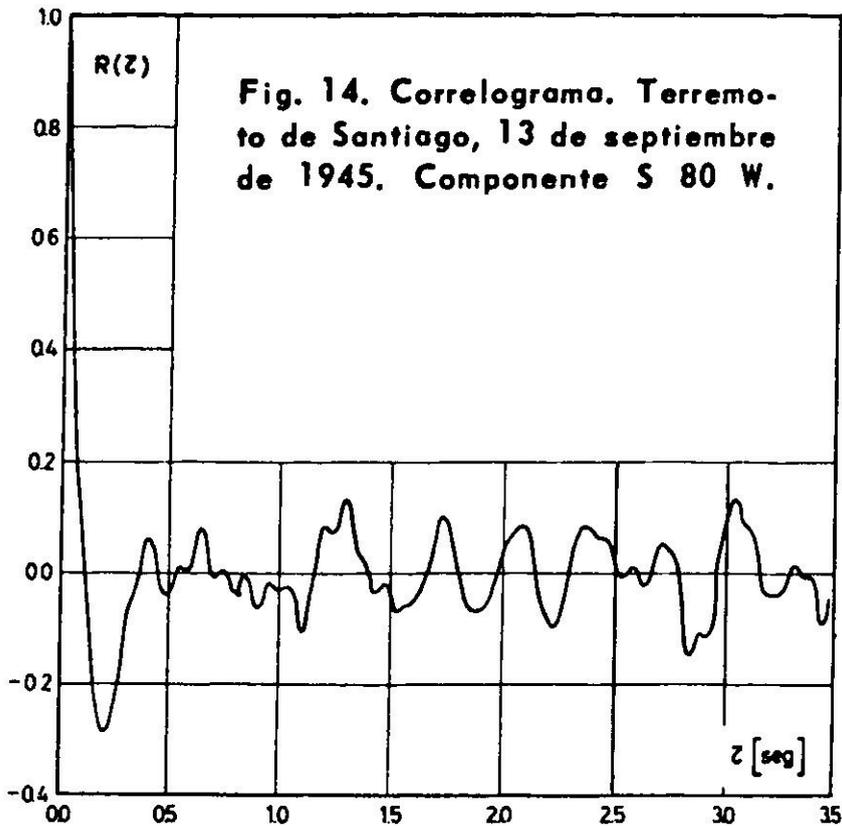
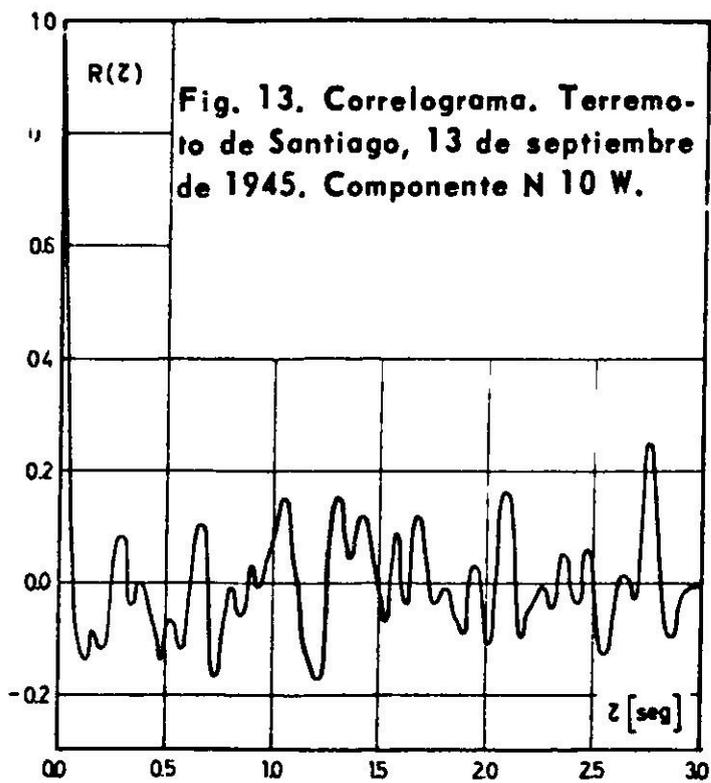
la fecha no pudieron ser digitalizados por los autores de este trabajo, los correlogramas fueron calculados para las duraciones escogidas por Lepe y Torres<sup>7</sup> y Saragoni<sup>6</sup>. Los resultados correspondientes se muestran en las Figs. 13 a 18.

De los correlogramas que se muestran en las figuras recién mencionadas, dos de ellos habían sido calculados, anteriormente, por Arias y Petit-Laurent<sup>8</sup>. La comprobación de los resultados es satisfactoria. Nuevamente se encuentra que los terremotos chilenos poseen componentes aleatorias importantes.

## TERREMOTOS MEXICANOS

Los terremotos del 11 y 19 de mayo de 1962, de magnitud 7.0 de la escala de Richter se sintieron fuertemente en Ciudad de Méjico donde fueron registrados por dos acelerógrafos del tipo SMAC, uno ubicado en la base de la Torre Latinoamericana y el otro en el Parque Alameda.

Los acelerogramas analizados en el presente trabajo corresponden a los



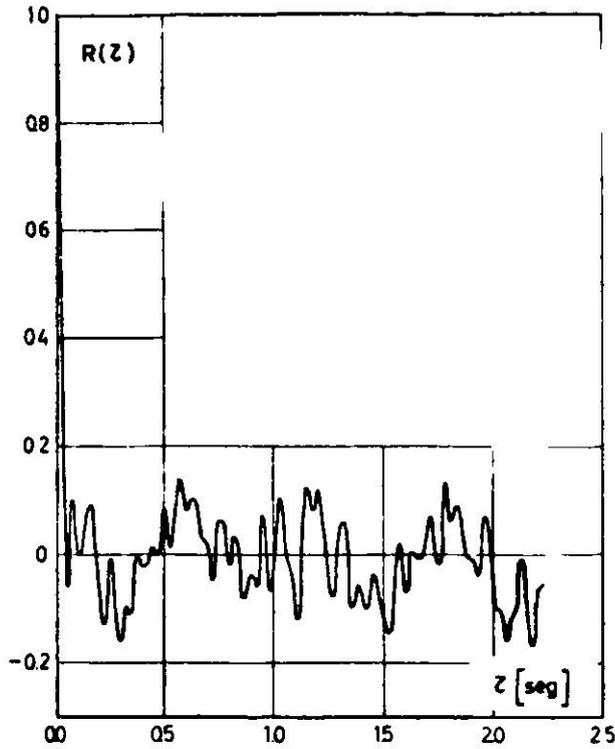


Fig. 17. Correlograma. Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente N 10 W.

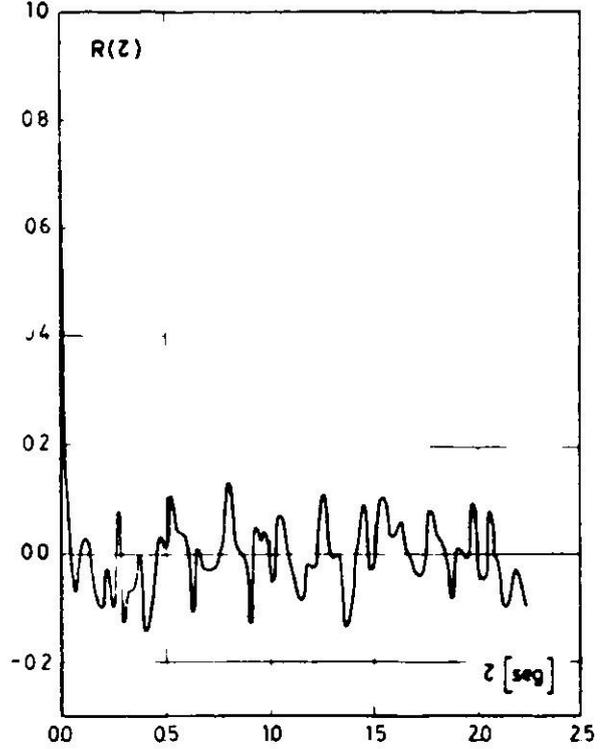


Fig. 18. Correlograma. Terremoto de Santiago, 26 de septiembre de 1967. Componente S 80 W.

designados con los números 81 al 88 de la Tabla I, y fueron digitalizados por L. Zeevaert a intervalos iguales de 0.1 segundos, con una duración total de 60 segundos. Las ordenadas de los acelerogramas recién mencionados aparecen publicados en el apéndice de un trabajo de Jennings<sup>9</sup>, y fueron perforadas en tarjetas IBM por los autores.

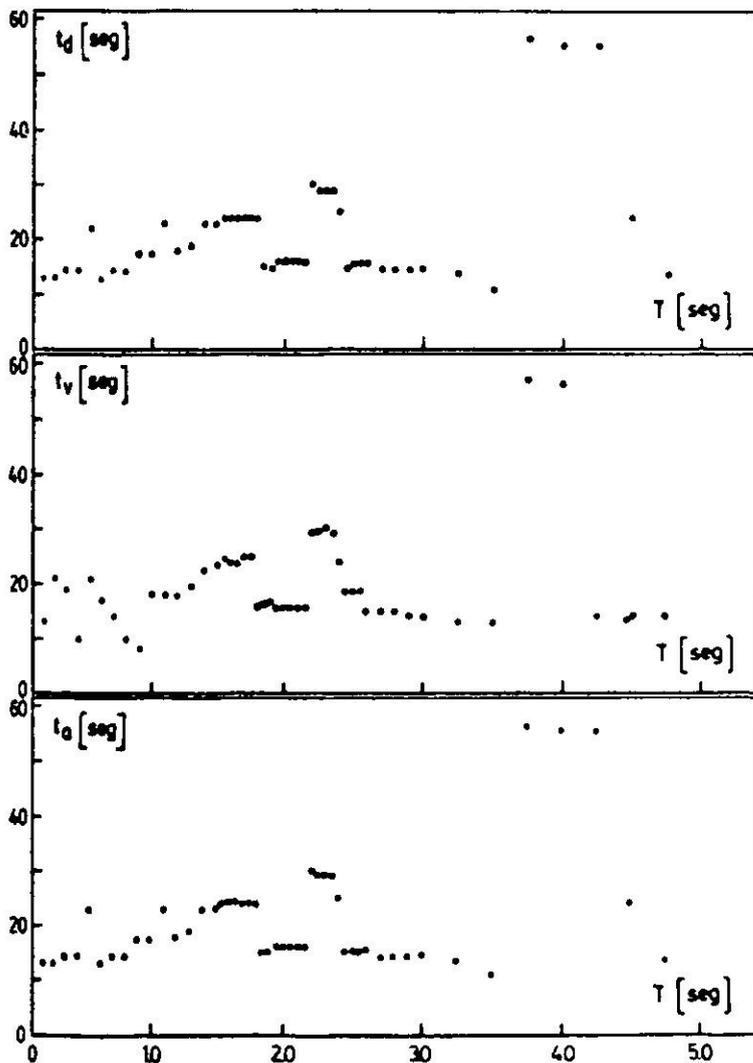


Fig. 19. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

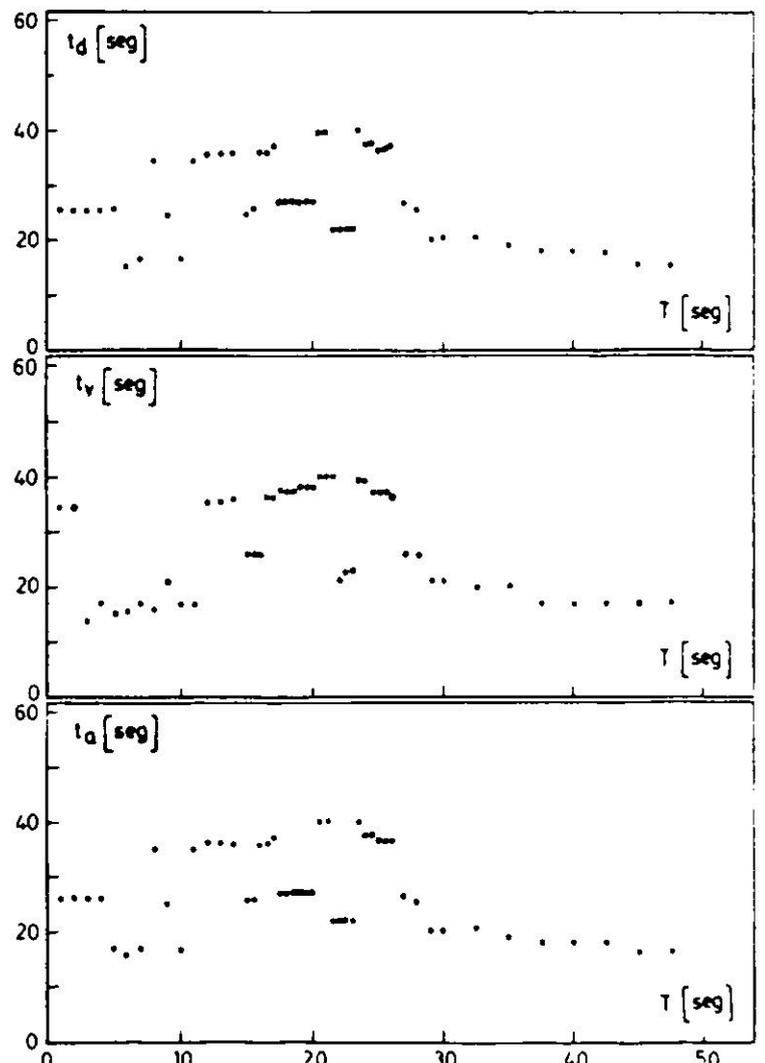


Fig. 20. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 81 W.

### Tiempos de espectro

Los tiempos de espectro fueron calculados para 5 valores del grado de amortiguamiento y para un mínimo de 48 valores del período no amortiguado, comprendidos entre 0.10 y 4.75 segundos.

En las Figs. 19 a 26 se presentan los tiempos de espectro para  $c = 0.05 c_c$ . En ellas se puede apreciar que los valores de los tiempos de espectro son bastante altos a pesar del valor elegido para el grado de amortiguamiento. Se hace notar que una reducción en la duración del registro puede conducir a resultados poco exactos en los espectros de respuesta.

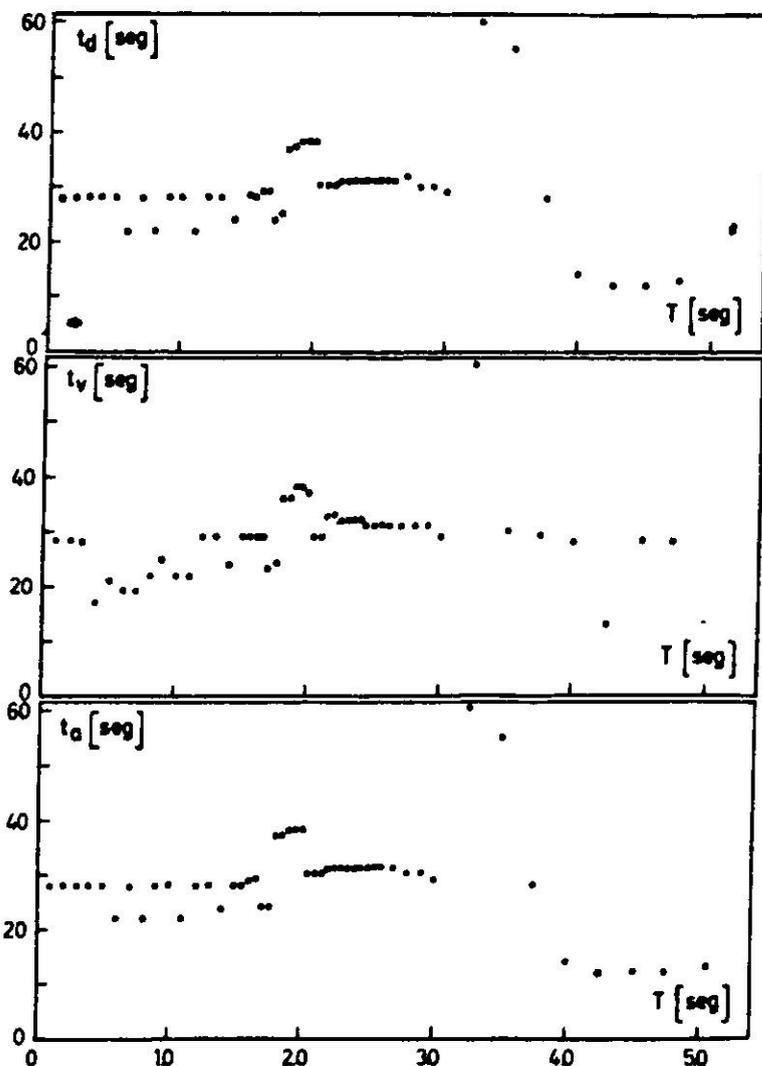


Fig. 21. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Torre Latinoamericana, 19 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

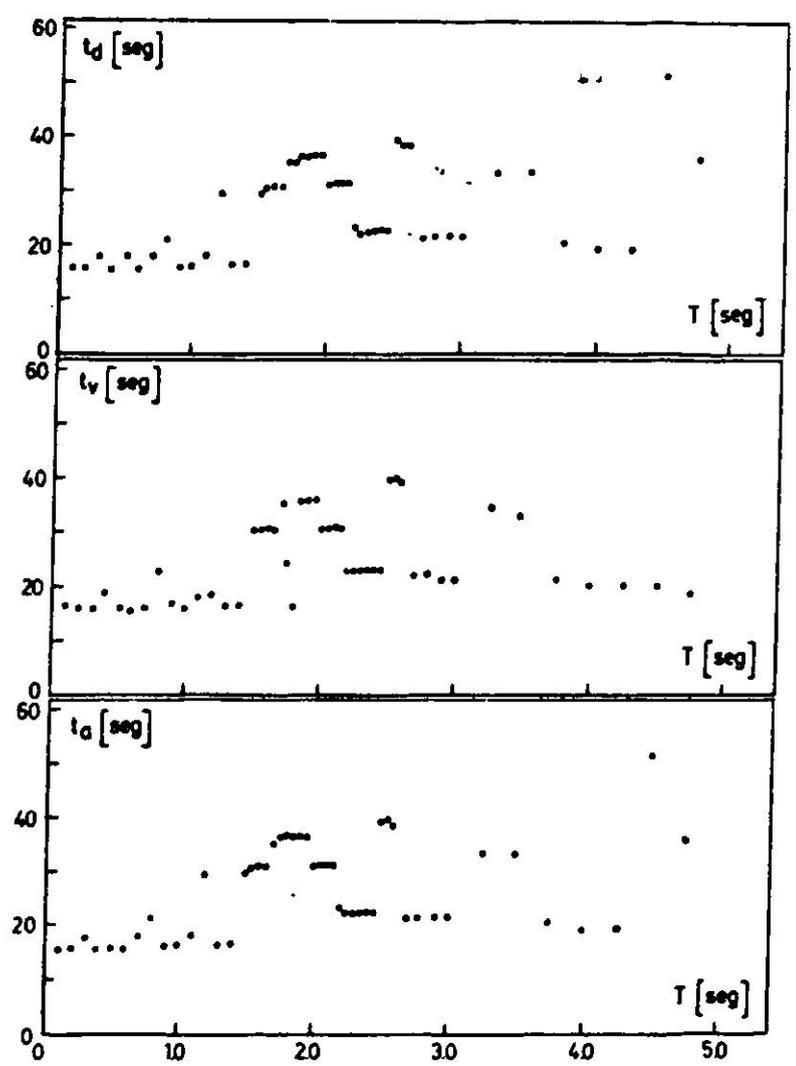


Fig. 22. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Torre Latinoamericana, 19 de mayo de 1962. Componente N 81 W.

### Espectros de respuesta

En las Figs. 27 a 34 se presentan los espectros de velocidad relativa para cada uno de los terremotos mejicanos mencionados más arriba. Para todos estos espectros se efectuó una comparación con los que aparecen en el trabajo de Jennings<sup>9</sup>.

Se hace notar que en la publicación recién mencionada solamente se presentan los espectros de velocidad relativa y que cada gráfico se construyó calculando las ordenadas para 40 valores del período no amortiguado. Los autores utilizaron 48 valores para el período, cuando menos.

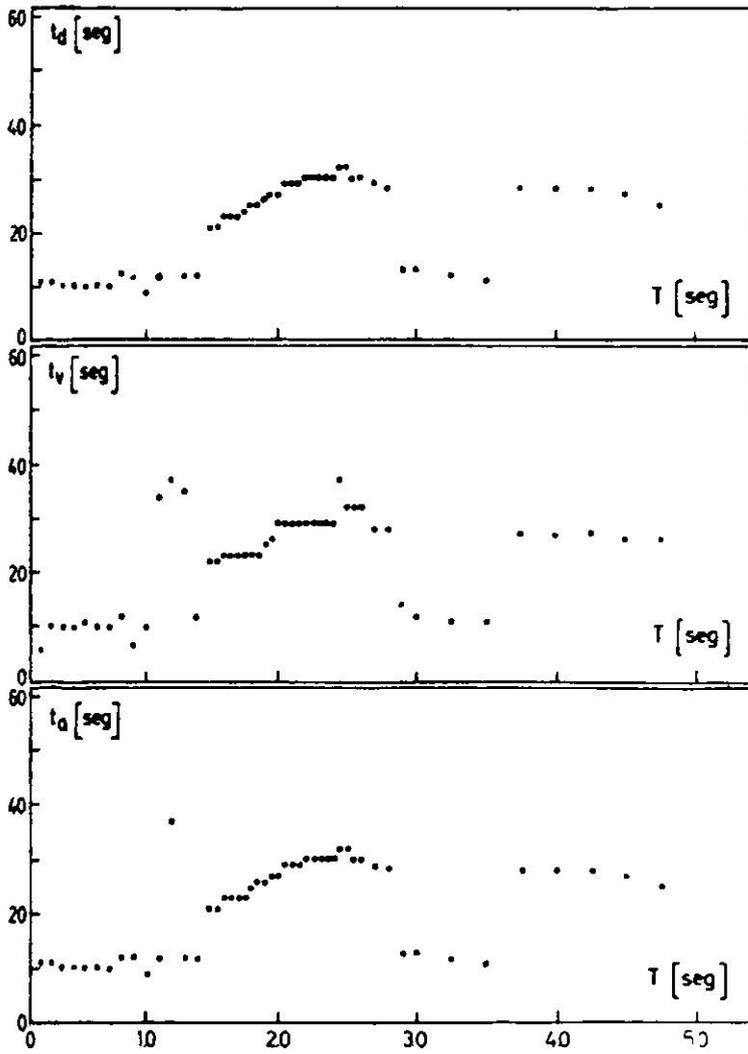


Fig. 23. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Parque Alameda, 11 de mayo de 1962. Componente N  $10^\circ 46'$  W.

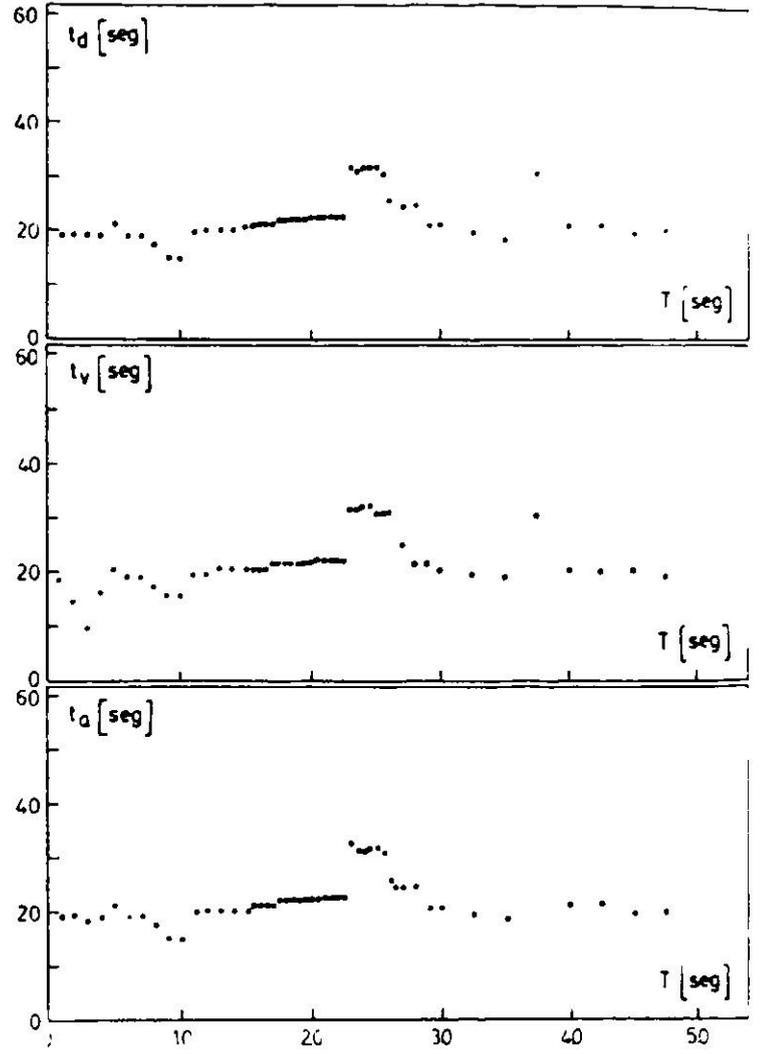


Fig. 24. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Parque Alameda, 11 de mayo de 1962. Componente N  $79^\circ 14'$  E.

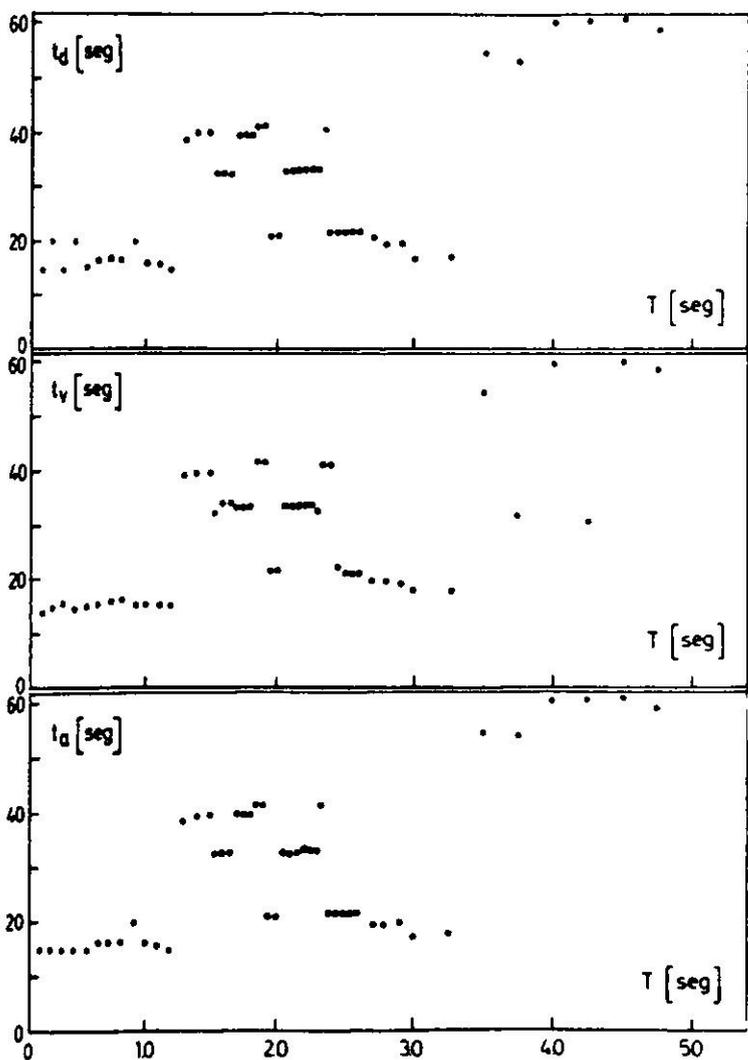


Fig. 25. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N  $10^\circ 46'$  W.

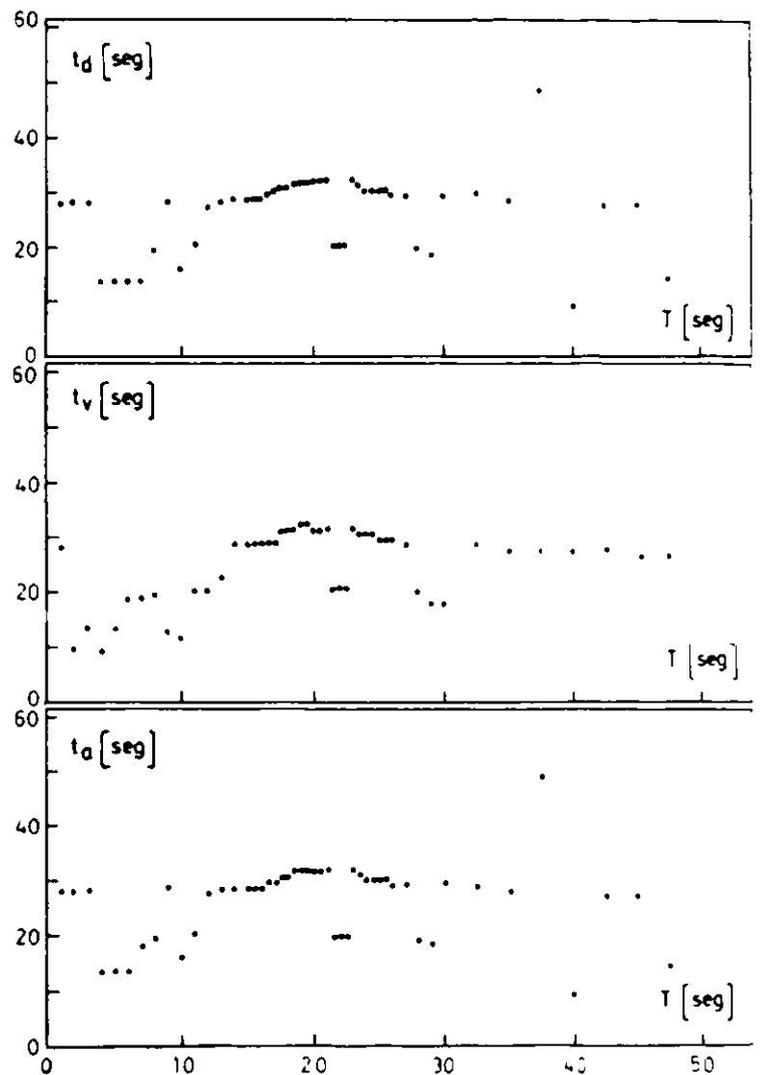


Fig. 26. Tiempos de espectro ( $c/c_c = 0.05$ ). Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N  $79^\circ 14'$  E.

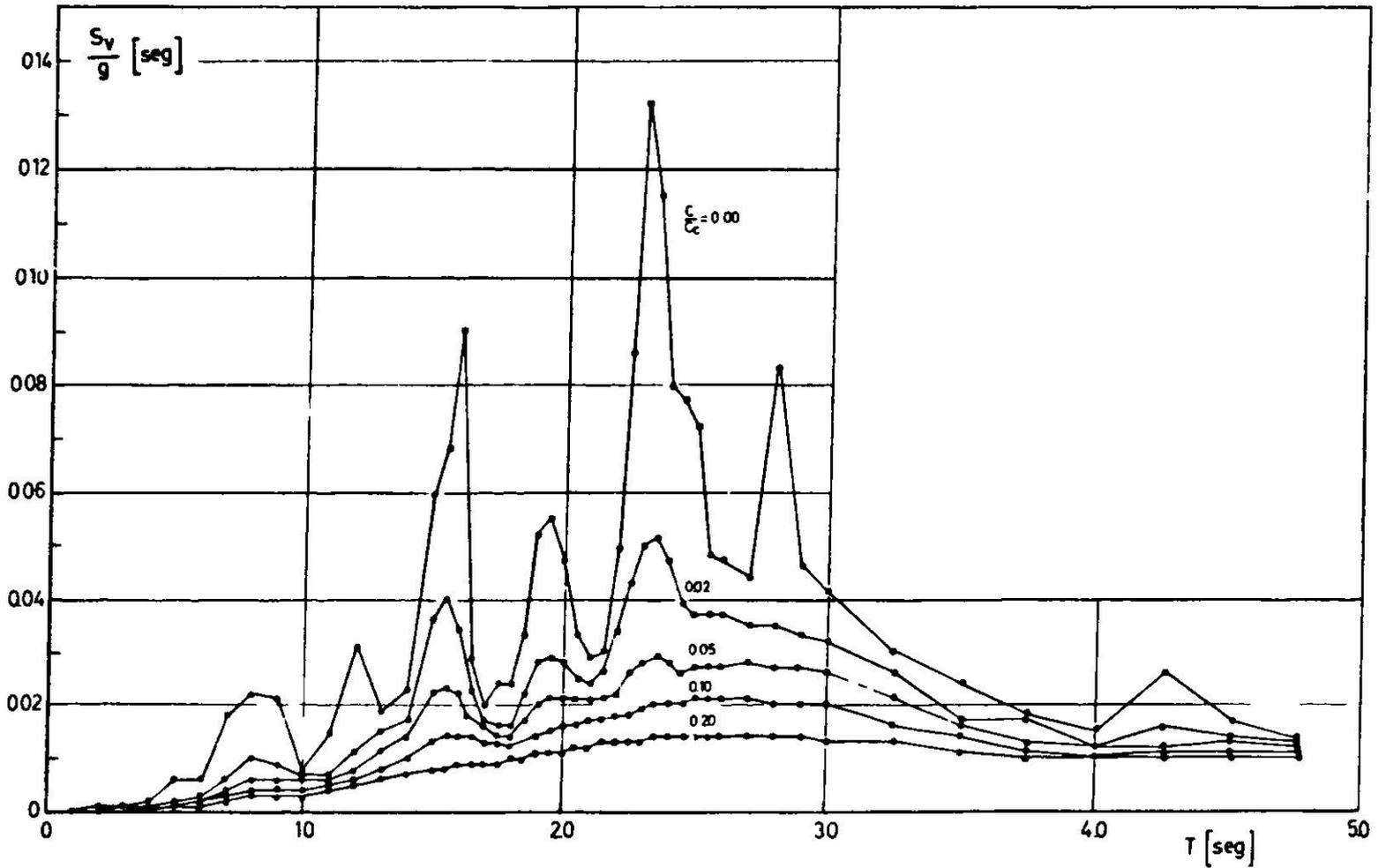


Fig. 27. Espectros de velocidad. Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

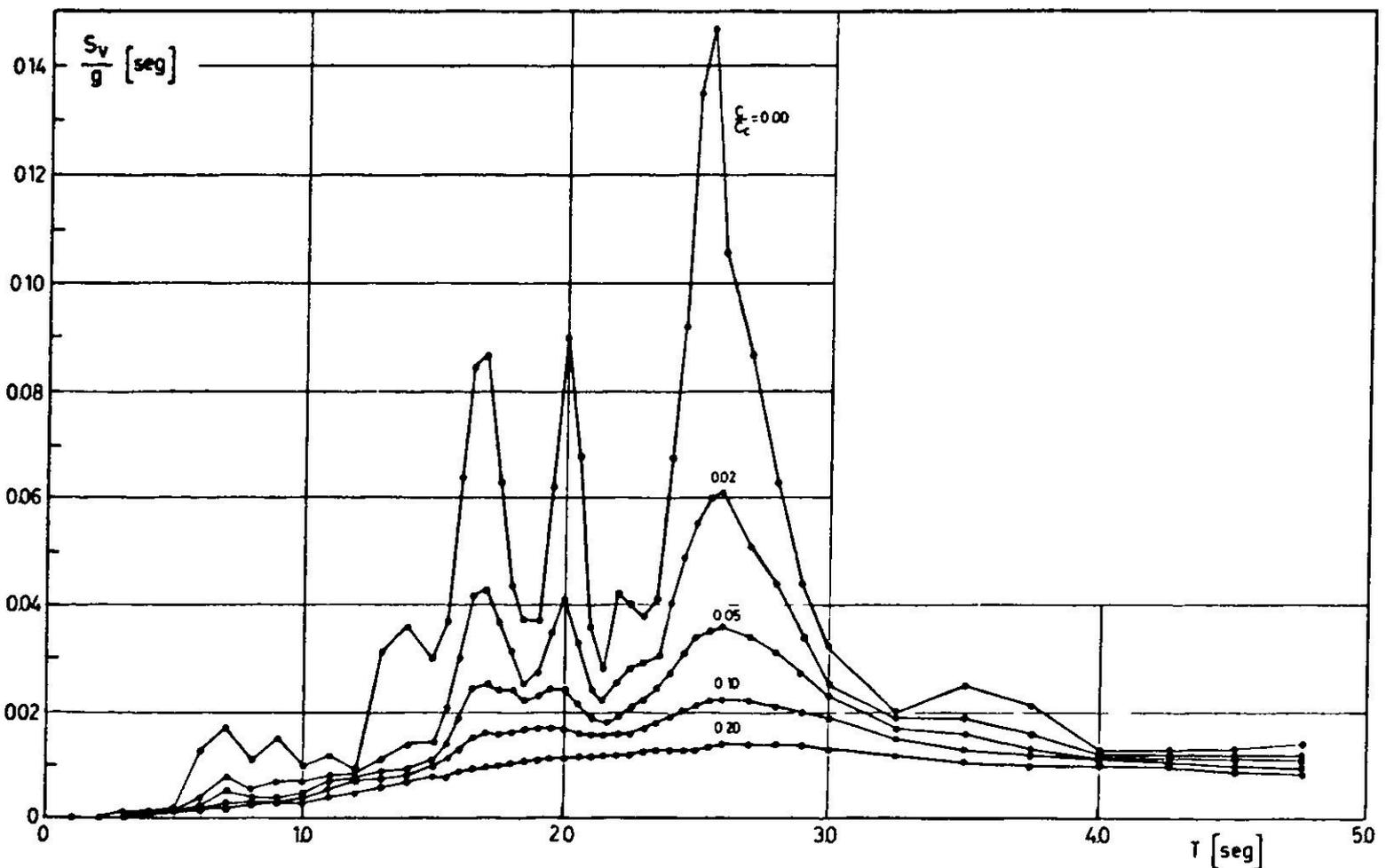


Fig. 28. Espectros de velocidad. Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 81 W.

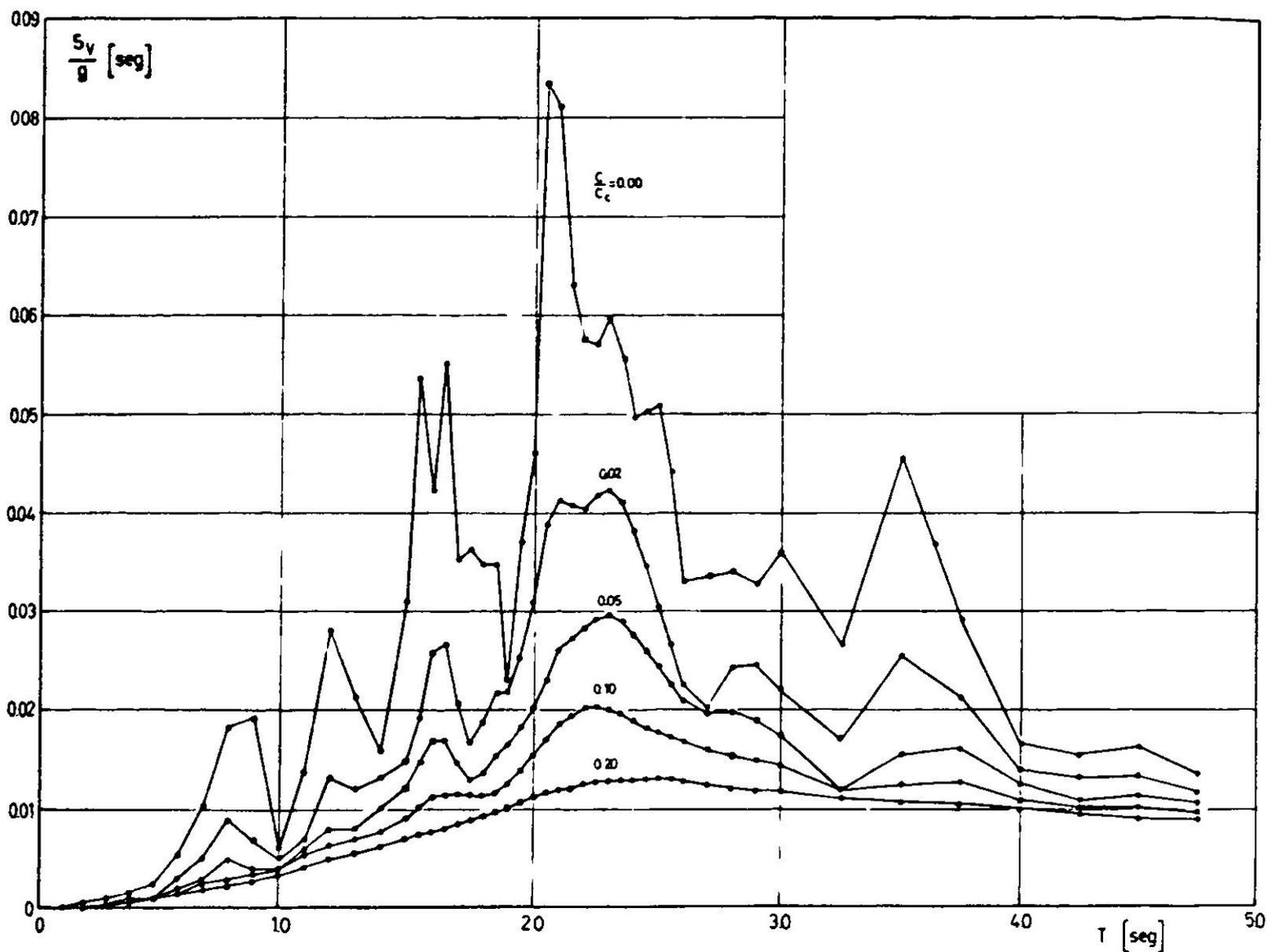


Fig. 29. Espectros de velocidad. Terremoto Torre Latinoamericana, 19 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

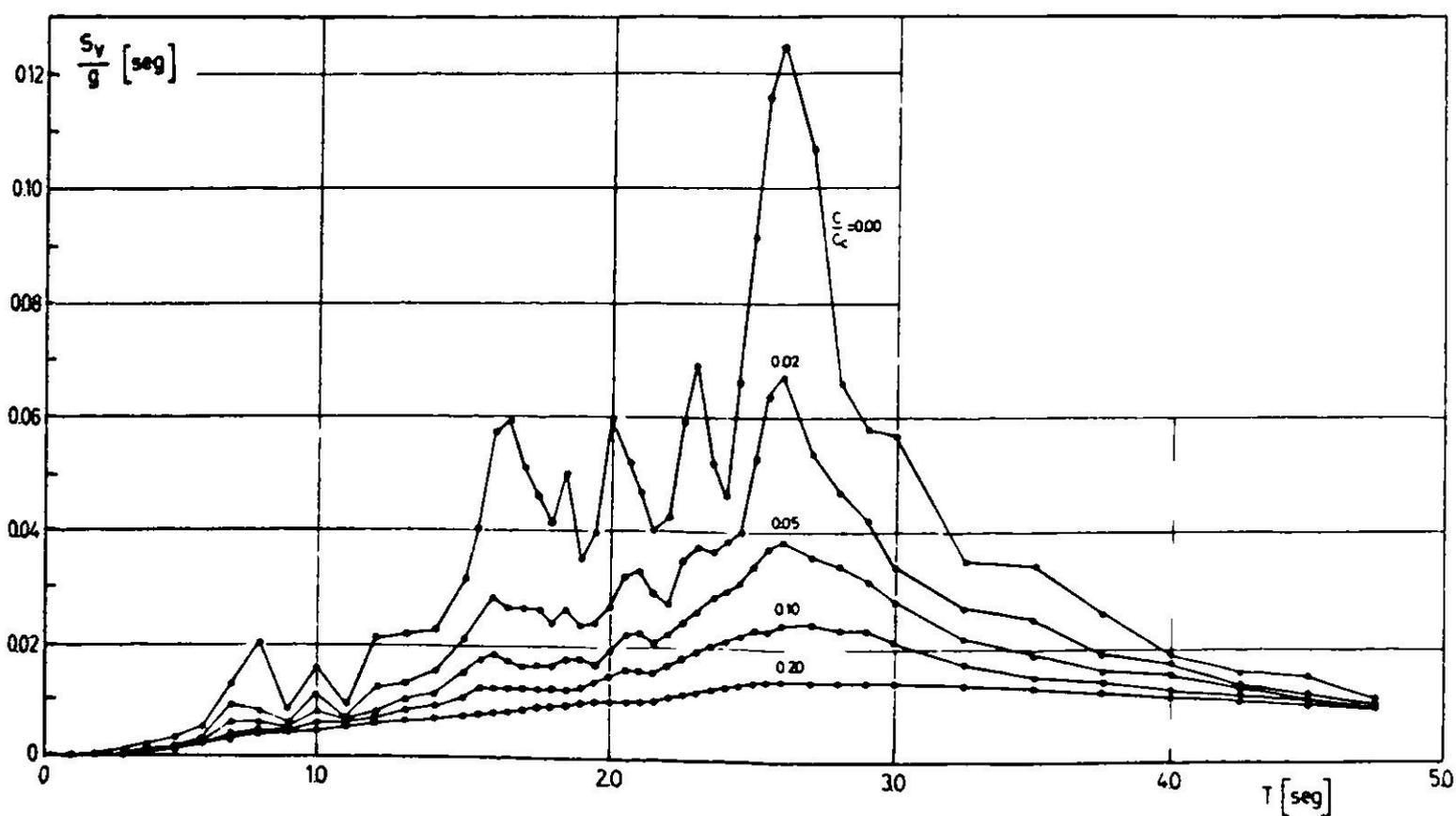
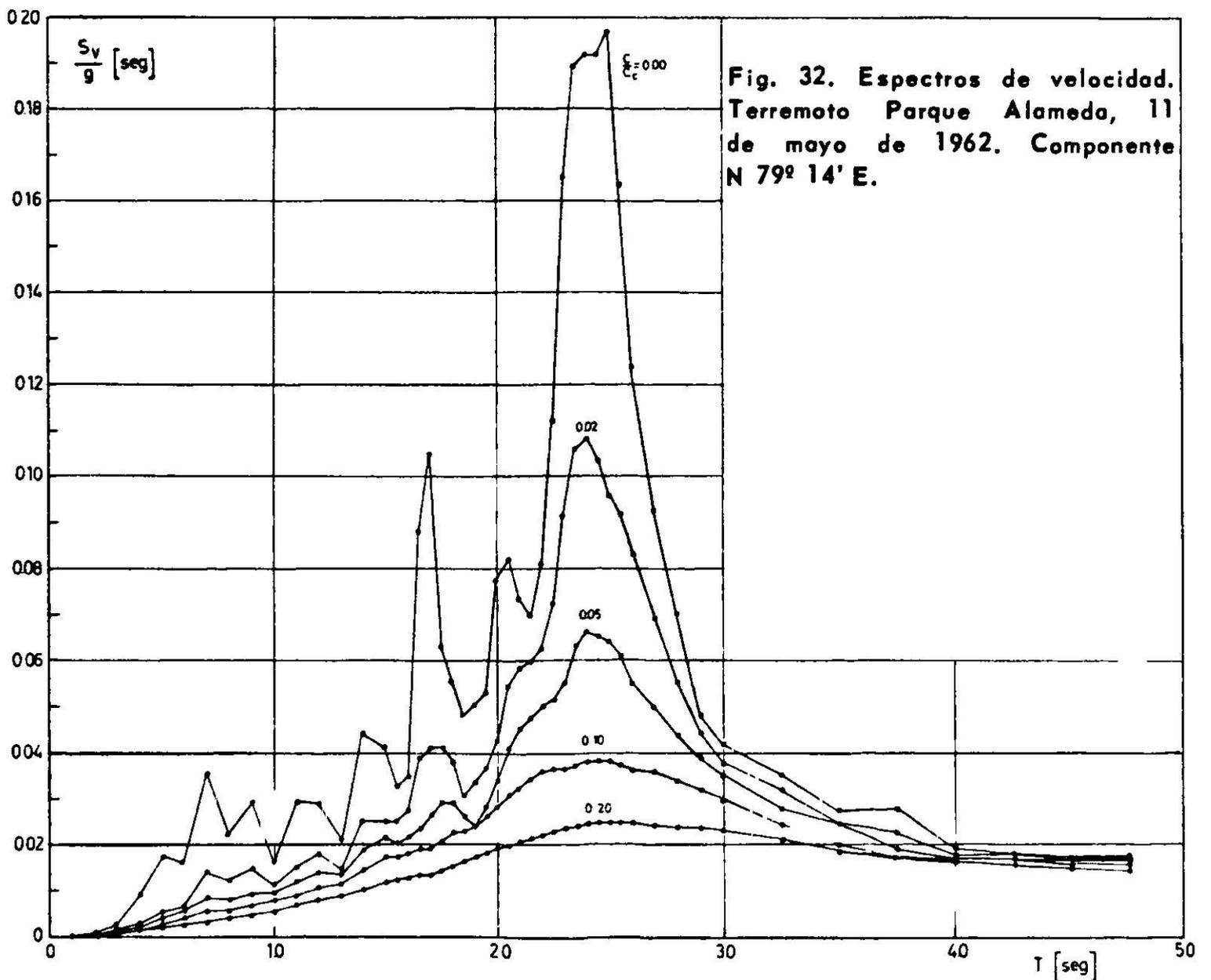
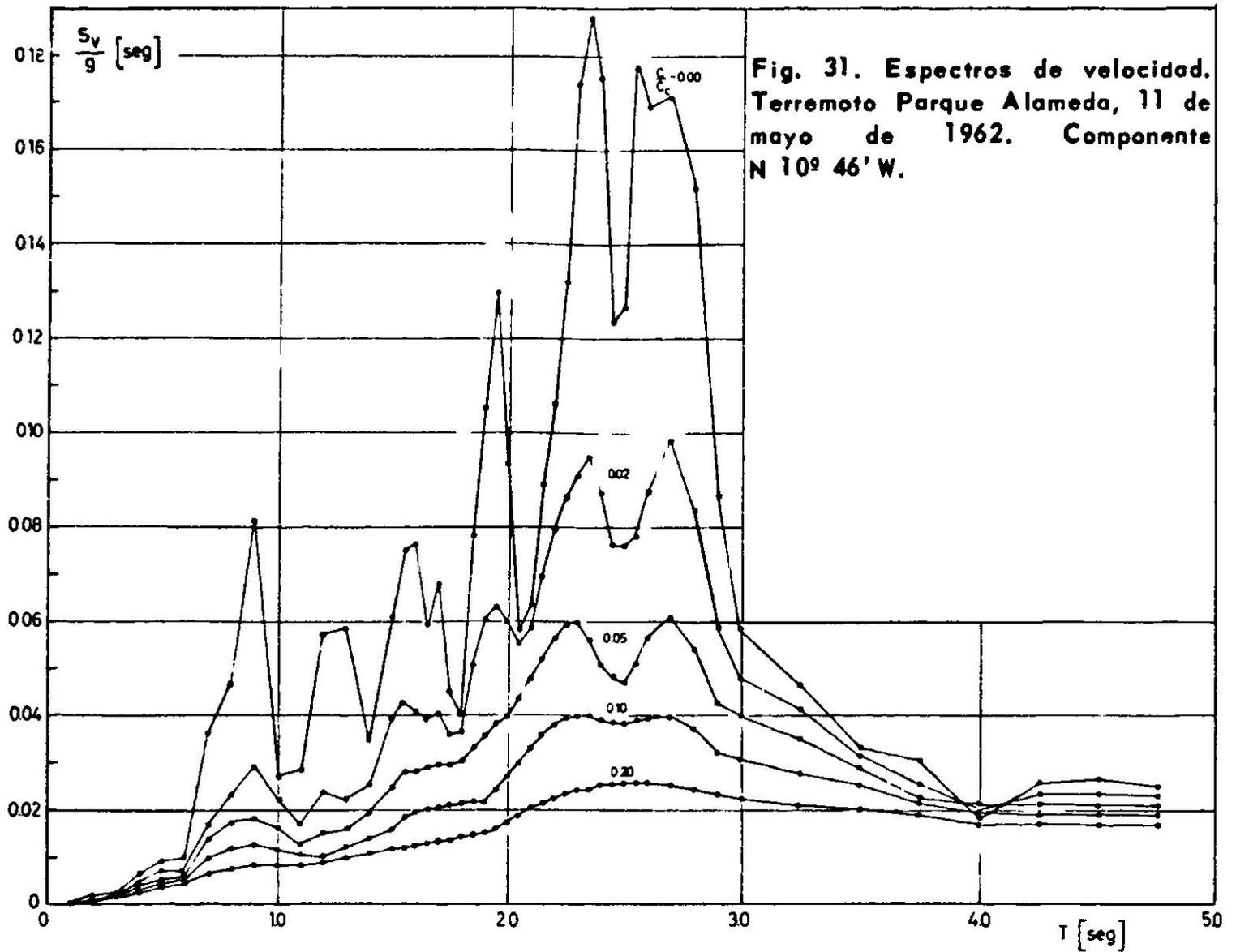


Fig. 30. Espectros de velocidad. Terremoto Torre Latinoamericana, 19 de mayo de 1962. Componente N 81 W.



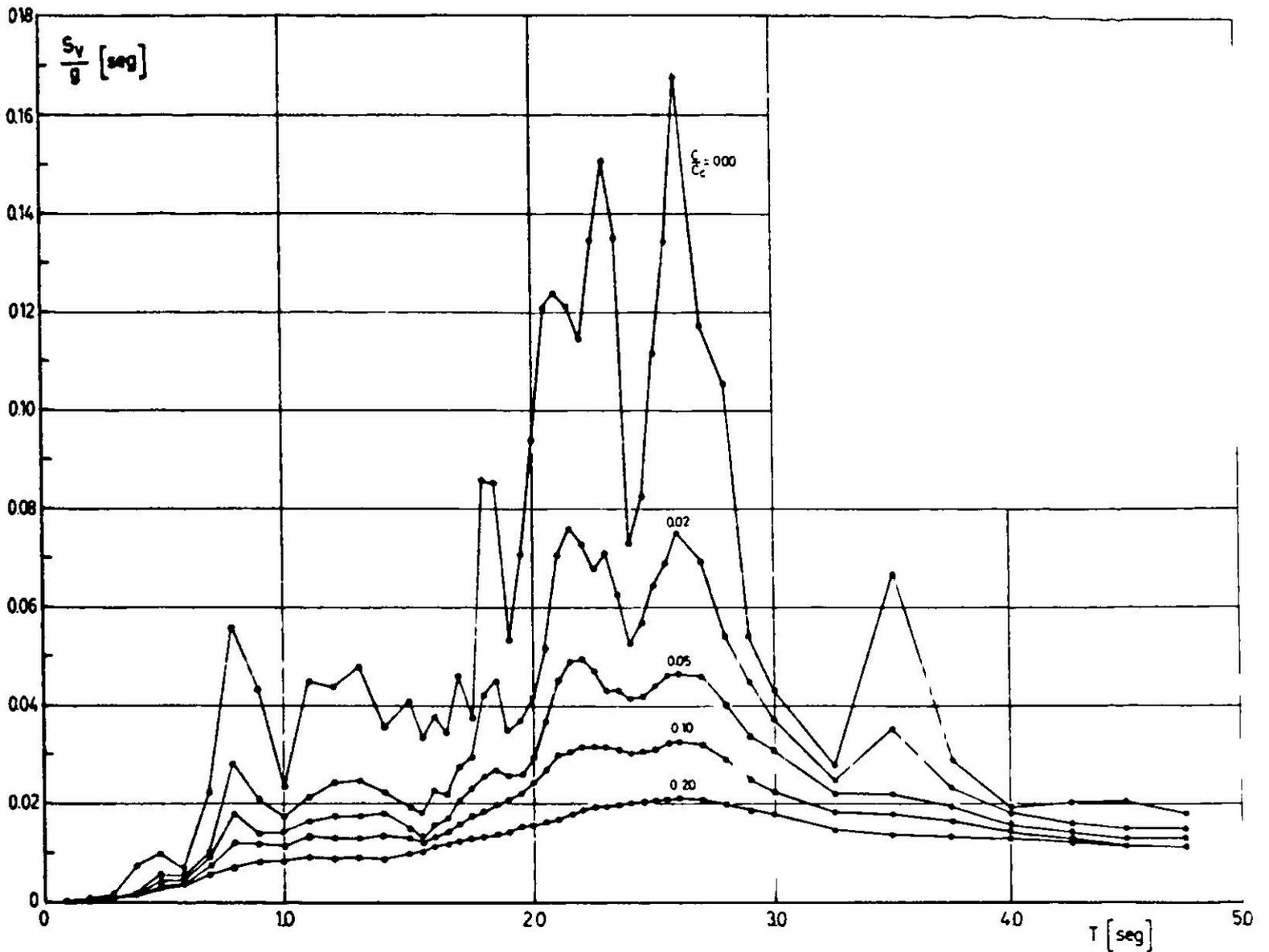


Fig. 33. Espectros de velocidad. Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N 10° 46' W.

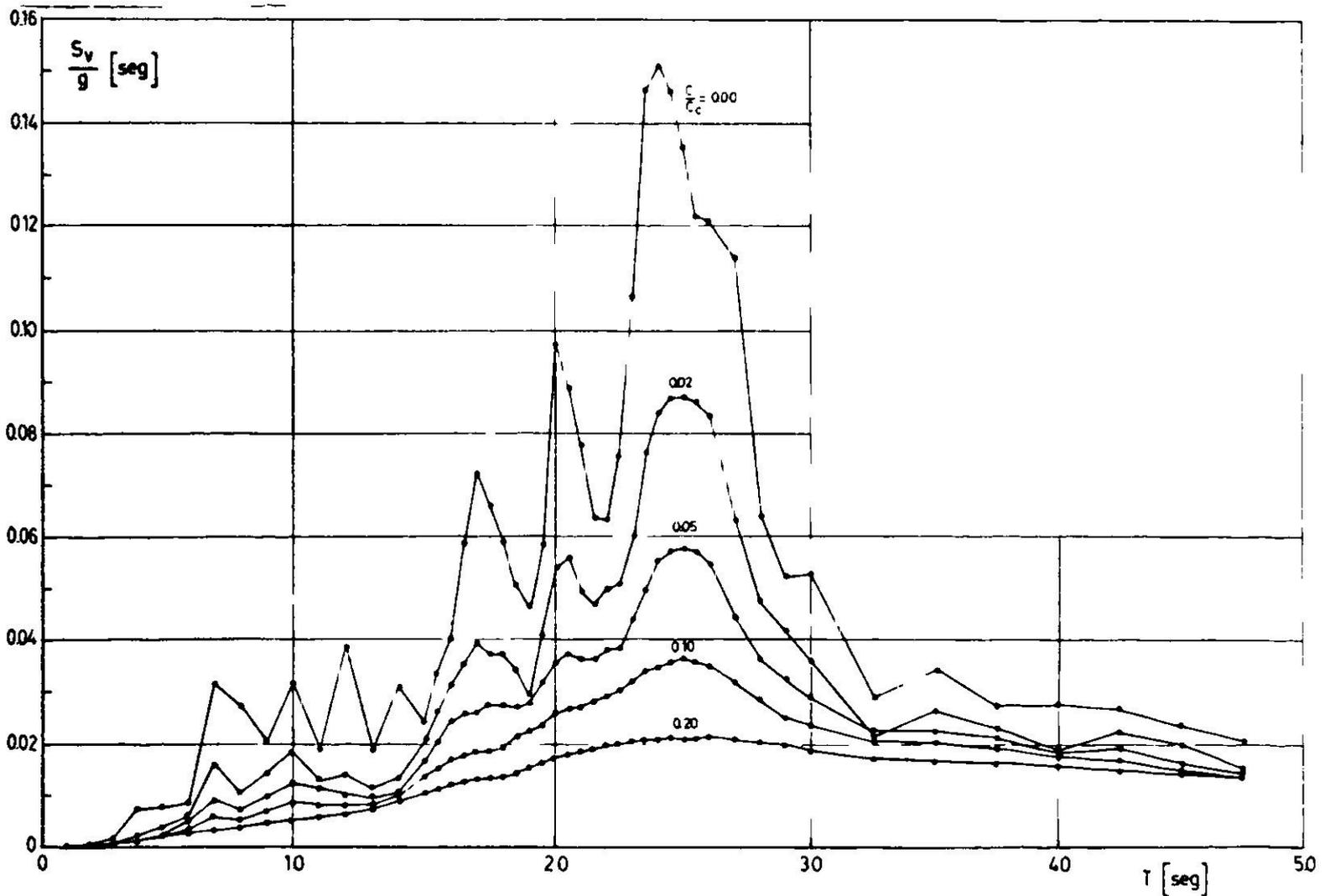


Fig. 34. Espectros de velocidad. Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N 79° 14' E.

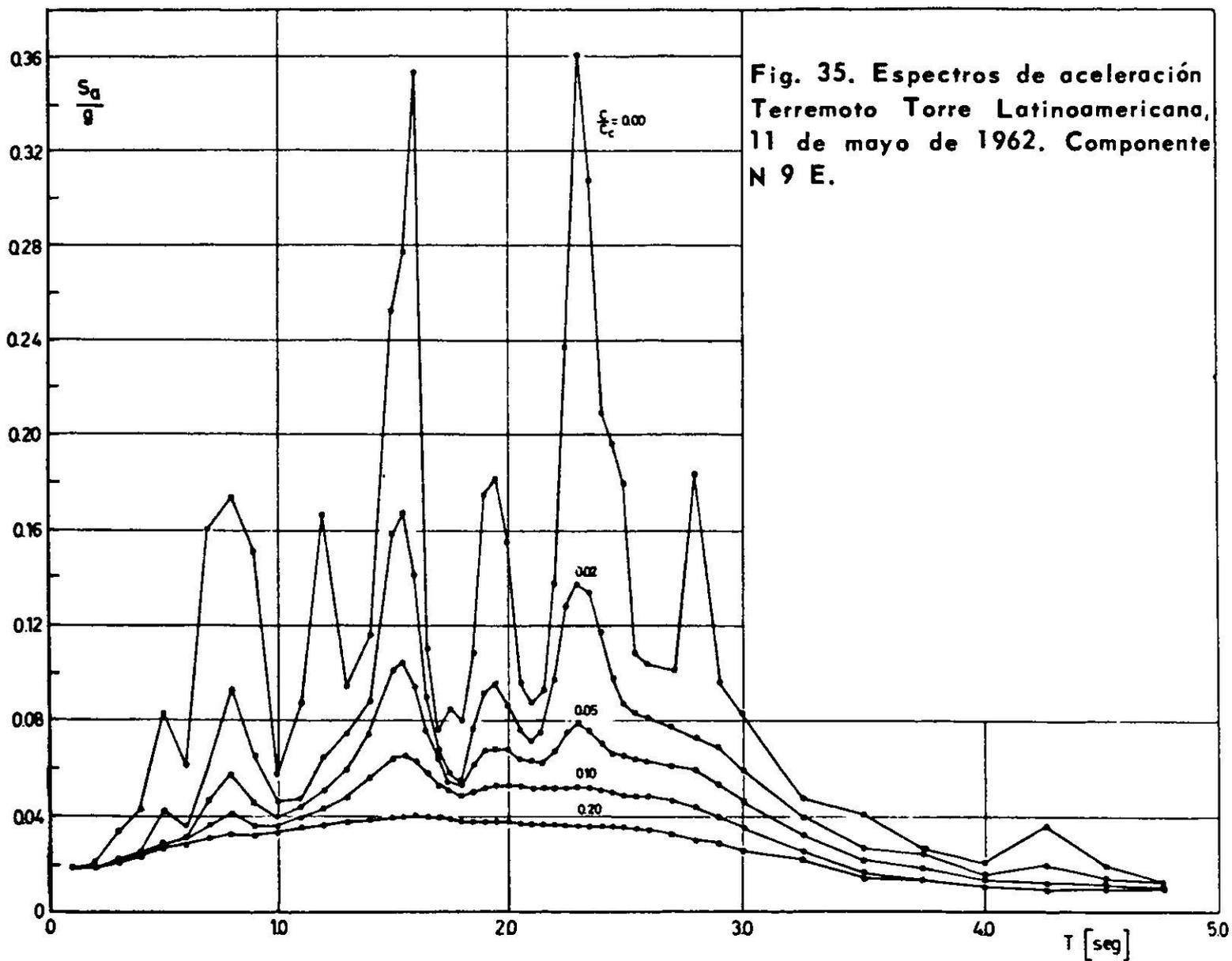


Fig. 35. Espectros de aceleración Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

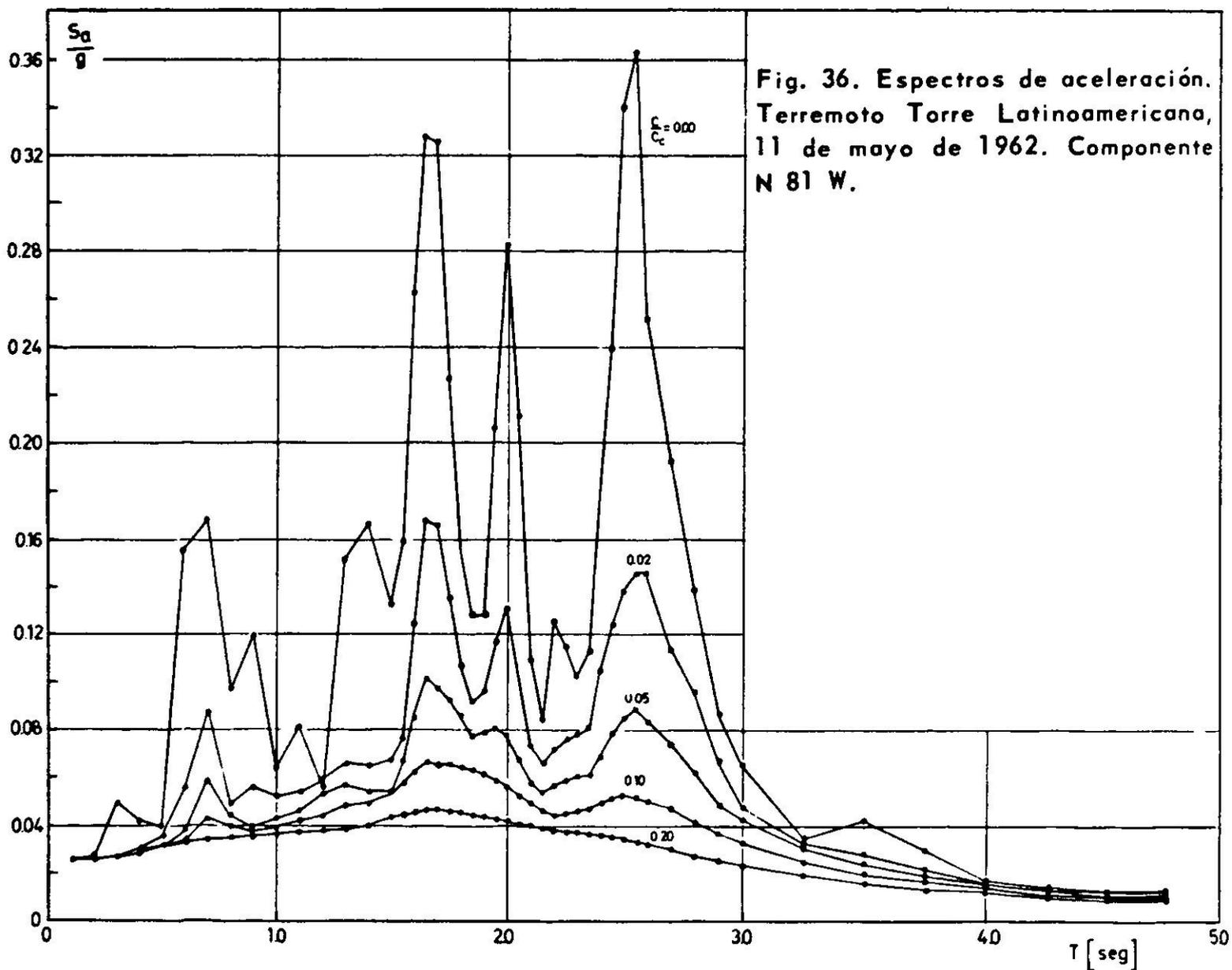
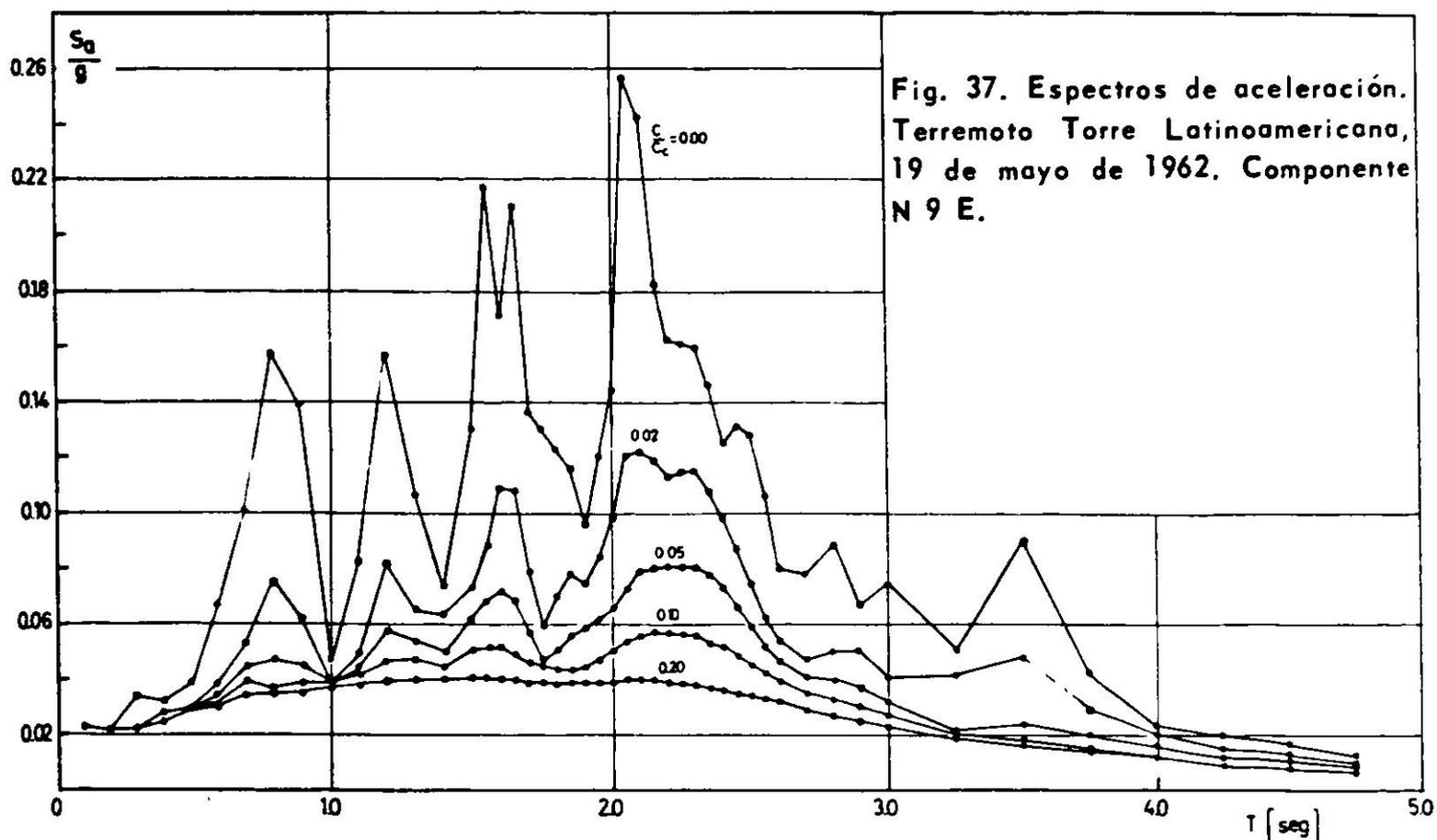


Fig. 36. Espectros de aceleración Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 81 W.



En la Tabla III se aprecia que los períodos tomados por Jennings y por los autores coinciden sólo en unos pocos casos.

TABLA III  
PERIODOS UTILIZADOS EN LOS ESPECTROS

| T (seg) Jennings |      |      |      | T (seg) Autores |      |      |      |
|------------------|------|------|------|-----------------|------|------|------|
| 0.20             | 1.54 | 2.99 | 4.36 | 0.10            | 1.30 | 2.00 | 2.60 |
| 0.25             | 1.63 | 3.13 | 4.49 | 0.20            | 1.40 | 2.05 | 2.70 |
| 0.37             | 1.75 | 3.24 | 4.62 | 0.30            | 1.50 | 2.10 | 2.80 |
| 0.50             | 1.88 | 3.38 | 4.76 | 0.40            | 1.55 | 2.15 | 2.90 |
| 0.63             | 1.99 | 3.49 |      | 0.50            | 1.60 | 2.20 | 3.00 |
| 0.74             | 2.13 | 3.66 |      | 0.60            | 1.65 | 2.25 | 3.25 |
| 0.87             | 2.24 | 3.67 |      | 0.70            | 1.70 | 2.30 | 3.50 |
| 1.01             | 2.38 | 3.74 |      | 0.80            | 1.75 | 2.35 | 3.75 |
| 1.12             | 2.51 | 3.88 |      | 0.90            | 1.80 | 2.40 | 4.00 |
| 1.26             | 2.63 | 3.98 |      | 1.00            | 1.85 | 2.45 | 4.25 |
| 1.37             | 2.86 | 4.13 |      | 1.10            | 1.90 | 2.50 | 4.50 |
| 1.50             | 2.88 | 4.25 |      | 1.20            | 1.95 | 2.55 | 4.75 |

Debido a esto, al comparar los espectros de velocidad relativa, publicados por Jennings<sup>9</sup>, con los obtenidos en este trabajo, se observa que las Figs. 27, 31, 32 y 33 difieren en su forma, especialmente para los períodos comprendidos entre 2.0 y 3.0 segundos, valores entre los cuales se producen los máximos de los espectros de velocidad para los acelerogramas estudiados. Jennings consideró nueve valores del período entre 2 y 3 segundos, mientras que los autores utilizaron diecisiete.

En las Figs. 35 a 42 se presentan los espectros de aceleración absoluta para los terremotos mejicanos considerados.

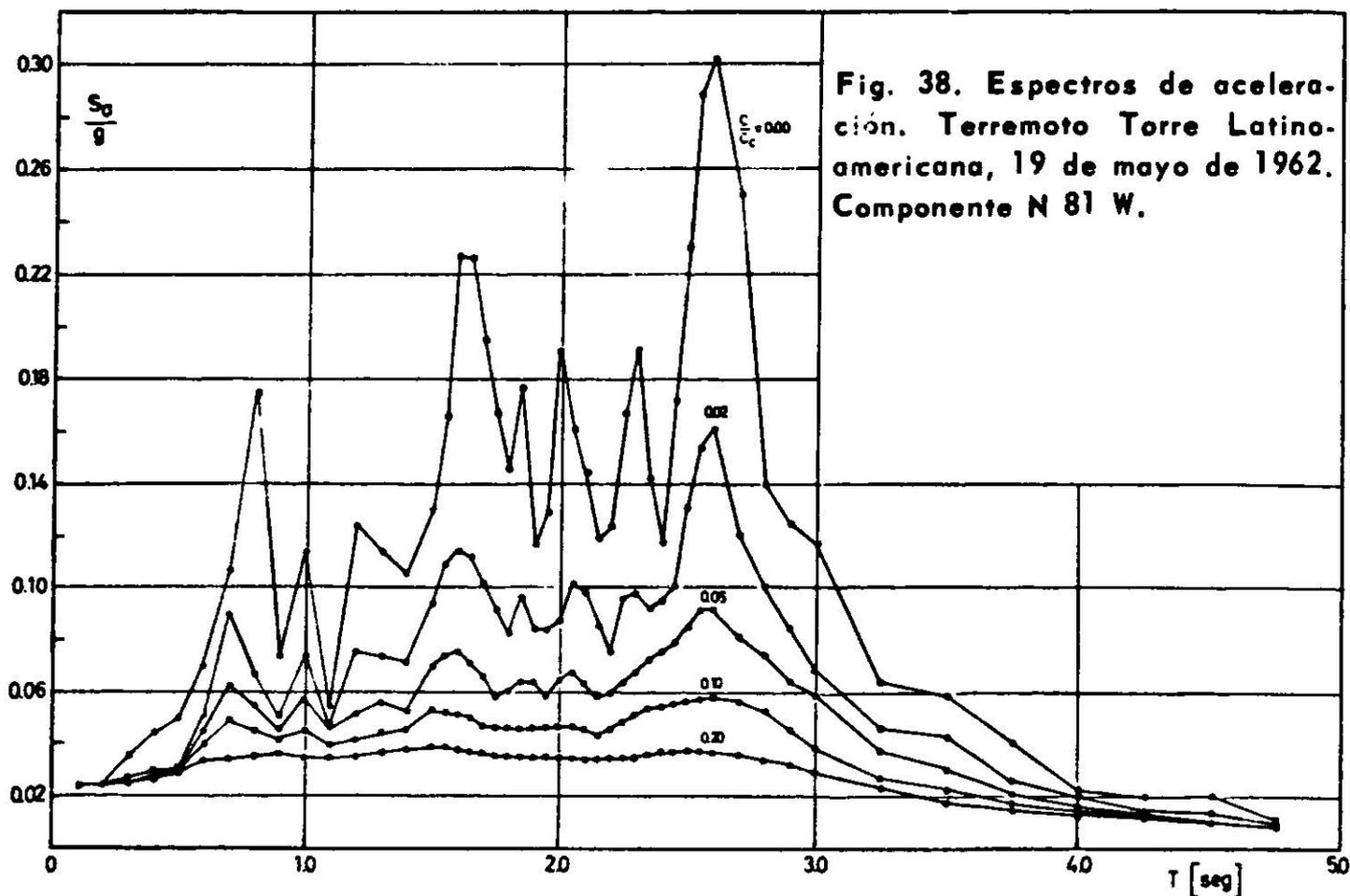


Fig. 38. Espectros de aceleración. Terremoto Torre Latinoamericana, 19 de mayo de 1962. Componente N 81 W.

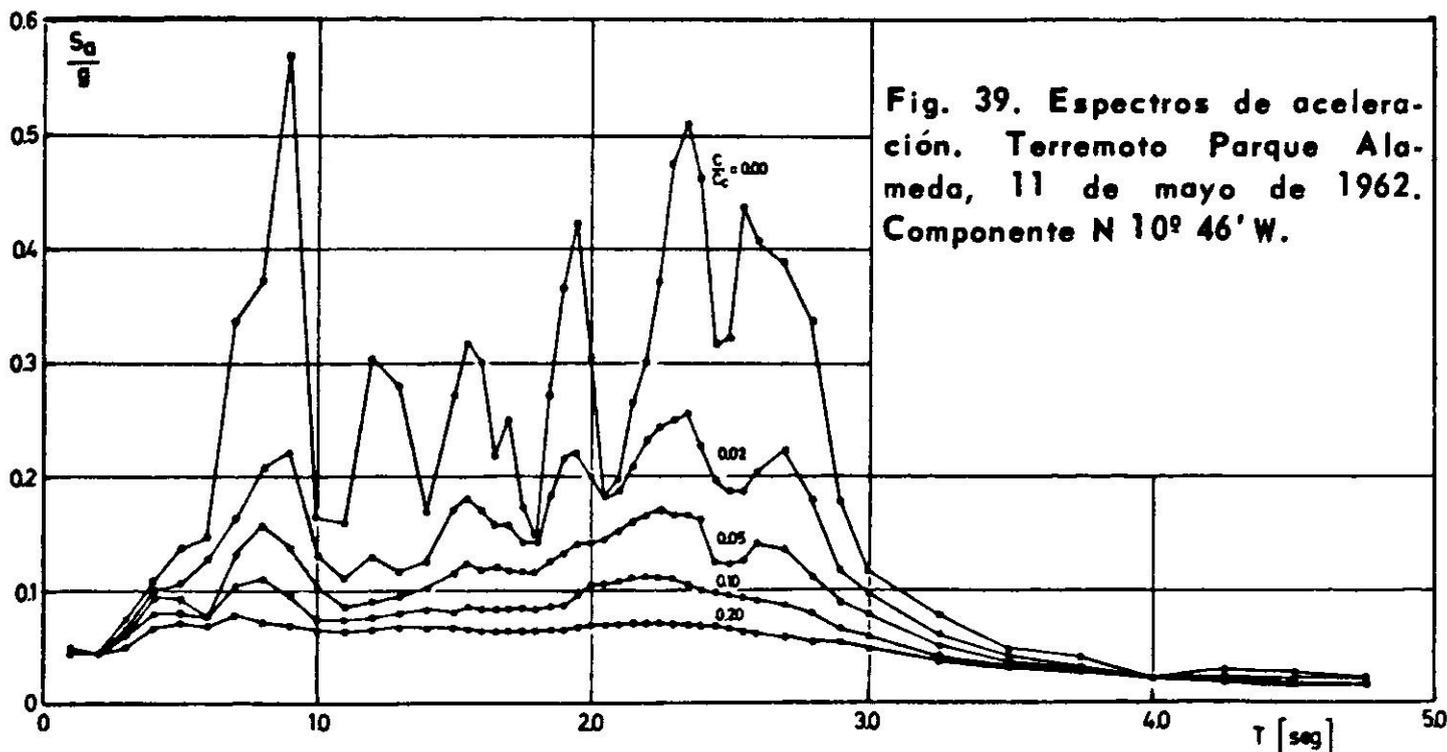


Fig. 39. Espectros de aceleración. Terremoto Parque Alameda, 11 de mayo de 1962. Componente N 10° 46' W.

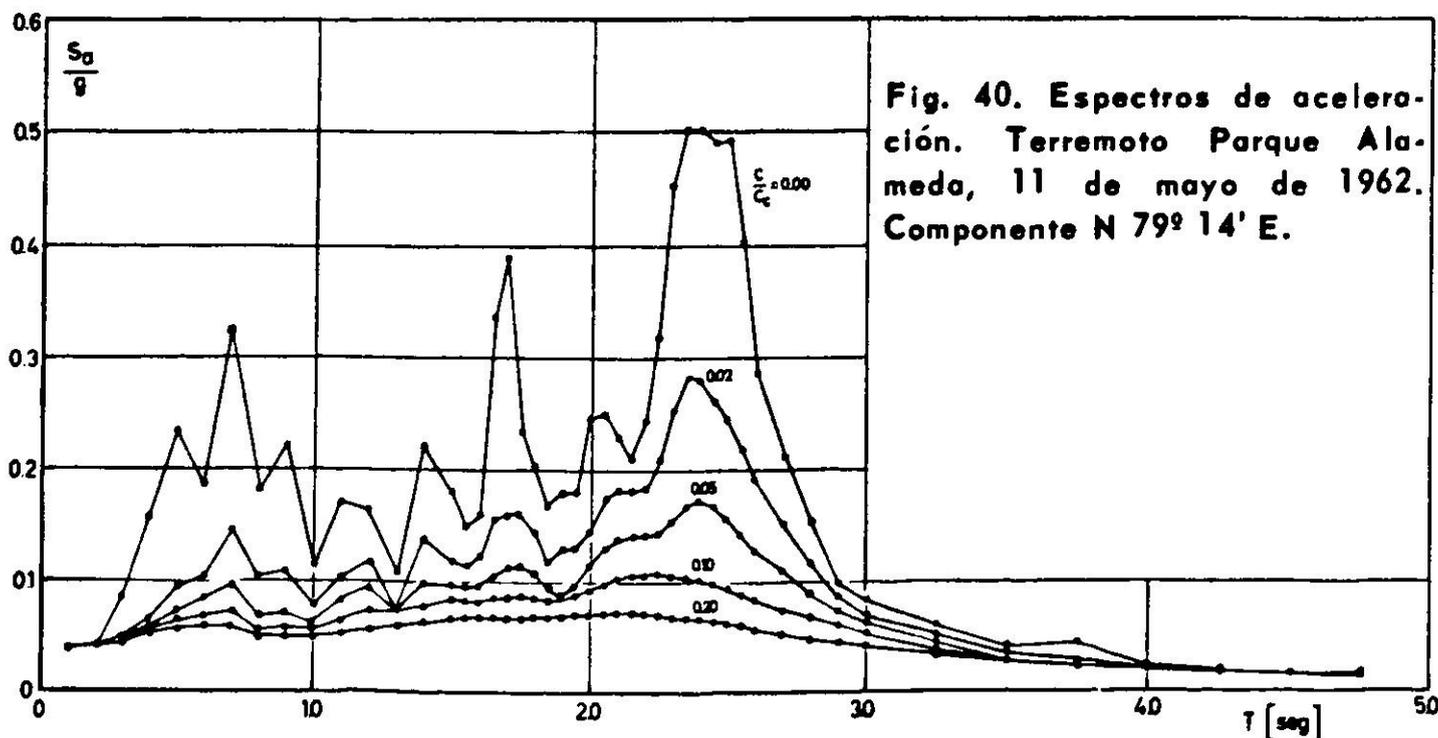
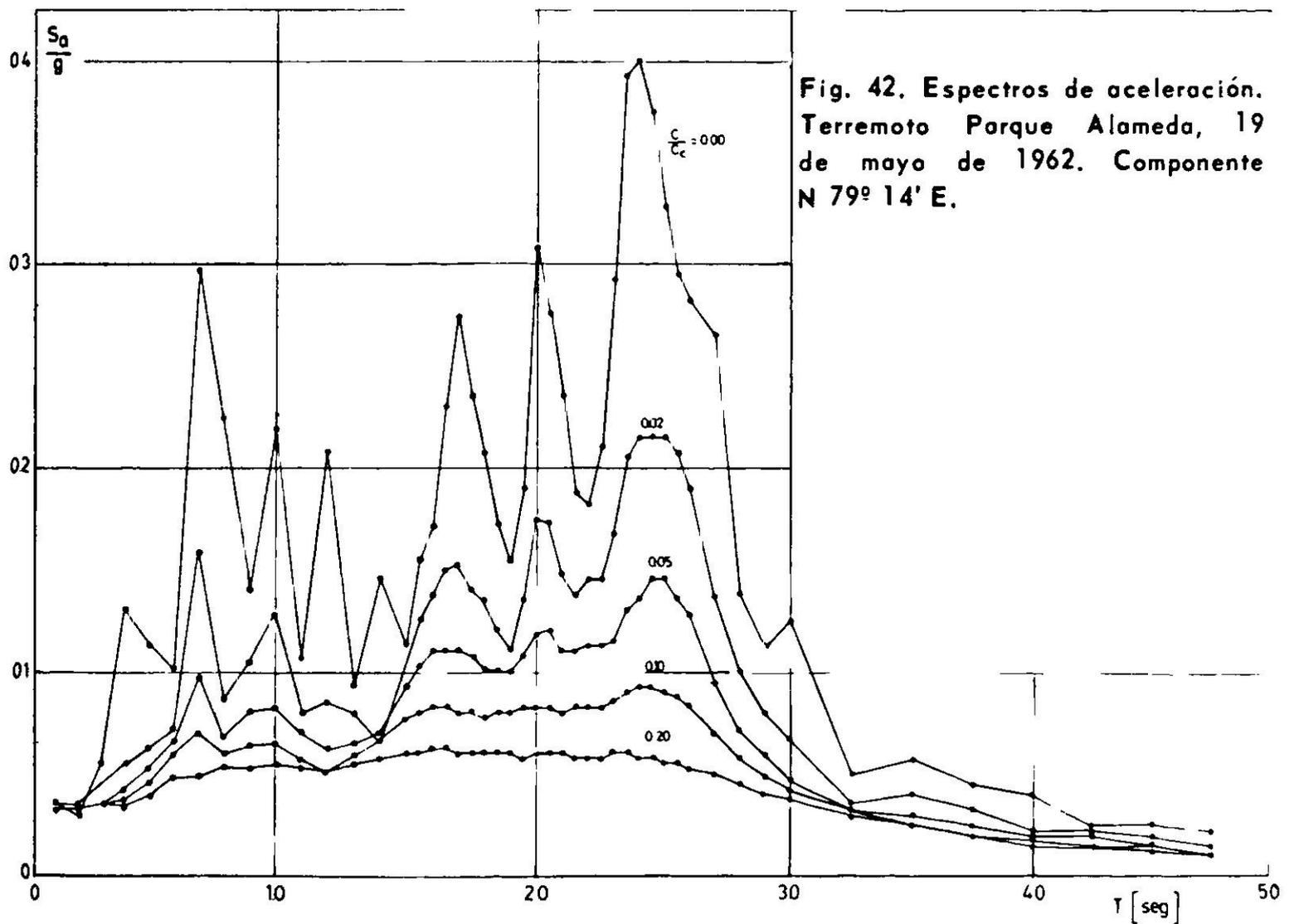
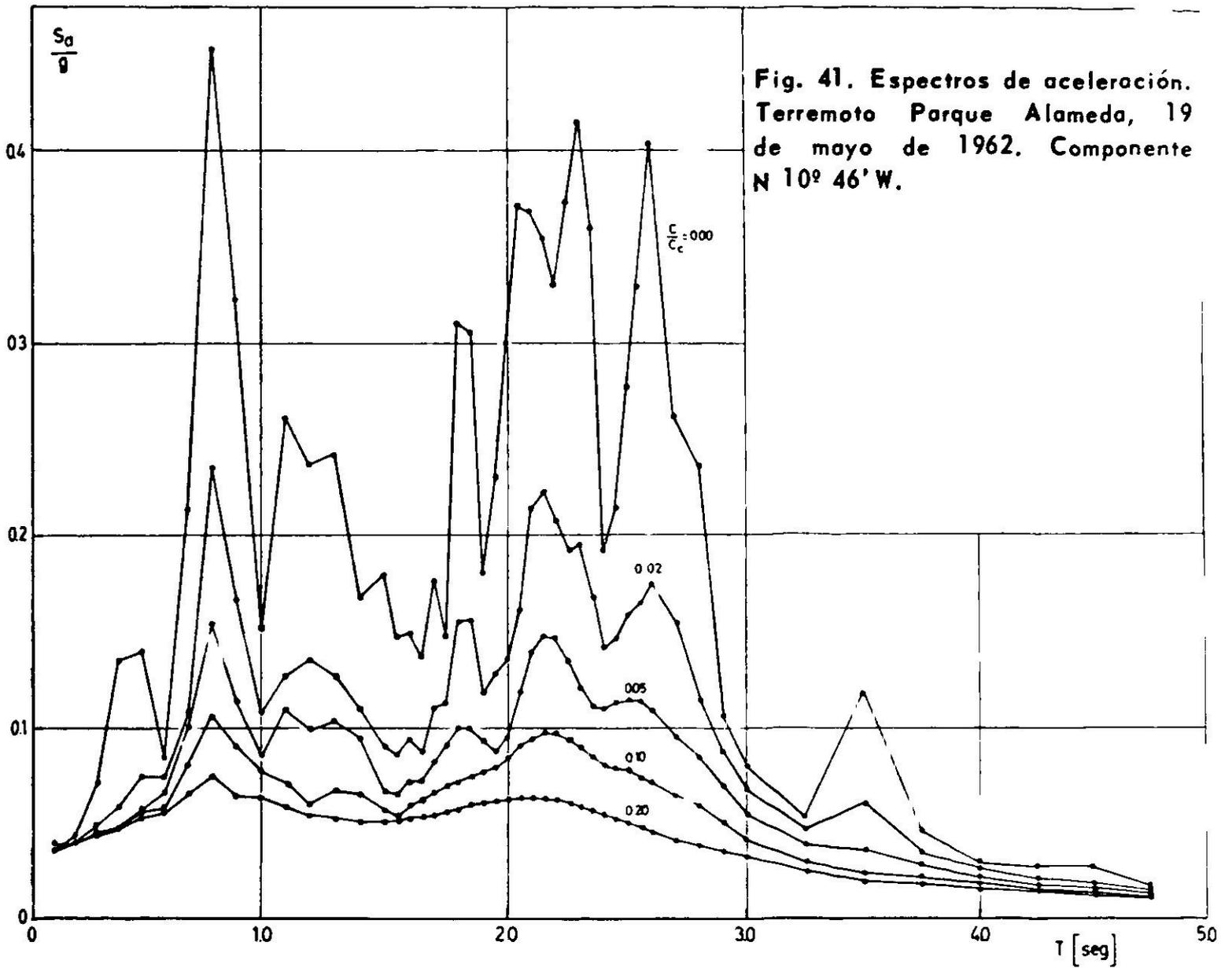


Fig. 40. Espectros de aceleración. Terremoto Parque Alameda, 11 de mayo de 1962. Componente N 79° 14' E.



### Intensidad de Arias y aceleración cuadrática media

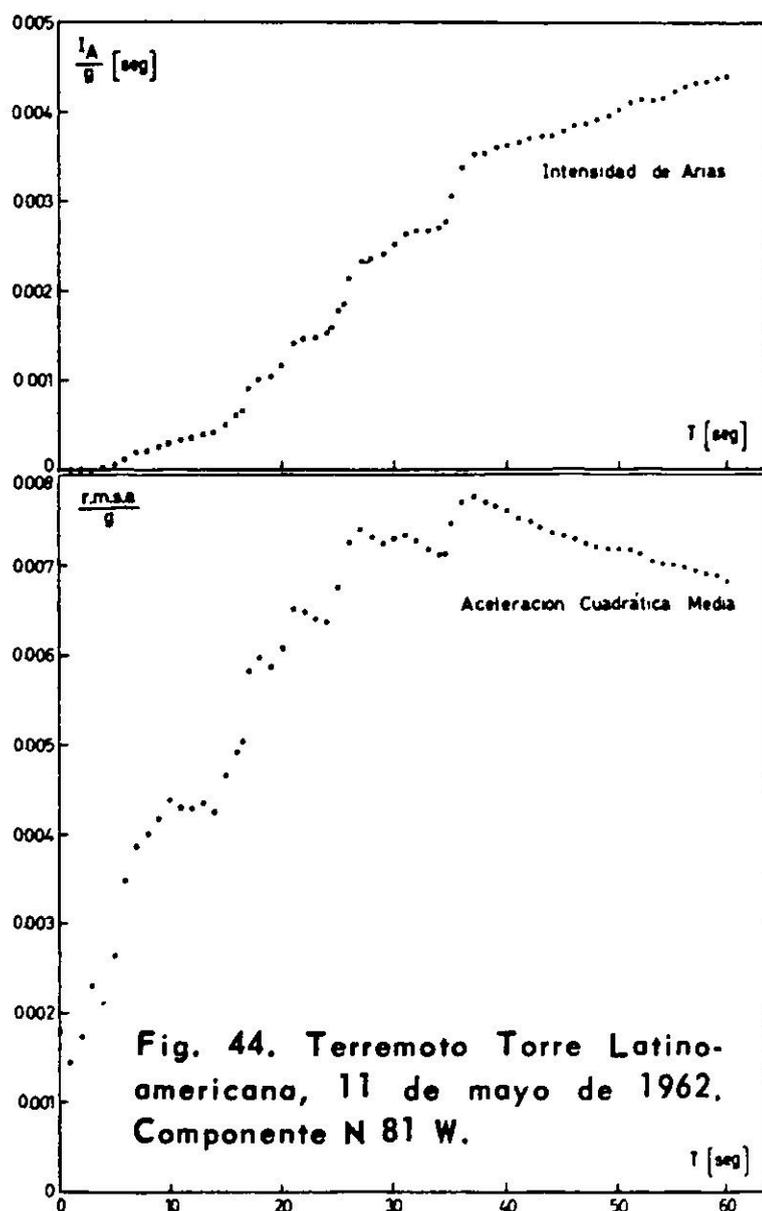
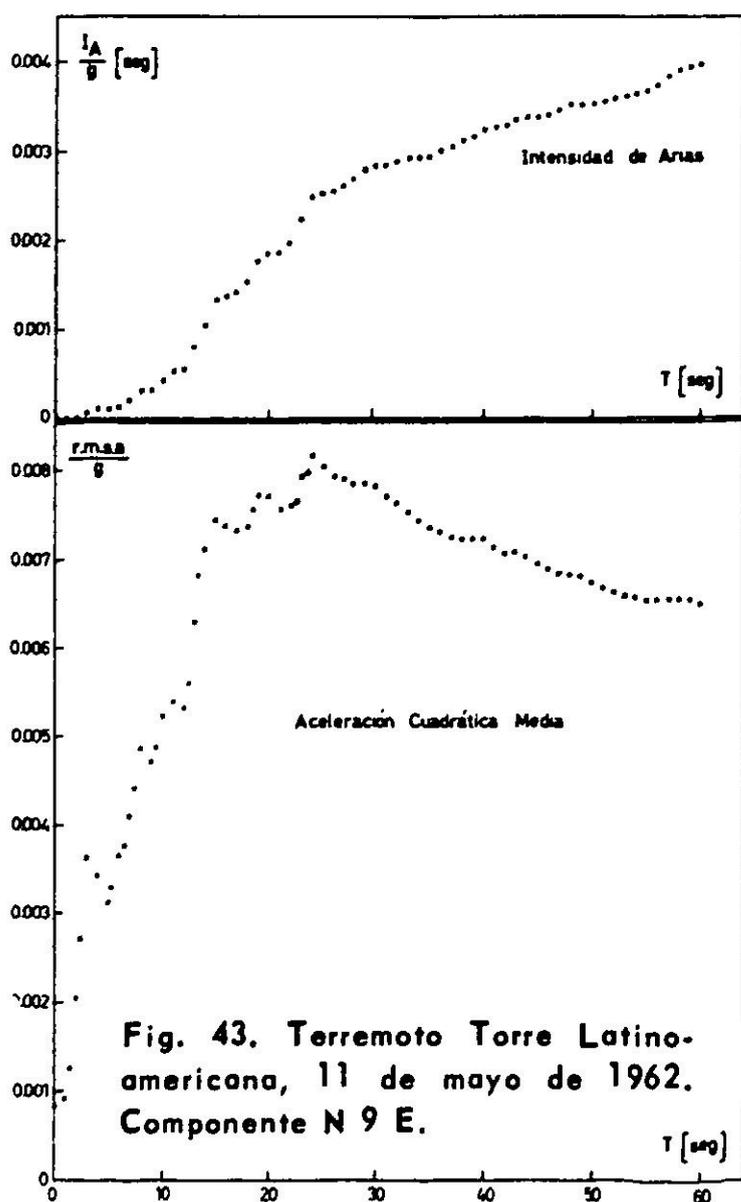
Para cada terremoto mejicano se calculó la intensidad de Arias y la aceleración cuadrática media en función del tiempo. Los resultados se presentan en las Figs. 43 a 50.

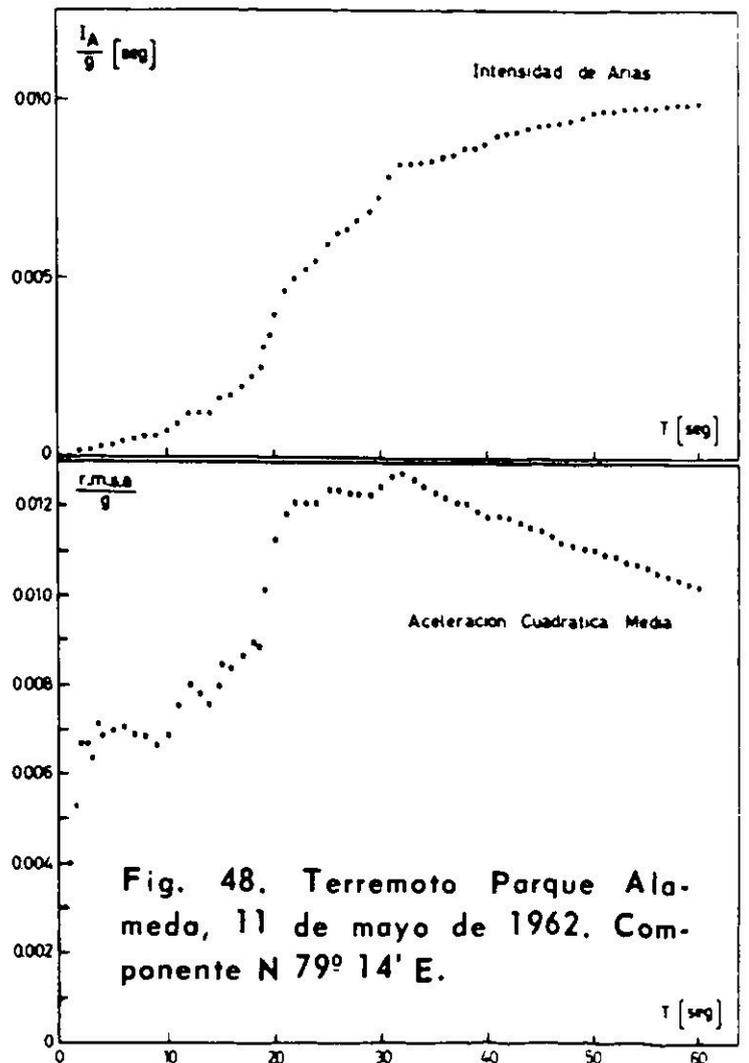
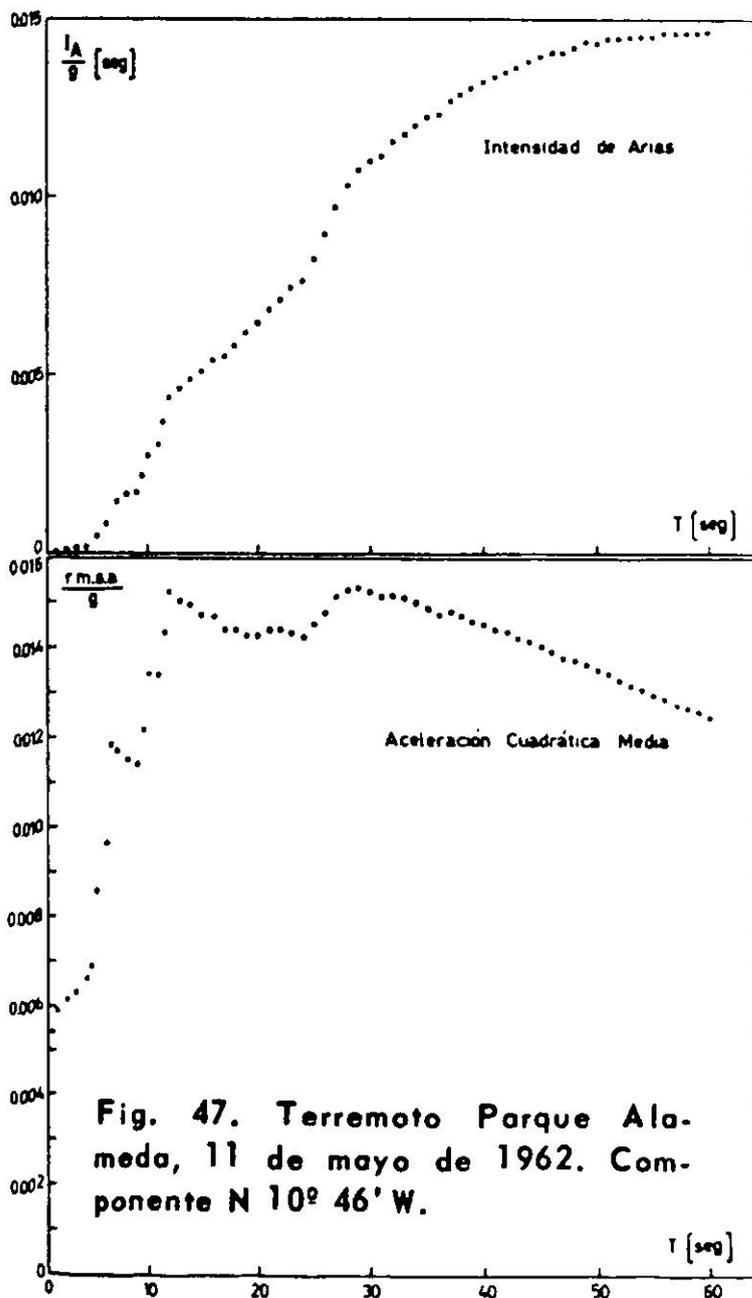
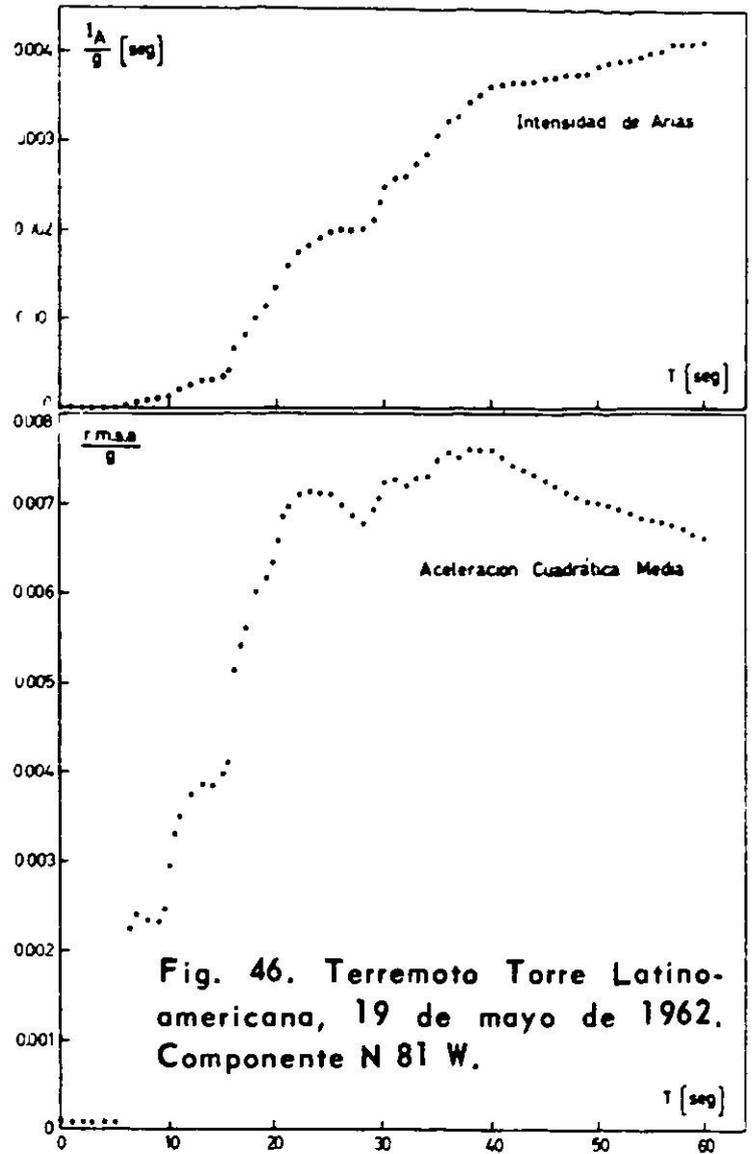
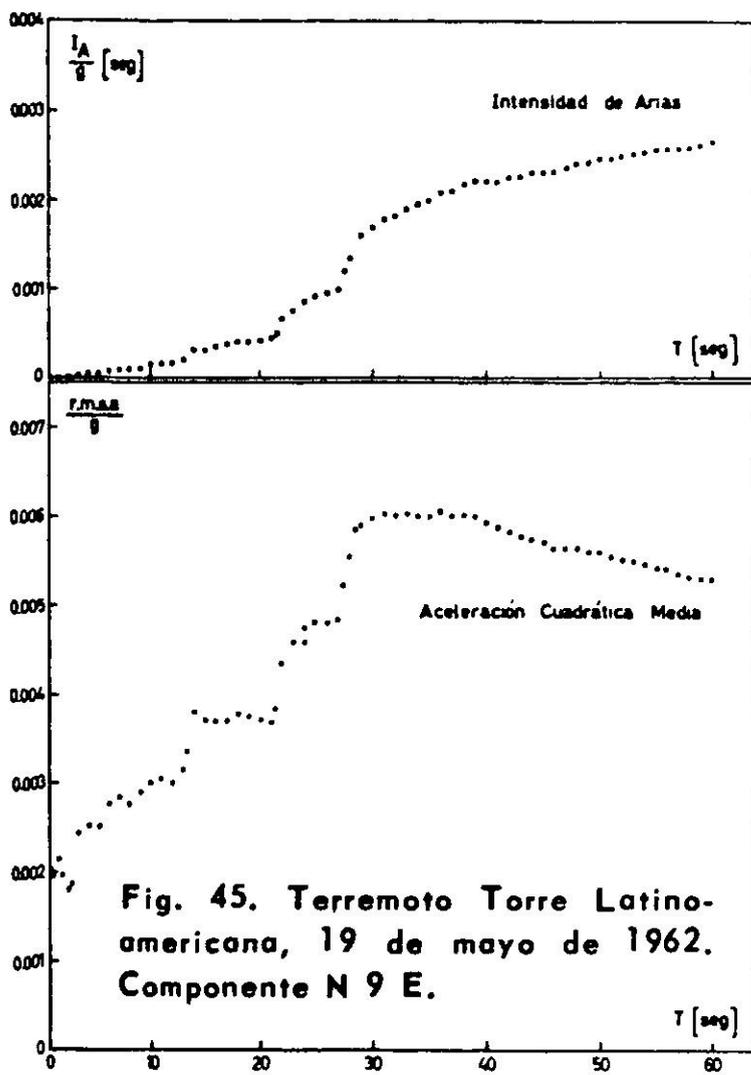
En los gráficos de la intensidad de Arias se puede observar que la duración elegida para el terremoto, es aproximadamente la necesaria, por tener esas curvas pequeñas variaciones en las proximidades del tiempo final de digitalización. Esto confirma lo dicho al estudiar los tiempos de espectros, y justifica no estudiar la influencia de la duración del acelerograma sobre los espectros de respuesta<sup>3</sup>.

### Correlogramas

A todos los acelerogramas considerados se les corrigió la línea base según el criterio de Berg y Housner y se calcularon los correlogramas correspondientes en la forma descrita por Husid<sup>3</sup>.

Los correlogramas para cada uno de los acelerogramas mejicanos se presentan en las Figs. 51 a 58. Se puede observar que son poco amortiguados.





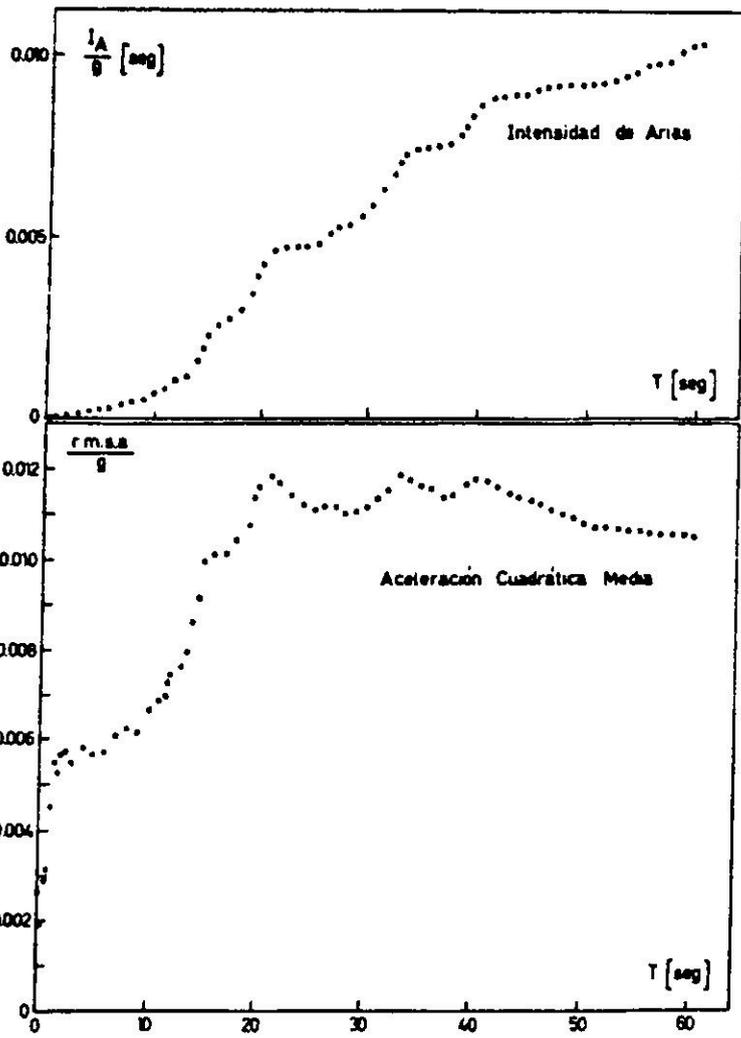


Fig. 49. Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N 10° 46' W.

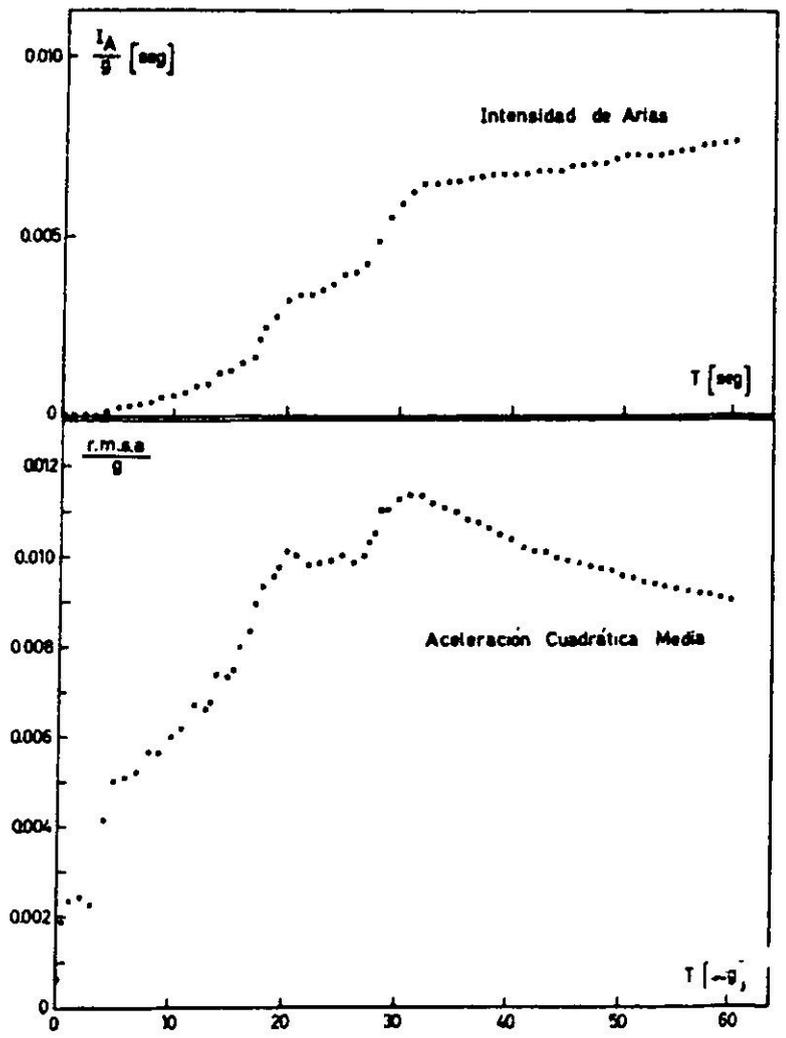


Fig. 50. Terremoto Parque Alameda, 19 de mayo de 1962. Componente N 79° 14' E.

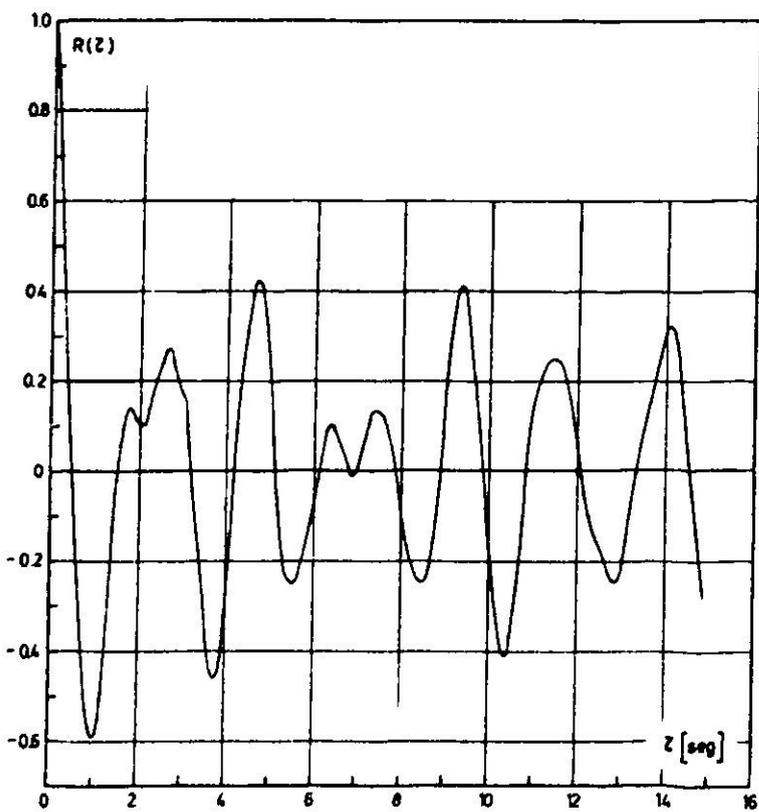


Fig. 51. Correlograma. Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 9 E.

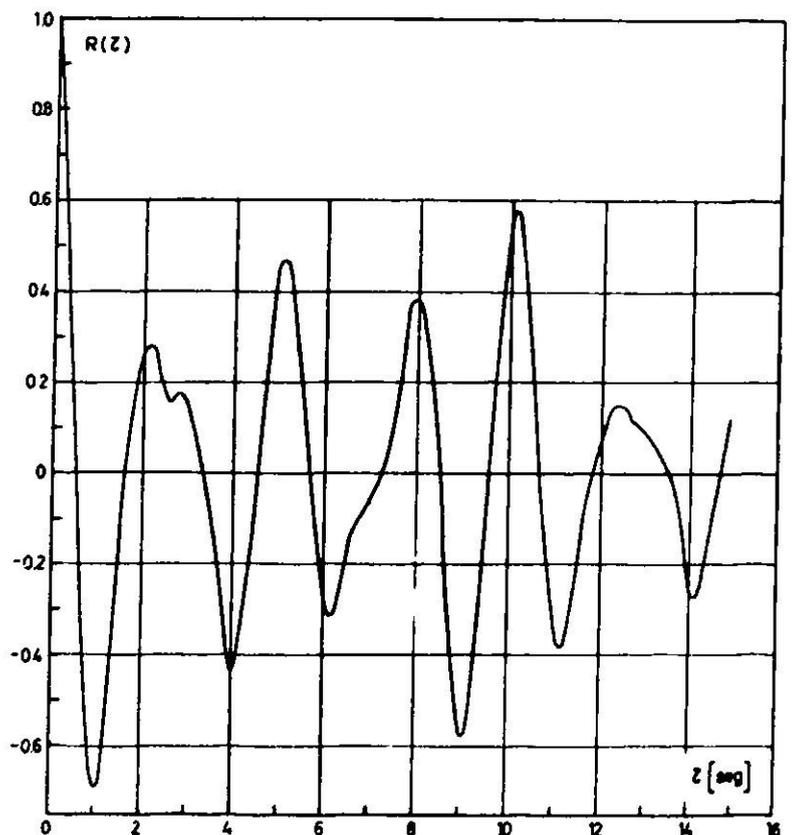
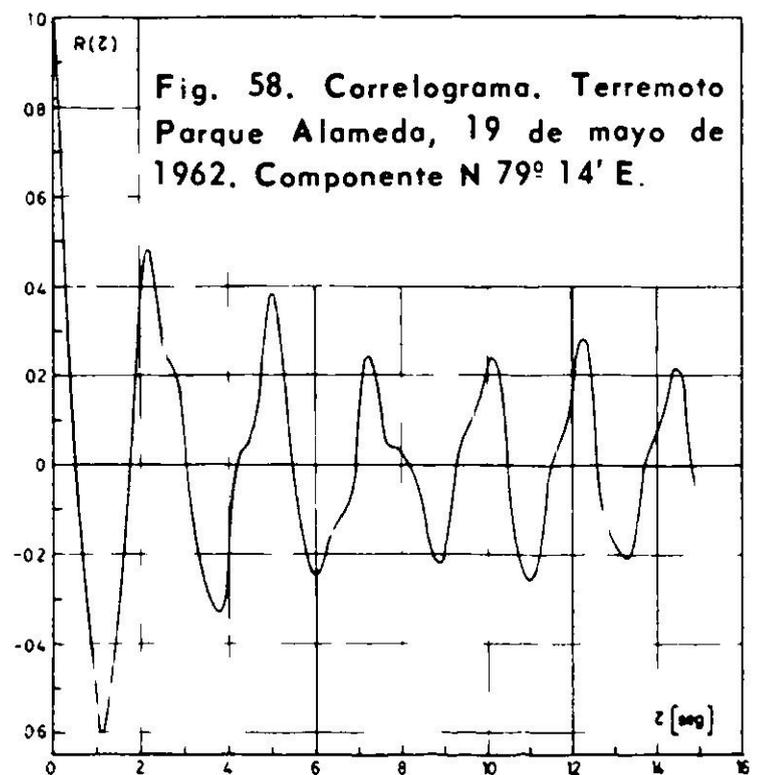
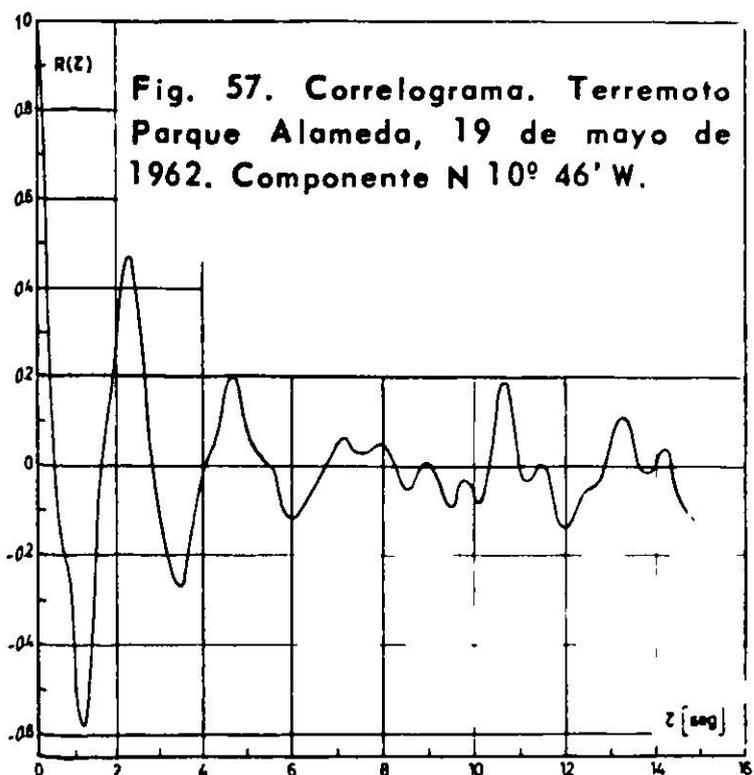
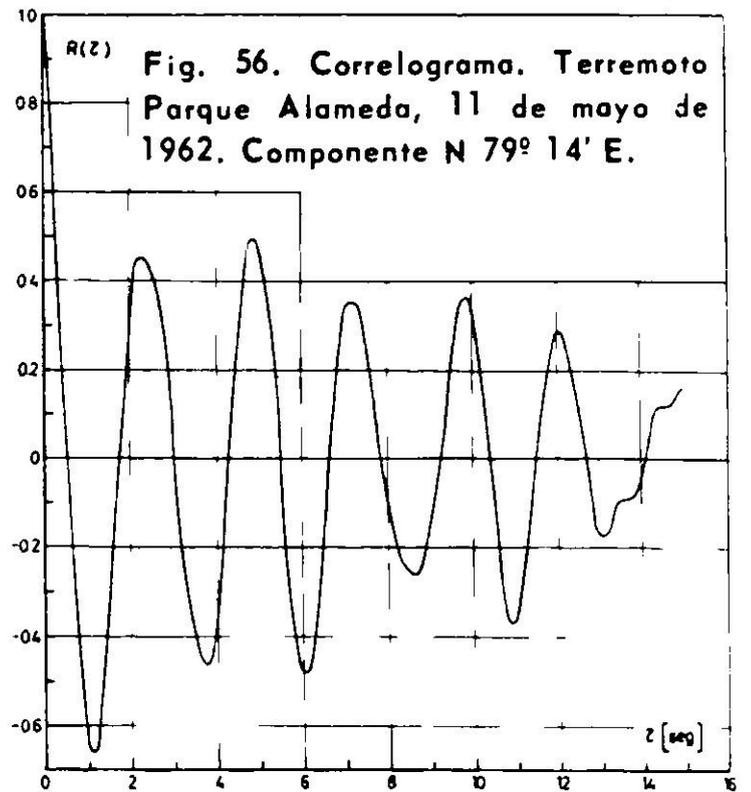
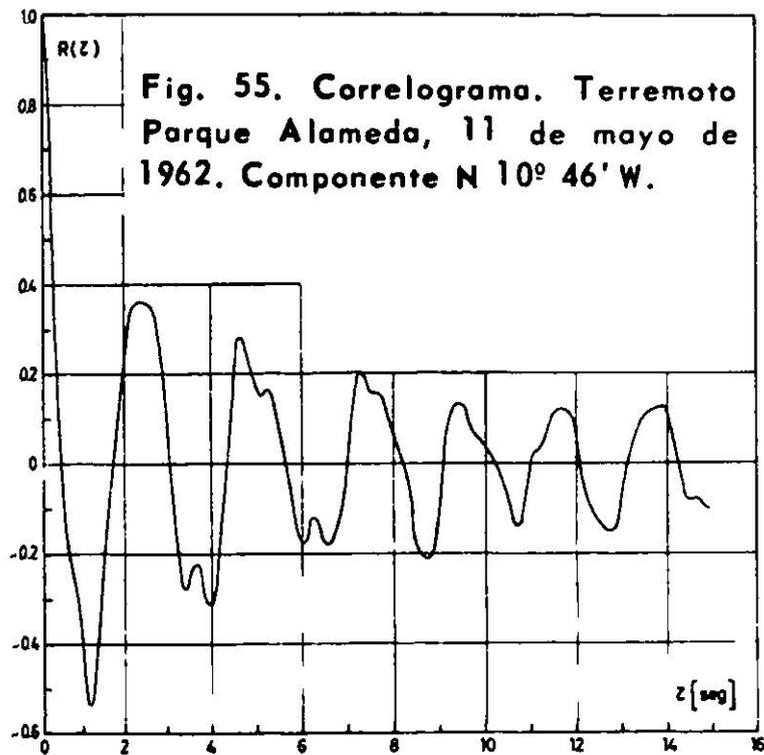
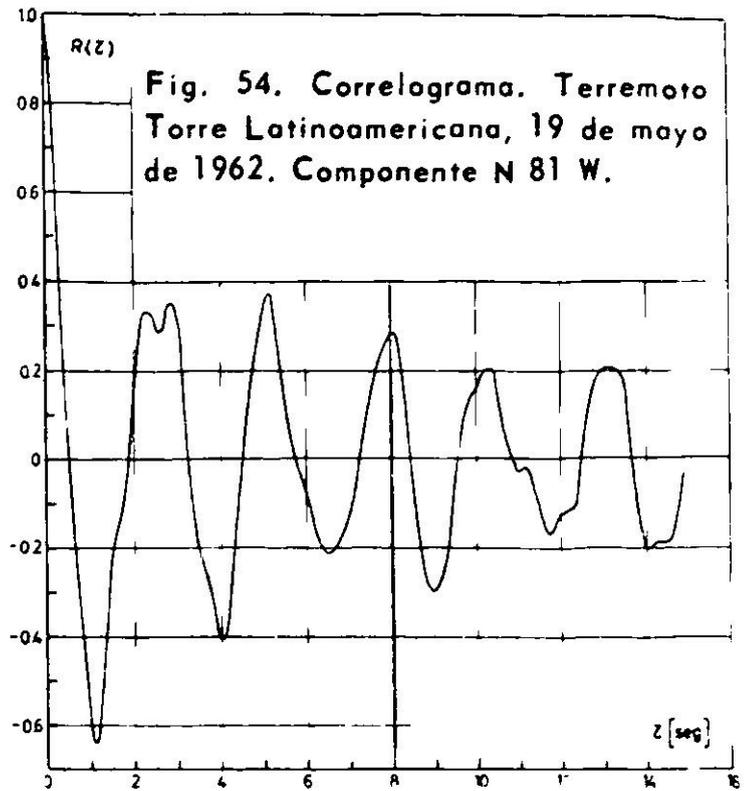
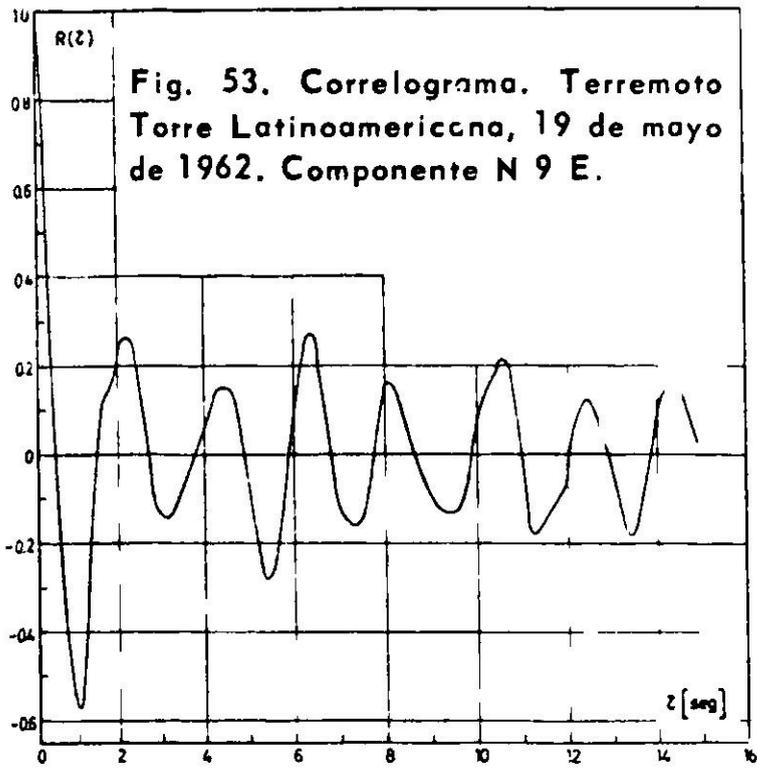


Fig. 52. Correlograma. Terremoto Torre Latinoamericana, 11 de mayo de 1962. Componente N 81 W.



## REFERENCIAS

1. GOMEZ, N. y SANTOLAYA, A. *Análisis espectral de terremotos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1969.
2. GUILOFF, R. y ROIZEN, S. *Análisis espectral de terremotos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1969.
3. HUSID, R. Características de terremotos. Análisis general, *Revista del IDIEM*, vol. 8, nº 1, pp. 21-42.
4. HUSID, R., MEDINA, H. y RIOS, J. Análisis de terremotos norteamericanos y japoneses, *Revista del IDIEM*, vol. 8, nº 2, pp. 55-82.
5. CAMPUSANO, D. *Torsión en planta de estructuras de un piso sometidas a sismos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1968.
6. SARAGONI, G.R. *Análisis de la interacción dinámica suelo-estructura*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1968.
7. LEPE, J. y TORRES, R. *El péndulo de torsión en el análisis sísmico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1950.
8. ARIAS, A. y PETIT-LAURENT, L. Funciones de autocorrelación y densidades de potencia de acelerogramas de movimientos fuertes, *Revista del IDIEM*, vol. 3, nº 3, pp. 147-192, 1964.
9. JENNINGS, P.C. *Velocity spectra of the mexican earthquakes of may 11 and may 19, 1962*. Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, December 1962.

## ANALYSIS OF CHILEAN AND MEXICAN EARTHQUAKES

## SUMMARY:

*A part of the results of a study of chilean and mexican strong motion accelerograms are presented. For all the accelerograms the following quantities were determined: time of spectra, response spectra, Housner's intensity, Arias' intensity and the root mean square acceleration both as a function of time, and the correlograms.*

*Some of the results are compared with values published by other researchers. The differences encountered are due to the fact that the authours used a greater number of values for the undamped period of the structure.*