

CARACTERISTICA DE DURACION DEL MOVIMIENTO HORIZONTAL DEL TERRENO DURANTE TERREMOTOS*

Ricardo DOBRY*

Izzat IDRIS***

E. NG***

RESUMEN

Se examinaron desde el punto de vista de su aplicación en ingeniería las características de duración de las componentes horizontales de registros de terremotos obtenidos en el Oeste de EUA. En el estudio se incluyó un total de 84 acelerogramas, correspondientes a un rango de magnitudes, M, entre 4.7 y 7.6, y a distancias al origen entre 0.1 km y 130 km. Las condiciones locales del subsuelo en las estaciones consideradas varía desde roca a arcilla blanda. Se usó como definición de la duración significativa, D (s), el tiempo necesario para que se desarrolle entre el 5 y el 95^o/o de la intensidad de Arias del registro: $I_A = \pi/2g \int_0^{t_f} a^2(t)dt$ (t_f = duración total del registro). Para estaciones en roca, se obtuvo una correlación consistente entre D y M: $\log D = 0.432 M - 1.83$. Para estaciones en suelos, D presenta una dispersión mucho mayor, siendo la duración en la roca una cota inferior.

* Este artículo se publica con autorización del Bulletin of the Seismological Society of America, donde fue publicado originalmente en el vol. 68, pp. 1487 - 1520, octubre 1978.

** Profesor del Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.

*** Ingenieros de Woodward-Clyde Consultants, San Francisco.

Los acelerogramas y sus diagramas asociados de Husid, $I_A(t)/I_A(t_f)$, se analizaron detalladamente. Se encontró que la duración total de rotura en la falla, d , es un parámetro fundamental que controla la duración del movimiento del terreno, medida por D . Los registros en roca presentan una parte fuerte dominante de duración, Δ , que corresponde aproximadamente a una recta en el diagrama de Husid, y $\Delta \leq D$. Esta parte fuerte coincide aproximadamente con las llegadas de las ondas S que siguieron una trayectoria directa entre la falla de origen y la estación (ondas S directas). Tanto el valor de Δ como el de D dependen principalmente de la duración de la rotura en la falla, d , para $M \leq 7$. Muchos acelerogramas en suelos presentan, además de esta parte fuerte, otra parte final de aceleraciones moderadas y períodos más largos, la que aparece después de la llegada de las ondas S directas. Esta parte de período largo es responsable del aumento de los valores de D observados para los registros en suelo, y también de la forma curva del diagrama de Husid en muchos registros en suelos. Esta parte contribuye también en forma importante al mayor contenido de períodos largos observados en el movimiento del suelo por diversos investigadores. Se presentan y discuten algunas evidencias que sugieren que esta parte de período largo puede deberse a la amplificación por el suelo de ondas P o S de trayectoria indirecta, así como a efectos de ondas superficiales.

INTRODUCCION

La caracterización ingenieril de los movimientos sísmicos del terreno durante terremotos requiere definir el nivel de la vibración, su contenido de frecuencias y la duración significativa del movimiento. La ingeniería sísmica moderna ha reconocido desde un comienzo la importancia del nivel y del contenido de frecuencias del movimiento. El contenido de frecuencias se define mediante la forma del espectro de respuesta, en tanto que el nivel del movimiento se ha definido por parámetros tales como la aceleración máxima del terreno o la intensidad espectral de Housner. Se han publicado una cantidad de estudios de registros sísmicos que incluyen valores promedio y rangos de variación del nivel

y del contenido de frecuencias S de la vibración, así como la influencia que en estos parámetros tienen la magnitud del terremoto, la distancia al origen y las condiciones locales del subsuelo^{1 a 8}.

Sobre la duración hay menos trabajo hecho y la mayor parte es relativamente reciente. Hace unos 10 años se conoció explícitamente la importancia de este parámetro en la licuación de depósitos de arena saturada, y se desarrollaron procedimientos de evaluación y diseño que incorporaban la duración, medida por el número de ciclos equivalentes de las oscilaciones del terreno^{9, 10, 11}. Experiencias de terremotos ocurridas en la última década han dejado en claro que una mayor duración del movimiento sísmico aumenta en forma importante el daño sufrido por estructuras y suelos. El análisis de los registros obtenidos en el terremoto de 1966, en Parkfield, California, mostró que grandes aceleraciones y valores espectrales altos pueden estar asociados con poco daño a las estructuras si la duración del movimiento es breve^{1 2}. La falla por licuación del relleno hidráulico del talud de aguas arriba de uno de los tranques en la zona epicentral durante el terremoto de San Fernando, California, en 1971, parece haber ocurrido cerca del final del movimiento, y comprometió el talud hasta unos 2 metros por debajo del coronamiento del tranque. Si la duración hubiera sido más breve la falla no se habría producido; si hubiera sido más larga, se habría producido una inundación catastrófica de una zona densamente poblada^{1 3}. Junto a estas experiencias, una serie de estudios analíticos y experimentales han demostrado y cuantificado la importancia que la duración tiene en:

- a) el daño y la probabilidad de colapso de la estructura una vez que los esfuerzos sísmicos superan el límite de fluencia^{1 4},
- b) la magnitud del asentamiento sísmico, y el potencial de licuación de los suelos granulares^{1 5, 1 6}.

Hasta ahora, tradicionalmente la intensidad o severidad global de un terremoto en un lugar se ha identificado con el nivel de la vibración, y por lo tanto se ha usado un solo número para definir la intensidad. Algunos de los parámetros utilizados con este objeto son: Intensidad de Mercalli Modificada, Intensidad Espectral de Housner, aceleración máxima del terreno, Intensidad de Arias^{1 7, 1 8}. Recientemente, Housner^{1 2} propuso tomar en cuenta la importancia de la duración y definir la severidad de la vibración por la combinación de dos parámetro, uno que describe el nivel y el otro la duración del terremoto.

La especificación de las características de duración de los terremotos es necesaria para seleccionar registros sísmicos representativos de entrada para los estudios de respuesta de suelos y estructuras. La duración es también parte importante del enfoque probabilístico usado para calcular respuesta, incluyendo la generación de acelerogramas artificiales. La especificación correcta de la duración del movimiento es especialmente importante cuando se estudian sistemas no lineales. Usualmente los cálculos de respuesta sísmica de suelos y estructuras suponen un comportamiento tensión-deformación lineal o lineal-equivalente de los materiales implicados, lo que permite aplicar el principio de superposición

y realizar los cálculos sea en el dominio de frecuencias o en el de los tiempos. Los efectos no lineales se introducen en forma indirecta, usando métodos aproximados tales como el sistema lineal equivalente usado en suelos^{19 a 21} o las ecuaciones que usan la razón de ductilidad para corregir el espectro de respuesta en diseño estructural²². En los sistemas lineales se ha puesto más énfasis en el nivel y contenido de frecuencias del registro de entrada, en el entendido de que estos parámetros son más importantes que la duración en la determinación de la respuesta. Por otra parte, si se hace un cálculo realmente no lineal de la respuesta la situación es muy diferente. Al respecto, es necesario destacar que las técnicas analíticas no lineales en suelos se han desarrollado rápidamente en los últimos tiempos^{23 a 27}. Estos cálculos no lineales deben hacerse necesariamente en el dominio de los tiempos, y ellos tienen la capacidad inherente de calcular cambios acumulativos con el tiempo durante la sollicitación sísmica, de parámetros de falla importantes tales como el exceso de presión de poros en una arena saturada^{28, 29}, la degradación del módulo en una arcilla blanda^{27, 30} y el movimiento descendente de un talud³¹. Cuando se hacen estos cálculos es fundamental que el acelerograma de entrada tenga características de correcta duración.

Varios investigadores han hecho estudios sobre la duración significativa, y Bolt³² y Trifunac y Brady³³ los han resumido. Hay consenso general de que la duración aumenta con la magnitud del terremoto, debido a las mayores dimensiones de la falla de origen y al correspondiente mayor tiempo de rotura de la misma. La Fig. 1 muestra relaciones entre magnitud y duración propuesta por varios autores. Las curvas que allí aparecen son el resultado del estudio de un número limitado de registros, combinado con varias definiciones de duración significativa. Trifunac y Brady³³ introdujeron una nueva definición y calcularon la duración significativa de más de 300 acelerogramas; estos autores estudiaron la influencia que tienen la magnitud, la distancia epicentral y el tipo de geología local sobre la duración. En el estudio citado se hicieron análisis de regresión lineal múltiples para establecer las relaciones cuantitativas entre esas variables y la duración; algunos de los resultados se resumen en la Fig. 2. Se encontró que, en promedio, la duración aumenta tanto con la magnitud como con la distancia y también que la duración es mayor en suelo que en roca. Sin embargo, la dispersión de los resultados fue muy grande. La desviación estándar (supuesta constante e independiente de la distancia y de la geología de la estación) fue $\sigma = 10.7$ s, suficientemente grande como para encubrir el efecto de las otras variables, ver Fig. 2.

Un problema mencionado por Trifunac y Brady³³ es la carencia de información detallada del subsuelo para muchas de las estaciones. Sólo muy recientemente se ha acumulado suficiente información sobre el subsuelo de esos sitios. Parte de esta nueva información, resumida por Seed et al^{7,8}, se usa extensamente en este trabajo. Algunas de las conclusiones presentadas aquí se incluyeron en un artículo anterior³⁴.

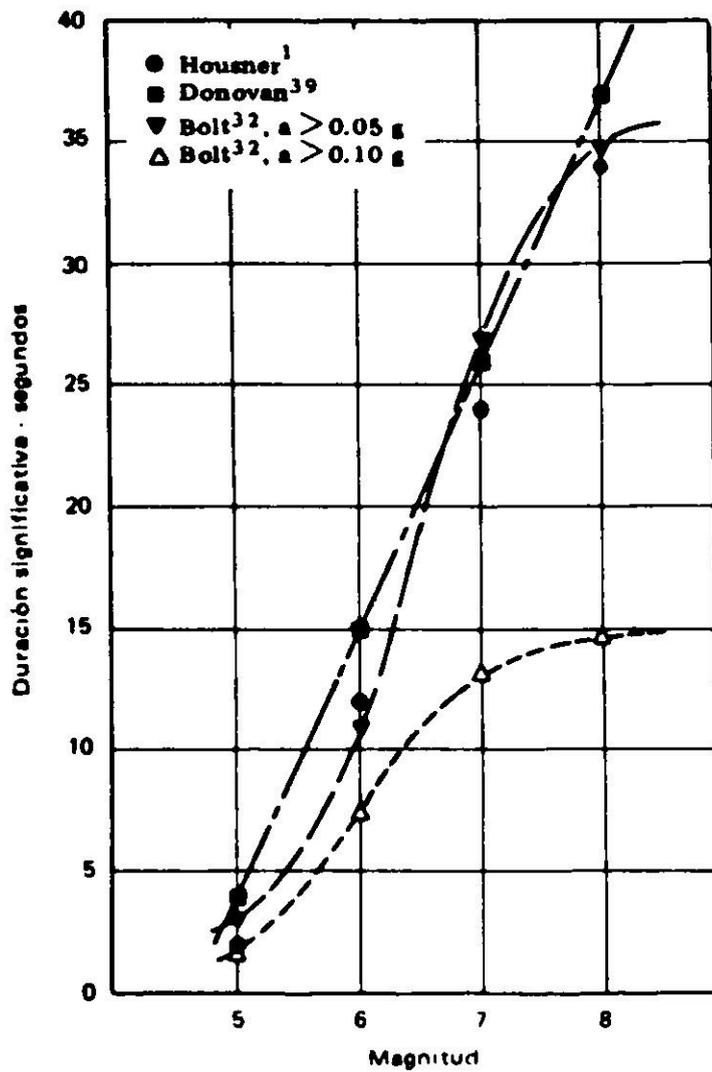


Fig. 1. Relaciones típicas entre magnitud y duración significativa.

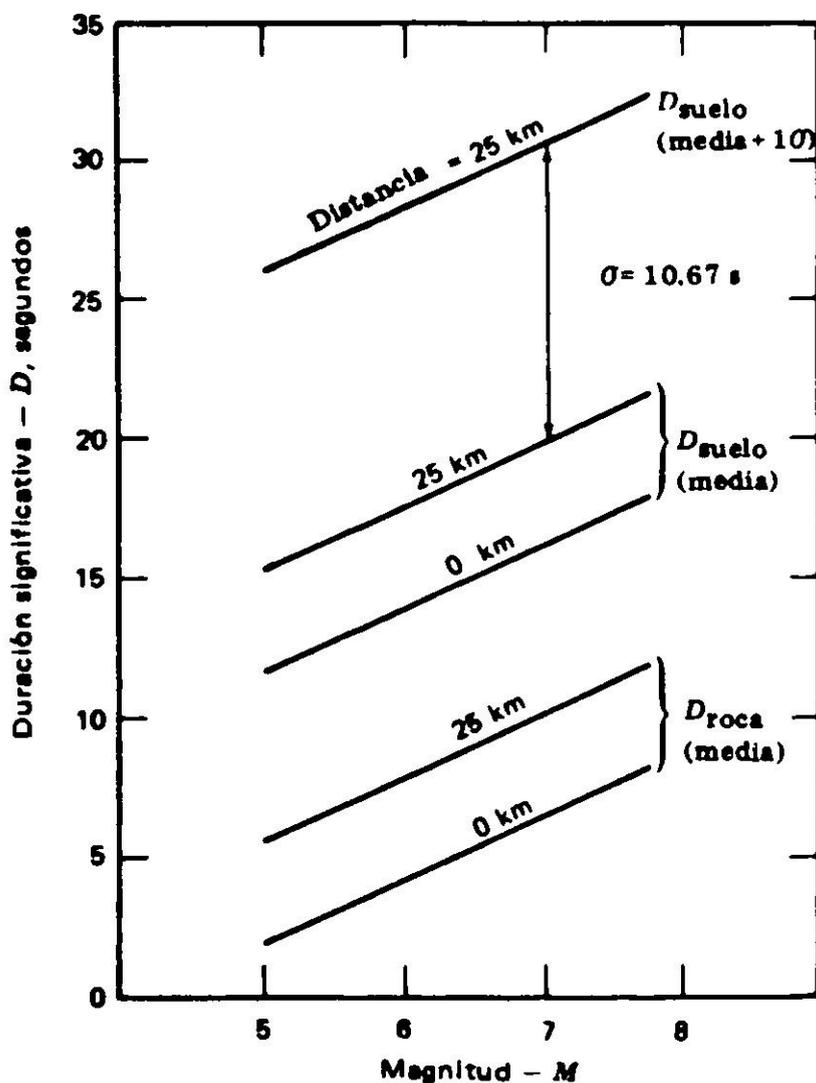


Fig. 2. Influencia en la duración significativa de la magnitud, distancia al epicentro, y geología local, según Trifunac y Brady³³.

DEFINICION DE LA DURACION SIGNIFICATIVA DEL MOVIMIENTO SISMICO

Se han propuesto varias definiciones de la duración significativa de un registro, pero todavía no se ha adoptado ninguna en forma general. La mayoría de ellas se expresa en unidades de tiempo, aunque también se ha desarrollado otra definición en términos del número de ciclos equivalentes para problemas relacionados con licuación y resistencia de suelos^{1 1}. Bolt^{3 2} definió la *duración acotada* de un acelerograma, como el tiempo transcurrido entre la primera y última excursión mayor que un cierto nivel. Bolt propuso niveles de 0.05 g o 0.10 g, tal como se ilustra en la Fig. 1. En esta definición, la duración acotada de un acelerograma depende de los valores numéricos de aceleración del registro, y para todo registro de aceleración máxima menor de 0.05 g la duración así definida es cero. En cambio, en otras definiciones discutidas más adelante, solo importa la forma del registro, y la duración es independiente de los valores absolutos de la aceleración. Es probable que ninguna definición sea igualmente útil para todos los registros y para todos los problemas de ingeniería sísmica; sin embargo, para algunos propósitos se necesita una definición tal que sea relevante dentro del rango más amplio posible de aplicaciones prácticas.

Si todas las partes de un acelerograma tuvieran el mismo nivel de vibración, la duración significativa del registro coincidiría con su duración total. Este es el caso, por ejemplo, de acelerogramas artificiales que son muestras de un proceso aleatorio estacionario^{3 5}. Los registros reales, sin embargo, tienen partes más fuertes y más débiles, como lo ilustra la componente S9OW registrada en el Blvd. Lankersheim 3838, San Fernando, 1971 que se muestra en la Fig. 3a. En este acelerograma se pueden distinguir a lo menos tres partes: a) una parte inicial débil, entre 0 y alrededor de 3 segundos; b) una parte fuerte entre 3 y 7-9 segundos, y c) una parte final débil posterior a los 9 segundos. Para muchos propósitos parece razonable considerar como la duración significativa de este registro la de la parte fuerte, ya que en la mayoría de los casos la influencia de las partes inicial y final serán despreciables. Pero, ¿cuál es la duración significativa de un registro como el de la Fig. 3b, obteniendo en Blvd. Ventura 15910 en el mismo terremoto de 1971, en San Fernando? En este registro se observan también 3 partes: a) una débil entre 0 y alrededor de 5 segundos; b) una parte fuerte de alta frecuencia entre alrededor de 6 y 11 segundos y c) una parte mediana de baja frecuencia (período largo) después de 11 segundos, la que se atenúa a alrededor de 30 segundos. La diferencia principal entre los dos acelerogramas de la Fig. 3 es la parte mediana, de baja frecuencia, c), del registro de Ventura que reemplaza a la parte final débil del registro de Lankersheim. Cualquier definición de duración significativa debe incluir por lo menos la parte fuerte b) de ambos registros. Si se incorpora o no la parte mediana c) de un registro tal como el de Ventura, dependerá en principio de la contribución que tal porción del acelerograma pueda hacer el desarrollo de la falla de sistemas de ingeniería.

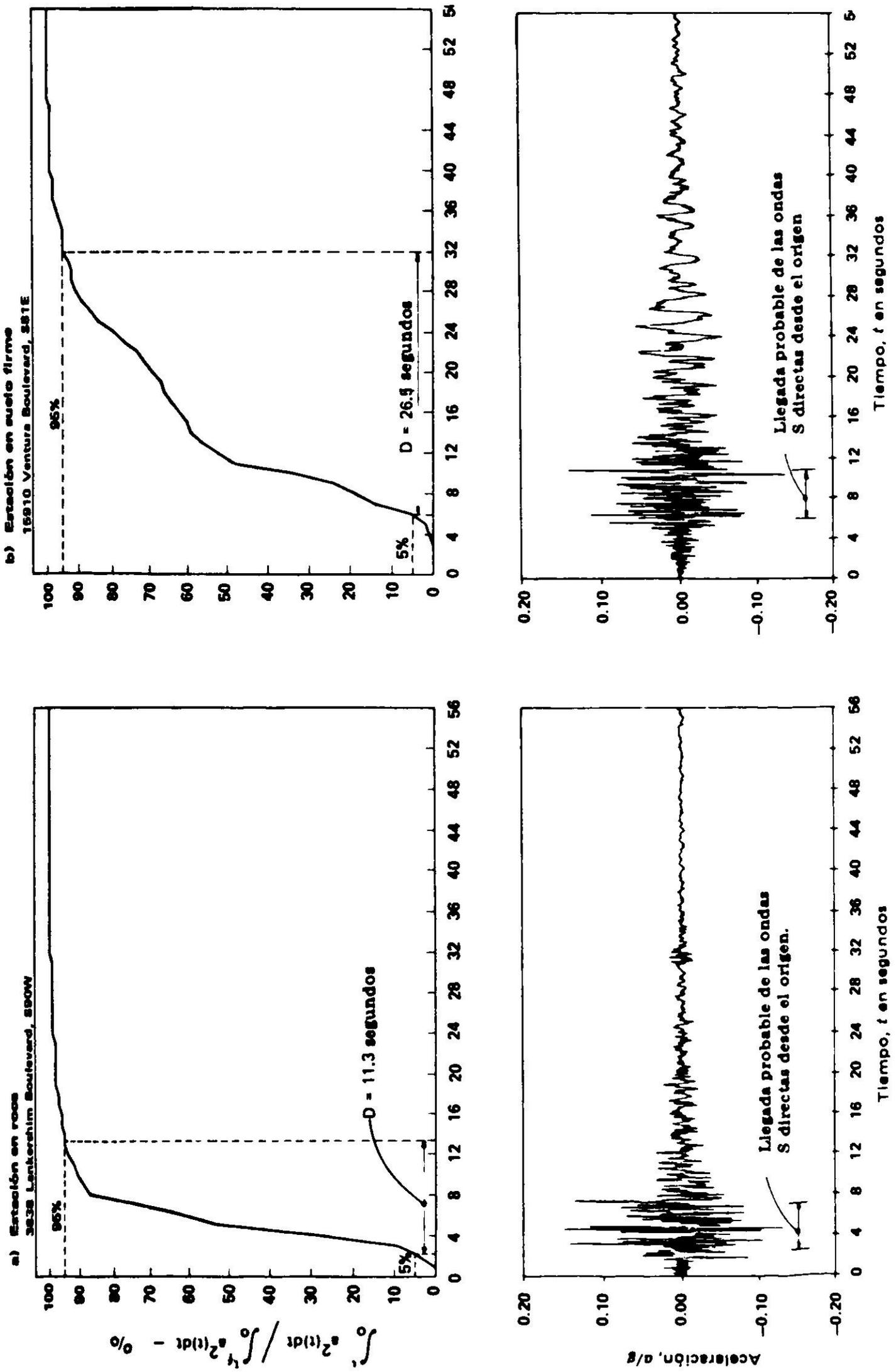


Fig. 3. Comparación de diagramas típicos de Husid y duraciones significativas para estación en roca y estación en suelo (terremoto de San Fernando, 1971).

Es conveniente cuantificar la variación del nivel de vibración con el tiempo, t , usando el desarrollo de la integral $\int_0^t a^2(t)dt$, en que $a(t)$ es la historia de la aceleración con el tiempo. Arias¹⁶ mostró que esta integral es una medida de la energía del acelerograma y propuso definir la intensidad del registro completo por I_A : $I_A = \pi/2g \int_0^{tf} a^2(t)dt$, en que I_A es la intensidad de Arias y tf la duración total del registro.

Husid³⁶ propuso trazar el desarrollo de esta energía con el tiempo, para cualquier acelerograma dado, para estudiar la evolución del nivel de vibración del registro. Husid trazó $I_A(t)$ en función de t , que puede definirse como la variable normalizada $h(t)$:

$$h(t) = \frac{I_A(t)}{I_A(tf)} = \frac{\int_0^t a^2(t)dt}{\int_0^{tf} a^2(t)dt} \quad 1$$

$h(0) = 0$ al comienzo del registro y $h(tf) = 1.0$ (100%) al fin del registro; el diagrama de $h(t)$ con el tiempo se denomina aquí el diagrama de Husid. En la Fig. 3 se incluye la variación de $h(t)$ para los registros de Lankersheim y Ventura. Curvas similares fueron calculadas y trazadas por Husid³⁵ para muchos acelerogramas.

Husid³⁶, Housner¹² y Trifunac y Brady³³ hicieron notar que la pendiente de un diagrama de $\int_0^t a^2(t)dt$ con el tiempo es una medida directa del nivel de vibración del acelerograma. La pendiente media durante el intervalo $(t_0, t_0 + \Delta t)$, es la tasa de crecimiento de la energía del acelerograma. Housner denominó a esta pendiente la potencia, P , del terremoto:

$$P = \frac{1}{\Delta} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta} a^2(t)dt \quad 2$$

Una parte recta de duración Δ en el diagrama de Husid significa que el nivel de vibración, medido por el valor P , es constante durante esa etapa. Otra medida alternativa de este nivel de vibración es la raíz cuadrática media de la aceleración \bar{a} :

$$\bar{a} = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta} a^2(t)dt} \quad 3$$

El diagrama de Husid para el acelerograma de Lankersheim de la Fig. 3a puede aproximarse por una línea recta en el intervalo entre alrededor de 3 y 8 segundos, el cual define la parte fuerte del registro. Para un registro de este tipo, Housner sugirió tomar como duración significativa la de este intervalo lineal, Δ (≈ 5 s en Fig. 3a). Esta duración, en conjunto con la pendiente del diagrama de $\int_0^t a^2(t)dt$ con t , definiría la severidad del registro. Sin embargo, para un registro como el del Blvd. Ventura en Fig. 3b, la forma global del diagrama de

Husid se parece más a una curva suave que a una línea recta y se torna difícil identificar sin ambigüedad el par de parámetros de pendiente y duración representativos del acelerograma. Para tales casos, tal vez puede observarse una caracterización más completa del terremoto reemplazando el diagrama de Husid con varios segmentos de recta, cada uno definido por su pendiente y duración. Housner¹² hizo también una proposición similar para el caso de registros tales como éste.

Se han propuesto también otras definiciones más sencillas de la duración significativa, basadas en el diagrama $h(t)$. Husid^{36,38} usó inicialmente el tiempo en que $h(t)$ alcanza el valor 0.95 (95%) con el propósito de seleccionar la longitud de registro adecuada para el cálculo del espectro de respuesta. Sin embargo, en algunos casos encontró que la respuesta máxima ocurría después del 95% y en consecuencia propuso un criterio alternativo basado en el valor de la tangente de la curva, dh/dt . Similarmente, Donovan³⁹ definió como duración significativa el tiempo en que $h(t)$ alcanza 0.9 (90%). Trifunac y Brady³³ modificaron la proposición de Donovan y definieron la duración, D , como el intervalo de tiempo necesario para que $h(t)$ pase del valor 5% a 95% descartando así la mayor parte de la duración asociada con las partes débiles al comienzo y fin del registro. Esta definición da para un registro como el de Fig. 3a, en que domina la parte fuerte, una duración similar o algo mayor que la Housner ($D = 11.3$ s comparada con $\Delta = 5$ s), mientras que para el registro de Blvd. Ventura de Fig. 3b, el valor calculado $D = 26.3$ s es mucho mayor que Δ , porque en este caso D incluye tanto la parte fuerte como la parte mediana. Como se comentó más arriba la utilidad de tal definición de D para un registro como el de Ventura dependería de las contribuciones relativas de las partes fuerte y mediana al desarrollo de la falla en sistemas de interés. Esta contribución relativa, a su vez dependerá de los diferentes niveles de vibración y de la duración de cada una de estas partes, en su relación con el mecanismo potencial de falla y con los parámetros del sistema. El problema se complica aun más por el diferente contenido de frecuencias de las dos partes, lo cual debería aumentar la importancia de la parte moderada para el caso de estructuras de período largo. Para sistemas muy rígidos, sin embargo, como es el caso de estructuras de período corto y para carga sísmica del suelo a poca profundidad, este cambio en contenidos de frecuencia es mucho menos importante, ya que la historia de solicitaciones sísmicas que actúa en un sistema muy rígido es proporcional a las aceleraciones del terreno. En consecuencia, para estos sistemas las características de duración de la historia de solicitaciones y de aceleraciones del terreno son idénticas.

Es posible considerar varios mecanismos de falla desde el punto de vista de la variación en el tiempo del nivel de la vibración. En un extremo estaría el colapso de estructuras muy frágiles, en que sólo importa el valor máximo de la fuerza y el concepto de duración es poco relevante. En el otro extremo estarían los fenómenos de falla acumulativa asociados con cargas cíclicas,

incluyendo fallas de fatiga en estructuras, licuación de suelos granulares saturados, y degradación del módulo de arcillas blandas^{40,11,27}. La falla por fatiga o por licuación es el resultado de un proceso cuyos efectos se suman con el tiempo de aplicación de las cargas cíclicas, y la importancia relativa de las partes más fuertes y más débiles del acelerograma dependerán de la resistencia cíclica del material o del sistema. Otro mecanismo importante de falla acumulativa de estructuras parece estar asociado con la inclinación y eventual colapso, bajo la acción de la gravedad, después de una cierta duración de la carga, de estructuras cargadas más allá de la fluencia. La probabilidad de colapso aumenta con la duración del terremoto, en una forma que está relacionada con el nivel de la vibración del terreno. El tiempo promedio necesario para el colapso ha sido cuantificado para acelerogramas que tienen un nivel uniforme de vibración (correspondiente a una recta en el diagrama $h(t)$). Se ha encontrado que, para un modelo estructural dado, el colapso ocurre en promedio cuando la energía total del acelerograma del movimiento del terreno, $\int_0^t a^2(t)dt$, alcanza un cierto nivel. Esto parecería respaldar la definición de la duración significativa basada en el valor acumulado de $\int_0^t a^2(t)dt$ como es el caso de la duración D discutida más arriba. Sin embargo, sólo se ha hecho un número muy reducido de cálculos usando acelerogramas reales para este mecanismo de falla, y todavía no se entiende totalmente el mecanismo de desarrollo de la falla cuando la excitación está compuesta de partes sucesivas de diferentes características^{14,12,38}.

En este estudio se usó la definición de duración significativa, D , propuesta por Trifunac y Brady, para evaluar la influencia general de varios factores en la duración del movimiento del terreno. Además, se ha intentado explicar el origen de las partes sucesivas existentes en los acelerogramas considerados, en términos del mecanismo de falla y de las trayectorias seguidas por las ondas sísmicas antes de llegar a la estación.

METODO USADO

En este estudio se usó un total de 84 componentes horizontales de acelerogramas de terremotos fuertes registrados en el Oeste de EUA entre 1935 y 1972, y correspondientes a magnitudes entre 4.7 y 7.6 (ver Tabla 1). La mayor parte de los registros se obtuvieron de las publicaciones por Caltech⁴¹. El rango de las distancias entre la estación y el origen del sismo está entre 0.1 y 130 km y las aceleraciones máximas van de 0.02 g a 1.17 g.* Alrededor de la mitad de los acelerogramas se obtuvieron durante el terremoto de 1971 en San Fernando. Se usaron en el estudio sólo estaciones de las cuales se tenía información sobre las condiciones del subsuelo del lugar. La mayoría de los registros

* En la publicación original aparecen las características principales de los registros usados, a saber: terremoto, nombre de la estación, componente, magnitud, aceleración máxima, distancia al origen y duración significativa.

TABLA I
LISTA DE TERREMOTOS ESTUDIADOS

Terremoto	Magnitud	Fecha	N ^o de registros
Bear Valley	4.7	09 - 04 - 72	2
San Francisco	5.3	03 - 22 - 57	10
Lytle Creek	5.4	09 - 12 - 70	2
Ferndale	5.6	12 - 10 - 67	2
Parkfield	5.6	06 - 27 - 66	5
Hollister	5.6	04 - 08 - 61	1
Helena	6.0	10 - 31 - 35	2
Eureka	6.5	12 - 21 - 54	4
Lower California	6.5	12 - 30 - 34	2
Borrego Mountain	6.5	04 - 08 - 68	2
El Centro	6.6	05 - 18 - 40	2
San Fernando	6.6	02 - 09 - 71	42
West Washington	7.1	04 - 13 - 49	4
Kern Country	7.6	07 - 21 - 52	4
Total			84

usados fueron los mismos que Seed^{7,8} y Mohraz^{4,2} emplearon para estudios estadísticos de la forma del espectro, aceleración máxima y velocidad máxima del terreno. Las condiciones del lugar y las distancias al origen también se obtuvieron de esas referencias en la mayoría de los casos. Todas las estaciones se clasificaron en los cuatro grupos sugeridos por Seed et al⁷, a saber: a) estaciones en roca (velocidad de la onda de corte superior a 0.6 km/seg; b) estaciones en suelo firme (menos de 45 metros de espesor de arcilla dura, arena o grava sobre roca); c) estaciones en suelo granular profundo (más de 75 metros de suelos generalmente no cohesivos sobre roca); y d) estaciones en suelo blando a medio (arcillas blandas a medianas con algunas capas de arena o grava). La mayoría de los sitios en suelo considerados son del tipo b) o c) y se incluyeron solo tres estaciones en suelo blando a medio. Al comienzo de la investigación se hizo aparente que había diferencias importantes entre los registros en roca, por una parte, y los otros registros en los tres grupos de suelos, por la otra. En consecuencia se decidió estudiar los acelerogramas en roca primero y después considerar la influencia del suelo.

Se calculó la duración D , para todos los registros. Para la mayoría de los cálculos de D se usó la longitud total del registro de Caltech; sin embargo, en algunos casos la longitud se redujo para eliminar las réplicas. Para algunos de los registros en roca de San Fernando, 1971, se calculó también la duración, Δ , de la fase recta del diagrama de Husid y los resultados se presentan en la Tabla III. Para muchos de los acelerogramas se obtuvieron también los diagramas de Husid, y algunas de las curvas se presentan y discuten en este trabajo.

Además de D y Δ , es conveniente definir un tercer parámetro de duración: el tiempo total de rotura de la falla en el origen, d . A diferencia de D y Δ , que

miden la duración del movimiento en un lugar y que pueden variar de estación a estación, *d* es un parámetro de origen y tiene en principio un solo valor para un sismo dado.

DURACION EN ROCA: TERREMOTO DE SAN FERNANDO, CALIFORNIA, EN 1971

Se eligió este terremoto para un estudio más detallado de la influencia en la duración de la distancia al origen y de las condiciones del subsuelo del lugar. Este sismo tuvo una magnitud de alrededor de 6.6 y tuvo su origen en una falla inversa. La Fig. 4 es un mapa geológico del área afectada por el terremoto, que muestra también la ubicación de la traza superficial de la falla. Varios autores^{43 a 49} estudiaron el mecanismo de falla durante este terremoto y llegaron

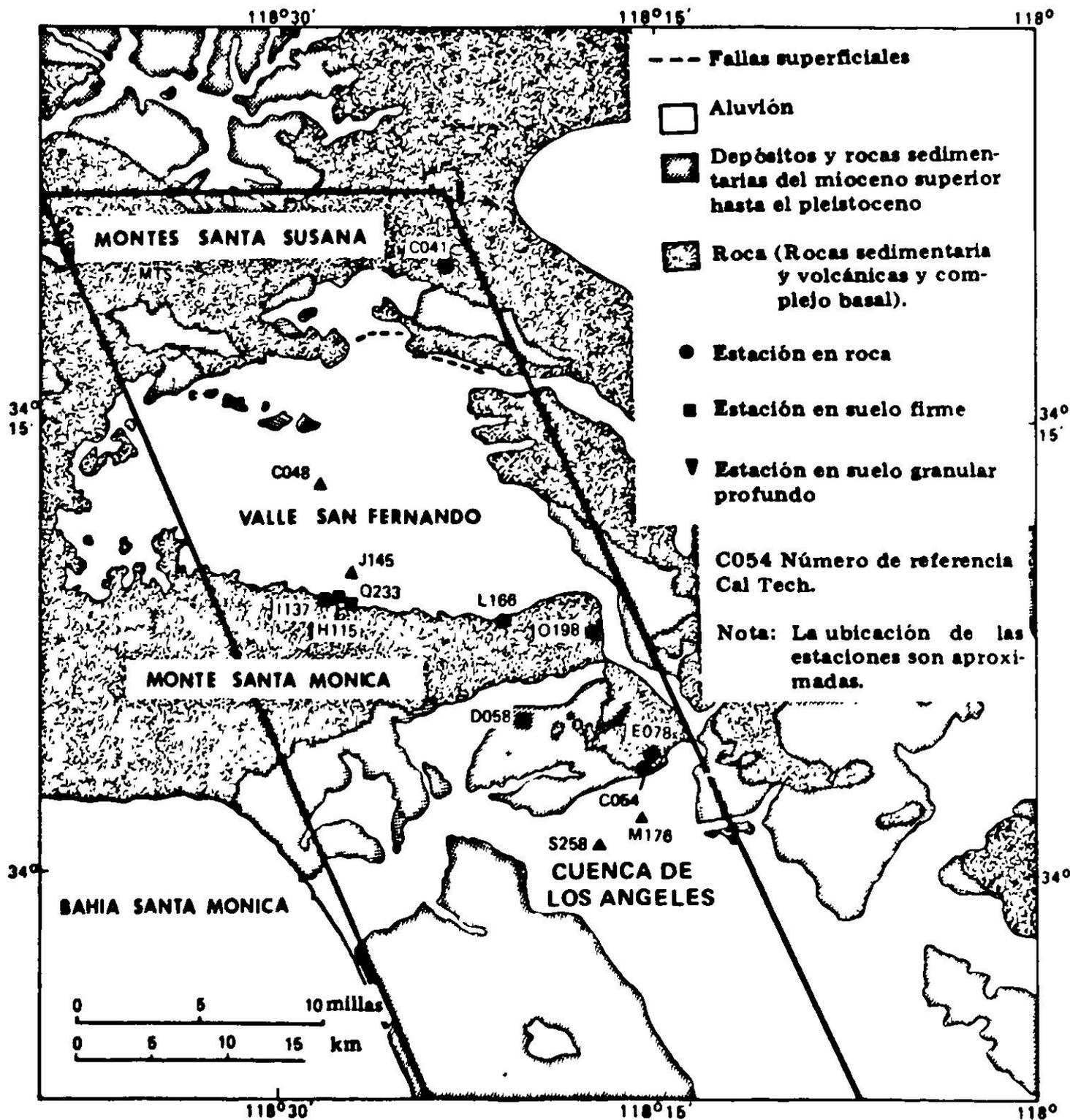


Fig. 4. Mapa geológico del Valle de San Fernando y Los Angeles y ubicación de las estaciones consideradas en este trabajo.

a conclusiones generales similares, las que se resumen en lo que sigue. La inclinación de la falla es hacia el noreste, y la rotura de la misma se produjo en una longitud total $L = 15$ a 23 km. La ruptura comenzó en el hipocentro, ubicado al norte de la traza superficial y a una profundidad de $10-15$ km, y se propagó hacia arriba y hacia el sur hasta llegar a la superficie. La velocidad de ruptura a lo largo de la falla, V , se estimó entre 2 y 3 km/s. Boore, Zoback, y Niazi concluyeron que V disminuyó algo a medida que la rotura se acercaba a la superficie (desde 2.5 a $1.5-2$ km/s). Los valores para la duración total de la rotura, d , obtenidos de esas referencias van de 6 a 9 segundos.

Para aislar el efecto de las condiciones del lugar y de la distancia, se consideraron en el estudio sólo estaciones situadas dentro de la zona mostrada en la Fig. 4, ya que Arnold et al⁵⁰ demostraron que los registros de San Fernando muestran diferentes características dependiendo del azimut entre la estación y el origen. Con excepción de la estación de Pacoima Dam (CO41) todas las estaciones de la zona de la Fig. 4 están ubicadas en el bloque inferior de la falla, al sur o suroeste de la traza superficial de la misma.

La Fig. 5 presenta la variación de la duración, D , con la distancia al origen, para todas las estaciones en roca de la Fig. 4. Hay una correlación consistente, en que D aumenta gradualmente con la distancia, desde alrededor de 7 segundos, muy cerca de la falla (Pacoima), a $12-15$ segundos, a 40 km de la falla de origen. La Fig. 6 muestra tres de los registros en roca obtenidos a diferentes distancias, y sus correspondientes diagramas de Husid. Los diagramas de Husid son muy

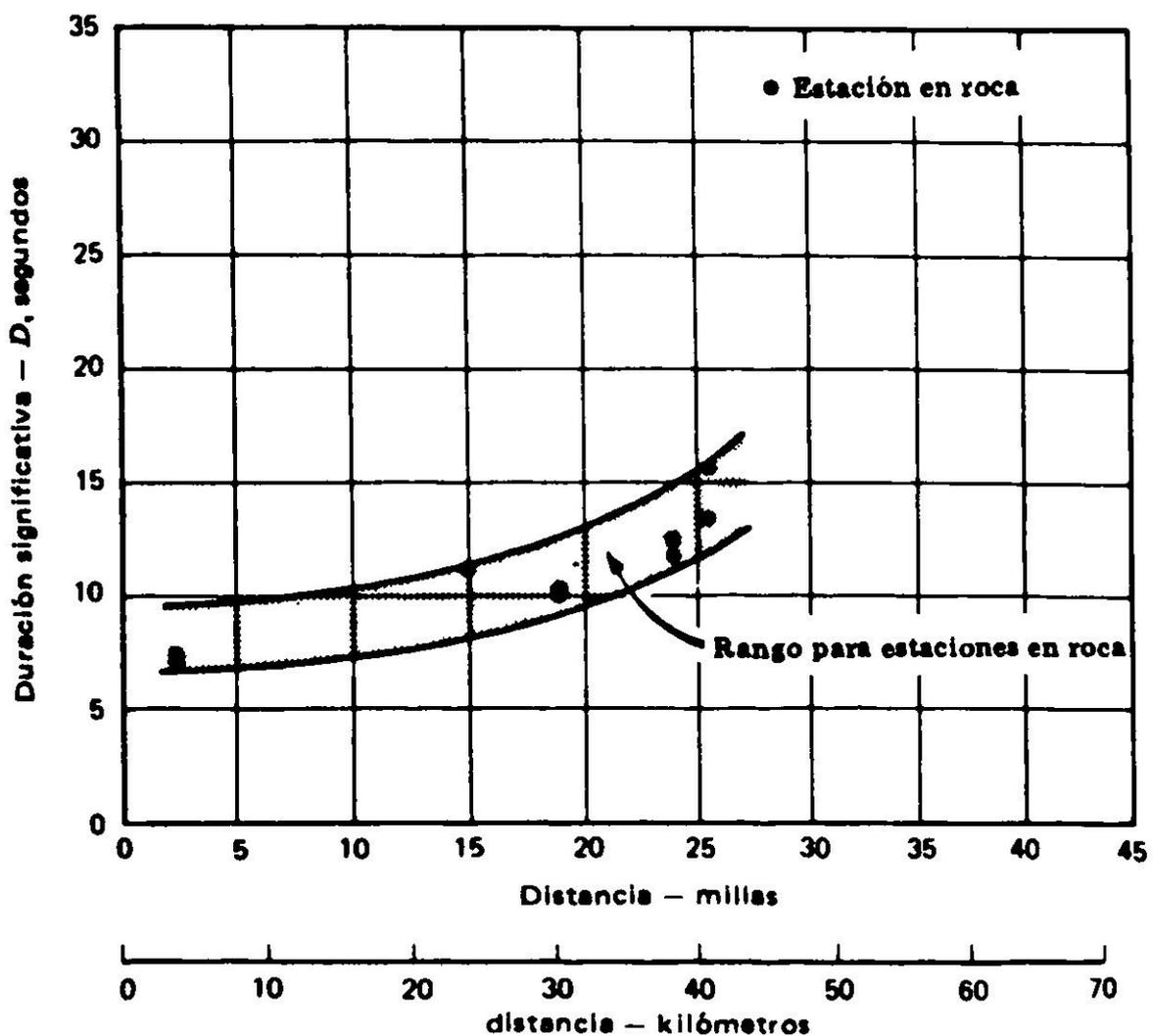


Fig. 5. Duración significativa, D , en función de la distancia al origen para estaciones en roca (terremoto de San Fernando, 1971).

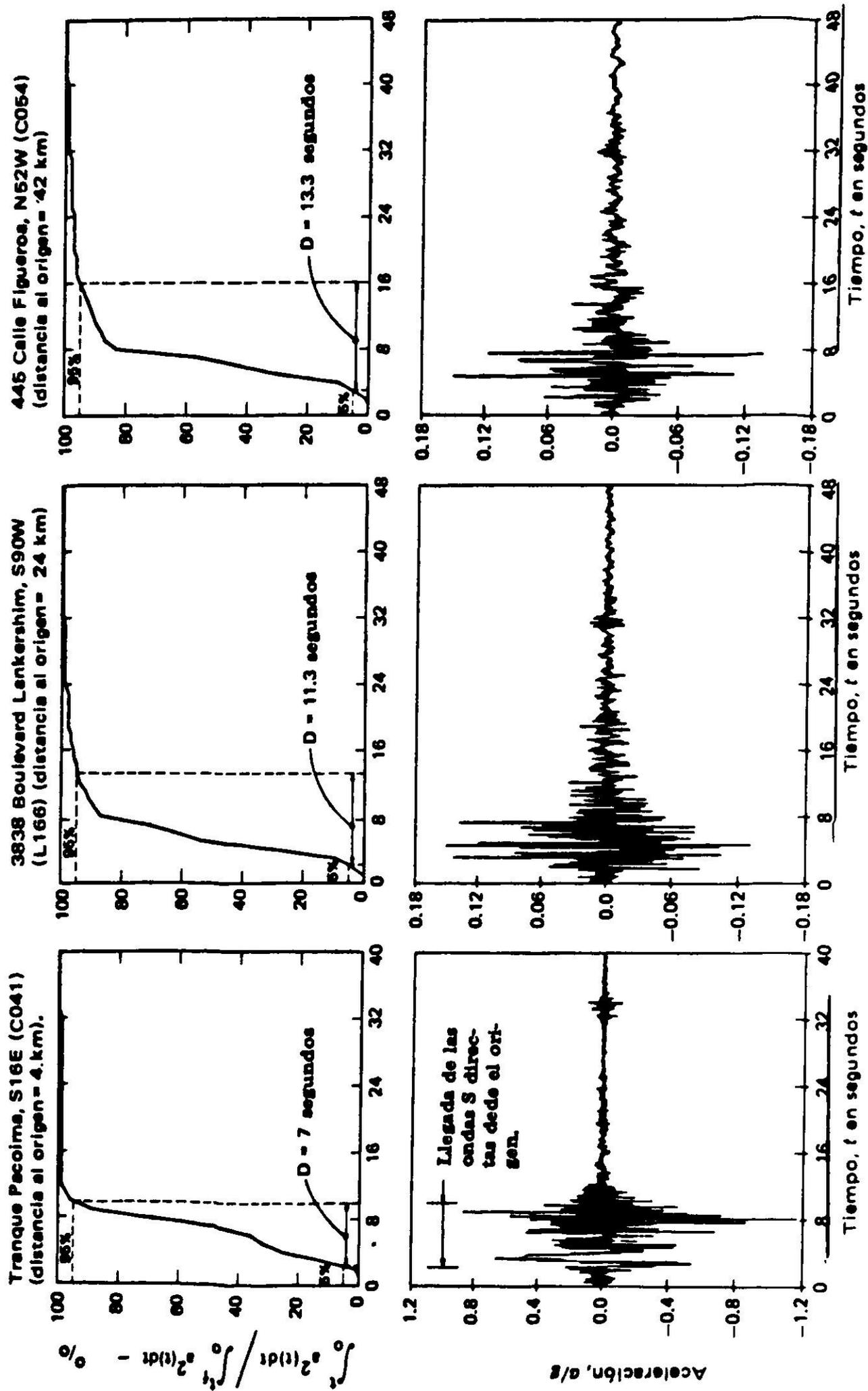


Fig. 6. Diagramas de Husid que ilustran los efectos de la distancia al origen en la duración significativa en roca (terremoto de San Fernando, 1971).

similares y aproximadamente rectilíneos, lo que indica un nivel constante de vibración durante la parte fuerte del terremoto. Este comportamiento rectilíneo abarca el 80-90% de la energía total de cada registro. Para el registro del Pacoima de la Fig. 6a, la duración asociada con la parte recta es aproximadamente $\Delta \approx D \approx 7$ segundos.

El registro de Pacoima es especialmente interesante, porque esta estación estaba directamente encima de la falla. La mayoría de los estudios sismológicos del mecanismo de falla del terremoto de San Fernando mencionados anteriormente han tratado de correlacionar las características del registro de Pacoima con el proceso de rotura en la falla. Una conclusión principal es que la duración de este registro fue controlado esencialmente por d , que mide el tiempo necesario para que la rotura se propague a lo largo de la falla desde el hipocentro hasta la traza superficial. A partir de algunas de las conclusiones más detalladas de los estudios sismológicos citados más arriba, se pueden distinguir tres partes en este acelerograma y en su diagrama de Husid mostrado en la Fig. 6a.

1. Parte débil, entre 0 y alrededor de 2 segundos. Esta parte corresponde a la llegada de ondas P directas. Presumiblemente el instrumento fue activado por la primera onda P.
2. Parte fuerte, entre alrededor de 2 y 7-9 segundos. Esta parte incluye ondas P y S, y es posible que también contenga la llegada de una onda superficial de Rayleigh a alrededor de 7.4 segundos^{4 y}. La duración de la parte fuerte ($\Delta = 5$ a 7 segundos) fue controlada principalmente por la llegada de ondas S directas, que siguieron una trayectoria directa entre la falla y la estación. Esta es la etapa del movimiento fuerte que puede reemplazarse por una línea recta en el diagrama de Husid, la que en este caso tiene duración, $\Delta \approx D \approx 5$ a 7 segundos. Para el terremoto de San Fernando, 6 a 7 segundos es también una estimación razonable de d en la falla. En consecuencia, en Pacoima la duración de la parte fuerte del movimiento fue aproximadamente igual al tiempo de rotura en la falla.
3. Parte débil, después de 9 a 10 segundos, en que probablemente predominan llegadas tardías de ondas P y S reflejadas y refractadas que siguieron trayectorias indirectas y múltiples entre el origen y la estación.

Esta división del registro de Pacoima en tres partes con un significado sismológico claro es muy útil para interpretar las características de duración del resto de los registros en roca en San Fernando. Los diagramas de Husid de los otros dos acelerogramas mostrados en las Figs. 6b y 6c (y otros que no se presentan aquí) contienen las mismas tres partes discutidas más arriba para Pacoima. La fracción de energía contenida en la tercera parte del registro tiende a aumentar con la distancia, probablemente debido al creciente número de refracciones y reflexiones, y puede que también a la aparición de las ondas superficiales a mayores distancias^{5 1}. Esta importancia creciente de la tercera parte del registro explica también el aumento de la duración D con la distancia mostrada en la Fig. 5. Parece una hipótesis razonable suponer que el valor de Δ

para los tres registros en roca de la Fig. 6 coincide con la duración de la llegada de las ondas S directas, y en consecuencia la duración de la parte fuerte debería estar controlada por: a) el tiempo de ruptura a lo largo de la falla ($d \approx 7$ segundos) y b) las distancias entre la estación y el comienzo (hipocentro) y fin (traza superficial) de la rotura en la falla, respectivamente.

DURACION EN ROCA: OESTE DE ESTADOS UNIDOS

El estudio de las características de la duración de los registros obtenidos en el terremoto de San Fernando en 1971, dentro de la zona marcada en la Fig. 4, se amplió a otros registros en roca del mismo terremoto y a otros terremotos ocurridos en el Oeste de Estados Unidos. El examen de muchos de estos registros muestra la existencia de una parte fuerte que es una recta en el diagrama de Husid, lo que es similar al comportamiento observado en los registros de roca en San Fernando.

Un ejemplo es el registro de Golden Gate N 10 E, obtenido en San Francisco en 1957 durante un terremoto de $M = 5.3$, el que se muestra en la Fig. 14a. Por lo tanto, es razonable concluir que una parte fuerte, rectilínea, con un nivel de vibración aproximadamente constante, parece ser una característica dominante de los registros en roca del Oeste de EUA, por lo menos para el rango de magnitudes considerado aquí. Tal como se hizo con los registros de San Fernando, parece también razonable generalizar las conclusiones obtenidas del registro de Pacoima y suponer que esta parte recta corresponde a llegadas de las ondas S directas. Si esto es cierto, la duración asociada con esta línea recta, Δ , será siempre primariamente una función del tiempo de rotura en la falla misma, d , y estará también influenciada por la ubicación de la estación en relación al comienzo y al final de la ruptura. Como corolario de lo anterior, la duración significativa, D , debería también depender fuertemente del valor de d .

Los valores de D se usaron para estudiar la influencia de la magnitud, M , sobre la duración significativa. Para determinar la forma probable de la función $D = f(M)$, se consideró primero la relación entre d y M , bajo el supuesto de que D y M están relacionados en forma similar. El tiempo total de rotura en el origen es aproximadamente igual a $d = L/V$, en que L es el largo total de la ruptura en la falla, y V la velocidad media de rotura. Las correlaciones existentes entre L y M sugieren que $\log L \propto M^{0.52 \text{ a } 0.55}$. Por otro lado, los pocos datos con que se cuenta sobre V sugieren que, para el rango de magnitudes usado en este estudio ($M \leq 7.6$), V es aproximadamente constante. Geller⁵⁵ presentó valores de V de 11 terremotos con magnitudes de onda superficial entre 5.8 y 7.4; en 9 de los 11 sismos, $2.3 < V < 3.0$ km/s. Todo esto sugiere una relación lineal entre $\log d$ y M , y también entre $\log D$ y M . Por lo tanto, se hizo una regresión lineal entre $\log D$ y M para los 26 registros en roca considerados.

Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.93 y los resultados de la regresión se muestran en la Fig. 7. La ecuación de la recta promedio en la Fig. 7 es

$$\log D = 0.43M - 1.83$$

0

4

$$D = 10^{(0.43 M - 1.83)_s}$$

y la que es válida para $4.5 < M < 7.6$. La desviación estándar calculada para $\log D$ es $\sigma = \pm 0.13$.

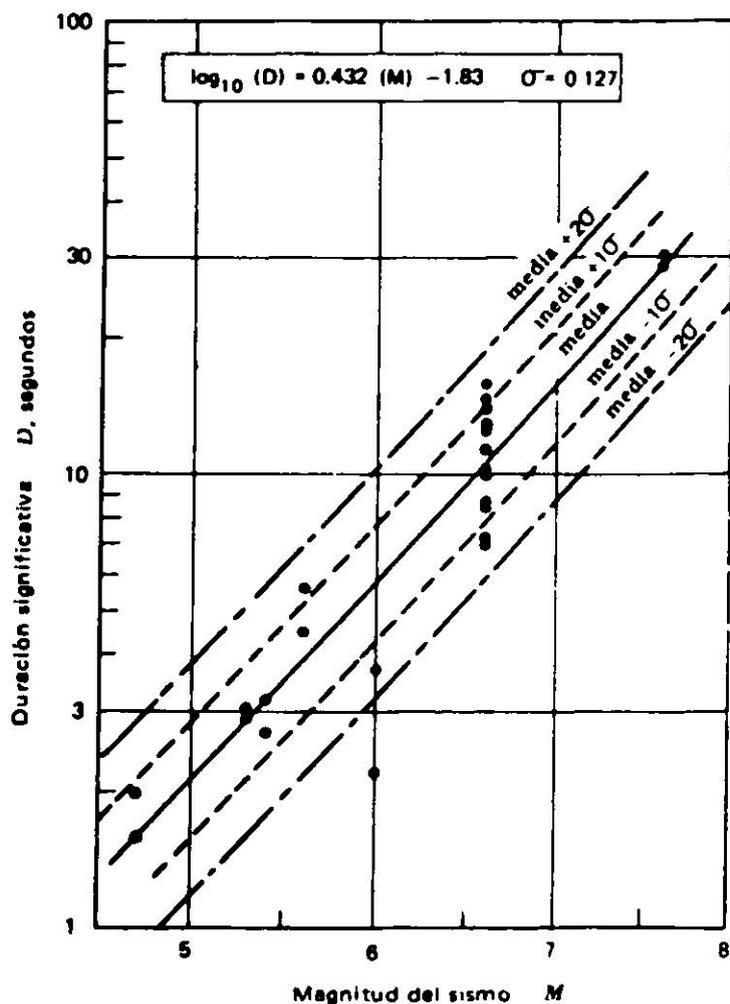


Fig. 7. Log D en función de M para estaciones en roca en el oeste de EUA.

La Fig. 8 presenta la misma correlación anterior en escala aritmética. En ella las dos curvas exteriores que definen el rango para lugares en roca corresponden a las líneas promedio $+ 2\sigma$ y promedio $- 2\sigma$ de la Fig. 7, respectivamente. Para visualizar mejor la influencia de la distancia, los puntos de la Fig. 8 se han presentado con símbolos diferentes según correspondan a distancias menores o mayores a 25 km del origen.

Las Fig. 7 y 8 muestran una relación consistente entre la duración significativa, D y la magnitud del terremoto para las estaciones en roca estudiadas. La duración esperada es alrededor de 2 a 3 segundos para un terremoto de magnitud 5, y aumenta a alrededor de 10 segundos para $M = 6.5$, y a 20 a 30 segundos para magnitudes mayores.

La correlación entre M y la longitud de rotura L en km propuesta por Patwardhan et al sobre la base del agrietamiento observado de la superficie del terreno y de la ubicación de las réplicas, es:

$$\begin{aligned} \log L &= (M - 2.88)/2.7 && \text{para } M < 6.4 \\ \log L &= (M - 5.13)/1.11 && \text{para } M > 6.0 \end{aligned} \quad 5$$

Si se estima la duración total de rotura, d , con la expresión $d = L/V$ con una velocidad media de rotura, $V = 2.5$ km/s, y la expresión resultante se combina con la correlación para L en la ec. 5, se obtienen las siguientes expresiones que relacionan d (s) con M :

$$d = \frac{1}{2.5} \times \left(10^{\frac{M - 2.88}{2.7}} \right) \quad \text{para } M < 6.4$$

$$d = \frac{1}{2.5} \times \left(10^{\frac{M - 5.13}{1.11}} \right) \quad \text{para } M > 6.0 \quad 6$$

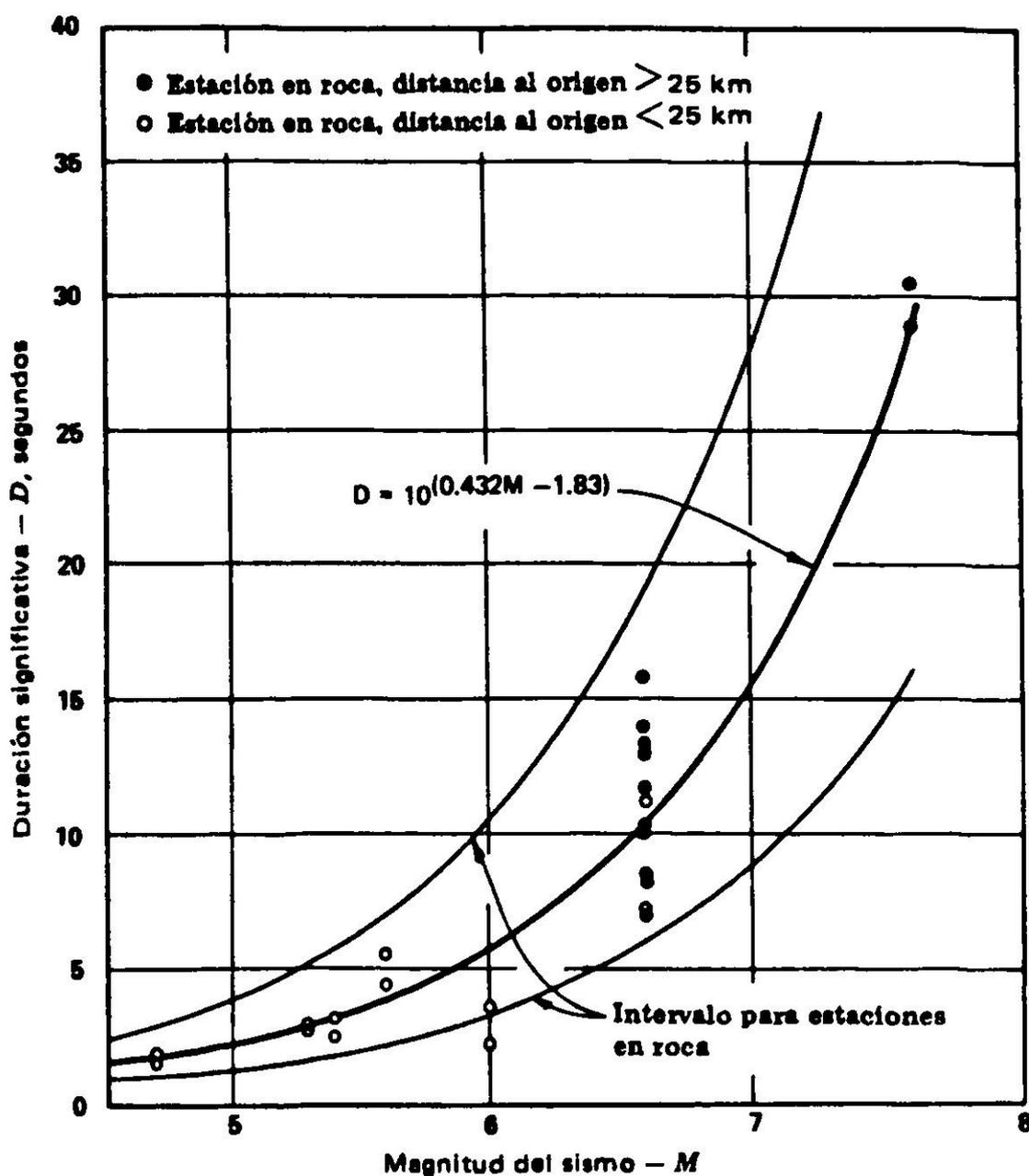


Fig. 8. D en función de M para lugares en roca en el oeste de EUA.

Estas expresiones para d se han dibujado en la Fig. 9, donde se comparan con la curva media para D de la Fig. 8. La comparación entre duración de rotura en el origen, d , y duración significativa de los registros en roca, D , es buena para $M < 7$, pero para $M > 7$, d aumenta mucho más rápidamente que D . Esto es

razonable, puesto que las longitudes de ruptura estimadas con la ec. 5 para $M = 7.0, 7.5$ y 8.0 son de alrededor de 50 km, 150 km y 400 km respectivamente. Para las distancias mayores, la energía generada por la ruptura de puntos distantes de la falla llegará fuertemente amortiguada a la estación, y no contribuirá por lo tanto a la duración significativa. Debido a esto, Bolt^{3 2} sugirió que la duración significativa no podía aumentar indefinidamente con la magnitud y que deberá estabilizarse a alrededor de 35 o 40 segundos. A esto corresponde la posible tendencia sugerida por la línea de puntos en la Fig. 9 para $M > 7.5$.

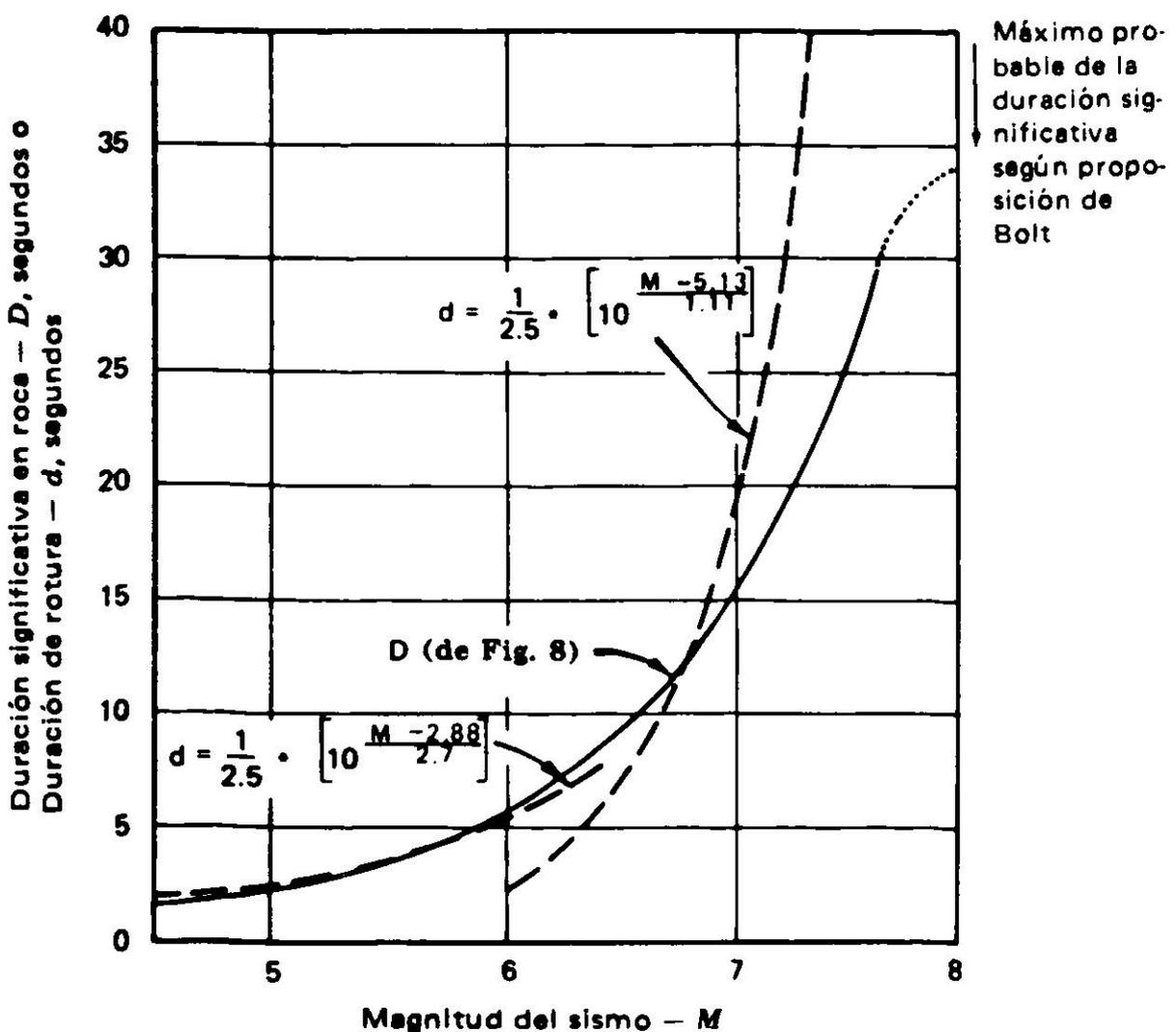


Fig. 9. Comparación entre la duración significativa, D , en lugares en roca y la duración de la ruptura en el origen, d .

La consistencia general de la correlación entre magnitud y D para roca, mostrada en la Fig. 8, puede entonces explicarse como resultado del aumento de la longitud de rotura a medida que la magnitud aumenta. La comparación de la Fig. 9 supone una velocidad de rotura aproximadamente constante y puede no ser válida para sismos que no avanzan uniformemente a lo largo de la falla, sino que consisten de una secuencia de dislocaciones separadas en el tiempo^{5 6}. En consecuencia, las Figs. 8 y 9 son consistentes con la suposición de que, para los terremotos considerados aquí, la rotura en la falla de origen fue un proceso esencialmente continuo.

DURACION EN SUELO

Se realizó para los registros obtenidos en lugares en suelo un estudio similar al presentado anteriormente para D en roca, y los resultados se presentan en las Figs. 10 a 15.

La Fig. 10 presenta la variación de la duración, D , con la distancia al origen,

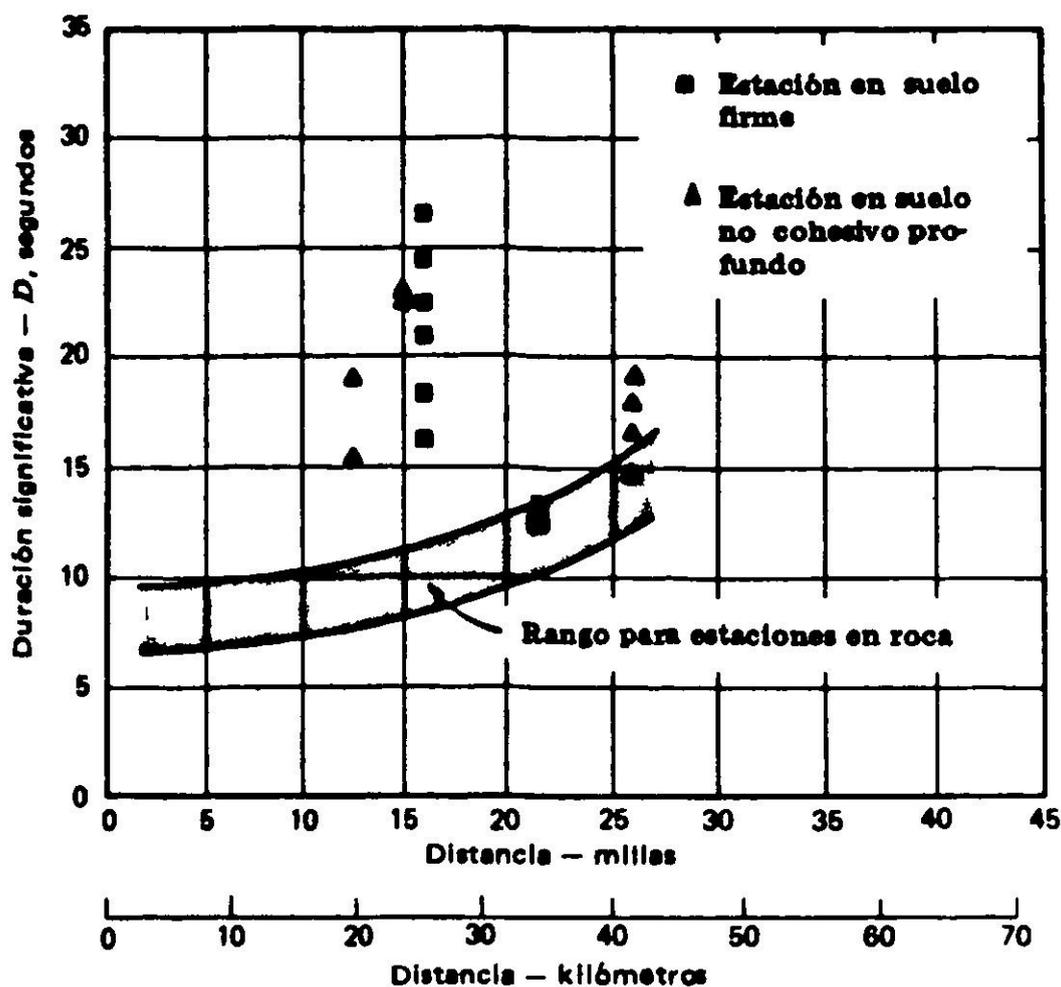


Fig. 10. Duración significativa, D , en relación con la distancia al origen para estaciones en suelos (terremoto de San Fernando, 1971).

para todos los registros del terremoto de San Fernando de 1971 obtenidos en estaciones en suelo de la Fig. 4. Para efectos de comparación, se ha incluido también en la Fig. 10 el rango obtenido en la Fig. 5 para los registros en roca. La Fig. 10 indica un comportamiento de la duración del movimiento sísmico en suelo muy diferente del de roca. Hay una considerable dispersión en los resultados, y la duración D en suelo no muestra una tendencia a aumentar con la distancia. Más aun, las mayores duraciones D se obtuvieron para las estaciones ubicadas sobre aluvión en el valle de San Fernando, de 12 a 16 millas del origen, mientras que los registros obtenidos al sur de las montañas de Santa Mónica, de 22 a 26 millas del origen, tienen duraciones algo más cortas. El rango de duraciones para los lugares en roca constituyen una cota inferior para la duración de acelerogramas en suelo, teniendo la mayoría de los registros en suelo de la Fig. 10 duraciones bastante por encima de ese rango.

Para entender mejor la razón de este comportamiento, se trazaron y estudiaron los registros en suelo y sus diagramas de Husid. La Fig. 11 presenta los

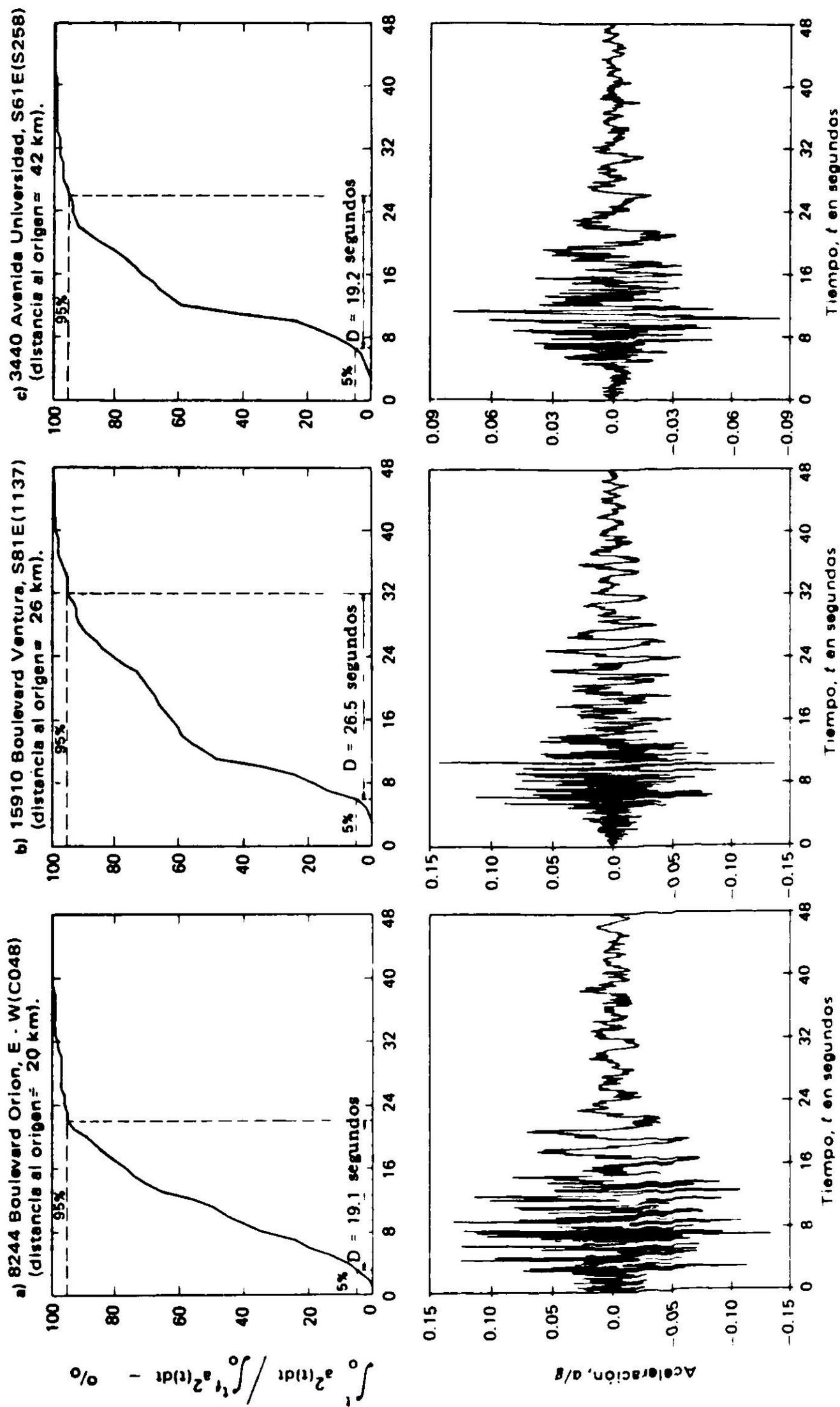


Fig. 11. Diagramas de Husid que ilustran los efectos de la distancia al origen en la duración significativa en suelos (terremoto de San Fernando, 1971).

diagramas de tres de estos acelerogramas en suelo. Dos de los registros corresponden a lugares de suelo granular profundo (Orion y University), mientras que el tercero (Ventura) se obtuvo en un lugar de suelo firme. Orion y Ventura están ubicados en el valle de San Fernando, mientras que University está en la Cuenca de Los Angeles. La comparación entre las Figs. 6 y 11 muestra que la diferencia principal entre los registros en roca y en suelo es la presencia de movimientos de período largo cerca del final de los acelerogramas en suelo, los cuales aparecen en los registros en roca. Los diagramas de Husid para suelo también difieren de los de roca. Mientras que el diagrama de Husid para el registro en suelo de Orion de la Fig. 11a tiene una forma predominantemente recta, similar a las que se obtuvieron en roca, los otros dos diagramas de Husid de la Fig. 11b tiene más bien la forma general de una curva cóncava. El examen de otros registros de suelos de las estaciones de la Fig. 4 (no presentados aquí) mostraron también la presencia de estos movimientos de período largo. Estos movimientos son claramente la causa de los altos valores de D en suelo comparados con las duraciones en roca. Además, los diagramas de Husid para esta serie de registros en suelo muestran una variedad de formas, tales como se ven en la Fig. 11.

En un registro en roca, como se hizo ver anteriormente en este trabajo, es posible identificar tres partes. La segunda parte, o parte fuerte, tiene un contenido de frecuencias relativamente alto, y corresponde aproximadamente a una recta en el diagrama de Husid; esta parte fuerte corresponde probablemente a la llegada de ondas S directas. El examen de los registros en suelos tales como los que se muestran en la Fig. 11, sugiere que esta parte fuerte también existe en los acelerogramas en suelos, pero que la tercera parte, o parte débil, observada en la roca es reemplazada en muchos registros en suelo por una parte moderada de período largo, la que tiene aceleraciones algo menores que la parte fuerte precedente. La importancia de esta nueva tercera parte en suelo varía grandemente de una estación a otra. Es muy prominente en todas las estaciones del valle de San Fernando, mientras que en las de la Cuenca de Los Angeles estudiadas aquí es algo menos significativa; la existencia de esta parte de períodos largos es dudosa en algunos registros en suelo, como el que se obtuvo en el lugar de suelo firme de Hollywood Storage P.E. Lot (Estación D058 en la Fig. 4).

Resulta interesante comparar el registro en suelo de la Fig. 11b (Ventura 58IE) con el registro en roca de la Fig. 6b (Lankersheim S90W) ya que ambas estaciones están de 15 a 16 millas del origen, y las dos componentes son prácticamente paralelas entre sí. La comparación se presenta en la Fig. 3. En el acelerograma en roca la parte fuerte tiene una duración de 4-6 segundos. En el acelerograma en suelo se puede también identificar una parte fuerte con características similares entre aproximadamente 6 y 10 - 12 segundos. En ambos registros esta parte fuerte está asociada presumiblemente con las llegadas de ondas S directas. Después de unos 12 segundos, la tercera parte de períodos largos y aceleraciones algo menores puede identificarse claramente en el registro en suelo, con el correspondiente achatamiento del diagrama de Husid. Estas conclusiones son

también válidas en general para los otros componentes horizontales de Ventura y Lankersheim, las que no se presentan aquí.

Se analizaron también los registros de otros terremotos para examinar las características de duración en lugares de suelo y roca. Se eligió el temblor de San Francisco de 1957, generado a lo largo de la falla de San Andreas y con una magnitud de alrededor de 5.3. En este terremoto se obtuvieron registros en un lugar en roca (G.G.P.), en tres lugares de suelo firme (A.B., S.B. y O.C.H.), y en un lugar de suelo blando a medio (S.P.B.) véase Fig. 12. La Fig. 13 presenta el

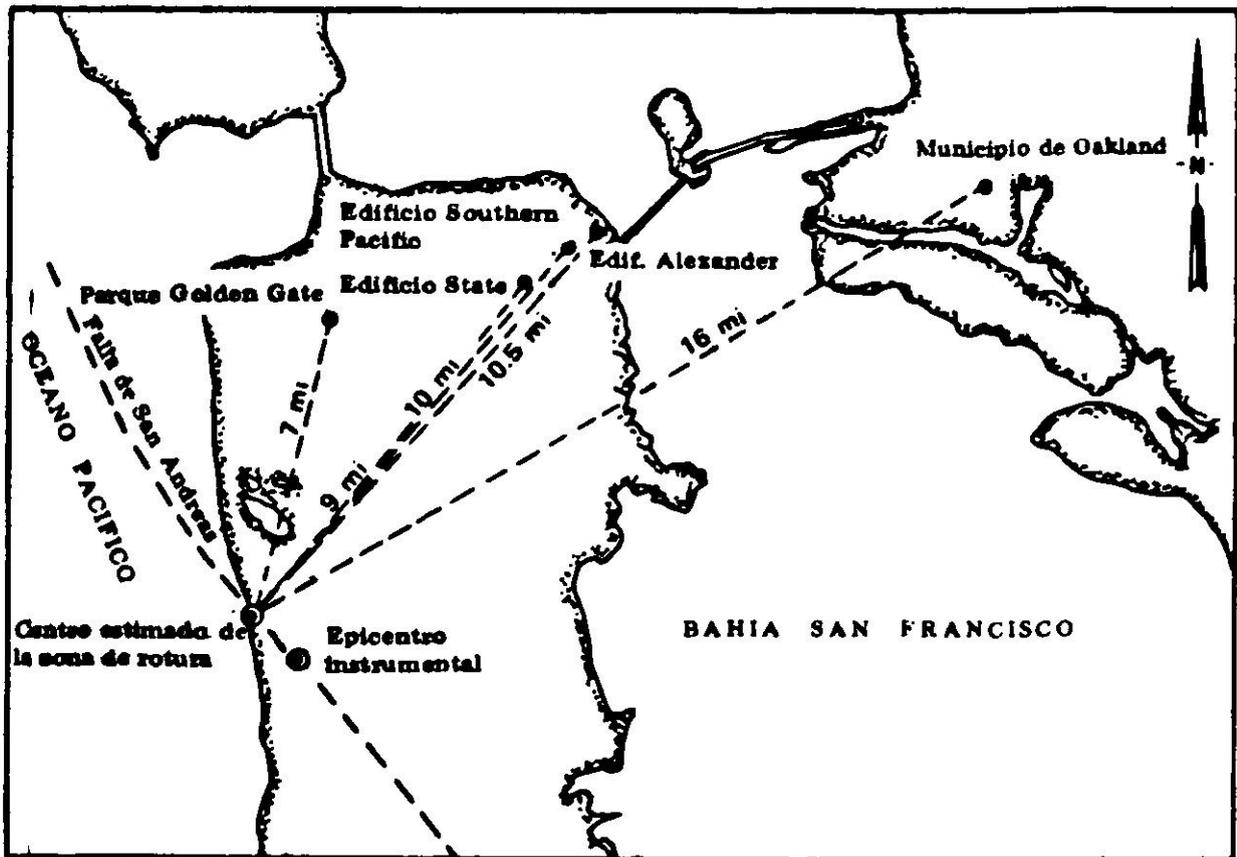


Fig. 12. Ubicación de las estaciones, terremoto San Francisco, 22 de marzo de 1957.

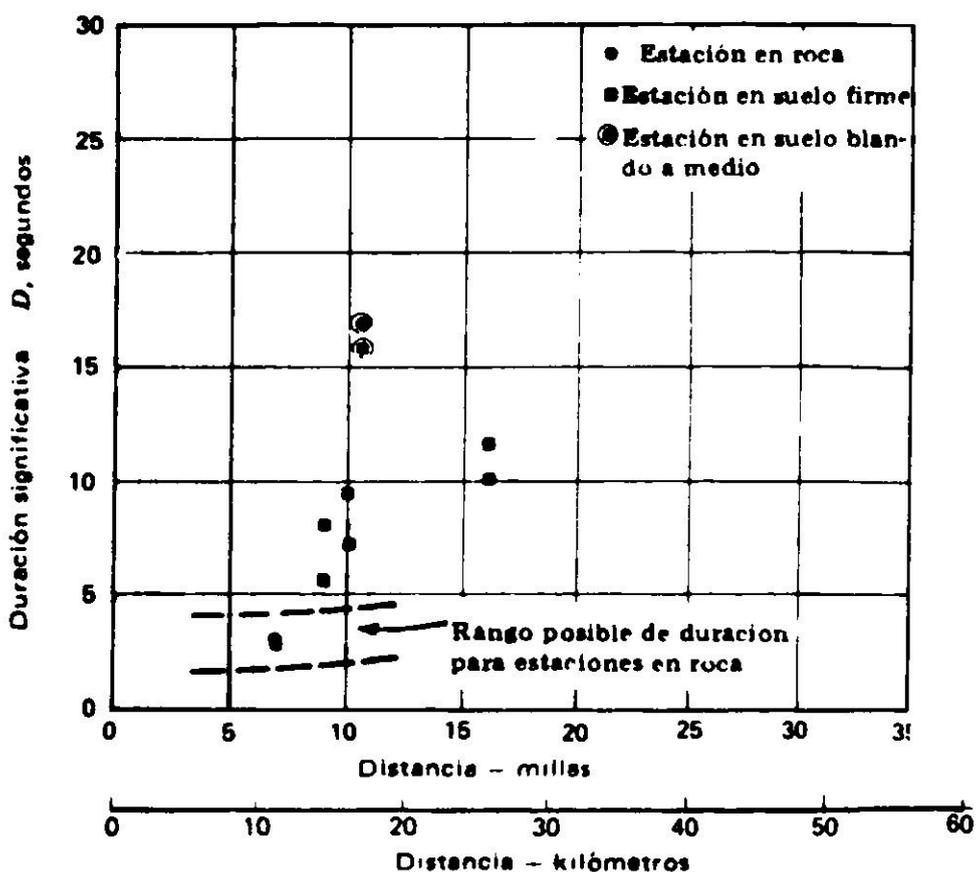


Fig. 13. Duración significativa, D , en función de la distancia al origen (terremoto de San Francisco, 1957).

gráfico de la duración, D , en función de la distancia al origen para todos estos acelerogramas. La duración mínima se obtuvo en el lugar en roca, y la Fig. 13 sugiere que la duración en suelo fue también, en este terremoto, generalmente más larga que la duración en roca.

Estos registros del terremoto de San Francisco de 1957 también muestran la presencia de la tercera parte de período largo observada en los acelerogramas en suelo de San Fernando. Esta parte del registro es especialmente destacada en la estación de suelo blando del Southern Pacific Building, al que corresponde también las duraciones más largas. La Fig. 14 compara los acelerogramas y diagramas de Husid de la componente N 4SE del registro del Southern PB con la componente N10E del registro en roca. La parte fuerte rectilínea del registro en roca de la Fig. 14, tiene una duración de 1-3 segundos y $D = 3.1$ segundos. El registro en suelo tiene también una parte fuerte similar de corta duración y alta frecuencia, seguida de la fase moderada de período largo, y $D = 16.9$ segundos. El diagrama de Husid del registro en suelo se parece más a una curva que a una línea recta, lo que es similar a lo observado en los registros en suelo de San Fernando.

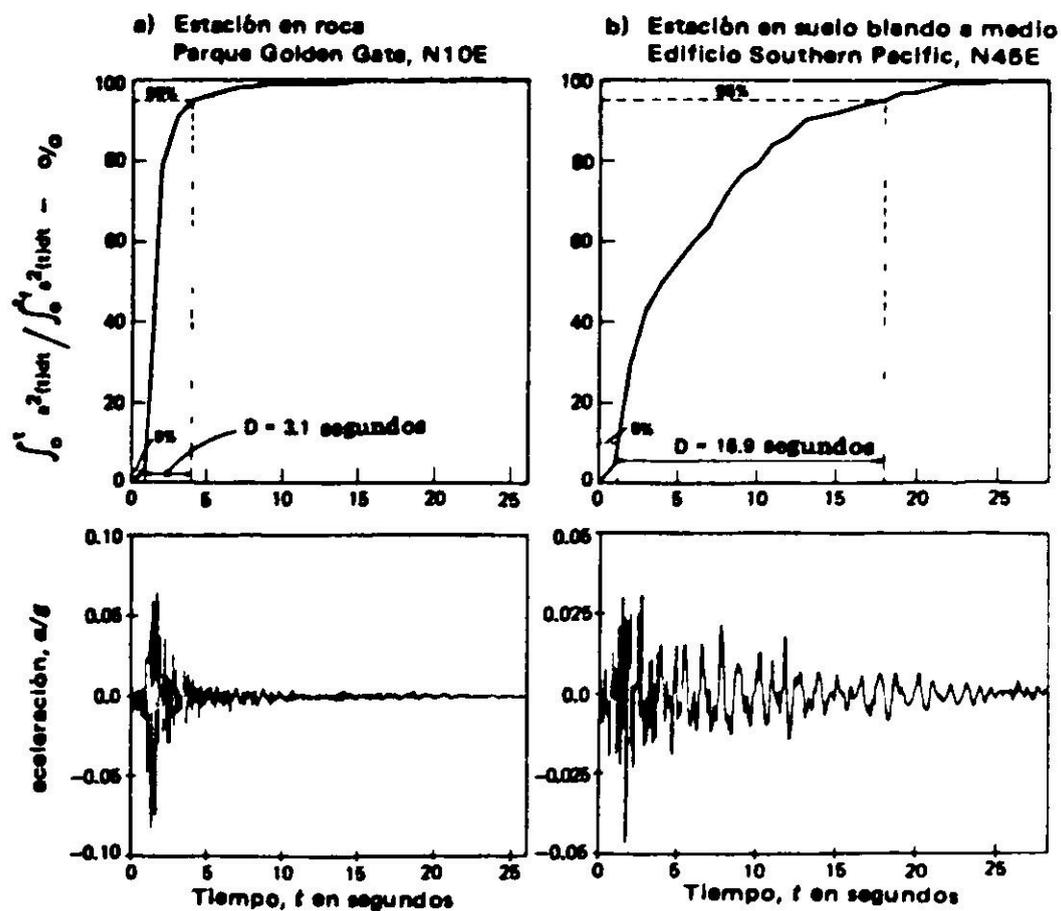


Fig. 14. Comparación de diagramas típicos de Husid y duraciones significativas para estación en roca y estación en suelo blando a medio (terremoto de San Francisco, 1957).

En la Fig. 15 se han trazado los valores de la duración significativa, D , en función de la magnitud, calculados para todo los lugares en suelo considerados. En ella hay datos de los terremotos de San Fernando y San Francisco comentados anteriormente, así como de otros sismos, en esta figura se ha superpuesto también el rango de duraciones para roca obtenido en la Fig. 8.

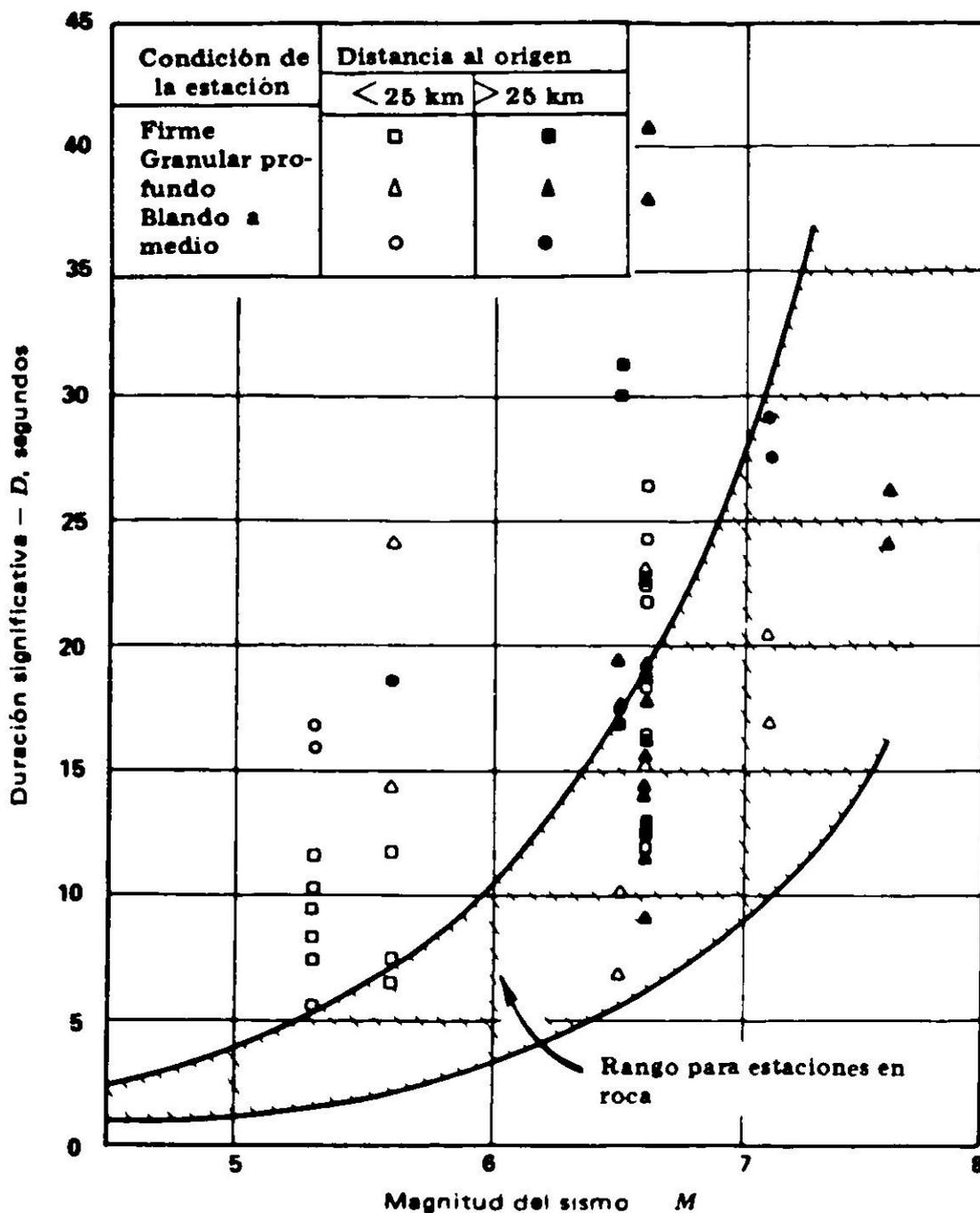


Fig. 15. *D* en función de *M* para estaciones en suelos en el oeste de EUA.

La Fig. 15 confirma las tendencias mostradas en las Figs. 10 y 13, y muestra en forma definitiva que la duración del movimiento sísmico en suelo tiene más dispersión que en roca, y que el rango de duración en roca constituye una cota inferior. Estas conclusiones son válidas para un amplio rango de magnitudes de terremotos y distancias al origen. En las Figs. 10, 13 y 15 no se aprecia ninguna diferencia mayor entre las duraciones en lugares de suelo firme (profundidad a la roca < 45 m) y las duraciones en lugares granulares profundos (profundidad a la roca > 75 m). Los pocos datos para lugares de suelo blandos a medios incluidos en las Fig. 13 y 15 sugieren una duración más larga para terremotos blandos, pero se necesitan más datos para verificar esta hipótesis.

LA PARTE DE PERIODO LARGO EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO

Los datos examinados más arriba demuestran la existencia de una parte de período largo en muchos registros de suelo obtenidos en el Oeste de EUA. Esta parte

tiene aceleraciones algo menores que la parte fuerte precedente y no aparece en los registros en roca en grado significativo. En los acelerogramas en roca estudiados, el diagrama de Husid tiene una forma predominantemente recta, mientras que en muchos registros en suelo el diagrama se curva, debido a la parte de período largo. Holzapfel et al⁵⁷ notaron por primera vez esta diferencia de forma entre los diagramas de Husid en roca y suelo, y sugirieron como explicación posible el mayor número de reflexiones y refracciones experimentadas por las ondas sísmicas antes de llegar a la estación en suelo. Trifunac y Brady³³ sugirieron que el valor de D para lugares en suelo puede estar asociado con la estratificación predominantemente horizontal de los depósitos aluviales.

Es interesante entender mejor el origen y las características de estos movimientos de suelo de período largo, especialmente en cuanto se relacionan con el diseño de estructuras de período largo. La Fig. 16 muestra la componente N79W del acelerograma del terreno obtenido en el subterráneo del edificio de BLVD

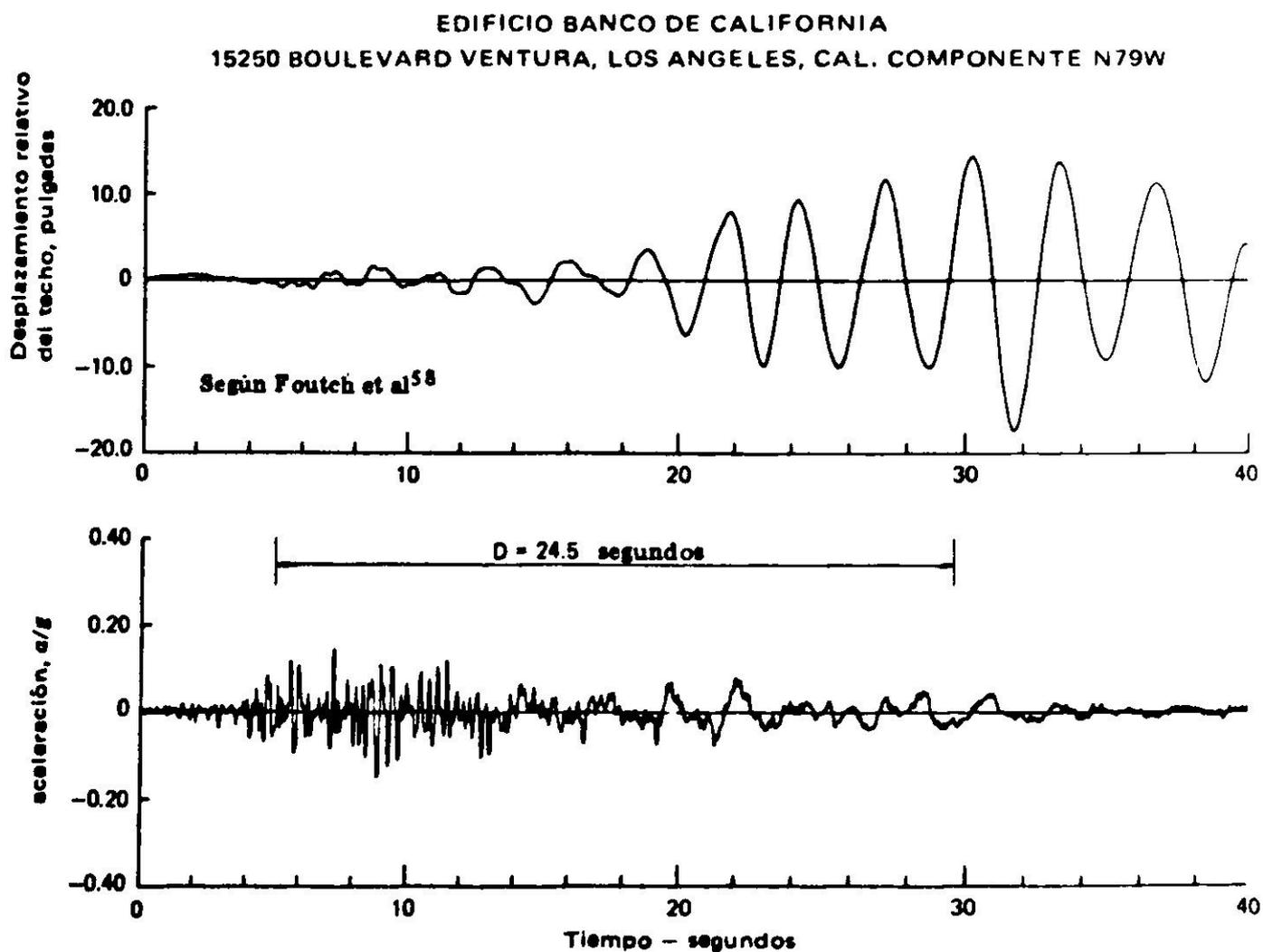


Fig. 16. Acelerograma en el subterráneo y desplazamiento relativo del techo registrado en el edificio del Banco de California en el Valle de San Fernando (terremoto de San Fernando de 1971).

Ventura 15250, en San Fernando 1971, así como los desplazamientos medidos del techo del edificio relativos al terreno. El período predominante de la parte de período largo del movimiento del suelo (que se inició a unos 15 segundos), coincidió aproximadamente con el período fundamental del edificio en esa dirección (alrededor de 2 segundos), y en consecuencia se produjo un fenómeno de resonancia en que el edificio experimentó desplazamientos de alrededor de

45 centímetros a los 30 segundos. A consecuencia de estos desplazamientos, el edificio experimentó algunos daños estructurales y no estructurales. Es probable que este edificio hubiera experimentado daños estructurales mucho mayores si la parte de período largo del movimiento del terreno hubiera tenido amplitudes mayores o si ésta hubiese sido bastante más larga⁵⁸ a ⁶⁰. Por otro lado, si el período del edificio y de los movimientos del terreno hubieran sido diferentes entre sí, se hubieran producido menos daños, como lo demuestra el comportamiento de otros dos edificios ubicados en la inmediata vecindad (14724 Ventura y 15910 Ventura). Estos edificios, descritos en la Tabla II, sufrieron menor daño que el edificio de 15200 Ventura⁶¹, probablemente debido a que los períodos fundamentales no coincidían con el período del movimiento del terreno.

Los autores hicieron un examen visual de los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento para las cinco estaciones del valle San Fernando descritas en la Tabla II. Este examen reveló que la parte de período largo para todas estas estaciones consistió en una secuencia de 7-9 pulsos con un período de 2.5 a 3 segundos, que se inició 10 a 15 segundos después de la activación del instrumento. Las formas de estos pulsos fueron muy similares para componentes horizontales paralelos en las diferentes estaciones, lo que sugiere que los movimientos de período largo en el valle de San Fernando no constituyeron un fenómeno local, que pudiera asociarse con las condiciones locales del suelo o con las características de los edificios. Una posible explicación de estos

TABLA II

CARACTERISTICAS DE LOS EDIFICIOS DE ESTACIONES EN SUELO

Ubicación general Figura 5	Nº Caltech	Nombre de estación	Tipo de edificio*	Número de pisos sobre el nivel del suelo*	Período fundamental, s**
Valle	C 048	8244 Orion	Concreto	7	1.3 a 1.5
San Fernando	J 145	15107 Van Owen	Concreto	7	
	Q 233	14724 Ventura	Concreto	12	1.1 a 1.2
	H 115	15250 Ventura	Concreto	12	2.4 a 2.9
	I 137	15910 Ventura	Acero	17	3.3
Cuenca	D 058	Hollywood PE Lot	Sitio eriazo	—	
Los Angeles	M 176	1150 South Hill	Acero	10	
	S 258	3440 University	Concreto	12	

* Maley y Cloud (1971).⁶⁵** Hart y Vasudevan (1975).⁵¹

movimientos es que ellos correspondieron a ondas superficiales que se desplazaron en el aluvión del valle⁶², las que no se propagaron hacia la roca que constituye las montañas de Santa Mónica, al sur del valle, debido a la alta razón de impedancia entre roca y aluvión. Un fenómeno similar de reflexión en una

superficie de roca de una onda superficial que se propaga en suelo, fue observado por Murphy y Hewlett⁶³ en Las Vegas durante la observación de una explosión nuclear. Se necesitan más estudios sobre el tema para aclarar la influencia del mecanismo de origen y de la geología del valle sobre las características de esta parte de período largo en los registros del terremoto de San Fernando.

Hanks^{51,64} estudió las características de los movimientos de período largo en el terreno durante el terremoto de San Fernando, para estaciones ubicadas al sur del valle de San Fernando, en las montañas de San Fernando y en la cuenca de Los Angeles (LAB). Este autor concluyó que hubo un crecimiento repentino de las amplitudes de onda superficial desde las montañas hacia la cuenca, y que los movimientos de período largo en la cuenca fueron principalmente ondas que se propagaron hacia el sur, dirección en que la cuenca no tiene montañas que la limiten (Esto está en contraste con las ondas superficiales atrapadas dentro del valle cerrado de San Fernando, debido a la existencia de superficies reflectantes de roca). Hanks correlacionó la ampliación de estas ondas superficiales con el aumento de espesor del aluvión y de la profundidad del basamento cristalino para el área de la cuenca inmediatamente al sur de las montañas de Santa Mónica. Esta explicación de Hanks es enteramente consistente con la ausencia de la parte de período largo y el pequeño valor de D notado más arriba para el lugar D058 de aluvión poco profundo, así como con la aparición en la parte de período largo de un mayor valor de D en la estación S258 de suelo profundo.

Varios estudios estadísticos del contenido de frecuencias de los movimientos horizontales sísmicos registrados en suelo y roca han mostrado que hay un mayor contenido de períodos largos en suelo que en roca^{7,42,66}. El significado práctico de este efecto ha sido dramáticamente ilustrado por observaciones de daños y de colapsos selectivos de edificios altos fundados en suelos; especialmente en áreas en que los sedimentos son más blandos y profundos: Ciudad de México en 1957⁶⁷, Caracas en 1967⁶⁸, Bursa, Turquía en 1970⁶⁹. Muchas ordenanzas sísmicas, para tomar en cuenta este efecto, requieren fuerzas de diseño mayores para edificios de período largo situados en suelos que para edificios en roca⁷⁰. Los resultados presentados aquí sugieren que la parte de período largo y la mayor duración del movimiento sísmico en suelo puede ser parte importante de la explicación de este efecto. Esto se ilustra en la Fig. 17, que muestra el espectro de aceleración normalizado (razón de amplificación) de la componente S 81E del registro de Ventura 15910 (San Fernando, 1971), para cuyo cálculo se usó el registro completo (56 segundos). El cálculo del espectro se repitió usando sólo los primeros 17 segundos para eliminar la influencia de la parte de período largo, y el resultado se presenta también en la Fig. 17. La comparación de ambos espectros demuestra que la parte de período largo es responsable del máximo que ocurre para un período de aproximadamente 2.5 segundos. Se hizo un cálculo similar para el registro del Southern Pacific 1957,

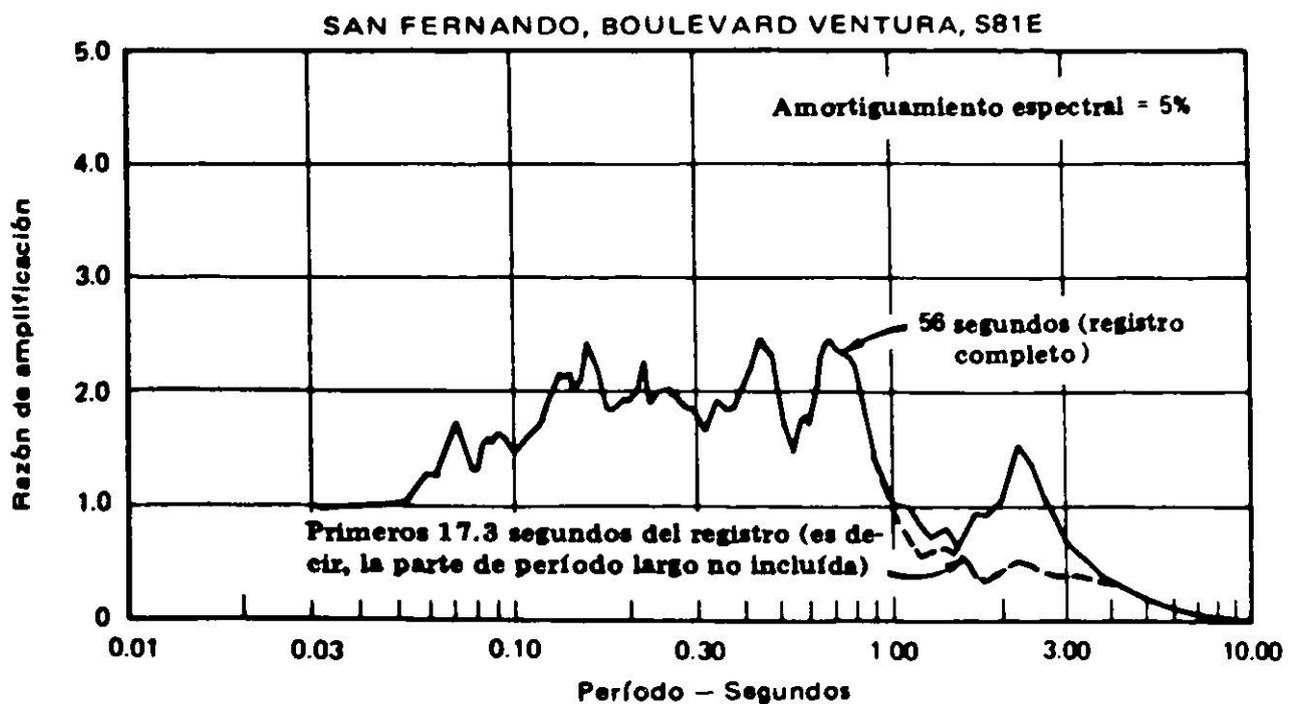


Fig. 17. Efecto de la parte de período largo en los valores del espectro para un acelerograma registrado en el Valle de San Fernando (terremoto de San Fernando, 1971).

correspondiente a un lugar de suelo blando, y los resultados aparecen en la Fig. 18. Esta figura también muestra que los movimientos de período largo después de 4 segundos son parcialmente responsables del máximo en el espectro para un período de 1.3 segundos.

Es interesante notar que este registro fue obtenido en el subterráneo del edificio Southern Pacific, el que tiene 11 pisos y un período fundamental de 1.1 - 1.2 segundos. A pesar de que las aceleraciones del terreno no fueron grandes (< 0.05 g), el edificio sufrió bastante daño estructural, el que fue mayor que el observado en estructuras cercanas fundadas en suelo más firme⁷¹. Este mayor daño se relaciona sin duda con el máximo del espectro a un período de 1.3 segundos, y con la parte de período largo del movimiento del terreno, discutidos más arriba. El espectro del Golden Gate se muestra también en la Fig. 18. La comparación de los espectros de la Fig. 18 muestra que la parte importante de la diferencia en el contenido de frecuencias entre suelo y roca para períodos mayores de alrededor de 0.8 segundos desaparece cuando se toman duraciones similares en ambos registros.

Los resultados del registro del Southern Pacific Building, resumidos en las Figs. 13, 14 y 18 merecen comentarios adicionales.

Este es uno de los pocos registros obtenidos en suelo blando incluidos en este estudio, y la parte de período largo del acelerograma tiene una duración excepcionalmente grande ($D > 15$ segundos, para $M = 5.3$).

Las condiciones del subsuelo en el sitio son bien conocidas. Ellas consisten de un relleno arenoso de cerca de 6 m seguido de una capa de arcilla blanda de 11 m y por un estrato de 15 m de arcilla media. Por debajo de estas capas hay un estrato de 36 m de arcilla dura con una intercalación de 3 m de arena densa a la profundidad de 38 m y por último viene una capa de arena y grava muy densa que se extiende hasta la roca a una profundidad de unos 86 m.

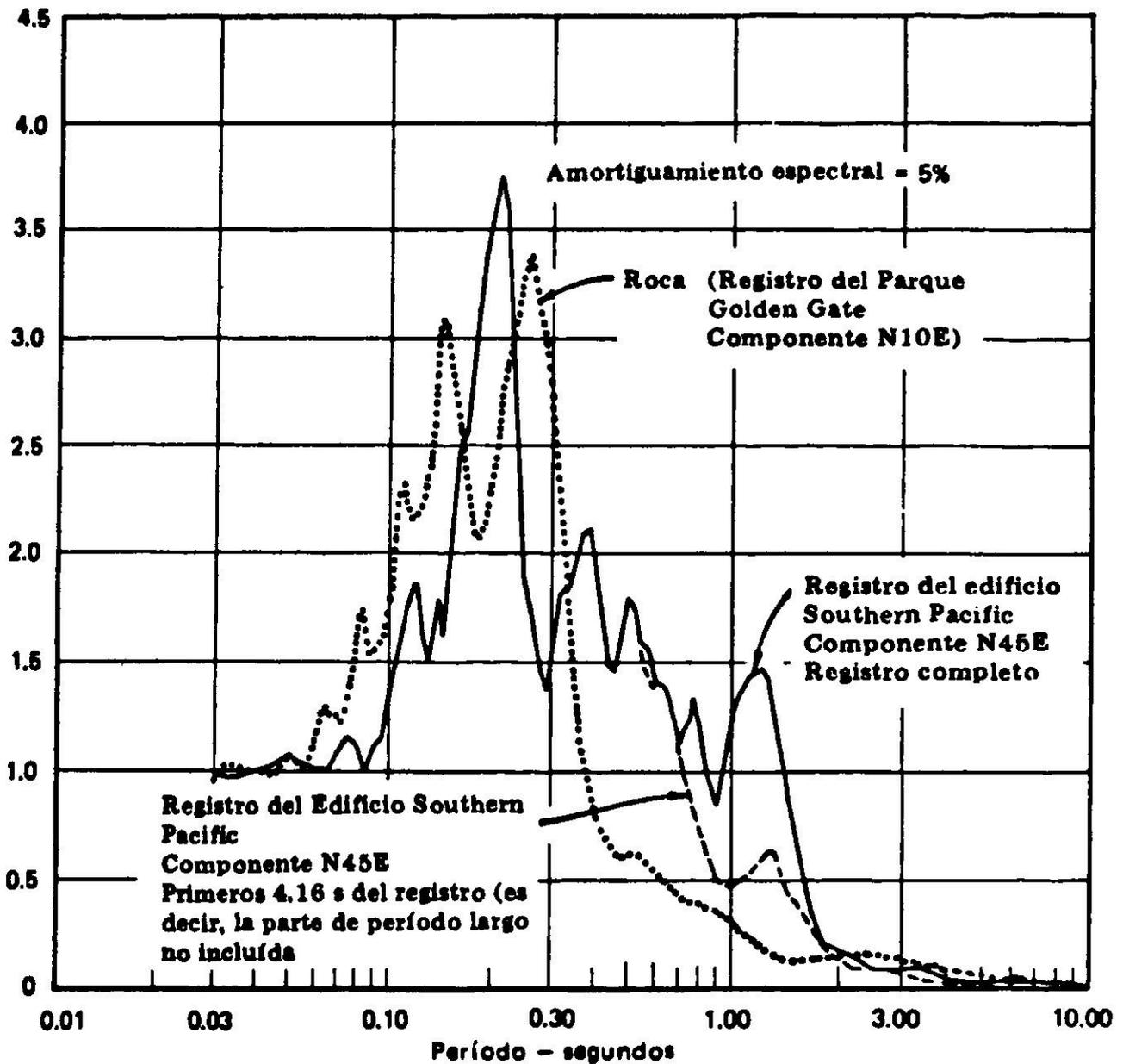


Fig. 18. Efecto de la parte de período largo en los valores del espectro para un acelerograma registrado en el terremoto de San Francisco de 1957.

Usando este perfil del suelo, se hicieron estudios de amplificación unidimensional para este sitio durante el sismo de 1957, tomando el registro del Golden Gate como impulso de entrada y usando tanto el método de análisis lineal equivalente⁷² como el método no lineal³⁰. Los movimientos de la superficie del terreno calculados por la técnica no lineal mostraron excelente concordancia con los movimientos registrados en el lugar, tanto en el dominio de las frecuencias como en el de los tiempos. Este buen acuerdo fue verificado por comparaciones de los acelerogramas, así como de los diagramas de Husid, espectros de respuesta y valores de D de los movimientos calculados y registrados. Estas comparaciones sugieren fuertemente que la parte de período largo de este registro puede explicarse por la amplificación unidimensional de los movimientos débiles que aparecen en el registro en roca después de alrededor de 4 segundos (Fig. 14a), los que excitaron el modo fundamental de la columna de suelo, cuyo período era de 1.3 segundos. Esta amplificación relativamente grande de la parte débil del registro en roca se debió a que el movimiento posterior a 4 segundos indujo muy pequeñas deformaciones en el suelo, lo que hizo que el suelo disipara poca energía y vibrara casi elásticamente.

De las discusiones anteriores es posible concluir que la parte de período largo en suelo puede tener varias causas, todas ellas relacionadas con la alta

razón de impedancia entre suelo y roca. Una causa principal de la parte de período largo parece ser la amplificación por el suelo de los movimientos débiles de la roca que llegan después de la parte fuerte, los que están constituídos por ondas P o S indirectas y tardías, o por ondas superficiales.

CARACTERIZACION DE LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Es posible extraer de las discusiones anteriores algunas conclusiones sobre la caracterización de los movimientos horizontales del terreno, con fines de aplicación en ingeniería.

Para los movimientos en roca estudiados aquí, el predominio de la parte fuerte, caracterizado en el diagrama de Husid por una línea más empinada que las partes débiles inicial y final, se ilustra mediante el esquema de la Fig. 19. Siguiendo la proposición de Housner^{1 2}, estas partes débiles pueden descartarse y el movimiento puede caracterizarse por la raíz media cuadrática de la aceleración, \bar{a} , y por la duración, Δ , correspondientes a la parte fuerte. La Tabla III presenta

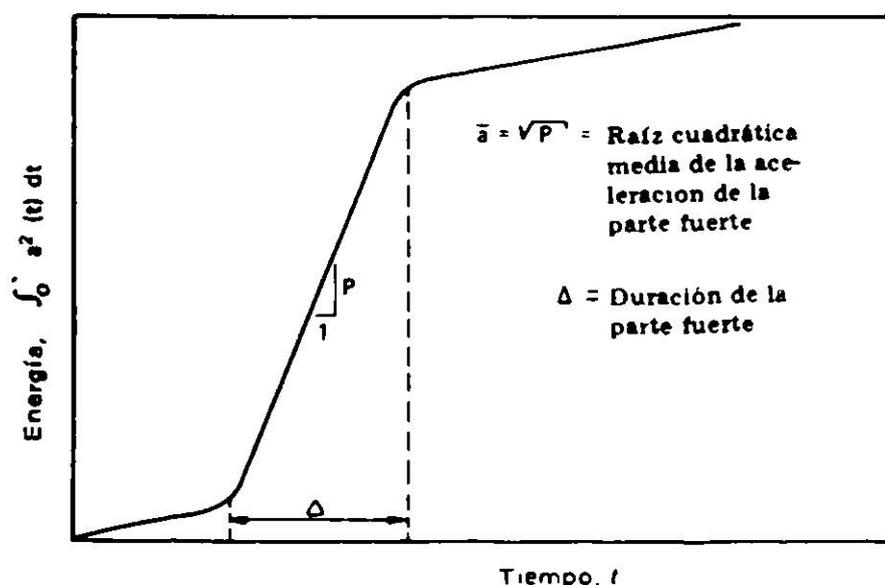


Fig. 19. Posible caracterización del nivel de vibración y de la duración de la parte fuerte de movimientos horizontales en roca para $M \leq 7$.

TABLA III

RAIZ CUADRATICA MEDIA DE LAS ACELERACIONES Y DURACIONES DE LA PARTE FUERTE DE LOS REGISTROS EN ROCA EN SAN FERNANDO, 1971

Estación	Comp.	Figura	Aceleración RMS, \bar{a} (g's)	Duración Δ (s)	a_p/\bar{a}
Pacoíma Dam	S16E	6a	0.27	7	4.3
3838 Lankerssheim	S90W	6b	0.05	4 a 6	2.4
445 Figueroa	N52W	6c	0.05	4 a 6	2.9

los valores de a y Δ para los tres registros en roca de San Fernando incluidos en la Fig. 6. En la Tabla III se han incluido también los valores de la razón entre las aceleraciones máximas y la raíz cuadrática media, a_p/\bar{a} . En consecuencia, para muchas aplicaciones prácticas la caracterización del movimiento horizontal en roca se reduciría a especificar los parámetros \bar{a} y Δ , junto con el contenido de frecuencias del movimiento. Se necesitan, por supuesto, estudios adicionales que correlacionen \bar{a} y Δ con los parámetros de origen del terremoto y con la ubicación del lugar, antes de que este enfoque pueda generalizarse. El estudio presente sugiere que Δ se relaciona principalmente con las dimensiones de la falla y con la posición relativa del lugar respecto a los puntos iniciales (hipocentro) y final de la rotura.

La caracterización del movimiento en roca por \bar{a} y Δ deberá ser especialmente útil en estudios de tipo probabilístico, pero antes que esta caracterización pueda usarse extensamente se requieren investigaciones adicionales.

Las conclusiones anteriores para movimientos en roca se obtuvieron principalmente sobre la base de registros de terremotos de magnitud pequeña y mediana ($M < 7$). Tal como se comentó más arriba, es probable que para mayores magnitudes y dimensiones de la falla, las ondas S directas procedentes de puntos distantes de la falla serán fuertemente atenuadas antes de llegar a la estación. Para estos terremotos grandes, por lo tanto, es posible que la parte fuerte empiece y termine más gradualmente, sin puntos de comienzo y fin netos como los observados para el rango de magnitudes estudiado aquí. Esto podría traducirse en que el diagrama de Husid del registro en roca se torne más curvo, lo que puede eventualmente limitar la aplicabilidad de los parámetros \bar{a} y Δ propuestos aquí. Para terremotos de magnitud grande y para sitios en roca a alguna distancia de la falla es de notar la importancia creciente que adquiere la contribución de las ondas superficiales, las que pueden contribuir también a disminuir la definición de la parte fuerte. En consecuencia, se requieren estudios adicionales antes de que la caracterización propuesta para movimientos en roca pueda aplicarse a terremotos de magnitudes mayores de 7.

Para lugares en suelo la caracterización del movimiento del terreno es evidentemente más compleja, y no se hace aquí ninguna proposición definitiva al respecto. Eso sí parece razonable indicar que cualquier caracterización del movimiento del suelo deba incluir por lo menos dos partes: una parte fuerte de frecuencia relativamente alta, con una duración similar a la que sería Δ para un afloramiento adyacente de roca, seguida de una fase moderada de período largo. Se necesitan más estudios de la amplificación de ondas P - S y superficiales para una caracterización más definitiva de los movimientos en suelo. Esos estudios deberían conducir a una mejor comprensión de la forma en que la parte fuerte es modificada por la presencia del suelo, así como de los factores que determinan la parte última de período largo.

CONCLUSIONES

Basándose en este estudio sobre las características de duración de movimientos horizontales fuertes de terrenos en roca y suelo registrados en el oeste de EUA, es posible concluir lo siguiente:

1. Hay una diferencia básica entre las características de duración de los movimientos en roca y suelo. Los acelerogramas en roca tienen duraciones más consistentes, que se pueden predecir razonablemente, mientras que las duraciones de los registros en suelo muestran mucho más dispersión, y tienen como cota inferior la duración en roca.
2. La parte fuerte es dominante en los acelerogramas en roca. Esta parte tiene aceleraciones relativamente grandes y frecuencias altas. Esta parte fuerte está probablemente asociada con la llegada directa de ondas S desde el origen, y la duración de esta parte está controlada principalmente por la duración de la rotura en la falla, d .
3. En este trabajo se usó D para medir la duración significativa del movimiento sísmico en roca y suelo. Se encontró una correlación consistente entre D y la magnitud del terremoto, M , para movimientos en roca. Esta correlación, presentada en las Figs. 7 a 9, se explica por las duraciones más largas de rotura correspondientes a terremotos de mayores magnitudes y longitudes de falla. Para el terremoto de 1971 de San Fernando, California, los valores de D para estaciones en roca ubicadas al sur y suroeste de la falla aumentaron en forma consistente con la distancia a la falla. Esto se debió probablemente a que, en las estaciones más lejanas, una fracción mayor de la energía total del registro corresponde a la llegada de ondas P o S tardías o a la llegada de ondas superficiales.
4. En los acelerogramas en suelo, se detectó también la presencia de una parte fuerte de duración similar a la observada en roca, y esta parte puede también asociarse con la llegada de ondas S directas. Después de la parte fuerte los registros en suelo presentan también una parte moderada de períodos más largos y aceleraciones algo menores. Esta parte de período largo es la causante del aumento de D en suelo descrito en 1, y está también relacionada con el mayor contenido de períodos largos en el movimiento del suelo comparado con el de roca, discutido por muchos autores.

El origen de esta parte de período largo se debe claramente a la diferencia de propiedades dinámicas entre roca y suelo (alta razón de impedancia). Evidencias obtenidas de los terremotos de San Francisco de 1957 y de San Fernando de 1971, sugieren que, en algunos casos, una causa principal de esta parte es en algunos casos la amplificación por los sedimentos del valle de las llegadas de ondas P o S indirectas y tardías, y en otros es causada por efectos de ondas superficiales. Se necesitan más investigaciones para establecer los parámetros que determinan la existencia y características de esta parte, la cual es crítica para el diseño sísmico de estructuras de

período largo ubicadas en suelo.

5. Se requieren enfoques diferentes para caracterizar los acelerogramas horizontales en roca y en suelo. En roca la parte fuerte dominante tiene una aceleración cuadrática media, \bar{a} , aproximadamente constante. El parámetro Δ parece ser esencialmente la duración de las ondas S que llegan directamente de la falla, y \bar{a} debería estar correlacionado con parámetros tales como la magnitud del terremoto y la ubicación de la estación. La caracterización de los registros en suelo es necesariamente más compleja. Se requiere una mejor definición de la parte de período largo del registro antes de que sea posible definir mejor un procedimiento de caracterización para el movimiento sísmico en suelo.

Las conclusiones anteriores son válidas para terremotos pequeños moderados ($M \leq 7$). Se necesitan más estudios para verificar la aplicabilidad de algunas de ellas a terremotos de mayor magnitud y de fallas de dimensiones más grandes.

BIBLIOGRAFIA

1. HOUSNER, G.W. Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, *Proceedings 3rd World Conference Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 1965.
2. SEED, H.B., IDRIS, I.M. y KIEFER, F.W. Characteristics of rock motions during earthquakes. *Journal Soil Mechanics Foundations Division, ASCE*, vol. 95, SM 5 (1969) pp. 1199 - 1218.
3. ESTEVA, L. Seismic risk and seismic design decision. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, R.J. Hansen, Editor, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, 1970.
4. SCHNABEL, P.B. y SEED, H.B. *Accelerations in rock for earthquakes in the western United States*, Earthquake Engineering Research Center, Report EERC 72-2, University of California, Berkeley, 1972.
5. NEWMARK, N.M.; BLUME, J.A. y KAPUR, K.K. Seismic design spectra for nuclear power plants, *Journal Power Division, ASCE*, vol. 99, P02, 1973.
6. DONOVAN, N.C. A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1971, San Fernando earthquake, *Proceedings 5th World Conference Earthquake Engineering*, Roma, 1973.
7. SEED, H.B.; UGAS, C. y LYSMER, J. *Site dependent spectra for earthquake-resistant design*, Report EERC 74-12, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1974.
8. SEED, H.B.; MURARKA, R.; LYSMER, J. y IDRIS, I.M. *Relationship between maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquake*, Report EERC 75-17, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1975.
9. SEED, H.B. y IDRIS, I.M. Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake, *Journal of Mechanics and Foundations Division ASCE*, vol. 93, SM3, 1967, pp. 83-108.

- 10 SEED, H.B. y IDRIS, I.M. A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 97, SM9, 1971, pp. 249-1294.
11. SEED, H.B., IDRIS, I.M., MAKDISI, F. y BANNERJE, N. *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*, Report EERC 75-29, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1975.
12. HOUSNER, G.W. Measures of severity of earthquake ground shaking, *Proceeding U.S. National Conference Earthquake Engineering*. Ann Arbor, Michigan, 1975.
13. SEED, H.B., LEE, K.L., IDRIS, I.M. y MAKDISI, F.I. The slides in the San Fernando Dams during the earthquake of February 9, 1971, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 101, GT7, 1975.
14. HUSID, R. *Gravity effects on the earthquake response of yielding structures*, Report of Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 1967.
15. SILVER, M.L. y SEED, H.B. Volume changes in sand during cyclic loading, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 97, SM9, 1971.
16. DE ALBA, P., SEED, H.B. y CHAN, C.K. Sand liquefaction in large-scale simple shear tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 102, CT9, 1976.
17. ARIAS, A. A measure of earthquake intensity, *Seismic Design for Nuclear Power Plant*, R. Hansen Editor, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, 1969.
18. HUSID, R. Evaluación de la severidad de terremotos, *Revista Geofísica*, XXXIV, n^{os} 1 y 2, Madrid, España, 1975.
19. IDRIS, I.M. DEZFULIAN, H. y SEED, H.B. *Computer programs for evaluating the seismic response of soil deposits with non-linear characteristics using equivalent linear procedures*, Research Report Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, 1969.
20. SCHNABEL, P.B., LYSMER, J. y SEED, H.B. *SHAKE- A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.
21. LYSMER, J., UDAKA, T., SEED, H.B. y HWANG, R. *LUSH- A computer program for complex response analysis of soil-structure systems*, Report EERC 74-4, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974.
22. NEWMARK, N.M. y HALL, W.J. Procedures and criteria for earthquake resistant design, *National Bureau of Standards Building Science Series 46*, Building Practices for Disaster Mitigation, 1972, pp. 209-236.
23. CONSTANTOPOULOS, I.V. ROESSET, J.M. y CHRISTIAN, J.T. A comparison of linear and exact nonlinear analysis of soil amplification, *Proceeding 5th World Conference Earthquake Engineering*, Roma, 1973.
24. STREETER, V.L., WYLIE, E.B. y RICHART, F.E. Soil motion computations by characteristic method, *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 100, GT3, 1974.
25. MARTIN, P.P. Nonlinear methods for dynamic analysis of ground response, *Ph. D. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1975.
26. JOYNER, W.B. y CHEN, A.T.F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 1315-1336.
27. IDRIS, I.M., DOBRY, R., DOYLE, E.H. y SINGH, R.D. Behavior of soft clays under earthquake loading conditions, *Proceeding Annual 8th Offshore Technology Conference, Houston*, 1976.
28. FINN, W.D.L., BYRNE, P.M. y MARTIN, G.R. Seismic response and liquefaction of sands, *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 102, 1976, pp. 841-856.

29. LIOU, C.P., STREETER, V. y RICHART, F. A numerical model for liquefaction, *Proceedings ASCE, Specialty Session on Liquefaction Problems on Geotechnical Engineering*, Philadelphia, 1976.
30. SINGH et al. Trabajo en preparación.
31. RICHART, F.E. Some effects of dynamic soil properties on soil-structure interaction, *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 101, GT12, 1975.
32. BOLT, B.A. Duration of strong ground motion, *Proceeding 5th World Conference Earthquake Engineering*, Roma, 1973.
33. TRIFUNAC, M.D. y BRADY, A.G. A study of the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 581-626.
34. DOBRY, R., IDRIS, I.M. CHANG, C.Y. y NG, E. Influence of magnitude, site conditions and distance on significant duration of earthquake, *Proceeding 6th World Conference Earthquake Engineering*, Nueva Delhi, India, 1977.
35. HOUSNER, G.W. y JENNINGS, P.C. Generation of artificial earthquakes, *Journal Engineering Mechanical Division, ASCE*, 90(EMI), Proceeding Paper 3835.
36. HUSID, R.L. Análisis de terremotos: Análisis General, *Revista del IDIEM*, vol. 8, 1969, pp. 21-42, Santiago, Chile,
37. HUSID, R.L. *Terremotos – Earthquakes*, Editorial Andrés Bello, Santiago, Chile, 1973.
38. HUSID, R.L. Comunicación personal.
39. DONOVAN, N.C. *Earthquake Hazards for Building*, National Workshop on Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1972.
40. SUIDAN, M.T. y EUBANKS, R.A. Cumulative fatigue damage in seismic structures, *Journal Structural Division, ASCE*, vol. 99, ST5, 1973.
41. California Institute of Technology. *Analysis of Strong Motion Earthquake Accelerograms, Vol. II, Corrected Accelerograms and Integrated Ground Velocity and Displacement Curves*, Earthquake Engineering Research Laboratory, Pasadena, 1973.
42. MOHRAZ, B. A study of earthquake response spectra for different geological conditions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, 1976, pp. 915-935.
43. BOLT, B.A. San Fernando rupture mechanism and the Pacoima strong-motion record, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 62, 1972, pp. 1053-1061.
44. MIKUMO, T. Faulting process of the San Fernando earthquake of February 9, 1971, inferred from static and dynamic near-field displacements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 63, 1973, pp. 249-269.
45. TRIFUNAC, M.D. A three-dimensional dislocation model for the San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 64, 1974, pp. 149-172.
46. HANKS, T.C. The faulting mechanism of the San Fernando earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, 1974.
47. BOORE, D.M. y ZOBACK, M.D. Two-dimensional kinematic fault modeling of the Pacoima Dam strong-motion recording of February 9, 1971, San Fernando earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 64, 1974, pp. 555 – 570.
48. NIAZY, A. An exact solution for a finite, two-dimensional moving dislocation in an elastic halfspace with application to the San Fernando earthquake of 1971, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 1797-1826.
49. BOUCHON, M. y AKI, R. Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 67, 1977, pp. 259-277.
50. ARNOLD, P., VANMARCKE, E.H. y GAZETAS, G. *Frequency content of ground motions during the 1971 San Fernando earthquake. Research Report Publication n° R76-3*, Department of Civil Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.

51. HANKS, T.C. Observations and estimation of long period strong ground motion in the Los Angeles Basin, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 4, 1976, pp. 473-488.
52. TOCHER, D. Earthquake energy and ground breakage, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 48, 1958, pp. 147-153.
53. PATWARDHAN, A.S., TOCHER, D. y SAVAGE, E.D. Relationship between earthquake magnitude and length of rupture surface based on aftershock zones, *Annual Meeting Seismological Society of America*, Los Angeles.
54. KANAMORI, H. y ANDERSON, D.L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 1073-1095.
55. GELLER, R.J. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, 1976, pp. 1501-1523.
56. BOLT, B.A. Elastic waves in the vicinity of the earthquake source, *Earthquake Engineering*, R.L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.; 1970.
57. HOLZAPFEL, A., ARIAS, A. y SARAGONI, G.R. Una función aproximada para la aceleración cuadrática esperada de terremotos fuertes, Research Report Sección Estructuras SES 1-4/74(110), Universidad de Chile.
58. FRAZIER, G.A., WOOD, J.H. y HOUSNER, G.W. Earthquake damage to buildings. *Engineering Features of the San Fernando Earthquake*, P.C. Jennings, Editor, Report n° 71-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 1971.
59. JOHN A. BLUME y Associates. Bank of California Building, *Report on San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971*, L.M. Murphey, Coordinator, vol. I, Part A, NOAA, Washington, D.C., 1973.
60. FOUTCH, D.A., HOUSNER, G.W. y JENNINGS, P.C. *Dynamic responses of six multistory buildings during the San Fernando earthquake*, Report n° EERL 75-02, California Institute of Technology, Pasadena, 1975.
61. HART, G.C. y VASUDEVAN, R. Earthquake design of buildings: damping, *Journal Structural Division, ASCE*, vol. 101, ST1, 1975.
62. DRAKE, L.A. y MAL, A.K. Love and Rayleigh waves in the San Fernando Valley, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 62, 1972, pp. 1678-1690.
63. MURPHY, J.R. y HEWLETT, R.A. Analysis of seismic response in the city of Las Vegas, Nevada a preliminary microzonation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 1575-1597.
64. HANKS, T.C. Strong ground motion of the San Fernando, California, earthquake: ground displacements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 193-225.
65. MALEY, R.P. y CLOUD, R.P. Strong-motion accelerograph records. *Strong-Motion Instrumental Data on the San Fernando Earthquake of February 9, 1971*, D.E. Hudson, Editor, EERC, California Institute of Technology, Pasadena, 1971.
66. TRIFUNAC, M.D. y BRADY, A.G. On the correlation of seismic intensity scale with the peaks of recorded strong ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, 1975, pp. 139-162.
67. DUKE, C.M. y LEEDS, D.L. Soil conditions and damage in the Mexico earthquake of July 28, 1957, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 49, 1959, pp. 179-191.
68. SEED, H.B., WHITMAN, R.V., DEZFULIAN, H., DOBRY, R. y IDRIS, I.M. Relationship between soil conditions and building damage in the 1967, Caracas earthquake, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 98, SM8, 1972, pp. 787-806.

69. TEZCAN, S.S., SEED, H.B., WHITMAN, R.V., SERFF, J.T., CHISTRAN, J.T. DURGUNOGLU, H.T. y YEGIAN, M. Resonant period effects in the Gediz, Turkey earthquake of 1970, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 5, 1977, pp. 157-179.
70. DOBRY, R., OWEIS, I. y URZUA, A. Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, 1976, pp. 1293-1321.
71. STEINBRUGGE, K.V., BUSH, R. y ZACHER, E.G. Damage to buildings and other structures during the earthquake of March 22, 1957. *San Francisco Earthquake of March 1957*, G.B. Oakeshott, Editor, Special Report 57, California Division of Mines, San Francisco, 1959.
72. IDRIS, I.M. y SEED, H.B. An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, 1968, pp. 2013-2032.

DURATION CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL COMPONENTS OF STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS

SUMMARY:

The duration characteristics of horizontal components of strong ground motion records obtained in the western U.S. were examined for engineering applications. A total of 84 accelerograms were used in the study, corresponding to a range of earthquake magnitudes, M , between 4.7 and 7.6, to distances to the source between 0.1 and 130 km, and to local subsurface conditions ranging from rock to soft clay. The definition of significant duration, $D(s)$, used was the time needed to build up between 5 and 95 per cent of the total Arias intensity of the record.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (t_f = \text{total length of record})$$

For rock sites, a consistent correlation was obtained between D and M : $\log D = 0.432 M - 1.83$. Values of D at soil sites show a much larger scatter, with the duration on rock being a lower bound.

Detailed analyses were conducted on the accelerograms and their associated Husid plots, $I_A(t)/I_A(t_f)$ versus t . It was found that a main parameter controlling the duration of strong ground motion was the total duration of rupture at the fault, d . Rock records are dominated by a strong part, having a duration, Δ , which is essentially a straight line in the Husid plot, and which is $\Delta \leq D$. This strong part coincides approximately with the arrivals of S waves which followed a direct path between source and station (direct S waves). The values of both Δ and D are mainly controlled by the duration of rupture at the fault, d , for $M \leq 7$. Many soil records have, in addition to the strong part, another part which is moderately strong, has longer periods and appears after the direct S wave arrives. This additional part is responsible for the increased values of D observed for soil, and also for the curved shape of the Husid plot observed in many soil records. This part also contributes significantly to the observed richer content of long periods in soil records, reported by several authors. Some evidence suggests this part of the record may be mostly associated with the amplification by the soil of indirect, multipath body-wave arrivals, and with surface waves effects.