

AMPLIFICACIÓN LOCAL DEL MOVIMIENTO EN DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS USANDO MODELOS SIMPLIFICADOS

*Martha Suarez*¹ y *Francisco J Sánchez Sesma*^{1,2}

¹ Instituto de Ingeniería, UNAM, México DF

² Centro de Investigación Sísmica, AC, México, DF

RESUMEN

Utilizando un modelo simplificado de propagación de ondas *SH* en depósitos triangulares asimétricos de suelo blando, se realiza un análisis de la influencia en la respuesta sísmica de la geometría y el ángulo de incidencia de la excitación. Se discuten la importancia de considerar los efectos de las irregularidades laterales en el cálculo así como las diferencias que se observan en la respuesta al compararla con los resultados obtenidos del análisis de modelos simétricos y aproximaciones unidimensionales. Los resultados se presentan en diagramas de contorno *f-x* donde se hace evidente la existencia de un patrón de amplitudes en la respuesta definido por la geometría del valle, mismo que se simplifica notablemente al impedir la interacción entre las cuñas que forman el depósito. Los resultados se interpretan estudiando las trayectorias de los rayos emitidos dentro del valle.

ABSTRACT

Using a simplified model, the response to incident *SH* waves in asymmetric triangular alluvial valleys is studied when parameters like geometry and incident wave angle are modified. The importance of considering lateral effects is enhanced when results are compared with those obtained from symmetrical models and from a one-dimensional approximation. Results are presented in *f-x* diagrams where it can be seen that the amplitudes have a spatial pattern governed by the geometry of the valley; this pattern is greatly simplified when interaction between dipping layers is neglected. An interpretation of this phenomenon is made in terms of ray theory.

INTRODUCCIÓN

Las amplitudes del movimiento observadas durante los sismos en algunos sitios donde existen variaciones en la topografía revelan la importancia que las irregularidades laterales tienen en la respuesta sísmica. La dificultad en el cálculo y los grandes recursos de cómputo requeridos para analizar estos efectos hacen impopulares a los métodos bidimensionales, optándose en muchos casos por despreciarlos y realizar sólo análisis unidimensionales que no reproducen adecuadamente la respuesta, llegando a conclusiones erróneas en cuanto a la amplitud y la posición de las frecuencias pico. Una alternativa prometedora es estudiar el problema aproximando la topografía del terreno a figuras geométricas sencillas mediante hipótesis severas que aporten buenos resultados, no requieran del uso de supercomputadoras y ayuden a comprender la física del fenómeno.

Tomando en cuenta esta idea, Sánchez-Sesma y Velázquez (1987) analizaron la respuesta sísmica de un estrato-cuña con base rígida ante movimiento antiplano prescrito de ésta. Ello da lugar a la propagación de ondas *SH* en el estrato. Se utilizó la teoría de rayos en una forma analítica, y se encontró que para ángulos del estrato-cuña iguales a $\pi/2N$ ($N = \text{impar}$) no se presenta el fenómeno de la difracción. En un estudio posterior Sánchez-Sesma *et al* (1988) extendieron esta solución para calcular la respuesta de valles triangulares simé-

tricos con base elástica, en donde la difracción que se presenta es despreciable. Continuando con esta misma línea hemos trabajado en un método para el cálculo de la respuesta sísmica en valles aluviales triangulares no simétricos con base elástica ante incidencia de ondas *SH*. Para ello utilizamos la solución geométrica propuesta por Sánchez-Sesma y Velázquez (1987). La difracción causada por la asimetría del valle se calcula utilizando las funciones de Green escalares asociadas al problema. Las expresiones que se obtienen también son sencillas como consecuencia de los ángulos estudiados. El lector interesado en los detalles del método puede consultar el artículo de Paolucci *et al* (1992).

En este trabajo se usa un método de cálculo rápido para obtener la respuesta sísmica de depósitos sedimentarios de forma triangular ante incidencia de ondas *SH* (Paolucci *et al*, 1992) con el propósito de identificar los fenómenos de amplificación que se presentan. Este método hace uso óptimo de las propiedades de las soluciones para el estrato-cuña. Se hace un análisis de los efectos de la asimetría de los modelos.

ANÁLISIS DE LA ASIMETRÍA DE VALLES TRIANGULARES

El modelo estudiado en este trabajo se presenta en la fig 1. La complejidad de la respuesta sísmica de valles triangulares es evidente cuando se gra-

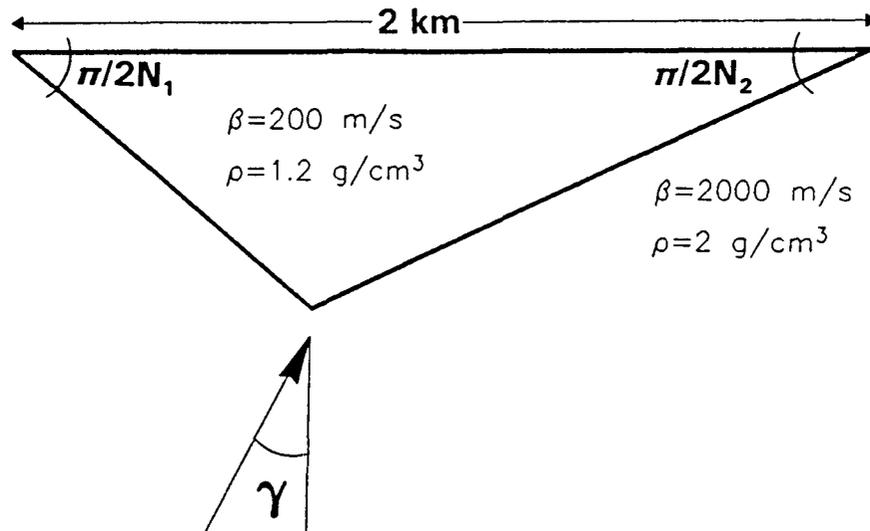


Fig 1. Modelo de un depósito sedimentario de forma triangular asimétrica ante ondas *SH* con un ángulo de incidencia γ .

fican los contornos de amplitud de la respuesta en diagramas de frecuencia-espacio ($f-x$) y se observan los patrones que forman. Las amplitudes se calcularon para varias frecuencias en sitios ubicados a lo largo de la superficie del depósito que en todos los casos se consideró de 2000 m. Para el material que rellena el valle y el semiespacio las características de velocidad de las ondas de corte (β) y densidad (ρ) utilizadas en los cálculos fueron de $\beta = 200$ y 2000 m/s y $\rho = 1.2$ y 2.0 g/cm³, respectivamente (fig 1). El amortiguamiento se consideró del 0.1% ($Q=500$). En la fig 2 se presentan los diagramas de contornos $f-x$ resultado del análisis de un valle triangular simétrico somero con ángulos de cuña iguales a 18° ($N=5$), sometido a una excitación que incide con un ángulo de 0° . En las abscisas se grafican los sitios para los que se calculó la respuesta, y en las ordenadas las frecuencias. Para facilitar la interpretación de los contornos, únicamente se dibujaron aquellos que representan amplitudes correspondientes a 10 (línea delgada) y 65 veces (línea gruesa) la amplitud de las ondas incidentes. En la misma figura se graficaron los resultados en diagramas de frecuencia-amplitud y distancia-amplitud para los sitios y frecuencias indicados, que resultan de realizar cortes en el diagrama de contornos $f-x$. El espesor del estrato para los puntos en los que se calculó la respuesta de las gráficas de frecuencia-amplitud, fue de 195, 325 y 139 m. La complejidad de la respuesta se hace evidente cuando se compara con la respuesta unidimensional (línea a trazos en la figura). La presencia de picos adicionales en varias frecuencias se debe a la interferencia constructiva o destructiva de las ondas ocasionada por la otra cuña que cierra el valle y por la inclinación de la base donde se apoya el estrato. En las gráficas de distancia-amplitud se aprecia la simetría de la respuesta sísmica para los sitios localizados en lados opuestos y a la misma distancia del centro del valle.

El patrón de simetría que se observa en los contornos se debe en este caso a la simetría del valle y a la incidencia vertical de ondas. Cuando el ángulo de incidencia difiere del vertical, este patrón en los contornos se modifica. En la fig 3 se grafican los diagramas $f-x$ para valles simétricos con las características mencionadas arriba pero para ángulos de incidencia de 0° , 30° y 60° . Se observa que la respuesta máxima se presenta en todos los casos para el sitio de mayor espesor del estrato (la parte más profunda del valle) que

corresponde a la frecuencia de 0.2 Hz. Para el resto del valle a esta frecuencia las amplitudes son despreciables. Comparando con la respuesta unidimensional de un estrato con espesor igual al de la parte de mayor profundidad del valle, la frecuencia fundamental se presentará a los 0.15 Hz, con una amplitud varias veces menor que la calculada para el valle (ver fig 1). En general, para cualquier sitio del depósito existe un aumento en las amplitudes comparadas con las que se obtienen para el caso unidimensional, y también un corrimiento de las frecuencias para las que se presenta la máxima respuesta. Para frecuencias menores a la fundamental, la amplitud es pequeña. El contorno de amplitudes de frecuencias máximas "dibuja" la geometría del valle. El patrón de contornos para incidencia vertical es simétrico (fig 3), observándose las mayores amplitudes en frecuencias de 0.2, 0.35, 0.55 y 0.82 Hz. Un efecto sorprendente es que en la tercera frecuencia resonante se presenten cinco máximos mientras que entre los 0.35 y 0.50 Hz se tienen amplificaciones moderadas. Cuando el ángulo incidente es de 30° se pierde la simetría del patrón de respuesta siendo éste más evidente para los contornos que definen la amplitud de 10 veces la incidente, observándose sólo la presencia de tres picos en la frecuencia de .55 Hz y apareciendo una resonancia lateral a los 0.48 Hz.

El efecto que causa un ángulo de incidencia mayor es correr algunos picos a frecuencias menores como se aprecia en la gráfica para un ángulo de incidencia de 60° . Aquí, la tercera frecuencia resonante se ha corrido de 0.55 Hz que presentaba para incidencias verticales, a 0.48 Hz y aparece una zona entre los 0.6 y 0.7 Hz de frecuencias que son menores a 10. No en todos los casos se aprecia este fenómeno de corrimiento, pero sí es evidente que la ubicación de las frecuencias pico cambia, ya sea por modificación de su posición o porque aparecen otras frecuencias pico. En la fig 4 se graficaron únicamente los contornos correspondientes a una amplitud de 2 veces la incidente y estos se presentan preferentemente en las zonas del valle con espesores más someros fuera del área de máxima amplitud y dependen de la frecuencia analizada. Para valles asimétricos, el ángulo de incidencia también influye de manera importante en la distribución de las frecuencias pico. En la fig 5 se muestran los resultados que se obtienen para un valle asimétrico con ángulos en los vértices de 10° y 8.18° sometido a distintos ángulos de incidencia. A manera de comparación,

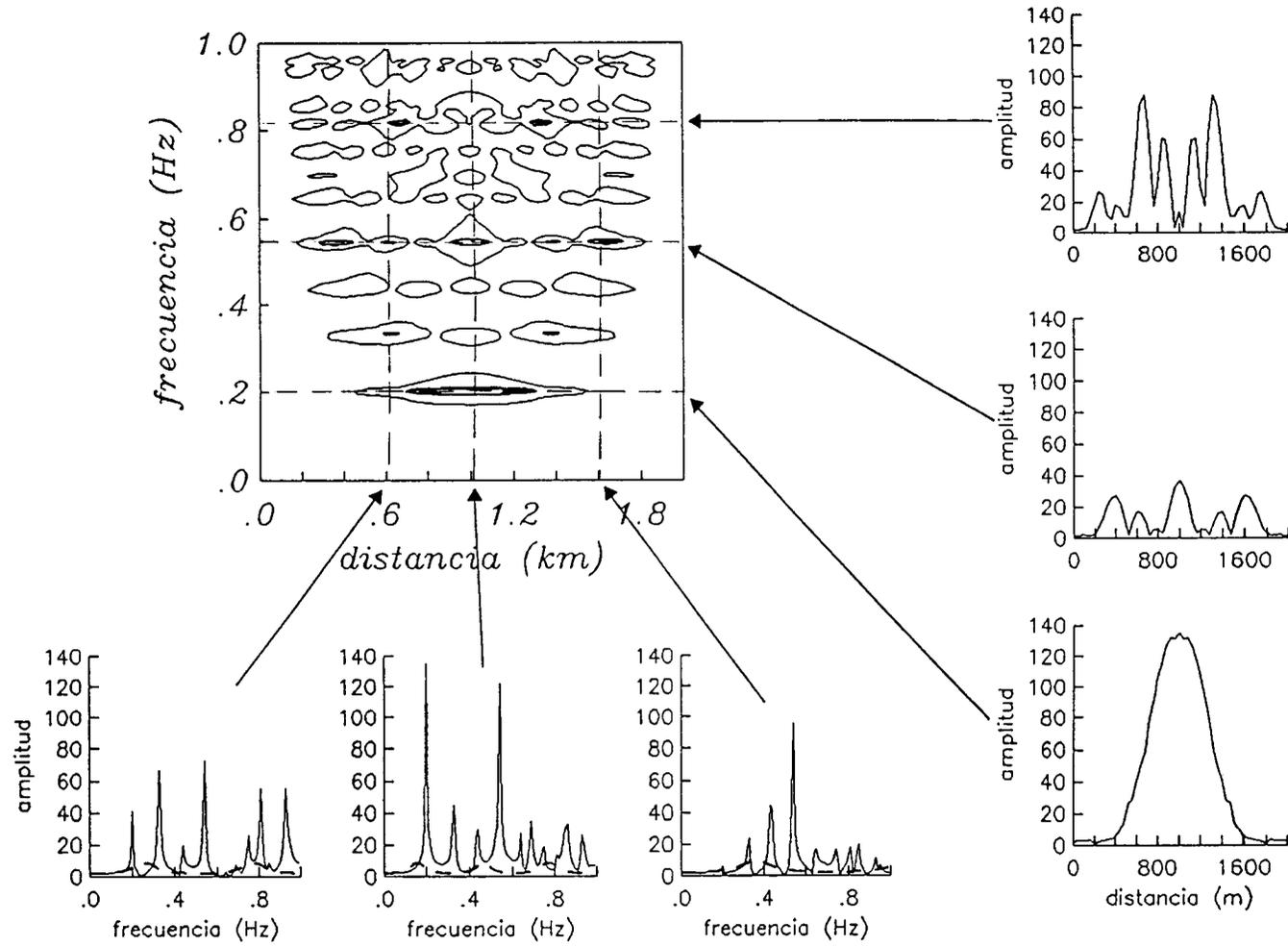


Fig 2. Contornos de amplitudes de 10 (línea delgada) y 65 veces (línea gruesa) la amplitud de la onda incidente, para un valle triangular simétrico ($N = 5$). En la parte superior de la figura se presentan los espectros de respuesta y en la inferior las gráficas de *espacio-amplitud*.

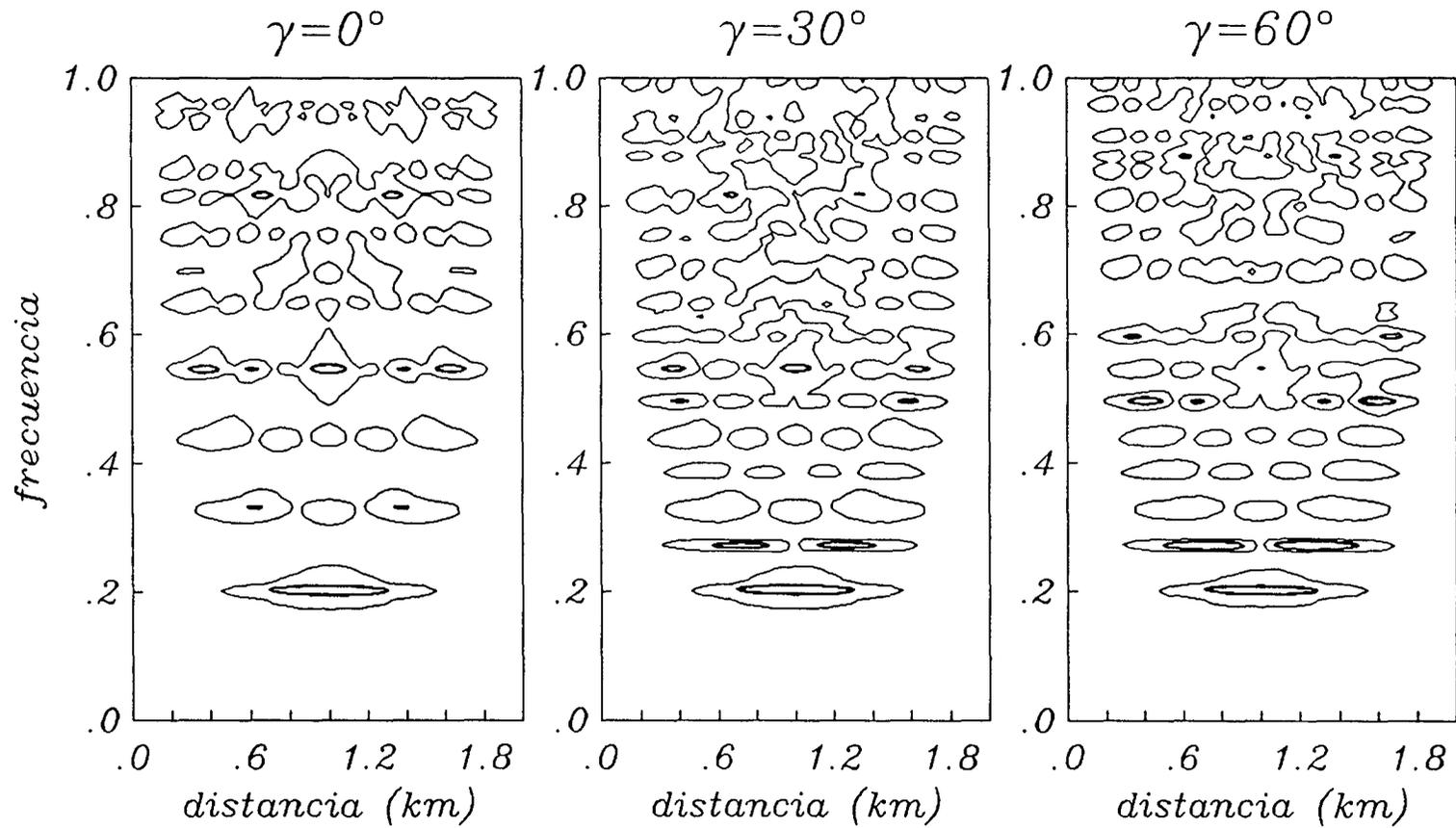


Fig 3. Contornos de amplitudes para un valle simétrico ($N=5$) ante incidencia de ondas SH con ángulos $\gamma = 0^\circ, 30^\circ$ y 60° . La línea gruesa representa a amplitudes de 65 veces la incidente y la delgada 10 veces la amplitud incidente.

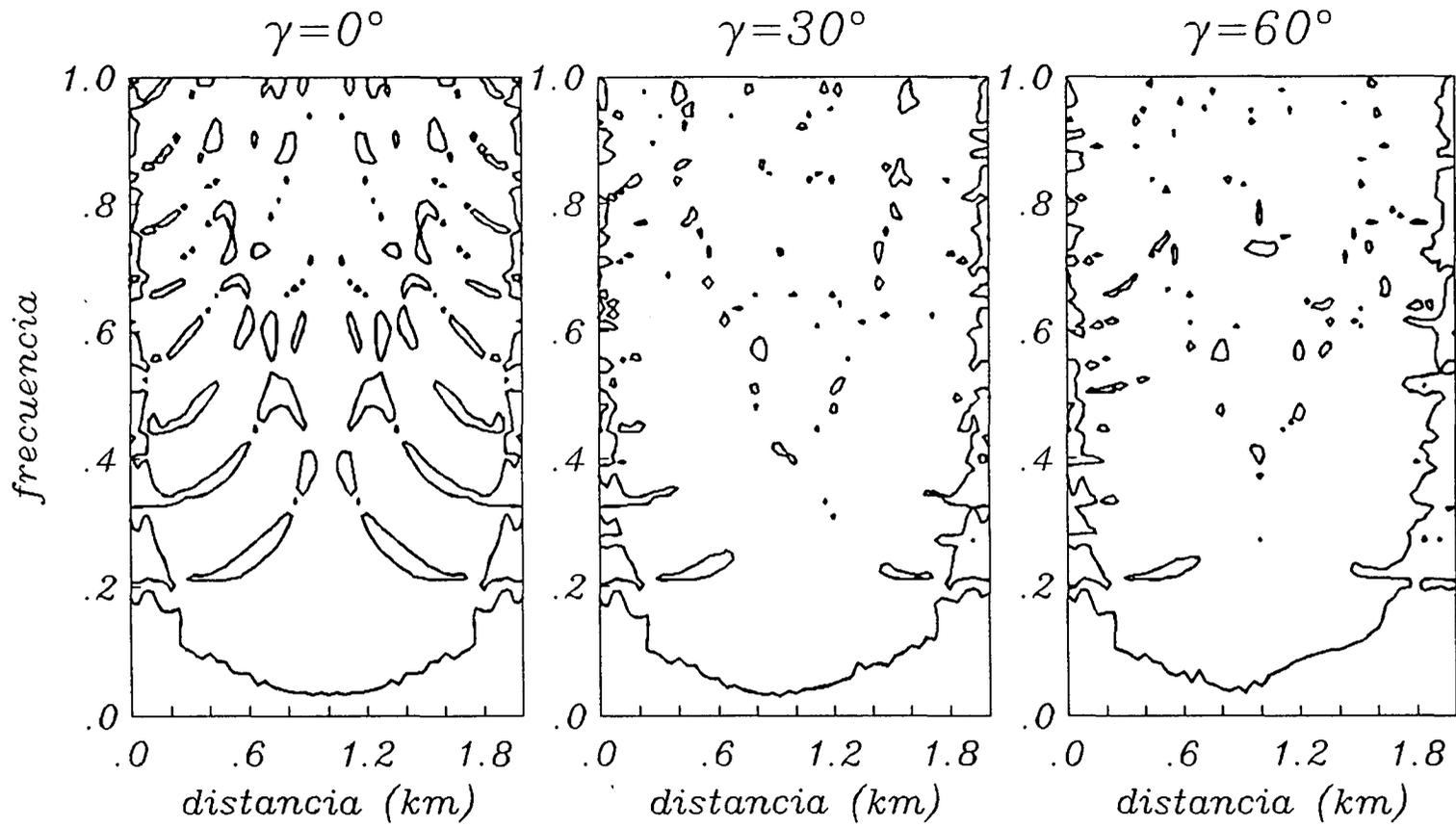


Fig 4. Contornos de amplitudes de dos veces la amplitud incidente para un valle simétrico ($N = 5$) ante incidencia de ondas SH con ángulos $\gamma = 0^\circ, 30^\circ$ y 60° .

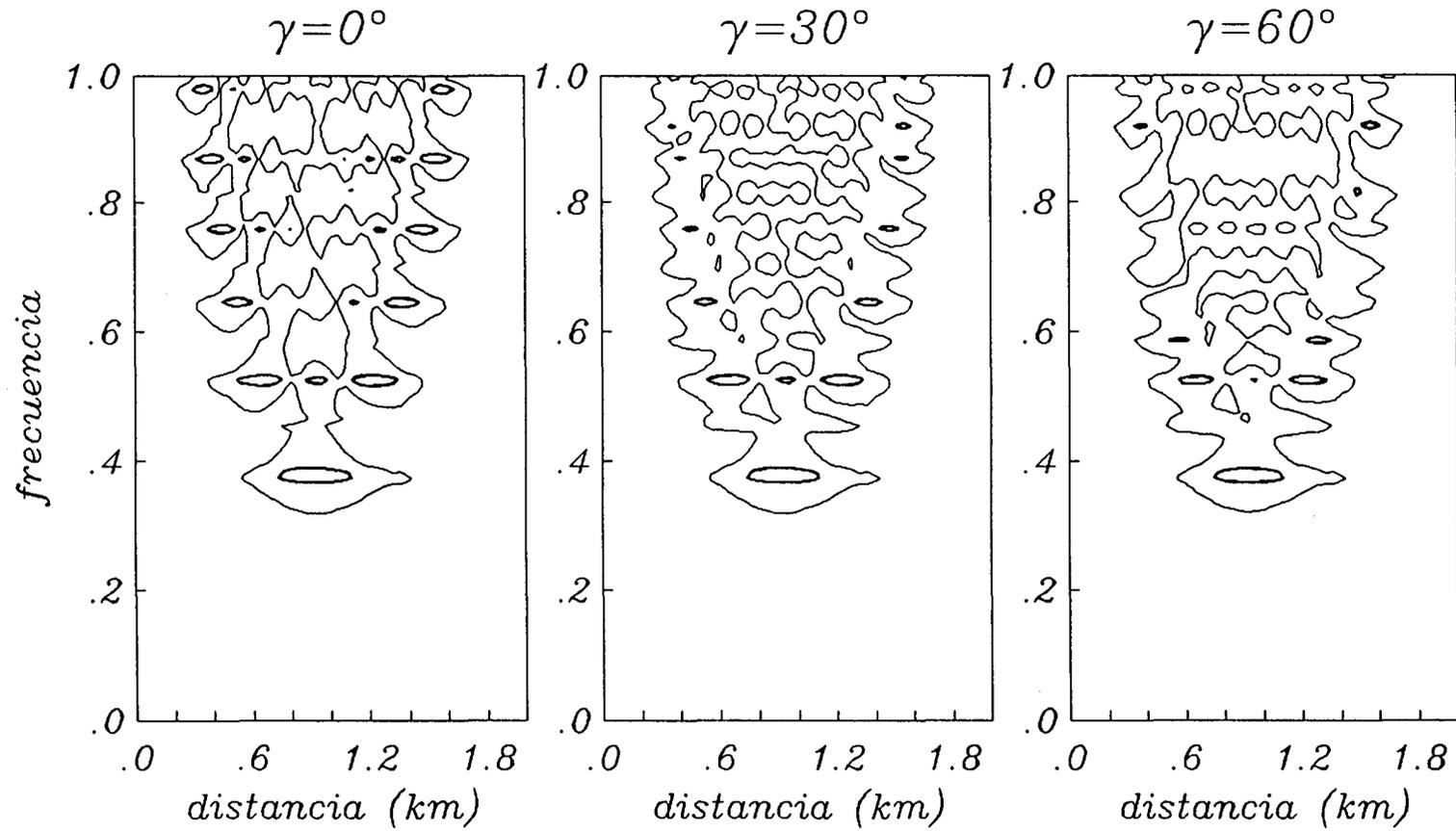


Fig 5. Contornos de amplitudes para un valle con ángulos en los vértices de 10° ($N = 9$) y 8.18° ($N = 11$) ante incidencia de ondas *SH* con ángulos $\gamma = 0^\circ$, 30° y 60° . La línea gruesa representa a amplitudes de 65 veces la incidente y la delgada 10 veces la amplitud incidente.

en la fig 6 se ha dibujado el diagramas $f-x$ de la respuesta esperada para un estrato de profundidad variable apoyado en una base que se interseca con la superficie libre (estrato-cuña) formando un ángulo de 18° . La sencillez de los contornos, al ser comparados con los obtenidos para el valle, muestran la importancia que las interferencias (constructivas o destructivas) de las ondas a determinadas frecuencias, generadas por la presencia del otro estrato-cuña que cierra el valle, tienen en el análisis de la respuesta sísmica. Estas interferencias definen patrones de resonancia en todo el depósito y producen los grandes picos del diagrama $f-x$. Generalmente la

aparición simultánea de los máximos se da en ciertas frecuencias que pueden llamarse de resonancia.

En la fig 7 se presentan los diagramas $f-x$ calculados para valles con las características descritas arriba, pero con ángulo de vértice de 12.86° ($N = 7$) para un extremo, haciendo variar el otro ángulo en 12.86° , 10° y 8.18° ($N = 7, 9$ y 11 , respectivamente). Se consideró incidencia vertical de ondas. Los contornos graficados corresponden a magnitudes de 65 veces (línea gruesa) y 10 veces (línea delgada) la magnitud incidente. Destacan en estos ejemplos las grandes amplificaciones en los

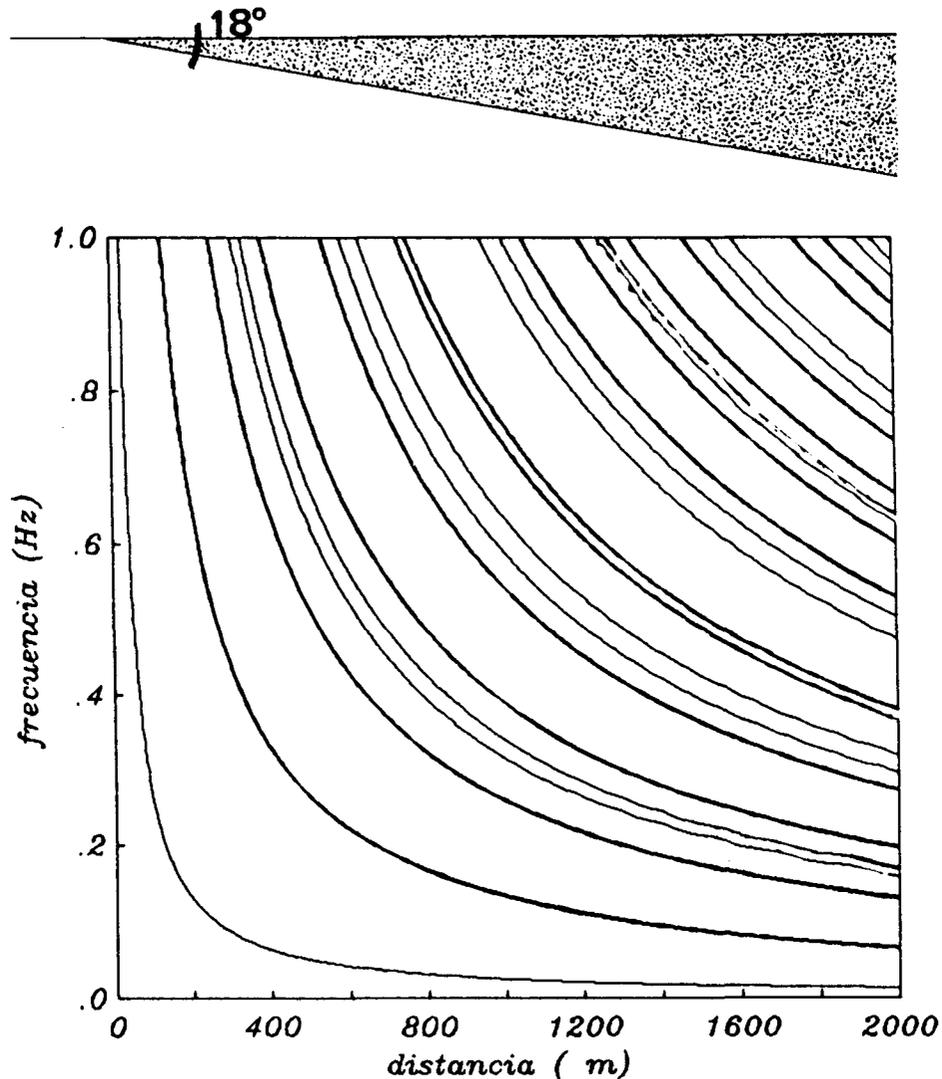


Fig 6. Diagrama de contornos para un estrato-cuña con ángulo de 18° .

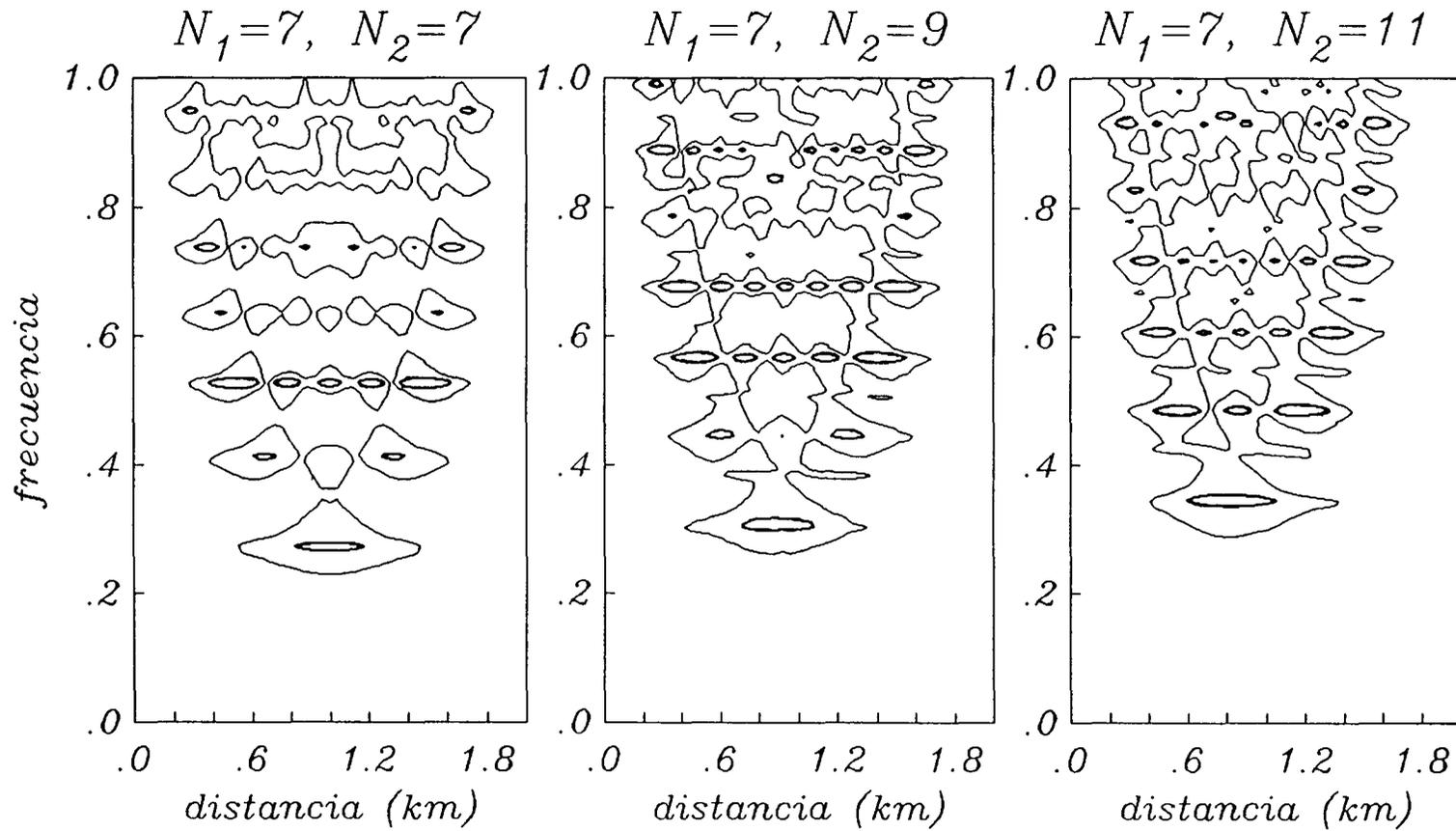


Fig 7. Contornos de amplitudes para un valle asimétrico ante incidencia vertical de ondas *SH* con ángulos en los vértices de 12.86° ($N = 7$) para un vértice variando el ángulo del otro vértice en 12.86° ($N = 7$), 10° ($N = 9$) y 8.18° ($N = 11$). La línea gruesa representa a amplitudes de 65 veces la incidente y la delgada 10 veces la amplitud incidente.

extremos de la zona excitada (que por cierto, crece con la frecuencia) entre los 0.25 y 1.0 Hz. Si bien la localización de los picos espectrales está controlada por el modelo unidimensional, las grandes amplitudes que se alcanzan son consecuencia de resonancias laterales. Por otra parte, la variación de las amplificaciones en posiciones intermedias parece deberse a la asimetría del modelo.

INTERPRETACIÓN CON TEORÍA DE RAYOS

Los diagramas de contornos en las funciones de transferencia en el dominio frecuencia-espacio ($f-x$) revelan que existe un patrón de resonancia, en el cual la propagación lateral juega un papel importante para frecuencias mayores de la que controla la respuesta unidimensional de la zona más profunda del valle. En estos resultados, la amplificación máxima para frecuencias ocurre en los bordes y dentro de una porción que crece con la frecuencia. Fuera de ellos la amplificación es moderada; dentro puede ser muy grande con un comportamiento resonante claramente definido. Este fenómeno puede ser explicado si consideramos que desde una zona de resonancia "local" la propagación de ondas es *estimulada* hacia los sitios más profundos. Los máximos muestran un patrón de resonancia lateral (ver p ej Ramos-Martínez y Sánchez-Sesma, 1992; Sánchez-Sesma, Ramos-Martínez y Campillo, 1993).

Una forma de explicar cómo ocurre el fenómeno de amplificación en el valle en frecuencias altas se obtiene al analizar las trayectorias de los rayos dentro del depósito. En la fig 8 se presentan las trayectorias seguidas por los rayos que entran en un depósito con ángulos de cuña de 10° y 8.18° en las distintas posiciones señaladas con la flecha. Se observa que existen zonas cercanas a los vértices para los cuales los rayos no se propagan lateralmente, presentándose un efecto de barrera que impide el paso de éstos aún cuando hayan iniciado su trayecto dentro de estas zonas (fig 8a, b y f). Esta barrera se forma en los sitios que tienen aproximadamente la misma profundidad. Se trata de un efecto controlado por el espesor del depósito. Las trayectorias que siguen algunos rayos son casi las mismas generando un efecto de enfocamiento de energía (fig 8c). Otra manera de interpretar estos resultados se basa en considerar la longitud de la onda que se propaga dentro del depósito, cuando ésta es muy grande no puede

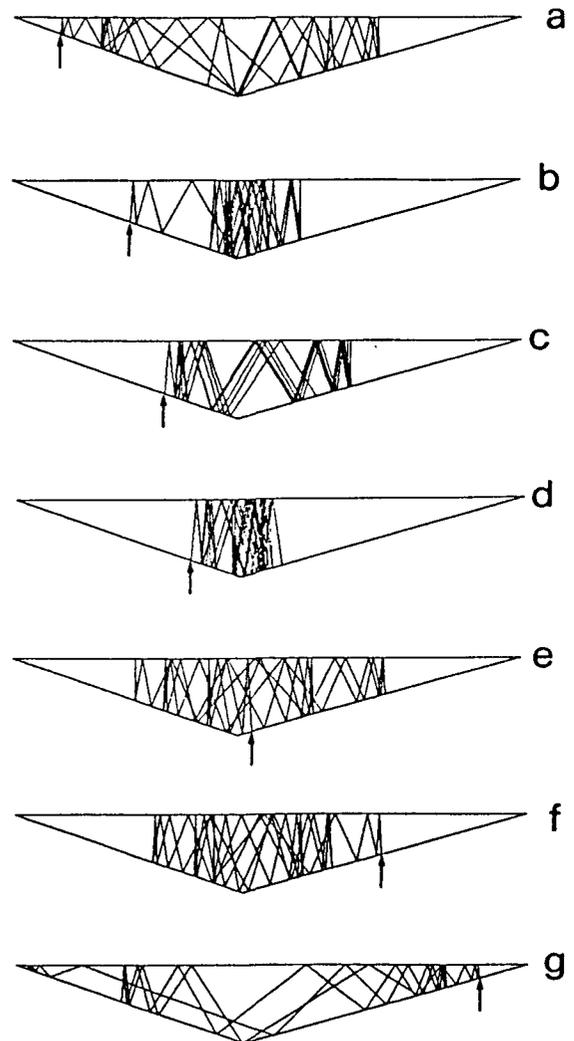


Fig 8. Trayectorias seguidas por los rayos que entran al depósito en las posiciones señaladas con la flecha.

propagarse por sitios donde el espesor es muy pequeño. Este comportamiento se debe a la difracción.

CONCLUSIONES

Para depósitos triangulares asimétricos ante incidencia de ondas *SH* se encontraron grandes amplificaciones; los diagramas de contornos de las funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia-espacio ($f-x$) revelan la existencia de un patrón de resonancia, en el cual las ondas superficiales generadas localmente juegan un papel significativo para frecuencias mayores que aquellas que controlan la respuesta unidimensional en la zona más profunda del valle.

Las amplificaciones máximas ocurren en los bordes y dentro de una porción que crece con la frecuencia. Este límite espacial corresponde a la resonancia "local" de un modelo unidimensional. Así, cuando la propagación de ondas es estimulada hacia las zonas más profundas, las amplificaciones son también controladas por las ondas superficiales. Esto hace evidente el mecanismo de acoplamiento que existe entre la respuesta unidimensional y las ondas superficiales. Nuestros resultados muestran que aún las irregularidades suaves estimulan la emisión de ondas superficiales, preferencialmente hacia las partes más profundas. Las ondas superficiales pueden generarse virtualmente en cualquier sitio dentro del depósito.

Estos resultados sugieren que a partir de las ondas *SH* se pueden encontrar aproximaciones prácticas que describan la respuesta sísmica de depósitos aluviales someros con variaciones suaves en su topografía para las ondas superficiales de Love (Rodríguez Zúñiga, 1992).

Cuando se analiza la asimetría del modelo se observa que ésta induce variaciones significativas con respecto a lo que se esperaría para problemas simétricos con variación suave. Ello es una poderosa motivación para profundizar en el desarrollo de modelos simplificados de este tipo. Los resultados hasta ahora obtenidos son prometedores.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la cuidadosa revisión de J. Avilés y E. Ovando; sus críticas y sugerencias ayudaron a mejorar notablemente el manuscrito. Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Proy 0523-T9109).

REFERENCIAS

- Paolucci, R, M Suarez y F J Sánchez-Sesma** (1992), "Fast computation of *SH* seismic response for a class of alluvial valleys", *Bull Seism Soc Am*, **82**, 2075-2086.
- Ramos-Martínez, J y F J Sánchez-Sesma** (1992), "Resonance characteristics in the seismic response of shallow alluvial valleys", *Proc Int Symp Seismic Disaster Prevention*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 253-260.
- Rodríguez Zúñiga, J L** (1992), "Simulación de la propagación de ondas sísmicas en configuraciones geológicas complejas", *Tesis de maestría en Sismología y física del Interior de la Tierra*. CCH-Inst de Geofísica, UNAM, México.
- Sánchez-Sesma, F J y S A Velázquez** (1987), "On the seismic response of a dipping layer", *Wave Motion*, **9**, 387-391.
- Sánchez-Sesma, F J, J Ramos-Martínez y M Campillo** (1992a), "Seismic response of alluvial valleys for incident *P*, *S* and Rayleigh waves: a boundary integral formulation", *Proc 10th World Conf Earth Engrg*, **2**, Madrid, España.
- Sánchez-Sesma, F J, J Ramos-Martínez y M Campillo** (1992b), "An indirect boundary element method applied to simulate the seismic response of alluvial valleys for incident *P*, *S* and Rayleigh waves", *Earthq Engrg Structl Dyn*, **22**, 279-295.