

APLICACIÓN DEL CÁLCULO PARALELO AL ANÁLISIS DE ENERGÍA SÍSMICA EN LA CODA DE TERREMOTOS REGIONALES

ARANTXA UGALDE*

LLUIS G. PUJADES*

y

JOSÉ A. CANAS**

* *Departament d'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica
Jordi Girona Salgado s/n, Mòdul D-2, 08034 Barcelona, España*

Tel.: + 34-93-401 7407, Fax: + 34-93-401 6504

E-mail: dugalde@etseccpb.upc.es

Tel.: + 34-93-401 7258, E-mail: pujades@etseccpb.upc.es

** *Instituto Geográfico Nacional
General Ibáñez de Ibero 3, 28003 Madrid, España*

Tel.: + 34-91-597 9410, Fax: + 34-91-597 9753

E-mail: canas@etseccpb.upc.es

RESUMEN

Las ondas de coda constituyen un instrumento muy útil de cara a la estimación de la atenuación de las ondas sísmicas durante su propagación a través de la litosfera terrestre. La atenuación total consta de dos efectos principales: la absorción intrínseca y la dispersión, que pueden ser separados si se efectúa una modelización de la envolvente de la coda sobre la base de la teoría de esparcimiento múltiple. En este trabajo compararemos, desde el punto de vista computacional, dos técnicas (una simulación por el método de Montecarlo y un procedimiento analítico) para obtener la distribución espacio-temporal teórica de la energía sísmica en la coda, bajo las hipótesis de dispersión isótropa múltiple y distribución uniforme de dispersores. Para ello estudiaremos las características de los algoritmos e introduciremos el cálculo paralelo, en un intento de reducir el tiempo de computación necesario para obtener los resultados.

APPLICATION OF PARALLEL COMPUTING FOR THE ANALYSIS OF SEISMIC ENERGY IN THE CODA OF REGIONAL EARTHQUAKES

SUMMARY

Coda waves constitute a powerful tool for the estimation of the seismic wave attenuation in the Earth's lithosphere. Total attenuation includes two effects: intrinsic absorption and scattering, that can be separated if we perform a multiple scattering modelling of the coda envelope. In this paper we will compare, in terms of the computational point of view, two techniques (a Montecarlo simulation and an analytical procedure) for obtaining the theoretical space and time distribution of the seismic energy in the coda, under the hypothesis of multiple

Recibido: Junio 1997

isotropic scattering and uniform distribution of scatterers. We will study the characteristic of the algorithms and will use parallelization techniques in order to reduce the time required for obtaining the results.

INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un terremoto o explosión subterránea en la Tierra, se generan ondas que se propagan en todas direcciones a partir de la fuente sísmica. No obstante, esta energía se atenúa durante su propagación como consecuencia del comportamiento anelástico del interior terrestre.

El fenómeno de atenuación incluye dos efectos principales, que son la absorción intrínseca y la dispersión o esparcimiento. El primero corresponde a un proceso de absorción anelástica, es decir, a la pérdida por deformación y transformación en calor de parte de la energía de las ondas sísmicas en su propagación a través de un medio anelástico. La atenuación por dispersión no es un proceso de disipación de la energía, sino una redistribución de la misma en el espacio y en el tiempo; es decir, la dispersión únicamente cambia la dirección de propagación de la onda o introduce un corrimiento de fase, y es debida a la interacción de la onda durante su propagación con las heterogeneidades del medio.

Una forma adimensional de medida de la atenuación de las ondas sísmicas es el llamado factor de calidad Q , o su inversa Q^{-1} , que es el factor específico de atenuación¹. Así, la atenuación total vendrá dada por la expresión

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s} \quad (1)$$

donde Q_t^{-1} representa la atenuación total, Q_i^{-1} es una medida de la absorción intrínseca y Q_s^{-1} cuantifica la atenuación por esparcimiento.

Es importante determinar la contribución de los efectos de absorción intrínseca y dispersión sobre la atenuación total para conocer mejor los mecanismos físicos que causan la atenuación sísmica en la litosfera. Por ejemplo, el estudio de la anelasticidad en la Tierra constituye un objetivo importante de los estudios de riesgo sísmico, el conocimiento del cual es fundamental para la predicción, prevención y minoración de los daños causados por los sismos. Asimismo se observa que la atenuación de la energía de las ondas sísmicas está directamente relacionada con la tectónica y la geología de la región afectada, así como con las características de los materiales que la componen. Una forma de obtener información sobre la constitución de una región será mediante el análisis de la atenuación de las ondas sísmicas.

Dependiendo del rango frecuencial a analizar, el estudio de la anelasticidad en la Tierra se puede realizar mediante el análisis de ondas internas, oscilaciones libres, ondas superficiales y ondas de coda. En el caso de 1 a 20 Hz, de gran interés para la sismología de período corto, se producen algunas dificultades, debidas fundamentalmente a la gran sensibilidad de las ondas sísmicas de estas frecuencias a la estructura del camino recorrido y a la presencia de heterogeneidades en la corteza y manto superior con dimensiones comparables a la longitud de onda de las ondas de período corto. Las ondas

de coda posibilitan tratar estos registros de alta frecuencia y hacer una estimación de la atenuación introducida por el medio sobre las ondas sísmicas durante su propagación.

En la Figura 1 podemos observar un claro ejemplo de registro de la coda. En los registros sísmicos de período corto se observa que la señal perdura después de la llegada de las ondas internas y superficiales, es decir, el área alrededor del foco sísmico continúa vibrando después del paso de las fases *P*, *S* y las ondas superficiales, formando una vibración residual que constituye la “coda” del sismograma. La amplitud de la vibración decae muy lentamente en el tiempo y este decrecimiento de la amplitud es el mismo para todas las estaciones registradoras y focos sísmicos situados en una misma región². Las ondas sísmicas de coda constituyen esta parte final de los registros de sismos locales.

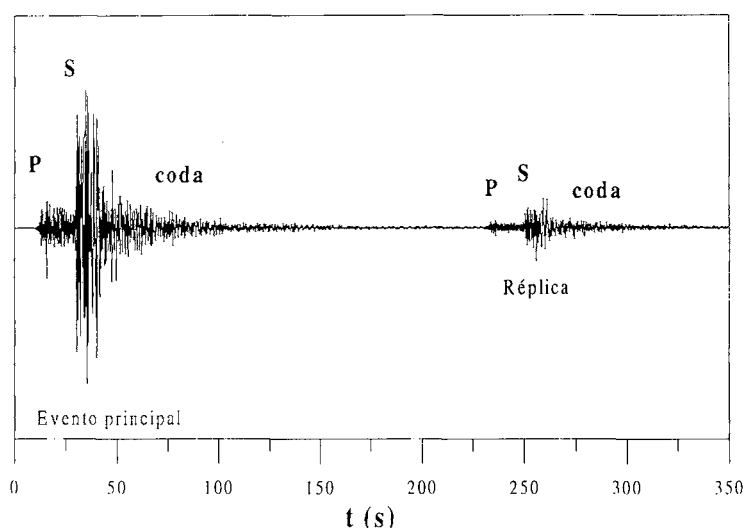


Figura 1. Registro de la componente vertical del terremoto ocurrido frente a las costas de Tarragona y registrado por la estación de banda ancha del Túnel del Cadí. Tiempo origen: 15/05/95 15:37:57.92. Se muestran las llegadas de las ondas *P* y *S*, junto con la coda de la *S* en el evento principal y en la réplica. Cortesía del *Institut d'Estudis Catalans*

El origen de las ondas de coda se explica considerando un modelo de Tierra lateralmente heterogéneo: cuando las ondas primarias, generadas en la fuente de un sismo, interactúan con las heterogeneidades del medio, se producen ondas secundarias, resultado de la incidencia de las ondas primarias o bien de otras ondas secundarias sobre las heterogeneidades. La superposición de estas ondas secundarias crea ondas retrodispersadas que se pueden considerar como la suma de pequeños eventos independientes que pueden ser tratados estadísticamente. Las ondas retrodispersadas se encontrarán, en los sismogramas debidos a sismos próximos, después de la llegada de las ondas primarias, es decir, en la coda de terremotos locales².

El número de iteraciones que una onda generada en el foco sísmico puede experimentar en su trayectoria hacia el receptor, depende de la intensidad de la dispersión. Se pueden diferenciar varias modelizaciones de la coda dependiendo del tipo

de esparcimiento que se considere. Por una parte está la hipótesis de dispersión simple², que se basa en un modelo de esparcimiento débil (la onda sólo sufre una interacción en su trayectoria del hipocentro a la estación) y en el cual el recorrido libre medio es mucho mayor que la distancia de propagación considerada. Diferentes autores han aplicado este modelo y lo han mejorado^{3,4,5}. Por otra parte, el modelo de difusión^{3,6,7} se basa en un esparcimiento muy fuerte y supone que toda la energía sísmica se dispersa por un proceso de difusión. Cuando el esparcimiento no es ni demasiado débil ni demasiado fuerte, hay que considerar una interpolación entre los dos modelos extremos anteriores (la onda ha sufrido varias interacciones antes de llegar al receptor); el modelo resultante de esta interpolación recibe el nombre de multidispersión^{8,9,10,11,12,13}.

Hoshiba¹⁴ modeló la distribución espacio-temporal de la energía de las ondas sísmicas multidispersadas mediante una simulación por el método de Montecarlo^{15,16}. Hoshiba¹⁴ supuso que el esparcimiento es isótropo y que los dispersores son puntuales y están aleatoriamente y uniformemente distribuidos.

Los resultados obtenidos mediante la simulación concuerdan¹⁷ con una solución integral del mismo problema obtenido por Zeng *et al.*¹⁸.

Fehler *et al.*¹⁹ adoptaron un método al que llamaron "Análisis por Ventanas Múltiples de Intervalos de Tiempo" (en inglés *Multiple Lapse Time Window Analysis* abreviado ---A.V.M.I.T), que tiene sus bases numéricas en un trabajo anterior²⁰. Este método se basa en comparar la energía observada de las ondas sísmicas, integrada sobre varias ventanas consecutivas de tiempo, con la esperada por el modelo de multidispersión isótropa^{14,18}. Este método ha sido aplicado por diferentes autores^{21,22,23,24,25,26,27} para cuantificar la contribución de la absorción intrínseca y el esparcimiento sobre la atenuación total en diferentes regiones de la Tierra.

El objetivo de este trabajo es presentar las metodologías más novedosas utilizadas para estimar los parámetros Q_i^{-1} , Q_s^{-1} y Q_i^{-1} y discutir su aplicación desde el punto de vista computacional.

MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA ENERGÍA SÍSMICA MULTIDISPERSADA

La hipótesis de esparcimiento simple es una aproximación que en general no se corresponde con el comportamiento del interior terrestre. Así, es necesario considerar dispersiones múltiples para obtener una modelización más realista de la distribución de energía en la coda. Hoshiba^{14,20} mediante una simulación por el método de Montecarlo y Zeng *et al.*¹⁸ a través de una expresión analítica modelizaron la forma de la coda bajo la hipótesis de dispersión múltiple y considerando esparcimiento isótropo y distribución uniforme de dispersores. Estas hipótesis son muy simples y representan tan sólo una aproximación a las complejidades del interior de la Tierra, pero han sido utilizadas en muchos estudios^{19,22,23,24,25,26,27} para separar las contribuciones de la absorción intrínseca y la dispersión sobre la atenuación total en muchas regiones del mundo. La estimación de la atenuación se lleva a cabo comparando la distribución teórica de energía en la coda, que depende de dos parámetros que caracterizan el medio (B_0 y L_e^{-1}), con las energías observadas en los sismogramas. B_0 es el albedo sísmico, o la razón de la

atenuación por esparcimiento respecto a la atenuación total, y L_e^{-1} es la inversa de la longitud de extinción, siendo esta la distancia sobre la cual la onda se atenúa en la proporción e^{-1} .

Las curvas teóricas obtenidas por Hoshiba^{14,20} y Zeng *et al.*¹⁸ son las mismas, pero sus bases numéricas son muy diferentes. Seguidamente describiremos las dos metodologías para después compararlas desde el punto de vista computacional.

Simulación por el método de Montecarlo de la densidad de energía de ondas multidispersadas

El objetivo de la simulación es estimar la distribución de energía de las ondas multidispersadas, en el espacio y en el tiempo, bajo la hipótesis de esparcimiento isótropo. Para ello, se representará la propagación de la energía de las ondas S a partir de la trayectoria de muchas partículas. Cada paquete de energía es radiado por la fuente en una dirección, que modificará en un lugar del espacio que posee las coordenadas geométricas del dispersor. Esta localización del dispersor y la nueva dirección vienen dados por una cierta función de probabilidad. El número de veces que cada paquete de energía cambia de dirección corresponderá al orden de dispersión que habrá sufrido. Se utilizan entonces un número muy grande de paquetes de energía y muchos órdenes de dispersión.

Las hipótesis básicas que se asumen en la simulación numérica son las siguientes¹⁴:

1. A partir de una fuente puntual y en un intervalo de tiempo muy corto, las ondas S se radian esféricamente.
2. No se producen conversiones de fase entre las ondas P y S ; la energía de las ondas S (coherentes) se propaga con una velocidad constante β .
3. Los dispersores son puntuales y están distribuidos aleatoriamente con una densidad uniforme.
4. La dispersión es isótropa.

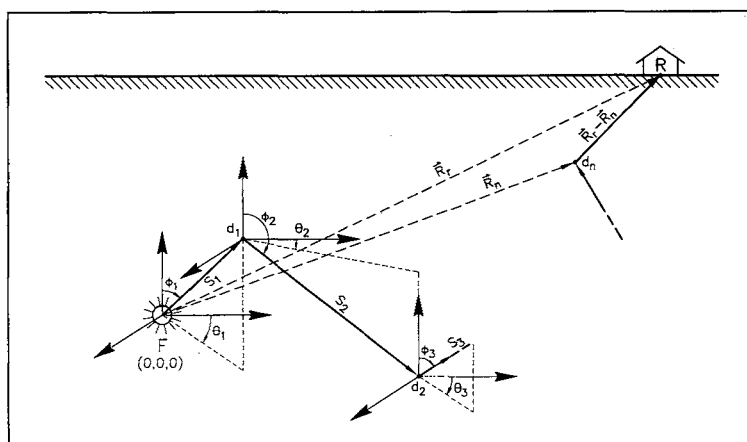


Figura 2. Localización de los dispersores (aleatorios), la fuente sísmica (F, determinista) y el receptor (R, determinista). Se han considerado sistemas locales de coordenadas esféricas en cada punto

En la Figura 2 se muestra un esquema del problema a resolver. Las partículas que representan la propagación de la energía de la onda S salen de la fuente, representada por el vector de posición $\vec{R}_0$ en un cierto sistema de referencia. $\vec{R}_1$ será la posición del primer dispersor y $\vec{R}_k$ la del k -ésimo dispersor, en el mismo sistema de coordenadas. El procedimiento se basa en la simulación de las coordenadas de los dispersores, que serán variables aleatorias. Éstas serán coordenadas esféricas (s_k, θ_k, ϕ_k) y representarán el vector posición del k -ésimo punto dispersor en un sistema de referencia situado en el $(k-1)$ punto de dispersión. Entonces, para una cierta distancia hipocentral y el orden de dispersión considerado, se calcula la probabilidad de que una partícula dispersada en $\vec{R}_n$ (siendo n el máximo orden de esparcimiento) atraviese un área unidad situada alrededor del receptor $\vec{R}_r$. La expresión de esta probabilidad es

$$P[s \geq |\vec{R}_r - \vec{R}_n|, \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \delta\theta, \phi_0 \leq \phi \leq \phi_0 + \delta\phi] \simeq \frac{1}{4\pi|\vec{R}_r - \vec{R}_n|^2} \exp(-g|\vec{R}_r - \vec{R}_n|) \quad (2)$$

Suponiendo que la partícula se desplaza con velocidad β constante, el tiempo que habrá tardado en llegar al receptor a partir de la fuente será

$$t_m = \frac{D_m}{\beta} \quad (3)$$

siendo D_m la distancia total recorrida por una partícula multidispersada n veces.

Se consideran por separado cada uno de los n órdenes de dispersión ($k = 1, 2, \dots, n$). Sea W_0 el número total de partículas que salen de la fuente ($m = 1, 2, \dots, W_0$). Para cada orden se calcula el tiempo t_m que habrá tardado cada partícula en llegar al receptor, procedente de un dispersor situado en una posición aleatoria. A este valor t_m se le asigna una probabilidad, que viene dada por la expresión (2) y que se va acumulando a medida que el proceso se repite. El eje temporal está dividido en segmentos de anchura Δt .

Así, el valor de la probabilidad se almacena en una matriz, donde las filas representan el rango de distancias hipocentrales considerado y las columnas son el tiempo de llegada de cada partícula ($E_k(r, t)$). La densidad de energía se obtiene entonces mediante la expresión

$$e_k(r, t) = \frac{E_k(r, t)}{\beta \Delta t}, \quad (k = 1, \dots, n) \quad (4)$$

donde k es el orden de dispersión, β la velocidad de la onda S y Δt la anchura del segmento temporal que almacena los valores acumulativos de la probabilidad. Este procedimiento se repite para todos los órdenes de dispersión y todas las distancias hipocentrales y finalmente la función densidad de energía se obtiene mediante la expresión

$$e(r, t) = \sum_{k=1}^n e_k(r, t) \quad (5)$$

Los detalles de este procedimiento se pueden encontrar en Hoshiba¹⁴ y Ugalde²⁷.

Cálculo analítico de la distribución de energía

La distribución de energía obtenida por Hoshiba¹⁴ mediante la simulación por el método de Montecarlo puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación integral¹⁸

$$E(\vec{r}, t) = E_0 \left(t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{\beta} \right) \frac{e^{-L_e^{-1}|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} + \int_V gE \left(\vec{r}_1, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{\beta} \right) \cdot \frac{e^{-L_e^{-1}|\vec{r}_1 - \vec{r}|}}{4\pi|\vec{r}_1 - \vec{r}|^2} dV_1 \quad (6)$$

donde $E(\vec{r}, t)$ es la densidad de energía sísmica por unidad de volumen para la distancia $\vec{r}$ y tiempo t , y para una fuente puntual en $t = 0$ situada en $\vec{r}_0$. El primer término de la parte derecha de la ecuación (6) representa la energía de la onda directa y el segundo término representa la contribución de todos los órdenes de la energía dispersada. β es la velocidad de las ondas S y $g = B_0 \cdot L_e^{-1}$ el coeficiente de esparcimiento.

Zeng *et al.*¹⁸ resolvieron la ecuación (6) en el dominio de las transformadas integrales y obtuvieron la siguiente solución integral compacta

$$E(r, t) = \delta \left(t - \frac{r}{\beta} \right) \frac{e^{-L_e^{-1}\beta t}}{4\pi\beta r^2} + \sum_{n=1}^2 E_n(r, t) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\Omega t}}{2\pi} d\Omega \cdot \int_0^{\infty} \frac{g^3}{2\pi^2\beta r} \frac{\left[\tan^{-1} \left(\frac{k}{L_e^{-1} + \frac{i\Omega}{\beta}} \right) \right]^4}{\left[1 - \frac{g}{k} \tan^{-1} \left(\frac{k}{L_e^{-1} + \frac{i\Omega}{\beta}} \right) \right]} \frac{\sin(kr)}{k^3} dk \quad (7)$$

La ecuación (7) describe la caída temporal de la energía de las ondas multidispersadas de forma isotrópica en un medio uniforme con distribución aleatoria de dispersores, para una fuente sísmica impulsiva. Esta expresión puede calcular numéricamente resolviendo la integral respecto a k mediante el método de la suma de números de onda discretos²⁸, donde la convergencia de la integral está asegurada por la presencia en el integrando de la función $\sin(kr)$ y k^{-3} . En los casos $n = 1$ y $n = 2$ se tiene¹⁸

$$E_1(r, t) = \frac{g}{4\pi r \beta t} H \left(t - \frac{r}{\beta} \right) e^{-L_e^{-1}\beta t} \ln \frac{1 + \frac{r}{\beta t}}{1 - \frac{r}{\beta t}} \quad (8)$$

$$E_2(r, t) = \frac{g^2}{16\pi} H \left(t - \frac{r}{\beta} \right) e^{-L_e^{-1}\beta t} \left[\frac{\pi^2}{\beta t} - \frac{3}{r} \int_0^{\frac{r}{\beta t}} \left(\ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^2 d\alpha \right] \quad (9)$$

donde $H \left(t - \frac{r}{\beta} \right)$ es la función de Heaviside.

EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

La mayoría de las veces no es fácil deducir una expresión analítica que describa un proceso físico y es necesario, por tanto, utilizar procedimientos numéricos. Es por esto que la ecuación (6) constituye un gran éxito en el campo de la atenuación sísmica. Podríamos entonces pensar, a primera vista, en descartar la utilización de una simulación numérica para obtener los mismos resultados ya que disponemos de una fórmula para calcularlos. A pesar de todo, la modelización teórica está basada en unas hipótesis importantes, como son el esparcimiento isótropo y distribución uniforme de dispersores y asimismo se considera que la fuente es puntual y que la coda está únicamente constituida por ondas S dispersas. Es evidente que introducir analíticamente alguna modificación sobre el modelo no es sencillo. Por otra parte, es posible calcular la distribución teórica de energía utilizando un procedimiento numérico: una simulación por el método de Montecarlo. Este método sí que permite introducir, más o menos fácilmente, algunas mejoras sobre el modelo, como puede ser una absorción intrínseca no uniforme o cierta dependencia de la distribución de dispersores con la profundidad, etc. Así, dado que disponemos de dos metodologías paralelas que permiten obtener los mismos resultados (la distribución teórica de energía en la coda), seguidamente efectuaremos un análisis de sus características desde el punto de vista computacional.

Se escribieron dos programas en lenguaje Fortran 77, uno que efectúa la simulación por Montecarlo (2) y el otro para resolver numéricamente la expresión analítica (7). Los experimentos numéricos para computar el tiempo de CPU requerido por los dos algoritmos se llevaron a cabo sobre dos entornos computacionales distintos:

1. Alpha AXP/VMS 7630; con 3 CPU a 200 MHz, 512 Mbytes de memoria central y arquitectura de 64 bits. Localización: E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.
2. Origin 2000 (Silicon Graphics); con 32 procesadores R10000 (196 MHz), 4 Gbytes de memoria principal y velocidad punta de 12,54 Gflops/s. Localización: Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona.

La ejecución de los dos códigos en el Alpha AXP requirió un tiempo de CPU de 18,5 horas para la simulación y 12,1 horas para la expresión analítica. Estos tiempos, traducidos a horas reales de espera del usuario como consecuencia de la compartición de recursos, como memoria, discos, etc., pueden variar entre tres días y una semana.

En un intento por reducir este período de espera, solicitamos el acceso al supercomputador O-2000, que dispone de una arquitectura de procesadores superescalares (en concreto puede iniciar la ejecución simultánea de 5 instrucciones por ciclo) con memoria compartida distribuida (la memoria está físicamente distribuida pero se accede a ella a través de un espacio único de direcciones). La compilación de los programas se efectuó optimizando los códigos íntegros, pudiendo destacar la propagación de constantes (se elimina código no utilizado propagando argumentos de funciones, constantes o variables, cuyo valor conoce el compilador) y el *inlining* automático, es decir, el compilador sustituye la llamada a una cierta función por el código de la misma. En este caso hemos utilizado el máximo nivel de optimización

(O3), o compilación agresiva, que explota al máximo la arquitectura R10000.

La ejecución de los códigos secuenciales en el O-2000 significó una mejora de casi 4 veces en la velocidad de los programas: la simulación requirió 4,6 horas de tiempo de CPU y la expresión analítica 3,9 horas. A pesar de este buen resultado, intentamos conseguir una mejora aún superior utilizando el concepto de paralelismo.

El objetivo de la utilización del paralelismo en este caso concreto, es conseguir la ejecución de los programas en el menor tiempo posible. Esto se consigue, en rasgos generales, repartiendo el programa más o menos equitativamente entre los procesadores disponibles.

Un punto importante a considerar cuando se paraleliza un código es escoger la metodología de paralelización a utilizar. En este caso, se ha optado por dos opciones:

1. PFA (*Power Fortran Accelerator*), que es un paralelizador automático que inserta directivas de paralelización en los bucles DO cuando considera que es seguro hacerlo, a partir del análisis de las dependencias de datos.
2. Directivas MP (*Message Passing*), que delegan toda la responsabilidad de la paralelización al programador, ya que requieren una distribución explícita de la ejecución del código entre los diferentes nodos.

El algoritmo que efectúa la simulación por Montecarlo auguraba buenos resultados de cara a su paralelización. Esto es debido a que consta de 4 bucles (Figura 3): 1) para todos los órdenes de dispersión de 1 a 20; 2) para todas las distancias hipocentrales de 1 a 100; 3) para todas las partículas que representan la propagación de la onda *S* de 1 a 500.000 y finalmente 4) de nuevo para todos los órdenes de esparcimiento. Asimismo, el número de instrucciones que ha de ser ejecutado por el bucle más interno es pequeño.

Debido a esto, escogimos la segunda metodología de paralelización, es decir, utilizamos las directivas MP. A partir de estas directivas, podemos definir regiones paralelas, que se convierten en subrutinas que en tiempo de ejecución son ejecutadas en paralelo por *threads* diferentes. Los *threads*, o procesos ligeros, son diferentes flujos de ejecución de un mismo programa que se lanzan a los diferentes procesadores. El número de *threads* es en este caso igual al número de procesadores utilizados, siendo el compilador el que efectúa el *scheduling* (o planificación), es decir, asigna cada trabajo a cada procesador. Así, el número total de iteraciones de un bucle DO se distribuye entre los diferentes *threads* y son ejecutados por diferentes procesadores. Dependiendo del entorno computacional utilizado y del programa en sí, es necesario efectuar una estrategia de balance de carga para optimizar la utilización de CPU en los diferentes procesadores. Para todo ello, se efectuó en primer lugar un análisis de dependencias de variables y se clasificaron éstas en locales y compartidas. Las variables compartidas son visibles por todos los *threads*, ya que comparten memoria, y las variables locales son conservadas como privadas, es decir, se crean al entrar en la región paralela y se destruyen a la salida.

En la Figura 3 podemos observar que la parte paralelizada del programa es el segundo bucle. Por ello, existirá un *overhead* en tiempo debido a la presencia del primer bucle, que introducirá penalizaciones debido a las llamadas consecutivas de la región paralela, que implica la puesta en marcha y sincronización de los diferentes *threads* (20 veces). Debido a ello, normalmente se introducen las directivas de paralelización en los

bucles más externos.

Para comparar resultados, hemos medido el tiempo de CPU requerido para cada iteración del primer bucle, es decir, para cada orden de esparcimiento, ya que es la parte del programa que se ejecuta en paralelo. Debido a que el bucle más interno depende de este número, como se puede observar en la Figura 3, el tiempo de CPU se incrementará cuanto mayor sea el orden de dispersión. La Figura 4 muestra una comparación entre los tiempos de CPU requeridos por el Alpha AXP (código secuencial), y los algoritmos secuencial y paralelizado con seis procesadores en el Origin 2000. Se puede observar una mejora muy buena en la velocidad del programa. Con objeto de comparar los tiempos de CPU consumidos por el programa paralelizado utilizando un número diferente de procesadores, se ha representado en la Figura 5 una comparación entre los tiempos para 2, 4, 6 y 8 procesadores. Se puede observar que los mejores resultados son los obtenidos para 8 procesadores.

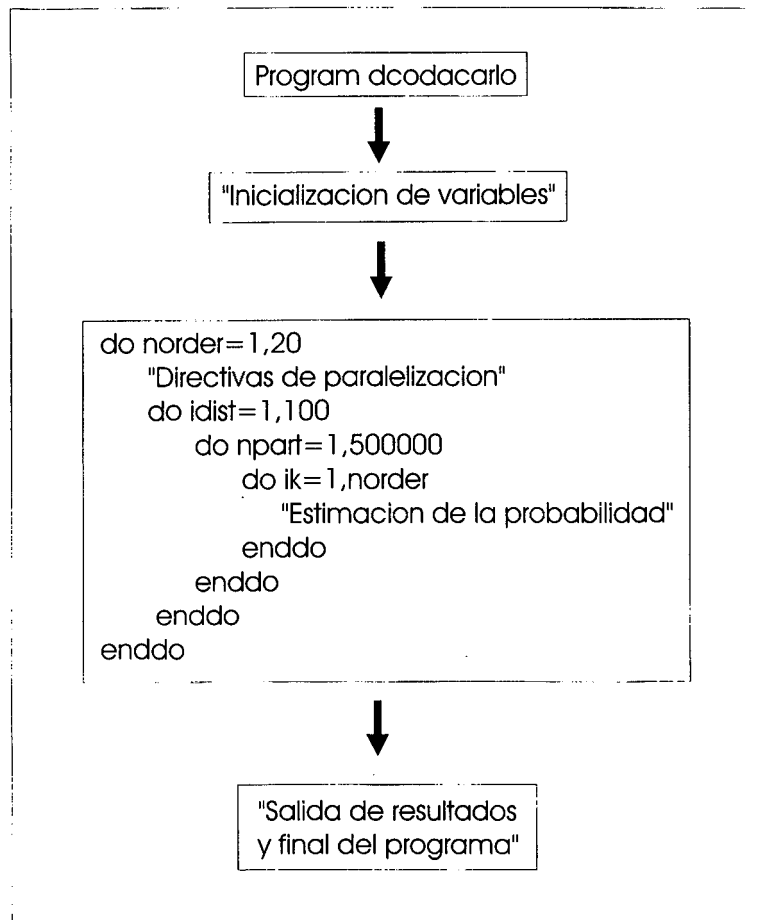


Figura 3. Diagrama de flujo del programa que efectúa la simulación por Montecarlo. Se muestra la localización de las directivas de paralelización

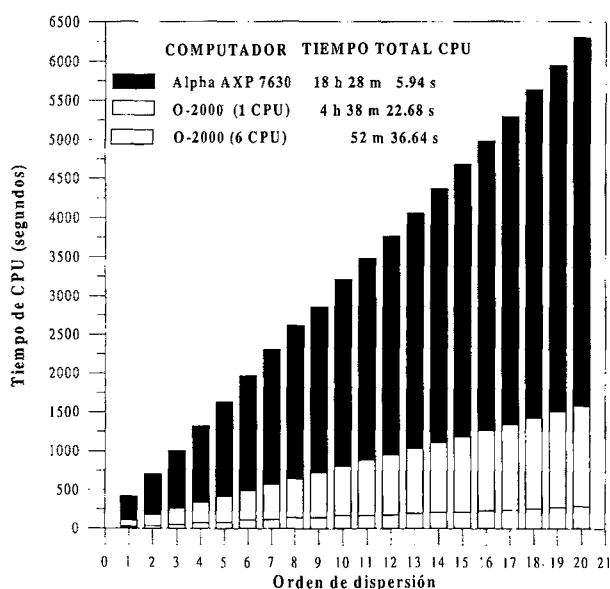


Figura 4. Tiempo de CPU para cada orden de esparcimiento. Se ha representado una comparación entre los tiempos requeridos por el código secuencial en los ordenadores Alpha AXP y Origin 2000, y el código paralelizado para 6 procesadores en el O-2000

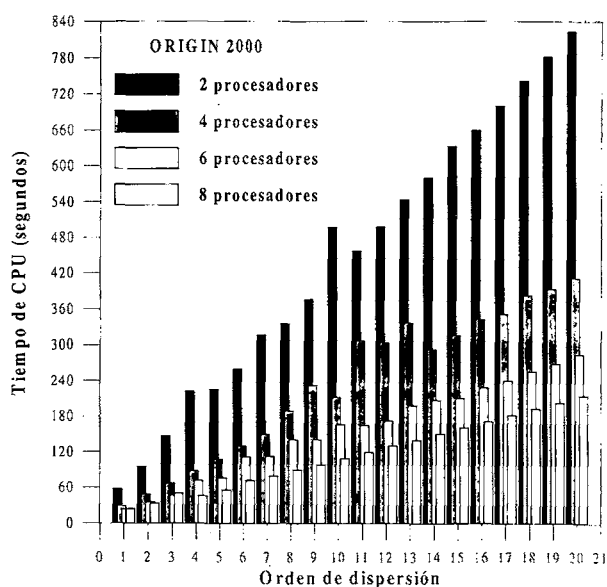


Figura 5. Comparación entre los tiempos de CPU requeridos para diferentes niveles de paralelismo y cada orden de dispersión. El tiempo total de CPU es: 2 h 28 m 51,28 s para 2 procesadores; 1 h 18 m 6,82 s para 4 procesadores; 52 m 36,64 s para 6 procesadores y 38 m 44,3 s para 8 procesadores

En la Figura 6 se ha representado el *speed-up*, o aceleración, que da cuenta de la efectividad de la paralelización del programa. Se define como la relación entre el tiempo de ejecución del programa en secuencial (T_{sec}) y el tiempo de ejecución en paralelo (T_{par}): $S = T_{sec}/T_{par}$. El *speed-up* ideal es el número de procesadores utilizando al ejecutar el programa (si el número de procesadores es p , el programa se debería ejecutar p veces más rápido). En la Figura 6 observamos que S se aparta del ideal tanto más cuantos más procesadores se utilicen. Sin embargo, se puede observar que para el número de procesadores utilizado, el *speed-up* no se aparta de la linealidad.

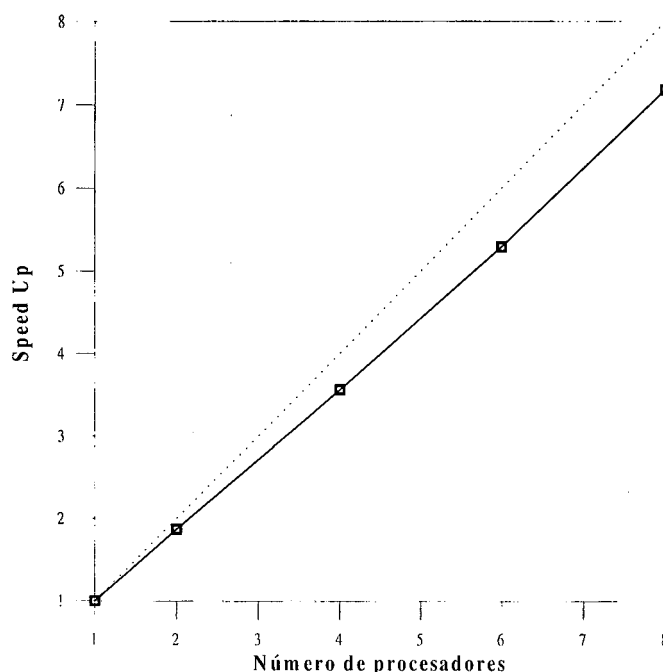


Figura 6. Se muestra el *speed-up* del código paralelizado en función del número de procesadores utilizados. S toma los valores de 1,87; 3,56; 5,29 y 7,18 para 2, 4, 6 y 8 procesadores, respectivamente

También se ha calculado la eficiencia, como muestra la Figura 7. Esta se define como la razón entre el *speed-up* y el número de procesadores utilizado. La eficiencia ideal sería 1. Podemos observar que las eficiencias conseguidas en la paralelización de este código son muy buenas, en todos los casos superiores a 0,8.

En cuanto al código que resuelve la expresión analítica no presenta tantas facilidades como el anterior de cara a su paralelización. En primer lugar, la utilización de PFA ha proporcionado resultados insatisfactorios, y el análisis de dependencias de variables ha planteado una gran dificultad o incluso probable imposibilidad de paralelizar el algoritmo de la manera como está diseñado.

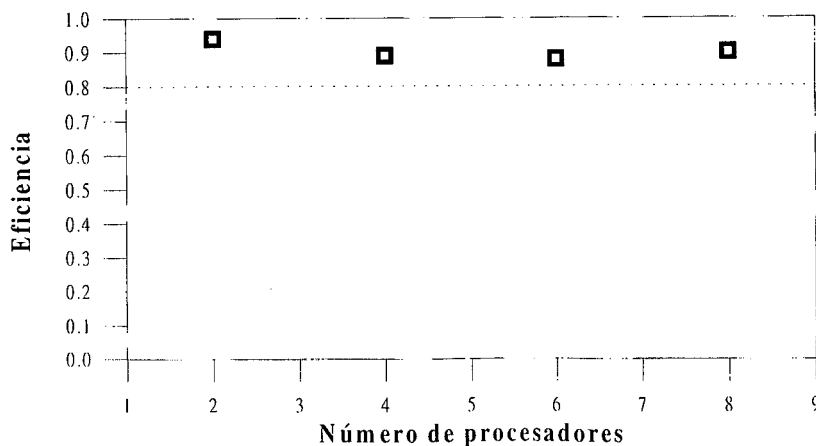


Figura 7. Representación de la eficiencia de la paralelización, que toma los valores de 0,94; 0,89; 0,88 y 0,90 para 2,4,6 y 8 procesadores, respectivamente

RESULTADOS

La Figura 8 muestra un ejemplo de la implementación del algoritmo de simulación por Montecarlo, para el que se han considerado las hipótesis de distribución uniforme de dispersores en el medio y esparcimiento isótropo.

Como observación más importante cabe comentar que, mientras que el producto resultante de la simulación es la función energía en función de la distancia hipocentral y el tiempo, en la figura se muestran las curvas de distribución de energía únicamente en función de r . Esto se debe a la aplicación del Análisis por Ventanas Múltiples de Intervalos de Tiempo (Fehler *et al.*¹⁹), basado en subdividir el registro de coda en tres intervalos temporales consecutivos: un primer intervalo que incluye la onda directa más las primeras ondas de coda, una parte media de ondas de coda y una tercera parte de ondas de coda tardías. La integración de la función densidad de energía respecto al tiempo sobre estos intervalos temporales proporciona las curvas de la Figura 8, donde en este caso se han escogido las ventanas de tiempo: 0-15 s, 15-30 s y 30-45 s a partir de la llegada de la onda S .

Por otra parte, se observa que se han representado diferentes familias de curvas dependiendo de dos parámetros: B_0 o albedo sísmico y L_e^{-1} , o inversa de la longitud de extinción. Se da el caso que el coeficiente de dispersión utilizado en la simulación (ecuación (2)) es $g = B_0 \cdot L_e^{-1}$, lo que indica que diferentes valores de estos dos parámetros proporcionarán diferentes curvas sintéticas. Sin embargo, en realidad no es necesario efectuar la simulación numérica para cada valor del parámetro g considerado, sino que para una única simulación, es posible efectuar posteriormente un reescalado que proporciona la distribución de energía para todas las posibles combinaciones de B_0 y L_e^{-1} . Este procedimiento está descrito en detalle en Hoshiba¹⁴ y Ugalde²⁷. Así, a partir de la Figura 8 se concluye que el decrecimiento de la curva $4\pi r^2 E_1(r)$ con la distancia hipocentral está afectado principalmente por la inversa de la longitud de extinción, mientras que las razones $\frac{E_1(r)}{E_2(r)}$ y $\frac{E_1(r)}{E_3(r)}$ dependen del valor del albedo sísmico.

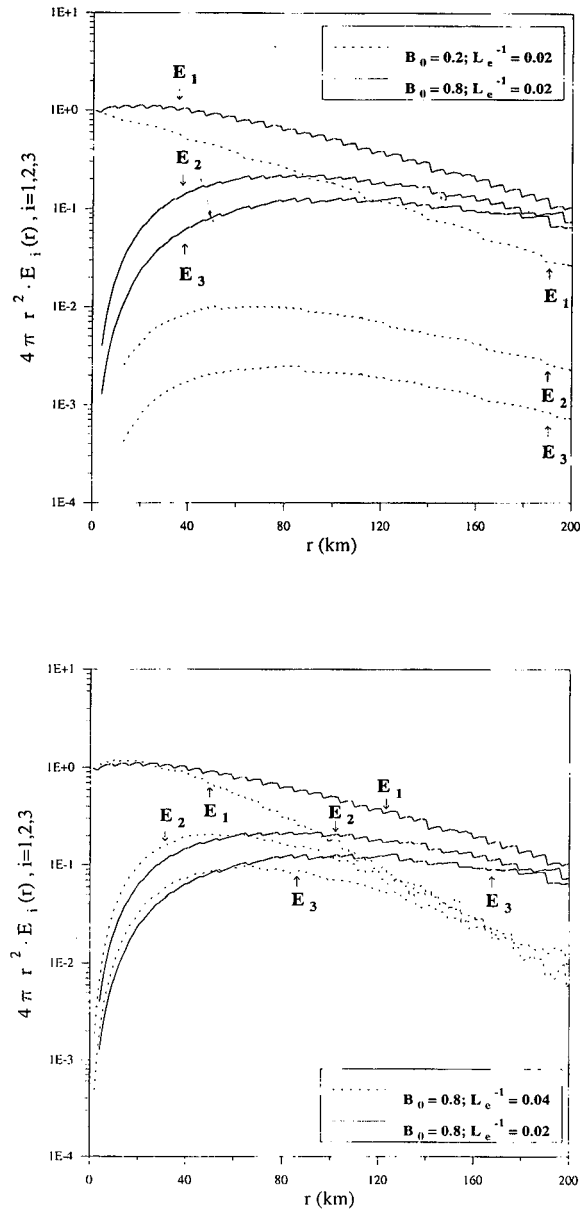


Figura 8. Representación de la energía en función de la distancia hipocentral, corregida por el efecto de expansión geométrica ($4\pi r^2$), para la coda próxima (E_1), coda media (E_2) y coda tardía (E_3). Se muestran varios ejemplos de las familias de curvas teóricas para diferentes valores de los parámetros de atenuación L_e^{-1} y B_0 . Estas curvas se han obtenido a partir de una simulación por Montecarlo utilizando un coeficiente de dispersión $g = 0,1$ y una velocidad de las ondas $S \beta = 3,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

En definitiva, es posible obtener las curvas observadas de energía en función de la distancia hipocentral a partir de los sismogramas. Así, los parámetros de atenuación del medio serán aquellos que proporcionen un error mínimo entre las observaciones y la correspondiente familia de curvas teóricas, cada una de ellas correspondiente a un valor de B_0 y L_e^{-1} . A partir de estos parámetros, la atenuación total, absorción intrínseca y atenuación por esparsamiento se obtienen a partir de las relaciones: $Q_t^{-1} = L_e^{-1} \cdot \frac{\beta}{\omega}$, $Q_i^{-1} = (1 - B_0) \cdot Q_t^{-1}$, $Q_s^{-1} = B_0 \cdot Q_t^{-1}$, siendo β la velocidad de las ondas de cizalla y ω la frecuencia angular.

La aplicación de este procedimiento a casos reales ha sido llevada a cabo en diferentes regiones de la Tierra^{21,22,23,24,25,26,27}.

CONCLUSIONES

El objetivo final del estudio consiste en estimar la contribución de la absorción intrínseca (Q_i^{-1}) y la dispersión (Q_s^{-1}) sobre la atenuación total (Q_t^{-1}) de las ondas sísmicas en una región determinada. Esto se lleva a cabo mediante una comparación entre la energía real observada en la coda de los registros sísmicos y una energía teórica estimada. Las curvas sintéticas de energía se pueden calcular siguiendo dos procedimientos alternativos: una simulación por el método de Montecarlo (2) a (5) y un cálculo analítico (6) a (9).

En este trabajo hemos descrito estas dos técnicas y hemos discutido su aplicación desde el punto de vista computacional. Hemos mostrado que la implementación de los códigos Fortran en supercomputadores más potentes y la utilización de nuevas tecnologías de computación, como el cálculo paralelo, nos ha beneficiado al lograr, después de una pequeña inversión de tiempo, mejoras espectaculares en la velocidad de los programas.

Así, la diferencia entre tiempos de computación de 6,4 horas observada para el Alpha AXP entre el código Fortran que resuelve la expresión analítica (7) y la simulación por Montecarlo, se redujo a 0,7 horas mediante la ejecución de los códigos esenciales en el O-2000, siendo aún ventajosa la aplicación de la expresión analítica desde el punto de vista de consumo de tiempo CPU.

Sin embargo, la aplicación del cálculo paralelo permitió obtener los resultados de la simulación con una diferencia de 3,3 horas de tiempo de CPU (para 8 procesadores) respecto a la resolución analítica. En concreto, el código que efectúa la simulación por el método de Montecarlo ha mejorado su velocidad en más de 28 veces, si comparamos los tiempos de ejecución en el Alpha AXP y el paralelizado para 8 procesadores en el Origin 2000. Asimismo, la alta efectividad en la paralelización de este código viene dada por la obtención de un *speed-up* lineal y eficiencias superiores a 0,8.

Finalmente, podemos concluir que la introducción del cálculo paralelo en la estimación de la distribución de energía en la coda sísmica ha supuesto pasar de un método analítico, ventajoso desde el punto de vista numérico y computacional, a una simulación numérica mucho más ventajosa ahora desde el punto de vista computacional, la cual permite además introducir modificaciones necesarias sobre la hipótesis del modelo más sencillamente que la forma analítica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al C.E.P.B.A. (Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona) y en especial a Oriol Farré, el acceso a Origin 2000 y la orientación en la utilización de sus recursos. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la D.G.I.C.Y.T., número de proyecto: PB93-0972, PB95-0777 y MAR 95-1916.

REFERENCIAS

1. L. Knopoff, "Q", *Rev. Geophys.*, Vol. **2**, pp. 625-660, (1964).
2. K. Aki, "Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as Scattered Waves", *J. Geophys. Res.*, Vol. **74**, pp. 615-631, (1969).
3. K. Aki y B. Chouet, "Origin of Coda Waves: Source, Attenuation and Scattering Effects.", *J. Geophys. Res.*, Vol. **80**, pp. 3322-3342, (1975).
4. H. Sato, "Energy Propagation Including Scattering Effects. Single Isotropic Scattering Approximation", *J. Phys. Earth.*, Vol. **25**, pp. 27-41, (1977).
5. A.M. Dainty, "A Scattering Model to Explain Seismic Q Observations in the Lithosphere between 1 and 30 Hz", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. **8**, pp. 1126-1128, (1981).
6. M.P. Wesley, "Diffusion of Seismic Energy in the Near Range", *J. Geophys. Res.*, Vol. **70**, pp. 5099-5106, (1965).
7. Y. Nakamura, G.V. Latham, M. Ewing y J. Dorman, "Lunar Seismic Energy Transmissions", *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. **51**, p. 776, (1970).
8. Y.F. Kopnischev, "The Role of Multiple Scattering in a Formation of a Seismogram's Tail", *Izv. Acad. Sci. USSR, Phys. Solid Earth.*, Vol. **13**, pp. 394-398, (1977).
9. L.S. Gao, N.N. Biswas, L.C. Lee y K. Aki, "Effects of Multiple Scattering on Coda Waves in Three Dimensional Medium", *Pure Appl. Geophys.*, Vol. **121**, pp. 3-15, (1983a).
10. L.S. Gao, N.N. Biswas, L.C. Lee y K. Aki, "Comparison of the Effects between Single and Multiple Scattering on Coda Waves for Local Earthquakes", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. **73**, pp. 377-380, (1983b).
11. A. Frankel y L. Wennerberg, "Energy-Flux Model of the Seismic Coda: Separation of Scattering and Intrinsic Attenuation", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. **77**, pp. 1223-1251, (1987).
12. R.S. Wu, "Multiple Scattering and Energy Transfer of Seismic Waves: Separation of Scattering Effect from Intrinsic Attenuation, I, Theoretical Modelling", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. **82**, pp. 57-80, (1985).
13. T. Shang y L. Gao, "Transportation Theory of Multiple Scattering and its Application to Seismic Coda Waves of Impulsive Source", *Sci. Sin., Ser. B*, Vol. **31**, pp. 1503-1514, (1988).
14. M. Hoshiaba, "Simulation of Multiple Scattered Coda Wave Excitation Based on the Energy Conservation Law", *Phys. Earth. Planet. Inter.*, Vol. **67**, pp. 123-136, (1991).
15. A.A. Gusev y I.R. Abubakirov, "Montecarlo Simulation of Record Envelope of a Near Earthquake", *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. **49**, pp. 30-36, (1987).
16. I.R. Abubakirov y A.A. Gusev, "Estimation of Scattering Properties of the Lithosphere of Kamchatka Based on Montecarlo Simulation of Record Envelope of a Near Earthquake", *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. **64**, pp. 52-67, (1990).

17. M. Hoshiaba, "Comment on 'Compact Solution for Multiple Scattered Wave Energy in Time Domain' by Yuehua Zeng", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. **82**, pp. 1552-1553, (1992).
18. Y. Zeng, F. Su y K. Aki, "Scattered Wave Energy Propagation in a Random Isotropic Scattering Medium, I, Theory", *J. Geophys. Res.*, Vol. **96**, pp. 607-619, (1991).
19. M. Fehler, M. Hoshiaba, H. Sato y K. Obara, "Separation of Scattering and Intrinsic Attenuation for the Kanto-Tokai Region, Japan, Using Measurements of *S*-Wave Energy vs. Hypocentral Distance", *Geophys. J. Int.*, Vol. **108**, pp. 787-800, (1992).
20. M. Hoshiaba, H. Sato y M. Fehler, "Numerical Basis of the Separation of Scattering and Intrinsic Absorption from Full Seismogram Envelope A Montecarlo Simulation of Multiple Isotropic Scattering", *Pap. Geophys. Meteorol.*, Vol. **42**, pp. 65-91, Meteorol. Res. Inst. of Japan, (1991).
21. K. Mayeda, S. Koyanagi, M. Hoshiaba, K. Aki y Y. Zeng, "A Comparative Study of Scattering Intrinsic and Coda Q^{-1} for Hawaii, Long Valley and Central California between 1.5 and 15.0 Hz", *J. Geophys. Res.*, Vol. **97**, pp. 6643-6659, (1992a).
22. K. Mayeda, S. Koyanagi, M. Hoshiaba, K. Aki y Y. Zeng, "Correction to 'A Comparative Study of Scattering, Intrinsic and Coda Q^{-1} for Hawaii, Long Valley and Central California between 1.5 and 15.0 Hz' by K. Mayeda, S. Koyanagi, M. Hoshiaba, K. Aki y Y. Zeng", *J. Geophys. Res.*, Vol. **97**, pp. 12425, (1992b).
23. M. Hoshiaba, "Separation of Scattering Attenuation and Intrinsic Absorption in Japan Using the Multiple Lapse Time Window Analysis of Full Seismogram Envelope", *J. Geophys. Res.*, Vol. **98**, pp. 15809-15824, (1993).
24. A. Jin, K. Mayeda, D. Adams y K. Aki, "Separation of Intrinsic and Scattering Attenuation in Southern California Using TERRAscope Data", *J. Geophys. Res.*, Vol. **99**, pp. 17835-17848, (1994).
25. A. Akinci, E. del Pezzo y J.M. Ibáñez, "Separation of Scattering and Intrinsic Attenuation in Southern Spain and Western Anatolia (Turkey)", *Geophys. J. Int.*, Vol. **121**, pp. 337-353, (1995).
26. L.G. Pujades, A. Ugalde, J.A. Canas, M. Navarro, F.J. Badal y V. Corchete, "Intrinsic and Scattering Attenuation from Observed Coda *Q* Frequency Dependence. Application to the Almeria Basin (Southeastern Iberian Peninsula)", *Geophys. J. Int.*, (1997).
27. A. Ugalde, "Atenuació sísmica intrínseca i dispersiva a partir d'ones de coda. Aplicació a la conca d'Almeria, Les Illes Canàries i el nord-est de Veneçuela", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, (1997).
28. M. Bouchon, "Discrete Wave Number Representation of Elastic Wave Fields in Three-Space Dimensions", *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, pp. 3609-3614, (1979).