

MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS BASADO EN ALGORITMO FDTD EN PARALELO

Alberto Silva L.^a, Herling Gonzalez A.^b and William Agudelo^c

^a*Escuela de Física y Grupo de Petrosísmica, Universidad Industrial de Santander, Cra 27 Calle 9 Ciudad Universitaria, Bucaramanga (Santander), Colombia, silva.l.a.l@gmail.com, <http://www.xiccg.uis.edu.co/petrosísmica>*

^b*Grupo de Geofísica, Instituto Colombiano de Petróleo, Piedecuesta, Santander, Colombia. herling@tux.uis.edu.co*

^c*Grupo de Geofísica, Instituto Colombiano de Petróleo, Piedecuesta, Santander, Colombia. william.agudelo@ecopetrol.com.co*

Keywords: FDTD, MPI, Ecuación de Onda Acústica, Geofísica Computacional.

Abstract. Los algoritmos de malla intercalada fueron creados para guardar una mejor estabilidad y eficiencia en diferencias finitas dominio temporales (FDTD), en nuestro caso esta técnica es usada para modelar las propagaciones de ondas sísmicas, esquema que permite reproducir la fenomenología de la dinámica sísmica en medios heterogéneos. Como la solución de las ecuaciones de ondas son computacionalmente costosas, presentamos una propuesta general para paralelizar y acelerar la solución.

1 INTRODUCCIÓN

El modelado sísmico es una herramienta importante para su uso en interpretación sísmica y en exploración sísmológica. Este permite sintetizar sismogramas y capturas de pantalla del campo de onda en el espacio y tiempo. Los cálculos son llevados a cabo basados en la ecuación de onda acústica ó elástica. Como los cómputos no pueden ser representados con funciones continuas, un método de discretización debe ser usado para asignar un valor finito a la derivada que describe la física de la propagación de una onda. El método que hemos escogido es el de diferencias finitas dominio temporales (FDTD) nombre asignado por [Taflove and Brodwin \(1975\)](#).

2 ESQUEMA NUMÉRICO

[Yee \(1966\)](#) y [Taflove and Brodwin \(1975\)](#) desarrollaron el método FDTD para solucionar las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell en el vacío. Este método ha sido usado como un estándar para solucionar sistemas de ecuaciones diferenciales parciales de manera general. El esquema FDTD de malla intercalada esta basado en la aproximación de diferencias finitas de los operadores diferenciales tanto en el espacio como el tiempo de la ecuación de onda.

Nuestro fenómeno físico es descrito por tres ecuaciones diferenciales de primer orden donde la derivada temporal de un campo esta relacionada con la derivada espacial de los otros dos. Tanto la propagación de onda acústica como elástica hacen parte de este fenómeno. Para nuestro propósito consideraremos unicamente la propagación acústica, específicamente pequeñas variaciones las cuales pueden ser descritas en términos del campo escalar de presión $P(x, z, t)$ y el campo de velocidades $v(x, z, t)$. Las propiedades del medio sobre el que se propaga la onda acústica son tanto la velocidad c como la densidad ρ . Podemos considerar que estas propiedades varían respecto de la posición caracterizando un medio heterogéneo.

Las ecuaciones que gobiernan la propagación en 3D de manera acústica son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial t} &= -\rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{v} \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P\end{aligned}\tag{1}$$

expandiendo los términos en 2D tenemos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\rho c^2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)\tag{2}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}\tag{3}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}\tag{4}$$

donde P es el campo escalar de presión, y $\mathbf{v} = \{v_x, v_z\}$, son los campos de velocidad.

Para obtener un algoritmo FDTD con aproximación acústica, el campo de presión y las componentes de velocidad son discretizados tanto en el tiempo como el espacio. De manera tal que tenemos un campo escalar y un campo vectorial arreglados en el espacio-tiempo. Para el

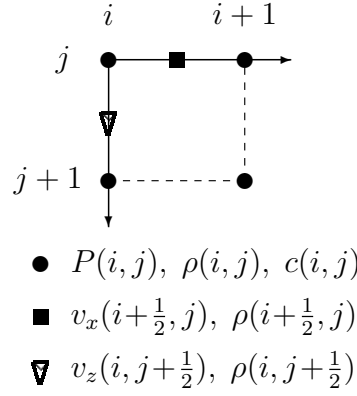


Figure 1: Esquema de malla intercalada, para la solución de los campos.

esquema acústico de FDTD los nodos deben ser acomodados de acuerdo a la figura 1 y a las ecuaciones discretas 5, 6, 7.

$$\frac{P^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - P^{n-\frac{1}{2}}(i, j)}{\delta t} = -\rho c^2 \left[\frac{v_x^n(i+\frac{1}{2}, j) - v_x^n(i-\frac{1}{2}, j)}{\delta x} + \frac{v_z^n(i, j+\frac{1}{2}) - v_z^n(i, j-\frac{1}{2})}{\delta z} \right] \quad (5)$$

$$\frac{v_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j) - v_x^n(i+\frac{1}{2}, j)}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{P^{n+\frac{1}{2}}(i+1, j) - P^{n+\frac{1}{2}}(i, j)}{\delta x} \right] \quad (6)$$

$$\frac{v_z^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}) - v_z^n(i, j+\frac{1}{2})}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{P^{n+\frac{1}{2}}(i, j+1) - P^{n+\frac{1}{2}}(i, j)}{\delta z} \right] \quad (7)$$

Un importante criterio es la estabilidad del algoritmo. Asumiendo una solución de onda plana propagándose a través del dominio, la estabilidad es conservada con la ecuación 8 :

$$c \delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\delta x)^2} + \frac{1}{(\delta z)^2}}} \quad (8)$$

la precisión de la solución numérica esta asociada con la representación de la longitud de onda sísmica en seis punto de malla

$$\delta x = \delta z = \delta h = \frac{\lambda_{min}}{c} = \frac{c_{min}}{6 \cdot \pi f_0} \quad (9)$$

3 CÁLCULOS CON MPI

Este trabajo hace uso de la interfaz de paso de mensajes (MPI) para los cálculos en paralelo dentro de una división del dominio de manera eficiente. La figura 2 muestra el esquema de paralelización de la malla FDTD. Hemos descompuesto el espacio a simular dentro de subdominios y asignamos a cada uno una unidad de procesamiento, el numero total de procesos puede depender del numero de núcleos en el procesador o el numero de hebras simultaneas a ejecutar (Gropp and Lusk, 2008). Separamos el dominio a lo largo de la dirección x donde los respectivos subdominios vecinos intercambian la actualización de los campo en cada paso de tiempo (Aoyama and Nakano, 1999).

La figura 2 está basada en la implementación del algoritmo paralelo resumido de la siguiente manera:

1. Inicialización MPI.
2. Lectura de parámetros para la simulación.
3. Calculo dh, dt basado en la velocidad del medio y el criterio de las ecuaciones 8 y 9.
4. Descomposición del dominio computacional en subdominios.
5. Para cada paso de tiempo:
 - (a) Calcula el campo $P(i, j)$.
 - (b) Comunica $P(i, j)$ en las fronteras del subdominio.
 - (c) Calcula los campos $v_x(i + \frac{1}{2}, j), v_z(i, j + \frac{1}{2})$.
 - (d) Comunica $v_x(i + \frac{1}{2}, j), v_z(i, j + \frac{1}{2})$ en las fronteras del subdominio.
6. Finaliza MPI.

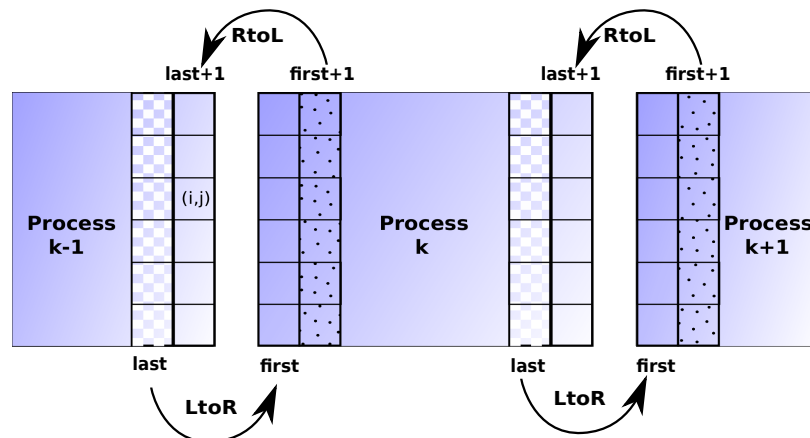


Figure 2: Esquema de paso de mensajes (comunicación) entre procesos vecinos.

4 MODELADO

El modelo de *Marmousi*, fue creado inicialmente por el Instituto Francés del Petróleo (IFP), es usado para aspectos prácticos en procesamiento de datos sísmicos como migración e inversión. Los datos utilizados en este trabajo para crear los modelos de velocidad y densidad se basan en una segunda versión del modelo conocido como *Marmousi2* (Martin et al., 2006). Ver figuras 3 y 4. Los parámetros que se tuvieron en cuenta durante la simulación se encuentran resumidos en la tabla 1.

Tamaño del paso de tiempo dt	0.000978 [s]
Numero de pasos T_{out}	2000
Tiempo simulado T	1.95608 [s]
Tamaño de malla dh	6.5 [m]
Longitud L_x	10563.9 [m]
Profundidad L_z	3737.98 [m]
Velocidad min c_{min}	1560.2 [m/s]
Velocidad max c_{max}	4700 [m/s]
Frecuencia de la Ondicula f_0	20 [Hz]

Table 1: Parámetros que se tuvieron en cuenta durante la simulación.

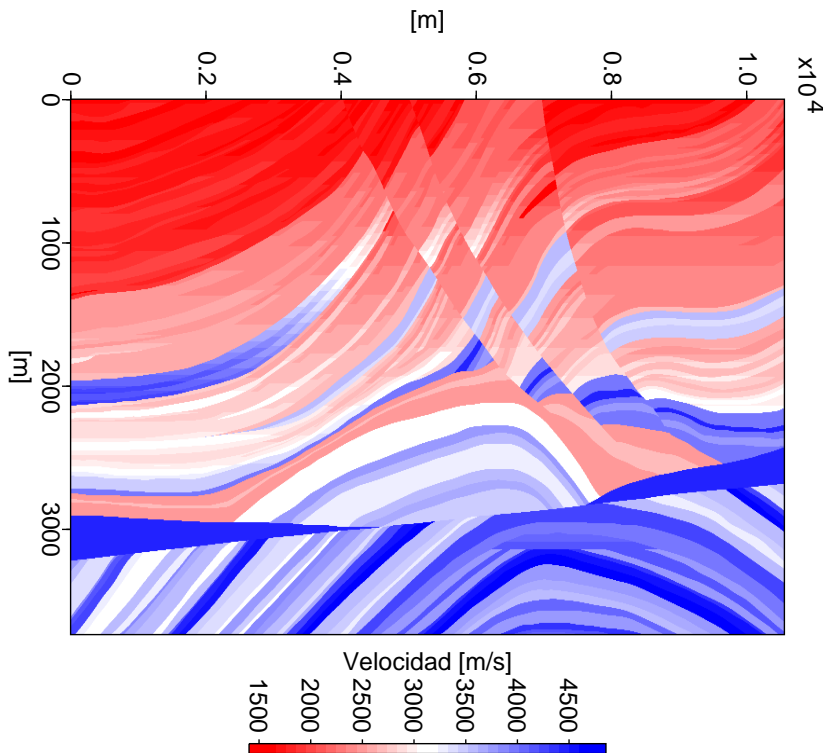


Figure 3: Valores de velocidad del campo onda acústico, en el modelo de Marmousi con 575x1625 nodos equivalentes en profundidad a 3.74 Km y 10.6 Km en longitud ($dh = 6.5 m$).

5 CONCLUSIÓN

Un modelo de diferencias finitas dominio temporales para ondas acústicas en el subsuelo ha sido llevado a cabo e implementado totalmente de manera paralela. El método de malla intercalada FDTD es eficiente para estimar el valor del campo próximo a la fuente en el dominio del tiempo. Los efectos de impedancia acústica del modelo de *Marmousi* tiene un grado significativo en el patrón *tiempo-profundidad* del frente de onda. Para la mayoría de nuestras simulaciones FDTD el tiempo de calculo se ha reducido notablemente respecto de los códigos seriales, no obstante esto depende del tipo de hardware y software, cuyo benchmark no se llevó acabo. Hemos observado que las librerías de mpich administra de manera eficiente los procesos para procesadores con varios núcleos que computadores independientes en una red ó cluster. También hemos observado que la solución de la ecuación de onda en diferencias finitas es efi-

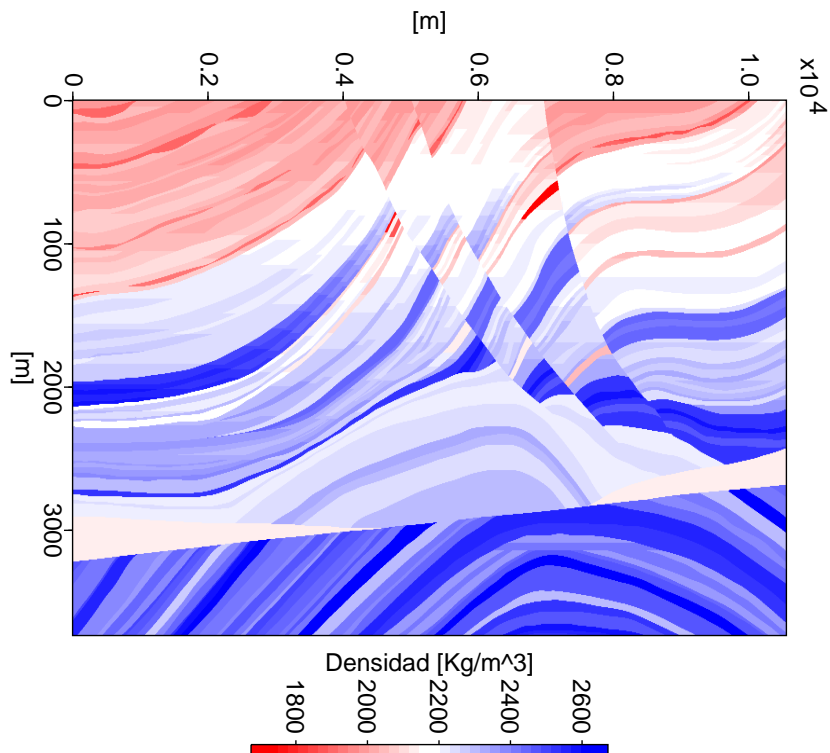


Figure 4: Valores de densidad [Kg/m^3] del modelo de Marmousi con 575x1625 nodos equivalentes en profundidad a 3.74 Km y 10.6 Km en longitud ($dh = 6.5 m$).

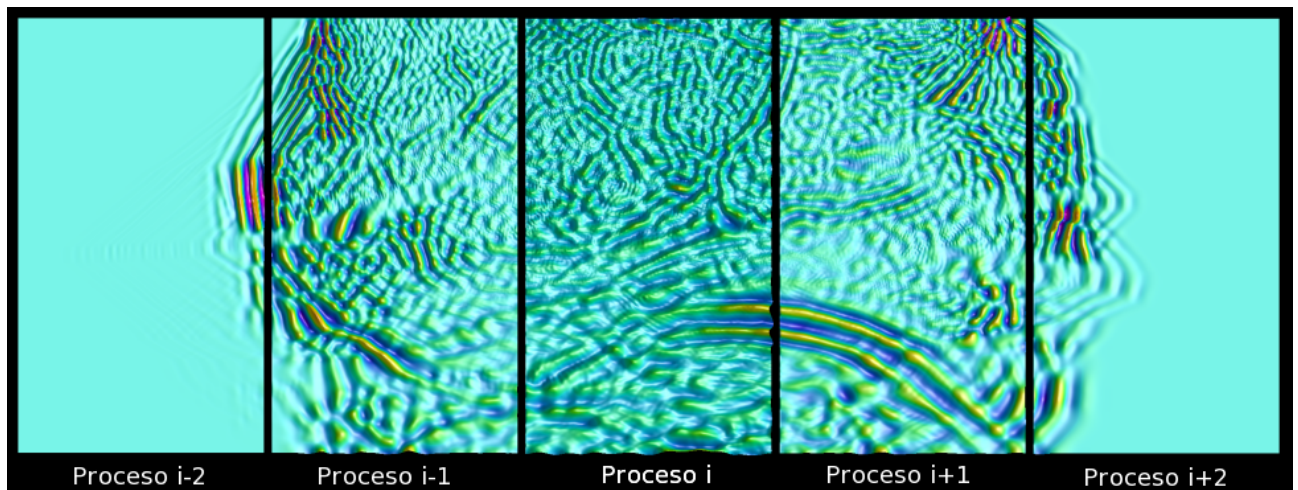


Figure 5: Captura de pantalla de la propagación de la onda sísmica entre procesos vecinos con 2000 pasos de tiempo, simulando 1.96 segundos; donde cada proceso calcula la solución en una malla de 575x325 nodos, para un total de 575x1625 nodos en cinco procesos.

ciente mientras exista poca interrupción por comunicación entre procesos, esto gracias a que dividimos el dominio en una única dimensión, como se muestra en la figura 5.

REFERENCES

Aoyama Y. and Nakano J. Rs/6000 sp: Practical mpi programming. Technical Report, IBM, International Technical Support Organization, 1999. [Http://www.redbooks.ibm.com](http://www.redbooks.ibm.com).

- Gropp W. and Lusk E. Installation and user's guide to mpich, a portable implementation of mpi version 1.2.7. Technical Report, Argonne National Laboratory, 2008. [Ftp://ftp.mcs.anl.gov/pub/mpi/mpichman.ps](ftp://ftp.mcs.anl.gov/pub/mpi/mpichman.ps).
- Martin G., Larsen S., and Marfurt K. Marmousi2: An elastic upgrade for marmousi. *The Leading Edge*, 25:156–166, 2006.
- Taflove A. and Brodwin M.E. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent maxwell's equations. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 23:623–630, 1975.
- Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 14:302–307, 1966.