



# Obtención de imágenes RTM (Reverse Time Migration), teniendo en cuenta el parámetro de amplitud verdadera en zonas estructuralmente complejas

Laura Espinel Rey\*†, Luis Montes†, Francisco Cabrera\*  
 \*Grupo de investigación Pangea, Universidad de Pamplona.  
 † Universidad Nacional de Colombia

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

Reverse Time Migration is an in-depth migration method that implements a solution of the full wave equation. The methodology of work is developed from the application of RTM pre-stacked to synthetic and real data. The components of RTM are presented and analysed modelling the acoustic wave, contour conditions and image condition. For wave modeling, a high order Finite Differences (DF) method was implemented in the space-time domain, based on an alternating grid scheme. In the extrapolation process an adaptive space operator of variable length was applied in the calculation of the spatial derivatives to reduce the computational cost effectively, with little reduction in the accuracy of the numerical solution. A hybrid ABC boundary condition was established that combines two of the most common solutions to the problem of boundary conditions: the predictive method and the attenuation method. RTM images were obtained from a Cross-Correlated Image Condition with Field Separation. The algorithm was applied to synthetic data obtained from the modeling of a complex geological structure, having control of the velocity model. On real data, an image of a complex structure was obtained that allowed to know the real location of the reflection events. The obtained seismic image presents better seismic events in comparison to the conventional methods of migration.

## Introduction

Para este trabajo se usó el El algoritmo implementado se basa en el Método de Diferencias Finitas (MDF) de alto orden en el dominio de espacio-tiempo, para el modelamiento de la onda en un medio acústico, basado en un esquema de grilla alternada; en el proceso de extrapolación se aplicó un operador espacial adaptativo de longitud variable en el cálculo de las derivadas espaciales, para reducir el costo computacional en forma efectiva con poca reducción de la exactitud de la solución numérica. Después de examinar dos de las soluciones más comunes, al problema de las condiciones de contorno, el método predictivo y el método de atenuación,

se estableció un método híbrido que combina lo mejor de ambas soluciones. La condición de imagen utilizada se basa en la correlación cruzada con descomposición de los campos de onda.

## Method

La solución al problema de simular estudios sísmicos, implica resolver la ecuación diferencial que describe la propagación de la onda en la subsuelo, bajo un conjunto de condiciones inicial, final y de contorno. Una de las técnicas numéricas más exitosas para resolver estas ecuaciones diferenciales, es el Método de Diferencias Finitas (MDF), el cual consiste en una aproximación numérica de las derivadas de la ecuación diferencial de onda, cuando es posible una adecuada discretización en espacio y tiempo, de tal manera que permita el cálculo preciso de las derivadas de la ecuación de onda, el MDF es la técnica más exacta para simular la propagación de la onda (ya sea acústica o elástica) a través de modelos geológicos complejos.

## Solución de la ecuación de onda 2D.

Para incrementar la exactitud numérica de las diferencias finitas, se usó un orden superior para las derivadas espaciales en la ecuación (1.3). De acuerdo con Kindelan et al (1990), las fórmulas para un orden 2M-simo están dadas por

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{\delta p}{\delta x} = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^M a_m (p_{x+m-\frac{1}{2}}^t - p_{x-m+\frac{1}{2}}^t)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{\delta p}{\delta z} = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^M a_m (p_{x,z+j-\frac{1}{2}}^{t-0} - p_{x,z-j+\frac{1}{2}}^1)$$

Donde  $a_m$  son los coeficientes del Método de Diferencias Finitas de Grilla Alternada (MDFGA) en las derivadas espaciales.

Asumiendo que la densidad en el medio varía muy suavemente respecto a las variaciones de velocidad, y sustituyendo las ecuaciones (1.3), (1.4) y (1.5) en la ecuación (1.1), se tiene

$$\frac{1}{h^2} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^M a_j a_m [(p_{x,z+m-j-1}^t - p_{x,z+m-j}^t) - (p_{x,z-m+j}^t - p_{x,z-m+j+1}^t)]$$

$$+ \frac{1}{h^2} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^M a_j a_m [(p_{x,z+m-j-1}^t - p_{x,z+m-j}^t) - (p_{x,z-m+j}^t - p_{x,z-m+j+1}^t)] \approx \frac{1}{v^2} (p_{x,z}^{t+1} + p_{x,z}^{t-1} - 2p_{x,z}^t)$$

Para realizar la extrapolación de la onda en el medio, lo que se quiere conocer es  $p_{x,z}^{t+1}$ , a partir de los valores conocidos de  $p_{x,z}^t$  y  $p_{x,z}^{t-1}$ , por lo que

$$p_{x,z}^{t+1} = 2p_{x,z}^t - p_{x,z}^{t-1} + v^2 \tau^2 \left[ \frac{1}{h^2} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^M a_j a_m [(p_{x+m+j-1,z}^t - p_{x+m-j,z}^t) - (p_{x-m+j,z}^t - p_{x-m-j+1,z}^t)] + \frac{1}{h^2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_j a_m [(p_{x,z+m+j-1}^t - p_{x,z+m-j}^t) - (p_{x,z-m+j}^t - p_{x,z-m-j+1}^t)] \right]$$

Donde A partir de la teoría de ondas planas se derivará la metodología para encontrar los valores de  $a_m$  que son los coeficientes del Método de Diferencias Finitas. Haciendo

$$p_{m,j}^n = e^{-i[k_x(x+mh) + k_z(z+jh) - \omega(t+n\tau)]}$$

Donde  $k$  es el número de onda y  $\omega$  es la frecuencia angular. Substituyendo la ecuación (1.8) en la ecuación (1.6) y simplificando tenemos

$$\left[ \sum_{m=1}^M a_m \sin((m-0.5)k_x h) \right]^2 + \left[ \sum_{m=1}^M a_m \sin((m-0.5)k_z h) \right]^2 \approx [r^{-1} \sin(0.5\omega\tau)]^2$$

Haciendo

$$k_x = k \cos \theta \text{ y } k_z = k \sin \theta$$

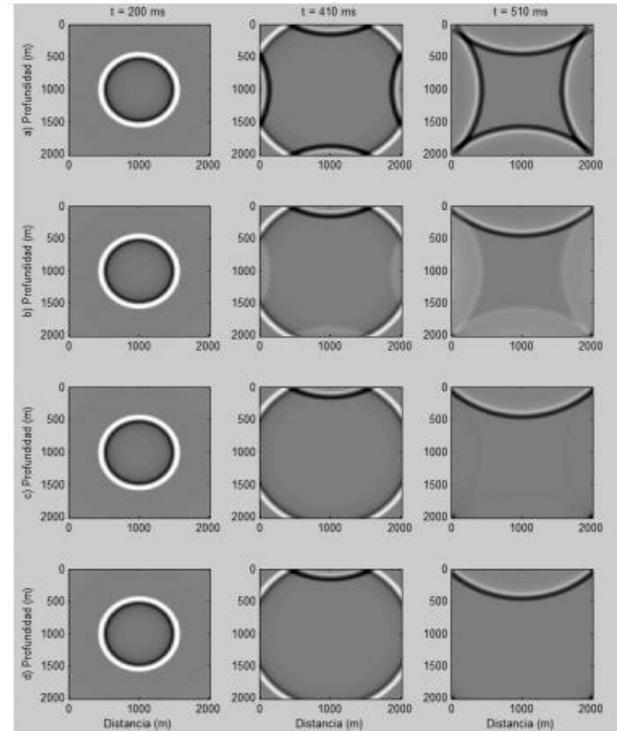
Donde  $k$  es el número de onda,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\theta$  es el ángulo de propagación de la onda plana.

$$\left[ \sum_{m=1}^M a_m \sin((m-0.5)kh \cos \theta) \right]^2 + \left[ \sum_{m=1}^M a_m \sin((m-0.5)kh \sin \theta) \right]^2 \approx [r^{-1} \sin(\omega\tau)]^2$$

Adicionalmente a la solución de la ecuación de onda, se tuvieron en cuenta otros parámetros para el modelamiento de la onda como fue: Análisis de dispersión numérica, condición de imagen, descomposición del campo de onda, simulación numérica de la ondícula, simulación numérica para condición de borde.

### Results

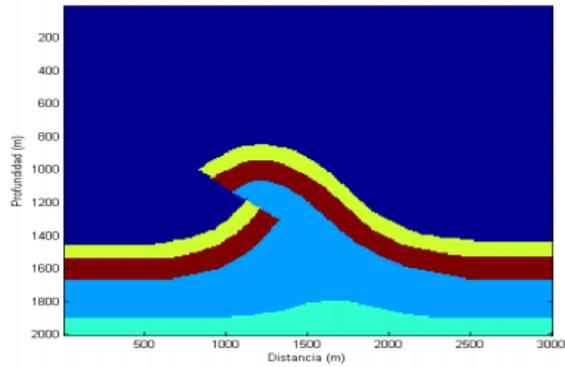
Se realizaron varias simulaciones numéricas, con el objetivo de analizar el efecto de los parámetros de modelamiento en los resultados, principalmente los referidos a dispersión y eliminación de las reflexiones de borde.



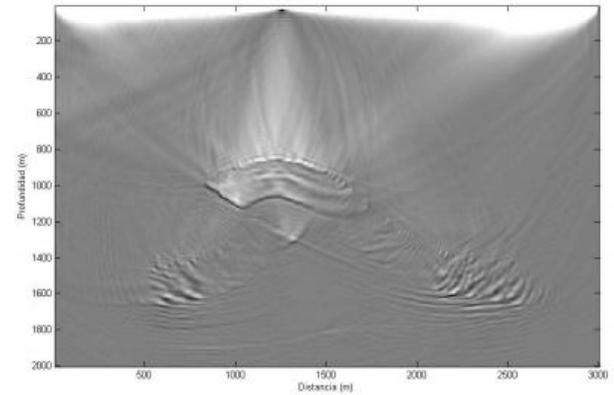
**Figura 1:** Imagen instantánea de condición de borde por el método ABC Híbrido a) condición de borde método ABC Híbrido, con  $N=1$ , donde las ondas son reflejadas completamente, b) con  $N=2$ , parte de la onda es absorbida, c) con  $N=3$  y d) con  $N= 10$ , donde la onda es absorbida completamente. Cada figura incluye tres instantáneas a 200, 410 y 510 ms respectivamente de izquierda a derecha. El modelo de velocidad es homogéneo de 3,000 m/s, un tamaño de grilla de  $10 \times 10$  m, el área total es de  $2,000 \times 2,000$  m ( $200 \times 200$  puntos de grilla), y un intervalo de muestreo de 1 ms. Para la solución numérica espacial se usó el orden 20 ( $2M= 20$ ) y para la solución numérica temporal el orden 2. La onda fuente es un pulso sinusoidal de 20 Hz y un período de longitud, localizado en el centro del modelo. La condición del borde superior es de borde libre.

### Modelo de Baysal

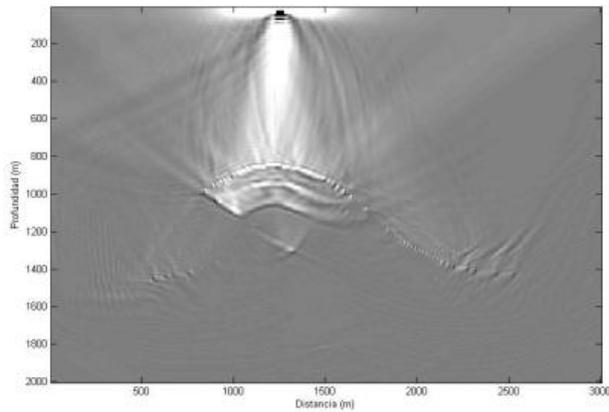
Baysal et al (1983) incluyeron un ejemplo de migración postapilado de un modelo de una falla de cabalgamiento. En la Figura 2 se puede ver el modelo modificado para los fines de este trabajo.



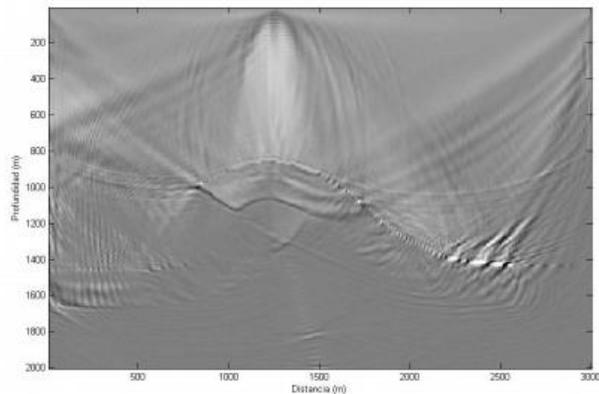
**Figura 2:** Modelo de velocidades tomado de Baysal et al (1983). El modelo tiene un tamaño de 2000 m en profundidad y 3000 m en distancia. El tamaño de la grilla es de 10 m.



**Figura 5:** Imagen migrada del modelo de Baysal por Correlación Cruzada normalizada por la iluminación de las fuentes Imagen migrada del modelo de Baysal de la Figura 3.14, para un fuente única ubicada a 1,250 m, obtenida por correlación cruzada normalizada por la iluminación de las fuentes.

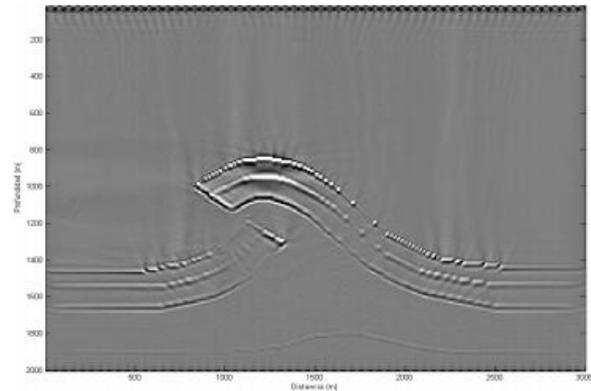


**Figura 3:** Imagen migrada del modelo de Baysal por Correlación Cruzada Imagen migrada del modelo de Baysal de la Figura 3.14, para un fuente única ubicada a 1,250 m, obtenida por correlación cruzada



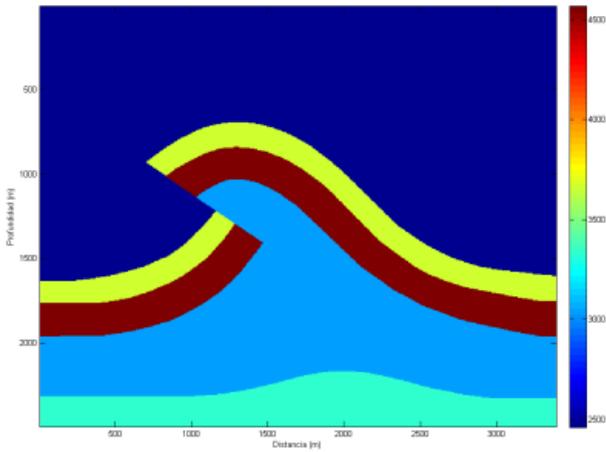
**Figura 4:** Imagen migrada del modelo de Baysal por Correlación Cruzada normalizada por la iluminación de los receptores Imagen migrada del modelo de Baysal de la Figura 3, para un fuente única ubicada a 1,250 m, obtenida por correlación cruzada normalizada por la iluminación de los receptores.

La imagen final migrada se muestra en la Figura 6. Se observa buena definición de las estructuras de cabalgamiento y el reflector más profundo está bien delimitado. Debido a la discretización del modelo, las esquinas resultantes producen difracciones que finalmente se pueden observar en la imagen migrada.

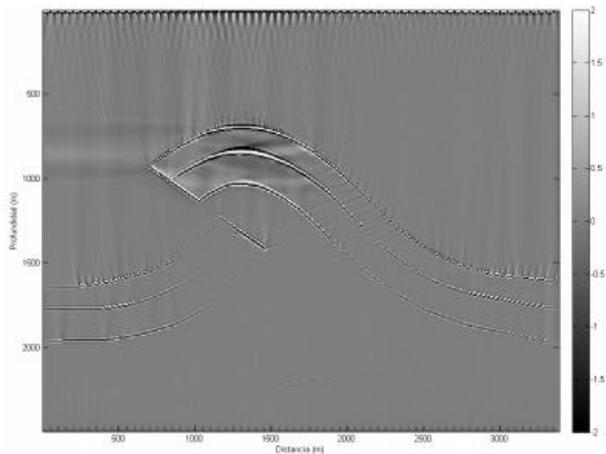


**Figura 6:** Imagen migrada de falla de cabalgamiento. Imagen migrada a partir del modelo de la figura Figura 2

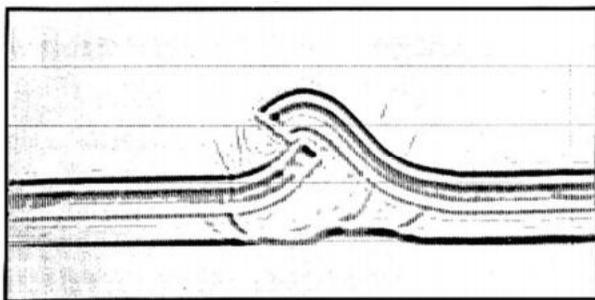
Para mejorar este aspecto, se migró un nuevo modelo con mejor resolución, con un tamaño de grilla de 5x5 m, que se puede observar en la Figura 7, así como la imagen migrada final en la Figura 8.



**Figura 7:** Modelo de falla de cabalgamiento alta resolución Este modelo tiene mejor resolución que el de la Figura 2, con un tamaño de grilla de 5x5 m.



**Figura 8:** Imagen migrada preapilado del modelo de Baysal (1983) de una falla de cabalgamiento alta resolución



**Figura 9:** Imagen migrada post-apilado del artículo de Baysal

## Conclusions

- Estos resultados preliminares que se obtuvieron del desarrollo de un programa en MatLab para realizar migración RTM, el cual se basó en el Modelo de Diferencias Finitas de alto orden en el dominio espacio-tiempo, con una condición de contorno ABC

Híbrido, que combinó convenientemente los métodos basados en predicción y atenuación, y una condición de imagen basada en la correlación cruzada con descomposición de campos.

- El método DF de alto orden en el dominio espacio-tiempo, brinda una mejor estabilidad y una menor dispersión que el método DF tradicional y es eficiente en términos de cómputo.
- Los resultados obtenidos en los modelos sintéticos fueron buenos, permitiendo reconstruir todos los reflectores presentes en los modelos, ubicados en su posición correcta, esto se logró desde el modelo más simple hasta el más complejo.
- La implementación del código RTM teniendo en cuenta el parámetro de verdadera amplitud se aplicó a una adquisición de datos reales que aún no se han obtenido resultados presentables.

## Acknowledgments

Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación Pangea

Profesor Luis Montes, Universidad Nacional de Colombia

## References

- Baysal E, Kosloff D, Sherwood J, 1983, Reverse time migration. *Geophysics*, 48(11): 1514-1524
- Baysal E, Kosloff D, Sherwood J, 1984, A two-way nonreflecting wave equation: *Geophysics*, 49, 132-141
- Bansal R, Sen M, 2008. Finite-difference modelling of S-wave splitting in anisotropic media, *Geophys. Prospect.* 56, 293-312.
- Bérenger J, 1994, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves: *Journal of Computational Physics*, 114, 185-200.
- Björck A, Pereyra V, 1970, Solution of Vandermonde System of Equations, *Mathematics of Computation*, Volume 24, Number 112.
- Bohlen T, 2002. Parallel 3-D viscoelastic finite-difference seismic modeling, *Comput. Geosci.* 28, 887-899.
- Cao S, Greenhalgh S, 1998, Attenuating boundary conditions for numerical modeling of acoustic wave propagation: *Geophysics*, 63, 231-243.
- Corjan C, Kosloff D, Kosloff R, Resef M, 1985, A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations; *Geophysics*, 50, 705-708.
- Chang W F, McMechan G, 1994, 3-D elastic prestack, reverse-time depth migration. *Geophysics*, 59: 597 - 609
- Chattopadhyay S, McMechan G. Imaging conditions for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, 2008, 73(3): S81-S89.
- Chen, J, 2007, High-order time discretizations in seismic modelling: *Geophysics*, 72, SM115-SM122.