



## Propagación de ondas elásticas en medios fracturados con anisotropía ortorrómbica

A. Sánchez Camus<sup>1</sup>, P. Gauzellino<sup>1</sup> y R. Ramos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. [aarioni@solaer ingenieria.com](mailto:aarioni@solaer ingenieria.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP.

### Resumen

En el presente trabajo se simula la propagación 3D de ondas elásticas usando el modelo de shale fracturada dado por Schoenberg y Helbig. Éste considera la superposición de la matriz de rigidez y de la compliancia de las fracturas, donde el movimiento de apertura o cerrado de las mismas es independiente de movimientos en las direcciones del plano de fractura. Además, los elementos de esta matriz dan cuenta de la densidad y parámetros geométricos de fracturas; por lo tanto, la estimación de la compliancia de las fracturas es relevante en la caracterización del reservorio y el plan de perforación para producción. El modelado se realiza usando Abaqus-CAE que resuelve la ecuación de onda elástica mediante la técnica de elementos finitos e implementando un procedimiento explícito. La validación de los resultados se lleva a cabo comparando con una solución analítica tridimensional.

**Palabras clave:** Fracturas, anisotropía, ondas sísmicas, elementos finitos.

### Introducción

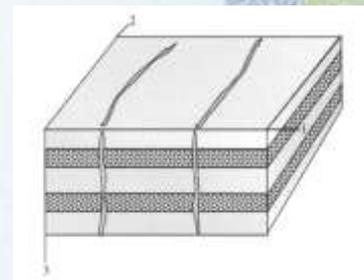
La determinación preferencial de las fracturas naturales presentes en shales mediante métodos sísmicos es un tópico de interés para el desarrollo y producción de estas formaciones que presentan anisotropía intrínseca fuerte.

Schoenberg y Helbig (Schoenberg y Helbig, 1997) presentan las ecuaciones que describen un medio elástico de fracturas paralelas verticales embebidas en un fondo de anisotropía VTI. La extensión del mismo para considerar viscoelasticidad es realizada por Carcione (Carcione y otros, 2012).

El presente trabajo estudia la propagación de todos los modos de ondas permitiendo comprender e interpretar este fenómeno en estos medios complejos a través del desacople de los distintos eventos para los planos de simetría (Tsvankin, 2005 y Tsvankin y Grechka, 2011). Los resultados numéricos son validados con la solución analítica dada por Carcione (Carcione, 2007).

### Modelo y propiedades del medio

El modelo de shale fracturada tiene como background un medio de capas finas estratificadas (minerales de arcilla, kerógeno, calcita, etc.) atravesadas por un conjunto de fracturas verticales paralelas. La matriz elástica que describe este tipo de configuraciones geológicas corresponde a un medio ortorrómbico que consta de 9 parámetros independientes y 3 planos de simetría, donde a la matriz del medio VTI se superpone a la compliancia de las fracturas. La compliancia normal al plano de fractura es  $Z_n=1/K_n$



( $K_n=9C_{11VTI}$ ) y las compliancias horizontal y vertical tangenciales a la fractura son  $Z_h=1/K_h$  ( $K_h=2.6C_{66VTI}$ ) y  $Z_v=1/K_v$  ( $K_v=4C_{55VTI}$ ), respectivamente. La tabla muestra los coeficientes de rigidez de estemedio dados en GPa y la densidad dada en  $kg/m^3$ .

$C_{11}$	$C_{22}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{23}$	$\rho$
20.70	22.63	13.66	4.60	3.68	5.02	8.28	5.18	5.52	2300

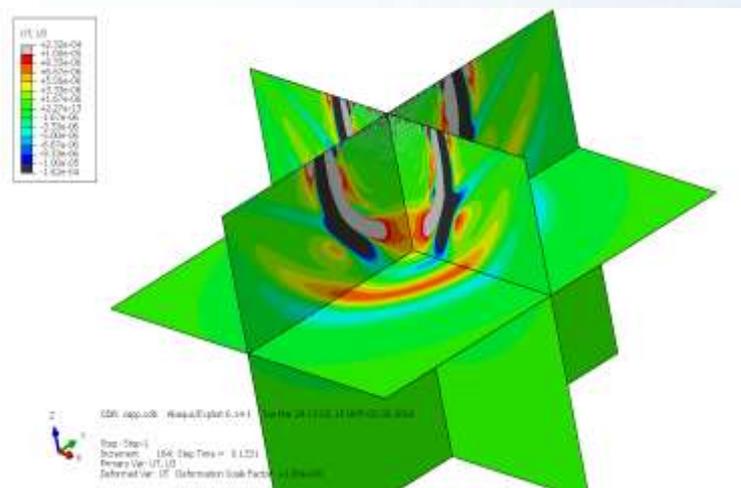
Se destaca que la consideración de medio efectivo es posible porque las alineaciones en direcciones preferenciales están en una escala mucho menor que la escala de las mediciones, que en propagación de ondas corresponde a la longitud de onda sísmica (alrededor de 100 m).

El modelo numérico es un prisma de 700 metros de lado y 500 metros de profundidad, estimulado en superficie con una fuente impulsiva centrada en 30 Hz y en dirección del eje 3 (vertical). La ecuación de onda elástica se resuelve aplicando la técnica de elementos finitos e implementando un procedimiento explícito en tiempo mediante el software Abaqus-CAE (SIMULIA, 2016). Los bordes del dominio equivalen a “bordes rígidos”, debiendo mencionar que el software no permite introducir bordes absorbentes.

## Resultados

En las siguientes figuras se muestran un corte tridimensional y sus respectivos planos de simetría para los diferentes frentes de onda a 0.1331 s. La variable graficada es la magnitud de la componente del desplazamiento,  $U_3$ . Además, se dan las velocidades para los diferentes modos de propagación correspondientes a cada plano.

Corte tridimensional:



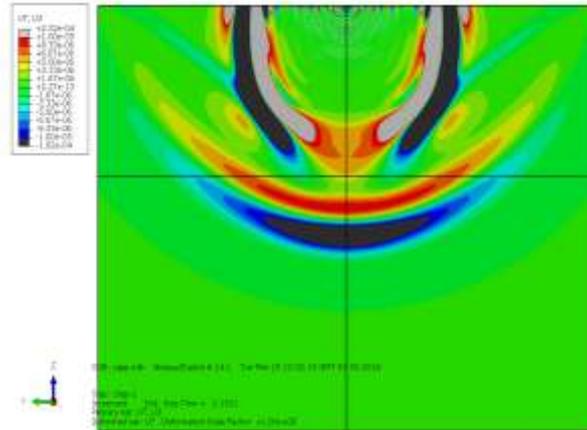


Corte en los tres planos de simetría en el tiempo  $t=0.1331$  s.

Plano 2-3:

Velocidades :

- $V_s(0^\circ) = 1477$  m/s
- $V_s(90^\circ) = 1265$  m/s
- $V_{qs}(0^\circ) = 1414$  m/s
- $V_{qs}(90^\circ) = 1414$  m/s
- $V_{qp}(0^\circ) = 2437$  m/s
- $V_{qp}(90^\circ) = 3137$  m/s

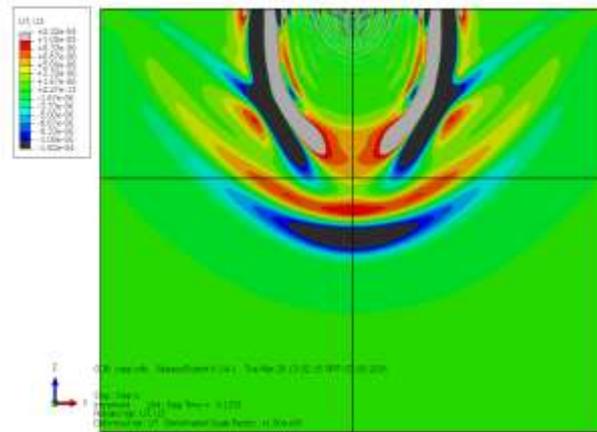


Plano de simetría 2-3  $t=0.1331$  s.

Plano 1-3:

Velocidades:

- $V_s(0^\circ) = 1414$  m/s
- $V_s(90^\circ) = 1477$  m/s
- $V_{qs}(0^\circ) = 1265$  m/s
- $V_{qs}(90^\circ) = 1265$  m/s
- $V_{qp}(0^\circ) = 2437$  m/s
- $V_{qp}(90^\circ) = 3000$  m/s

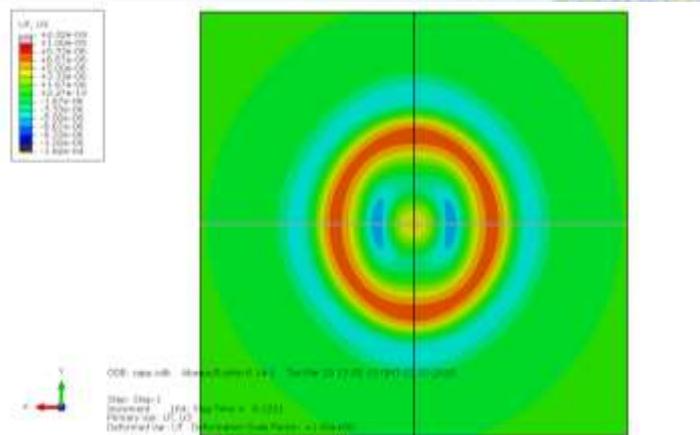


Plano de simetría 1-3  $t=0.1331$  s.

Plano 1-2:

Velocidades:

- $V_s(0^\circ) = 1414$  m/s
- $V_s(90^\circ) = 1267$  m/s
- $V_{qs}(0^\circ) = 1477$  m/s
- $V_{qs}(90^\circ) = 1477$  m/s
- $V_{qp}(0^\circ) = 3137$  m/s
- $V_{qp}(90^\circ) = 3000$  m/s

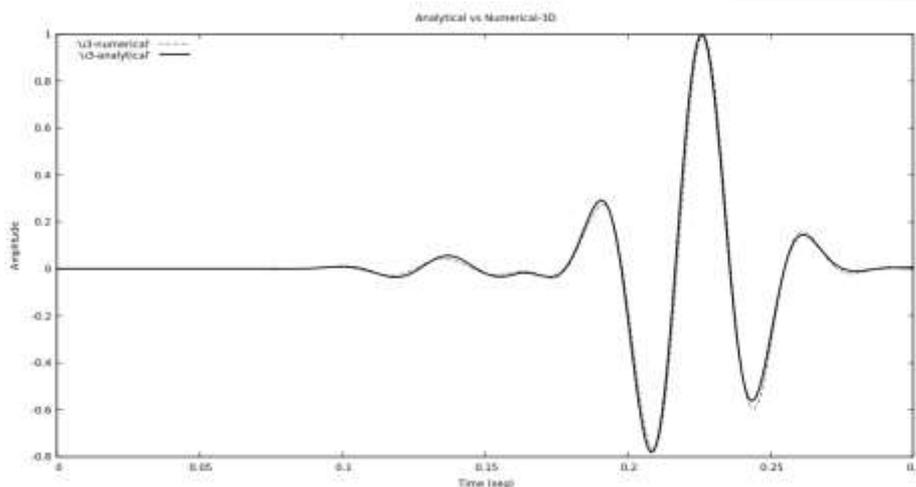


Plano de simetría 1-2  $t=0.1331$  s.



## Validación del modelo numérico y conclusiones

Para validar los resultados numéricos se usa la solución analítica de un medio homogéneo VTI (Schoenberg y Helbig, 1997) cuya geometría y función de Green son dadas por Carcione (Carcione, 2007). La siguiente figura muestra el buen ajuste entre ambas respuestas al considerar un receptor ubicado a 300 metros de la fuente. Por lo tanto, se concluye que esta técnica de modelado permite representar diferentes escenarios geológicos y de prospección (sísmica de superficie, sísmica de pozo, sísmica multicomponente, etc.) ayudando a reducir el riesgo y el impacto económico que supone no contar con un modelo de subsuelo preciso a la hora de perforar y desarrollar un yacimiento.



Componente U3 del desplazamiento, respuesta analítica y numérica .

## Referencias

- Carcione J. M., ELSEVIER, 2007. Wave Fields in real media: wave propagation in anisotropic, anelastic and porous media.
- Carcione J. M., Santos J. E. y Picotti S, 2012. Fracture-Induced Anisotropic Attenuation, Rock Mech. Rock Eng., 45: 929-942.
- Schoenberg M. y Helbig K., 1997. Orthorhombic media: modeling elastic wave behavior in a vertically fractured earth, Geophysics 62:1954–1974.
- SIMULIA – Abaqus-CAE, 2016. Documentación propia del software de elementos finitos.
- Tsvankin Ilya, ELSEVIER, 2005. Seismic Signatures and Analysis of Reflection Data in Anisotropic Media.
- Tsvankin Ilya y Grechka Vladimir, 2011. 17 Geophysical References Series, Society of Exploration Geophysicists. Seismology of Azimuthally Anisotropic.