

ACTIVIDADES Y RESULTADOS CAPP-ONDAS

Además de las publicaciones en revistas de circulación periódica de alto factor de impacto, y presentaciones con congresos, durante 2012, 2013 y 2014 se contrataron como consultores a los doctores José M. Carcione y Davide Gei, ambos investigadores del Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) de Trieste, Italia. Estos consultores dictaron cursos y discutieron con los investigadores integrantes del grupo y con el becario doctoral Robiel Martínez Corredor sobre los temas que YPF formuló de interés, esto es, respuesta sísmica de medios fracturados y/o anisotrópos entre otros.

En lo que respecta a la formación de recursos humanos, el becario doctoral Robiel Martínez Corredor, al que dirijo con la codirección de la Dra. Gauzellino, está ya redactando su tesis doctoral titulada **Propagación de Ondas Sísmicas en Medios Porosos Saturados y Fracturados** a ser defendida durante el año 2015. Además de contar con cuatro publicaciones en revistas de alto factor de impacto tener una quinta en proceso de revisión, Martínez Corredor ha colaborado activamente en el desarrollo de software para la caracterización y propagación de ondas en medios fracturados y/o anisotrópos, software que fuera oportunamente entregado a YPF.

Asimismo, tres estudiantes avanzados de la carrera de geofísica han desarrollado sus tesinas en las temáticas del proyecto CAPP-ONDAS, y generado software de aplicación en modelado y procesamiento de datos sísmicos. Los nombres de los estudiantes y títulos de las tesinas siguen a continuación:

Gabriel Castromán, *Resolución numérica de la ecuación acústica con Elementos Finitos Galerkin Discontinuos*

Rocio S. Hawryszczuk *poner título de tesina aquí y*

Ariel Sánchez Camus *Modelado de medios anisotropos. Estimación de la orientación de fracturas mediante moveout de onda compresional*

Por otra parte, la UNLP adquirió el paquete ABAQUS de elementos finitos, con licencia perpetua, con el que se está desarrollando software para YPF.

Los resultados de las tareas realizadas fueron presentados en congresos nacionales e internacionales y en reuniones entre la UNLP y la empresa YPF, todas estas actividades se encuentran descriptas y documentadas en este informe.

Breve descripción de las publicaciones relacionadas a los temas del proyecto.

El trabajo *Angular and frequency dependent wave velocity and attenuation in fractured porous media*, *Pure and Applied Geophysics*, **170**,1673-1683, (2013) analiza la anisotropía de velocidad y atenuación de las ondas que viajan en medios porosos fracturados. Las fracturas se modelan o bien como capas muy finas de alta permeabilidad y porosidad o utilizando parámetros que definen las fracturas como condiciones de borde internas dentro del medio poroso. En ambos casos el medio se comporta a escala macroscópica como anisótropo con diversos grados de anisotropía dependiendo de los materiales que forman las fracturas y el medio poroso que las contiene y de los fluidos saturantes.

El artículo *A rheological equation for anisotropic-anelastic media and simulation of synthetic seismograms*, (P. M. Gauzellino, J. M. Carcione, J. E. Santos y S. Picotti), *Wave Motion* **51**,743-757, (2014) utiliza un simulador numérico de la propagación de ondas en medios anisotrópos 2D desarrollado por mi grupo de investigación para obtener la respuesta sísmica de la formación Utsira. Esta formación consiste de una arena muy porosa que contiene una secuencia de capas finas impermeables, que se comporta como medio anisótropo (VTI) a escala macroscópica. Utilizando promedios de Backus se definieron los coeficientes del medio viscoelástico equivalente al medio poroso saturado por agua salada y dióxido de carbono. Se demuestra que es necesario utilizar simuladores anisotrópos de la propagación de ondas para la correcta obtención de la respuesta sísmica de esta formación.

El artículo *Reflection and transmission coefficients of a single layer in poroelastic media*, *Journal of the Acoustical Society of America*, (R. Martinez Corredor, J. E. Santos y P. M. Gauzellino), **135**, 3151-316, (2014) analiza el problema canónico de scattering correspondiente a una onda incidente en una capa plana que separa dos semiespacios, donde los tres dominios son medios porosos saturados representados por la teoría de Biot. Las soluciones a este problema se validaron con los casos límites ya publicados en la literatura en que el espesor de la capa plana es nulo o cuando un semiespacio es un fluido y el otro un sólido elástico. Se analizó la existencia de ángulos críticos y casos en que la capa plana es muy blanda y altamente permeable, y también el efecto del espesor de la capa plana en los coeficientes de reflexión y transmisión para distintos tipos de onda incidente.

El trabajo *Seismic velocity and Q anisotropy in fractured poroelastic media*, (J. E. Santos, R. Martinez Corredor y J. M. Carcione), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **70**, 212-218, (2014) presenta una metodología para caracterizar la anisotropía de velocidad y atenuación de las ondas que viajan en medios porosos saturados con un sistema denso de fracturas orientadas en direcciones preferenciales mediante procedimientos de *upscaling numérico*. El método, en el contexto de física numérica de rocas, consiste en realizar experimentos numéricos de compresión y de corte sobre muestras representativas del medio poroso fracturado. Cada experimento está asociado a un problema de valores de contorno que se resuelve utilizando el método de elementos finitos. Se consideraron casos de saturación *patchy* y muestras con matrices fractales, casos en los que no existen soluciones analíticas, mostrándose que en ambos casos la presencia de heterogeneidades en los fluidos o en la matriz porosa aumenta el grado de anisotropía debido a la presencia de fracturas.

El artículo *Numerical Simulation in Applied Geophysics. From the Mesoscale to the Macroscale*, (J. E. Santos, P. M. Gauzellino, G. B. Savioli y R. Martinez Corredor), *Journal of Computational Science and Technology*, **13** (3), 137-1420, (2013) muestra la aplicación del método de *upscaling numérico* descrito en el paper *Seismic velocity and Q anisotropy in fractured poroelastic media* antes mencionado al modelado de la propagación de ondas del medio viscoelástico anisótropo equivalente a escala macroscópica a un medio poroso saturado con un conjunto denso de fracturas con simetría vertical. La ecuación de ondas viscoelástica se resolvió en espacio-frecuencia utilizándose un espacio de elementos finitos no conformes. La anisotropía del medio es claramente observable en la curvatura de los frentes de ondas.

El trabajo *Oscillatory numerical experiments in finely layered anisotropic viscoelastic media*, *Computers & Geosciences*, **43**, pp. 83-89, (2012),

presentan el análisis y la aplicación de técnicas de *upscaling numérico* para el caso de medios viscoelásticos de capas finas donde cada capa fina es anisótropa y viscoelástica, obtuyéndose los correspondientes medios viscoelásticos efectivos.

En los trabajos

Numerical test of the Schoenberg-Muir theory, (J. M. Carcione, S. Picotti, F. Cavallini y J. E. Santos), *Geophysics* **77** (3), 1-9, (2012),

Fracture-induced anisotropic attenuation, (J. M. Carcione, J. E. Santos y S. Picotti), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 929-945, (2012),

Numerical experiments of fracture-induced velocity and attenuation anisotropy, (J. M. Carcione, S. Picotti and J. E. Santos), *Geophysical Journal International*, **191**, 1179-1191 (2012).

se utilizaron las condiciones de borde en las fracturas definidas por Schoenberg (M. Schoenberg and J. Douma, *Geophysical Prospecting*, **36**, 571-590 (1988)) para obtener en forma analítica y simular numéricamente medios transversos isotropos, monoclinicos y ortorómbicos equivalentes a medios fracturados con diversas orientaciones de fracturas.

El artículo *Evaluation of the stiffness tensor of a fractured medium with harmonic experiments*, (J. E. Santos S. Picotti y J. M. Carcione), *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **247-248**, 130-145 (2012)

formula y analiza los problemas de valores de contorno asociados a experimentos cuasiestáticos de compresión y de corte en medios viscoelásticos con conjuntos de fracturas orientadas en direcciones preferenciales. Las fracturas se modelaron utilizando las condiciones de borde de Schoenberg (M. Schoenberg and J. Douma, *Geophysical Prospecting*, **36**, 571-590 (1988)). Se analizaron los problemas a nivel continuo y discreto utilizando el método de elementos finitos. Se obtuvieron estimaciones del error de los procedimientos discretos, los que se validaron con soluciones analíticas, para luego mostrar ejemplos de aplicación en medios altamente heterogéneos y con coeficientes de fracturas en función de la presión de los fluidos saturantes.

En los artículos

Seismic monitoring of CO₂ storage considering wave attenuation and dispersion effects, (G. B. Savioli, J. E. Santos, J. M. Carcione and D. Gei), *MACI* 4,355-358, (2013)

Capillary pressure sensitivity in modeling CO₂ injection of fractured hydrocarbon reservoirs, (L. A. Macías, G. B. Savioli, J. E. Santos, J. M. Carcione and D. Gei), *Mecánica Computacional Vol. XXXIII*, 429-440, (2014)

y

Influence of capillary pressure on CO₂ storage and monitoring, (J. E. Santos, G. B. Savioli, L. A. Macías, J. M. Carcione y D. Gei), *84 Annual International Meeting (Denver, Colorado), 2014 SEG Denver Expanded Abstracts*, 4971-4975, (2014)

se muestra el uso combinado de simuladores de flujo multifásico y de la propagación de ondas en medios viscoelásticos para modelar el secuestro de dióxido de carbono en formaciones del subsuelo para mitigar efectos de calentamiento global.

La metodología utilizada es de interés para su aplicación en monitoreo sísmico de reservorios.

En particular, en el trabajo presentado en el 84 Annual International Meeting, se demuestra que variaciones en la presión capilar provocan cambios en la respuesta sísmica de medios porosos saturados.

El trabajo *Numerical Rock Physics and seismic characterization of fractured hydrocarbon reservoirs*, (R. Martínez Corredor, P. M. Gauzellino, J. E. Santos and R. S. Hawryszczuk), *Mecánica Computacional Vol. XXXIII*, 2201-2216, (2014) presenta la utilización de un simulador de la propagación de ondas en medios anisótropos viscoelásticos para obtener la respuesta sísmica de una capa porosa con un conjunto de fracturas verticales (medio HTI) saturadas con agua salada o con gas que satura dos medios isotropos viscoelásticos. Los coeficientes del medio anisótropo con fracturas verticales se determinaron utilizando el método de *upscaling numérico* antes descrito. Los resultados obtenidos son consistentes con los datos sísmicos observados en ambientes con fracturación HTI.

El trabajo *Numerical simulation in unconventional reservoirs*, (L. A. Macías, G. B. Savioli and J. E. Santos), *Mecánica Computacional Vol XXXII*, 1259-1270, (2013) presenta el uso de un simulador de flujo multifásico para modelar el procedimiento de fracturación hidráulica en reservorios no convencionales. A estos efectos, se simula la inyección de agua a alta presión en un reservorio de gas no convencional. Seguidamente, se utiliza un simulador de la propagación de ondas en un medio viscoelástico para obtener imágenes sísmicas de la zona fracturada y su evolución espacio-temporal (sísmica 4D).

El artículo *Determination of the stiffness tensor of a fractured medium using finite element simulations*, (J. E. Santos, J. M. Carcione y S. Picotti), *SEG Expanded Abstracts* 31, DOI <http://dx.doi.org/10.1190/segam012-0272-1> (2012), presentado en el 82 Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, (2012),

muestra la utilización del procedimiento de *upscaling numérico* en medios estratificados de capas finas y en medios fracturados para obtener los coeficientes promedio del medio viscoelástico transversal isotrópico equivalente para longitudes de onda largas.