

CARACTERIZACIÓN Y SIGNIFICADO TECTÓNICO DE LOS PATRONES DE FALLAS Y FRACTURAS EN TRAMPAS ESTRUCTURALES POLIDEFORMADAS, PIEDEMONTE LLANERO (COLOMBIA)

Mauricio Valencia Marín

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Grupo de Investigación en Geomecánica Aplicada, GIGA, e-mail: giga@unalmed.edu.co

Oswaldo Ordóñez Carmona

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, e-mail: oordonez@unalmed.edu.co

Alberto Ortiz Fernández

ECOPETROL S.A., Instituto Colombiano del Petróleo ICP, Unidad Investigativa, e-mail: aortiz@ecopetrol.com.co

La caracterización de los patrones de fracturamiento sub-superficiales constituye un factor de incertidumbre, usualmente muy costoso, determinante en la evaluación de yacimientos de hidrocarburos heterogéneos anisotrópicos. La presencia y naturaleza de estas discontinuidades, la distribución de atributos y la relación con el flujo de fluidos, son de gran importancia en la interpretación, simulación y operación de este tipo de yacimientos.

Los sistemas de fracturas-fallas naturales gobiernan, en mayor o menor grado, el comportamiento mecánico y las propiedades hidráulicas de los estratos productores fuertemente deformados, y registran la historia deformacional, frecuentemente compleja (La Pointe y Hudson, 1985), a la cual ha sido sometida estos a través del tiempo geológico. En especial, en trampas estructurales asociadas a cinturones plegados y cabalgantes, geológicamente complejos, cuya formación y evolución está gobernada por la suma de los esfuerzos regionales y perturbaciones locales inducidas, durante los diferentes periodos de deformación tectónica superpuestos (ver e. g. Bui *et al.*, 2003; Florez-Niño *et al.*, 2003; Sanders *et al.*, 2004; Bergbauer y Pollard, 2004).

Investigaciones clásicas de Cloos (1948), Price (1967), Stearns (1968) entre otros, propusieron modelos conceptuales de fracturas-plegues, basados exclusivamente en el control geométrico y las relaciones de simetría entre los esfuerzos principales, el grado de inclinación de las capas plegadas y el eje axial. No obstante, los estudios de Hancock (1985), Dunne (1986), Twiss y Moores (1992) y recientemente Bergbauer y Pollard (2004), se alejaron de esta perspectiva, asociando la ocurrencia y orientación de los diferentes sistemas de discontinuidades a procesos pre- sin y pos-plegamiento, empleando el concepto de secuencia de formación de fracturas como guía para la formulación de sus interpretaciones.

El reto actual del modelamiento conceptual no es solo caracterizar los diferentes patrones de fracturamiento desde el punto de vista de distribución espacial. Por el contrario, debe tender a predecir los atributos de los diferentes sistemas heterogéneos de fallas-fracturas, en términos de los principales procesos tectónicos ocurridos, la diagénesis estructural registrada, la escala de ocurrencia, los fenómenos de partición de la deformación observados, la conectividad y el flujo de fluidos.

Bajo esta perspectiva, el presente trabajo describe los aspectos metodológicos y resultados de la caracterización e interpretación de los sistemas de discontinuidades, presentes a escala micro meso y macro, en un pliegue de propagación polideformado, geológicamente localizado en el cinturón plegado y cabalgante subandino, piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia.

El análisis geológico-estructural de las fallas-fracturas, presentes en los estratos productores de hidrocarburos, satisface tres propósitos fundamentales: (1) provee una explicación física para su

formación y ocurrencia, (2) predice los atributos más relevantes en la conductividad hidráulica, y (3) determina su inferencia en el flujo de fluidos.

Información sísmica y estratigráfica, registros de pozo, datos de producción, afloramientos análogos, corazones, registros de imagen de pozo, perfiles de deformación, rasgos petrográficos y microestructurales, análisis de curvatura y leyes de potencia, son acoplados para modelar y escalar los diferentes sistemas de fracturas en función de fenómenos de superposición tectónica y de fracturamiento pre, sin y post plegamiento.

Técnicas para la caracterización sistemática de patrones de fracturas heterogéneos (*scanlines* lineales y circulares), microscopía electrónica, óptica convencional y catodoluminiscencia, geoestadística, tests cinemáticos y mecánicos, modelos gráficos bidimensionales, y correlaciones entre microfracturas/macrofracturas (*sensu* Marret, 1996; Ortega y Marret, 2000), son empleadas para caracterizar los atributos, la historia y la mecánica deformacional de los diferentes sistemas fracturas-fallas presentes en los estratos productores y las zonas de daño asociadas a las principales discontinuidades.

Eventos pre, sin y posformación de la trampa estructural son clasificados según la historia cinemática, diagenética y deformativa (Figura 1), empleando principios de superposición tectónica y cinemática.



Figura 1. Aspectos considerados en la clasificación y caracterización de atributos de macrofracturas aplicable a intervalos corazonados y afloramientos. GIGA 2004.

Los atributos se evaluaron teniendo en cuenta: (1) la profundidad y escala de ocurrencia, (2) las características faciales o unidades mecánicas confinantes, (3) la posición estructural, (4) fenómenos de partición del fracturamiento, y (5) su relación con la conductividad hidráulica, lo cual permitió el desarrollo de modelos conceptuales predictivos.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar sistemas de fracturas, de *strain* intermedio (*sensu* Ackermann et al., 2001), cuya ocurrencia e intensidad está estrechamente con la producción de hidrocarburos, y agruparlos en dos sistemas de deformación superpuestos: fracturas relacionadas con fallamiento de dislocación y sistemas de fracturas relacionados con plegamiento.

Dos modelos conceptuales son superpuestos, obteniéndose zonas de alta y baja deformación con inferencia directa en el flujo de fluidos. A las zonas de alta deformación se les cuantificó atributos, para cada uno de los sistemas analizados, equivalentes al valor promedio presente en zonas productivas. En contraste, en las zonas de baja deformación se asignaron valores de zonas no-

productivas. Estos atributos varían según la posición estructural, formación, y las subzonas de homogenización estructural.

A través de esta propuesta metodológica, se obtuvieron los siguientes atributos de macrofracturas: escala de ocurrencia, persistencia, apertura cinemática, intensidad y orientación; discriminados según el evento tectónico al cual pertenece, el modo de ocurrencia y su distribución en subzonas productoras de hidrocarburos.

Para lograr esto fue necesario diferenciar:

- Eventos pre, sin y posformación de la trampa estructural según la historia cinemática, diagenética y deformativa, empleando principios de superposición tectónica.
- Órdenes de ocurrencia para los diferentes patrones de macrofracturas observados: corredores de falla (orden 1), macrofracturas observadas con forma lineal en afloramientos, corazones o registros de imagen (orden 2), estilolitos, fracturas “*bedding slip*” y bandas de deformación mesoscópicas (orden 3), y microfracturas en general (orden 4)
- Distribuciones homogéneas de los diferentes patrones de fracturamiento sindeformacionales, subdividiendo la estructura en estudio en zonas de alta y baja deformación (subzonas de homogeneidad estructural), e incorporando “clusters” o enjambres de fracturas a modo de subregiones de alto fracturamiento, localizadas heterogénea o sistemáticamente.
- Zonas de presencia o ausencia de impregnación natural, correlacionables con análisis de fluorescencia y registros productivos.
- Distribuciones geoestadísticas que permitieron escalar los diferentes atributos de macrofracturas / microfracturas.
- Subdominios de homogeneidad estructural: flanco, inflexión o transición estructural cresta y zonas estructurales cresta: “*forelimb y backlimb*”.

El modelo conceptual propuesto, el cual puede predecir la distribución de fracturas y atributos principales, de forma realística, está definido por:

- Cuatro subdominios estructurales.
- Dos ordenes de ocurrencia de macrofracturas: corredores de falla (orden 1) y macrofracturas mesoscópicas (orden 2).
- Fracturas de segundo orden confinadas a estratos, asociadas a la generación y propagación del anticlinal.
- Fracturas de segundo orden sin confinamiento a estratos, asociadas a la tectónica rumbodeslizante.
- Inclusión de zonas de alta y baja deformación asociadas a perfiles de deformación, deducidos de análisis de curvatura.
- Atributos de fracturas definidos por leyes de potencia para cada uno de los sistemas de fracturas identificados.

La capacidad de análisis y replicabilidad de los resultados obtenidos está limitada por tres factores principales: la complejidad de la historia deformacional de la roca confinante, los fenómenos de partición de la deformación registrados, y las restricciones intrínsecas a la escala y técnicas de detección empleadas.

No obstante, la integración de datos geoestáticos y de producción, el empleo de nuevas tecnologías para la cuantificación de atributos, el desarrollo de modelos conceptuales predictivos y aspectos metodológicos mecánico-deformacionales, representan valiosas experiencias para la caracterización de yacimientos, heterogéneos anisotrópicos, en ambientes estructuralmente complejos.

AGRADECIMIENTOS. – Los autores agradecen a las instituciones participantes del convenio de cooperación tecnológica 002-2005 entre ECOPETROL S.A., Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, y la

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por permitir la publicación de parte de los resultados obtenidos en el proyecto investigativo Impacto geomecánico en la productividad de yacimientos del Piedemonte Colombiano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

La Pointe, P.R. and Hudson, J.A. (1985). Characterization and Interpretation of Rock Mass Joint Patterns. *The Geological Society of America*. Special Paper No. 199. pp. 1-25.

Florez-Niño J.M., Aydin, A., Antonellini, M., Ayaviri, A. and Mavko, G. (2003). Faults and fracture system in a fold and thrust belt: an example from Bolivia. *Stanford Rock Fracture Project*. Paper X. pp. 1-29.

Bui, T.D., Brinton, J., Karpov, A.V., Hanks, C.L. and Jensen, J.L. (2003). Evidence and implications for significant late and post fold fracturing on detachment folds in the Lisburne Group of the Northeastern Brooks Range. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. SPE 84845. June, pp. 197-202.

Sanders, C., Bonora, M., Richards, D., Kozlowski, E., Sylwan, C. and Cohen, M. (2004). Kinematic structural restorations and discrete fracture modeling of a thrust trap: a case study from the Tarija Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*. Vol. 21, pp. 845-855.

Bergbauer, S. and Pollard, D.D. (2004). A new conceptual fold-fracture model including prefolding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 116, No. 3/4, pp. 294-307.

Cloos, H. (1948). Gang and Gehwerk einer Falte. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*. Vol. 100, pp. 209-303.

Price, N.J. (1967). The Tectonic Significance of Mesoscopic Subfacies in the Southern Rocky Mountains of Alberta and British Columbia. *Canada Journal of Earth Sciences*. Vol. 4. No. 1, pp. 39-70.

Stearns, D.W. (1968). Macrofracture Patterns on Teton Anticline, Northwest Montana. *American Geophysical Union Trans*. Vol. 45, pp. 107-108.

Hancock, P.L. (1985). Brittle microtectonics: principle and practice. *Journal of Structural Geology*. Vol. 7, pp. 437-457.

Dunne, W.M. (1986). Mesostructural development in detached folds: an example from West Virginia. *Journal of Geology*. Vol. 94, pp. 473-488.

Twiss, R.J. and Moores, E.M. (1992). *Structural Geology*. Freeman. New York.

Marret, R. (1996). Aggregate properties of fracture populations. *Journal of Structural Geology*. Vol. 18, No. 2/3, p. 169-178.

Ortega, O. and Marret, R. (2000). Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, san Juan basin, New Mexico. *Journal of Structural Geology*. Vol. 22, p. 571-588.

Ackermann, R.V., Schlische, R.W. and Withjack, M.O. (2001). The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. *Journal of Structural Geology*. Vol. 23. p. 1803-1819.