

DISTRIBUCIÓN GEOESTADÍSTICA DE ESFUERZOS IN-SITU EN POZOS PROFUNDOS Y SU RELACIÓN CON LEVANTAMIENTO Y DEFORMACIÓN CONTRACCIONAL, 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

Javier Alejandro Jiménez Nava

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

El campo de esfuerzos dominante y la asociación de estos con regímenes tectónicos, locales o globales, son de gran importancia en diferentes campos de las geociencias. En especial, en la caracterización y simulación de yacimientos anisotrópicos heterogéneos, sensibles a esfuerzos y deformaciones, sobre los cuales evaluar el efecto geomecánico durante la perforación, producción e inyección de fluidos, representa un reto fundamental de la ingeniería (ver e. g. Heffer y Koutsabeloulis, 1996; Heffer *et al.*, 1997; Zoback *et al.*, 2003).

La perforación de pozos profundos, en rocas pre-estresadas anisotrópicamente y dinámicamente localizadas en zonas tectónicamente activas, genera un variado conjunto de rasgos deformativos, variables tanto en el tiempo como en el espacio, considerados indicativos de la orientación del esfuerzo máximo y mínimo horizontal (Zoback *et al.*, 1985). Entre estos rasgos, los *breakouts* (Gouh y Bell, 1982), las fracturas verticales de tensión inducidas por perforación (Zoback y Haimson, 1982) y las fracturas sinusoidales (Dezayes *et al.*, 1995), son los más representativos del estado de esfuerzos *in-situ*, producto de la perturbación inducida y la concentración de estos alrededor de las paredes del pozo.

El presente trabajo describe los resultados e interpretaciones de la estimación de los esfuerzos con base en la observación de fallas no catastróficas en las paredes de pozos sub-verticales (*breakouts* y fallas de tensión). Estos últimos, con profundidades entre 12000 y 16000 pies de profundidad *TVD* y estructuralmente localizados en el frente deformacional asociado al cinturón plegado y cabalgante del Piedemonte Llanero, flanco occidental de la Cordillera Oriental de Colombia, Andes del Norte.

El uso de registros de imagen sínicos (UBI), en conjunto con el desarrollo de modelos geoestadísticos mediante el programa *ISATIS 5.0.1*, permitieron establecer la distribución de la orientación de los esfuerzos horizontales principales S_{hmin} y S_{Hmax} en la cara de la formación y regiones adyacentes, en función de la localización espacial y la litología confinante. Los resultados obtenidos (Figura 1), permiten generalizar comportamientos de los esfuerzos *in-situ* en los alrededores de los pozos analizados e inferir: (1) variaciones sistemáticas en la orientación de los esfuerzos principales en dos subdominios andersonianos: flanco y cresta, estrechamente relacionados con la geometría de la trampa estructural, y (2) variaciones heterogéneas relacionadas espacialmente con fracturas o fallas de desgarre co-sísmico.

La distribución de esfuerzos en el área de estudio, y en la cual se ha caracterizado los esfuerzos horizontales cercanos a los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , permite interpretar fenómenos observados en las discontinuidades principales en términos de reactivación tectónica por levantamiento contraccional \pm desplazamientos de cizalla subhorizontales, y partición de la deformación en posible régimen transpresivo.

Las anomalías, deflexiones o anisotropías marcantes, al ser interpretadas en términos de reactivaciones relacionadas en espacio y tiempo con actividad microsísmica, tienen inferencia directa en la detección de zonas con actividad tectónica reciente (natural \pm inducida). Adicionalmente, los resultados obtenidos y su superposición con halos sísmicos, claramente evidencian la presencia de reactivaciones preferenciales de discontinuidades, asociadas a “*co-seismic-creep*”, cuya orientación espacial favorece el cizallamiento.

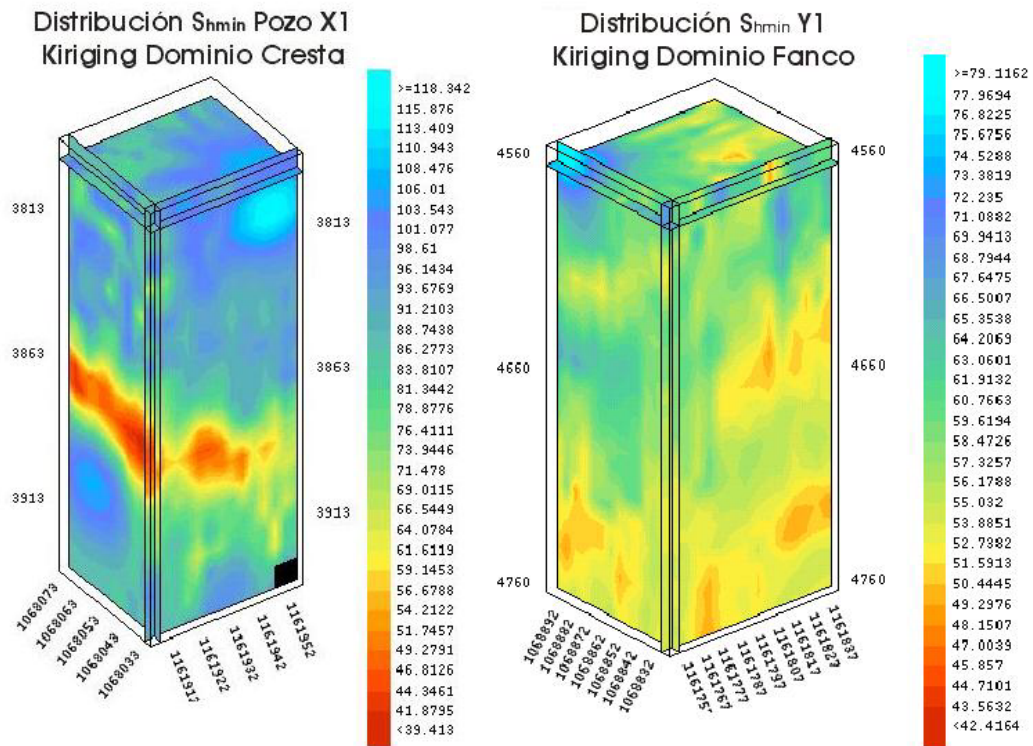


Figura 1. Distribución Geoestadística del esfuerzo horizontal mínimo (σ_3), en pozos representativos de los subdominios cresta y flanco.

Mediciones de esfuerzos *in-situ* a través del programa *World Stress Map* y otras investigaciones, han demostrado la existencia de provincias de esfuerzos tectónicos, tipo andersonianas, de dimensiones corticales, sometidas a uno de los tres regímenes de esfuerzos básicos: extensional, compresional y rumbodeslizantes (ver e. g. Anderson, 1951; Zoback, 1992; Sibson, 2004).

No obstante, la orientación de los esfuerzos activos en la zona, claramente difieren de los esfuerzos regionales, con lo cual se comprueba la existencia de heterogeneidades de esfuerzos locales, probablemente relacionadas con buckling o torsión elástica (Homberg *et al.*, 2004; Sibson, 2004), geológicamente localizada en un límite transicional entre provincias de esfuerzos andersonianas.

Estas notables discrepancias (globales y locales), están claramente demarcadas en uno de las zonas económicamente más atractivas del territorio colombiano, en el sentido de exploración / explotación de yacimientos de hidrocarburos, cuya fenomenología implícita está aún por clarificar. Por lo tanto, la determinación de los esfuerzos *in-situ* y su distribución geoestadística, constituye una valiosa herramienta de caracterización de patrones de esfuerzos.

Los resultados obtenidos, constituyen un elemento fundamental en la planeación de nuevas trayectorias de perforación, (para pozos exploratorios o productores), en una región caracterizada por altos costos y una curva de aprendizaje pobremente construida.

Adicionalmente, los valores geoestadísticos obtenidos permiten desarrollar modelos de esfuerzos para un yacimiento en la cara de la formación y regiones adyacentes, en cada uno de los tiempos de perforación de los pozos, obteniéndose información valiosa en el momento de simular y calibrar el flujo de fluidos (producción e inyección) y los diferentes impactos geomecánicos a evaluar.

La correlación tridimensional de los diferentes puntos de control, permite determinar regímenes de esfuerzos locales, los cuales pueden potencialmente favorecer o desfavorecer: 1) corredores de flujo de fluidos preferenciales, y 2) la reactivación de discontinuidades de segundo o tercer orden.

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

- Anderson, E.M. (1951). The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with application to Britain. *Oliver and Boyd*. 2nd ed, Edimburgh.
- Dezayes, Ch., Villemin, T., Genter, A., Traineau, H. and Angelier, J. (1995). Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forts (Rhine graben, France). *Scientific Drilling*. Vol. 5, pp, 31-41.
- Engelder, T. (1993). Stress Regimes in the Lithosphere. *Princeton Press*, Princeton, New Jersey.
- Gough, D.J. and Bell, J.S. (1982). Stress orientations from oil well fractures in Alberta and Texas. *Canadian Journal of Earth Sciences*. Vol. 18, pp. 1358-1370.
- Heffer, K.J. and Koutsabeloulis, N.C. (1996). The dynamic 3-D reservoir - both hydraulically and geomechanically. *SPE 35519, NPF/SPE European 3-D Reservoir Modelling Conference*. Stavanger, Norway, 16-17 April 1996.
- Heffer, K.J. Fox, R.J., McGill, C.A. and Kousabeloulis, N.C. (1997). Novel techniques show links between reservoir flow directionality, earth stress, fault structure and geomechanical changes in mature waterfloods. *SPE 30711, SPE Annual Technological Conference & Exhibition*. Dallas, USA, 22-25 October 1995.
- Sibson, R.H. (2004). Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation. *Journal of Structural Geology*. Vol., 26, pp. 1127-1136.
- Zoback, M.D. and Haimson, B.C. (1982). Status of the hydraulic fracturing method for in-situ stress measurements. *23rd Symposium on Rock Mechanics, Society of Mining Engineering of AIME*. New York, pp. 143-156.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R.N. (1985). Well bore breakouts and in-situ stress. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 90, No. B7, pp. 5523-5530.
- Zoback, M.D. (1992). First and second-order pattern of stress in the lithosphere: the World Stress Map project. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 97, pp. 11,703-11,728.
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D. and Wiprut, D.J. (2003). Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol. 40, p. 1049-1076.