

EXHUMACIÓN DIACRÓNICA DURANTE EL MIOCENO-PLIOCENO DE LOS ANDES DE MÉRIDA

**MAURICIO A. BERMÚDEZ^a; PETER VAN
DER BEEK^b AND MATTHIAS BERNET^b**

^aLaboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

^bInstitut des Sciences de la Terre CNRS, Université Joseph Fourier, BP53, 38041 Grenoble, France

mauricio.bermudez@ing.ucv.ve
maberce@yahoo.com

Resumen

Usando modelos numéricos termales 3D y datos de termocronología en apatitos se establece que la Sierra Nevada de Mérida se exhumó con una velocidad de ~ 1.7 Km/Ma desde hace 10 Ma hasta 4 Ma, luego la velocidad disminuye a ~ 0.4 km/Myr. En contraste, La Sierra La Culata muestra reciente y rápida exhumación (~ 1.4 km/Ma) desde hace 4 Ma.

Palabras clave: *Andes de Venezuela, huellas de fisión en apatitos, Falla de Boconó, modelos numéricos termales, Exhumación Diacrónica.*

Abstract

Using thermochronology data and 3D thermal modeling to constrain the exhumation history of the Sierra Nevada (SN) and La Culata (SLC) blocks was possible establishing significant differences. SN is exhumed with rates ~ 1.7 km/Myr from ~ 10 Ma until 4 Ma, decreasing to ~ 0.4 km/Myr to present. In contrast, SLC experienced much more rapid recent exhumation (~ 1.4 km/Myr) since 4 Ma.

Keywords: *Venezuelan Andes, apatite fission-track, exhumation, Boconó Fault, thermal models.*

Introducción

Los Andes de Venezuela registran la compleja interacción geodinámica entre la placa del Caribe, el Arco de Panamá y la placa Suramericana (Pindell and Barrett, 1990; Taboada *et al.*, 2000) y controlan la distribución actual de drenajes del norte de Suramérica (Hoorn *et al.*, 1995; Díaz de Gamero, 1996) y establecen condiciones para el transporte, depositación y sedimentación del material detrítico. Sin embargo, debido a la poca resolución que

poseen los sedimentos sin-orogénicos de las cuencas situadas a ambos flancos andinos (Colletta *et al.*, 1997) y la escasez de datos termocronológicos (Kohn *et al.*, 1984), no había sido posible establecer el comienzo y la variabilidad en los patrones de exhumación de la cadena, por lo tanto, los posibles controles geodinámicos eran muy poco conocidos.

La evolución de Los Andes de Venezuela está acoplada con los principales sistemas de fallas rumbo-deslizantes con componentes verticales variables, resultados del desplazamiento dextral de la placa del Caribe respecto a Suramérica (Figura 1 en Bermúdez *et al.*, 2011). Así este orógeno constituye un caso ideal para estudiar las relaciones entre exhumación y fallas rumbo-deslizantes (Fitzgerald *et al.*, 1995; Cruz *et al.*, 2007; Spotila *et al.*, 2007).

En este trabajo nosotros reportamos nuevas edades de huellas de fisión en apatitos extraídos de muestras recolectadas a lo largo de un perfil vertical (edad-elevación) en la parte más alta de la Sierra Nevada de Mérida. Los resultados fueron comparados con datos previamente publicados y se usaron modelos termo-cinemáticos tridimensionales para reconstruir la evolución de Los Andes de Mérida.

Marco Tectónico

Los Andes de Venezuela constituyen una cadena con orientación NE-SO de aproximadamente 400 km de longitud (Fig. 1 en Bermúdez *et al.*, 2011) resultante de la convergencia oblicua de un pequeño bloque continental (bloque de Maracaibo) y la placa Suramericana (Colletta *et al.*, 1997; Mann *et al.*, 2006). Discontinuidades tectónicas preexistentes (originadas durante los procesos Mesozoicos de rifting; Case *et al.*, 1990), fueron reactivadas durante esta convergencia, lo cual causó la exhumación de diversos bloques tectónicos desde el

Eoceno al Plioceno (Kohn *et al.*, 1984; Bermúdez *et al.*, 2010).

Los Andes de Venezuela son cortados por numerosos sistemas de fallas rumbo-deslizantes (Figuras 1 y 2). Uno de los más importantes sistemas de fallas es el sistema rumbo-lateral dextral conocido como Boconó el cual se extiende a lo largo de toda la cadena. El desplazamiento rumbo-lateral a lo largo de esta cadena comienza tarde en comparación con la exhumación de Los Andes (desde el Plioceno, según Backé *et al.*, 2006; Egbue and Kellogg, 2010). La Falla de Boconó es un rasgo geomorfológico predominante que divide casi simétricamente a Los Andes de Mérida en dos bloques: uno al norte llamado Sierra La Culata y otro al sur llamado Sierra Nevada (Figuras 1 y 2 en Bermúdez *et al.*, 2011). En estos dos bloques se concentran los principales picos de Los Andes de Venezuela con alturas mayores a los 4000 metros de elevación (incluyendo el Pico Bolívar con casi 5000 metros de elevación).

Datos termocronológicos

Nosotros recolectamos muestras para análisis de huellas de fisión en apatitos a lo largo de un transecto edad-elevación en la Sierra Nevada. Es decir, con la condición de que las muestras estuviesen lo más orientadas posibles en una línea vertical a diferentes elevaciones. En total fueron recolectadas 13 muestras entre 1250 metros de elevación en el valle del río Chama al SE de la ciudad de Mérida y 4718 m de elevación cercanos al Pico Bolívar. Las 7 muestras ubicadas en la parte superior de la cadena fueron recolectadas cerca del Pico Bolívar pero no se pudo hacer el perfil vertical completamente en este sitio ya que en la cota inferior a los 3000 metros la vegetación cambia abruptamente a un bosque tropical y las muestras eran más propensas a procesos de meteorización. Por tal motivo, fue necesario recolectar 6 muestras a lo largo de la carretera Mérida-

El Morro ubicado ~10 km al SE de la ciudad (Fig. 2 en Bermúdez *et al.*, 2011). Los dos perfiles de elevación siguen el mismo transecto, indicando que no hay exhumación diferencial entre ellos (Fig. 3A en Bermúdez *et al.*, 2011). Detalles sobre el procesamiento de las muestras, mediciones de longitudes de trazas de fisión y algunas interpretaciones son dadas en Bermúdez *et al.*, (2011). Las longitudes de trazas de fisión varían 13.9 y 14.5 μm con distribuciones unimodales y muy poca variación en cuanto a las desviaciones estándar (0.8-1.4 μm), lo cual sugiere un rápido paso por la isoterma de cierre (e.g., Fitzgerald *et al.*, 1995). Nosotros usamos modelos de regresión lineal por mínimos cuadrados (McCullagh and Nelder, 1989) para tratar de estimar la pendiente de la recta edad-elevación y así tener un estimado de la tasa de exhumación, esto arrojó un valor de $1.1 \pm 0.2 \text{ km/Ma}$ ($r^2 = 0.90$) para la exhumación ocurrida entre 4 y 8 Ma en la Sierra Nevada.

Nosotros comparamos nuestra data con 7 edades existentes de huellas de fisión en apatitos obtenidas de un perfil de elevación entre 1520 y 3100 m en el bloque El Carmen (Sierra La Culata) elaborado por Kohn *et al.* (1984; ver Figuras 2 y 3 en Bermúdez *et al.*, 2011). Para este bloque las edades oscilan entre 1.8 ± 0.4 y $3.4 \pm 0.6 \text{ Ma}$ (Fig. 2A en Bermúdez *et al.*, 2011). En contraste, usando los métodos anteriormente descritos para estimar la tasa de exhumación se obtuvo un valor de $1.4 \pm 0.7 \text{ km/Ma}$ ($r^2 = 0.89$). La separación vertical entre los dos perfiles edad-elevación sugiere un mínimo de 1.9 kilómetros de levantamiento de la columna de rocas del bloque El Carmen con respecto a la Sierra Nevada desde hace 4 Ma.

Modelos numéricos

Los resultados obtenidos anteriormente sugieren pendientes similares o relaciones edades-elevación muy parecidas. Sin embargo, esas tasas son sensibles a la

topografía y al cambio de relieve (Braun, 2002), extraer esas dos señales es una tarea compleja (Valla *et al.*, 2010). Con el propósito de obtener esta información, inferir la historia de exhumación más probable para ambos bloques y estimar la resolución con la cual los datos permiten reconstruir tales historias utilizamos métodos de inversión numérica. Detalles de los métodos y los parámetros usados pueden ser encontrados en Bermúdez *et al.*, (2011). Nosotros corrimos 11 diferentes inversiones con diferentes grados de complejidad. Nuestro modelo preferido (el geológicamente y numéricamente más representativo) sugiere una historia de exhumación a dos fases para la Sierra Nevada, con tasas de exhumación de 1.7 ± 0.6 km/Ma entre 9.6 ± 2.5 y 4.0 ± 1.0 Ma, disminuyendo a 0.4 ± 0.5 km/Ma desde ese tiempo (Fig. 3C en Bermúdez *et al.*, 2011). En contraste, el bloque El Carmen registra una simple y rápida exhumación (1.4 ± 0.3 km/Ma) desde 3.9 ± 1.2 Ma al presente (Fig. 3D en Bermúdez *et al.*, 2011). Estas soluciones optimizadas indican que diferentes y sucesivos pulsos de exhumación afectaron la Sierra Nevada y el bloque El Carmen ubicado en la Sierra La Culata.

Discusión y Conclusiones

Nuestros datos y los modelos numéricos demuestran exhumación rápida de Los Andes de Venezuela desde el Neógeno tardío, además indican que esta fue diacrónica a lo largo de la Falla de Boconó: una exhumación rápida al sur de la falla entre 10 a 4 Ma fue seguido por una fase de exhumación al norte. Aunque el inicio del engrosamiento cortical (“crustal thickening”), levantamiento y exhumación asociada en Los Andes de Venezuela y en la Cordillera Oriental de Colombia se inicia en tiempos del Eoceno tardío al Oligoceno (Parra *et al.*, 2009; Bermúdez *et al.*, 2010; Horton *et al.*, 2010), la rápida exhumación durante el Mioceno tardío en la Sierra

Nevada de Mérida coincide con el principal acortamiento y exhumación de la Cordillera Oriental de Colombia (Gomez *et al.*, 2005; Parra *et al.*, 2009) y registran la respuesta a la acreción del Arco de Panamá en la parte noroeste de Colombia (Taboada *et al.*, 2000). Subsecuentemente la exhumación rápida de la Sierra La Culata en el Plioceno puede estar controlada por la convergencia oblicua y continua del bloque de Maracaibo hacia los Andes de Venezuela (Monod *et al.*, 2010), todo esto fue anterior al actual escape tectónico Cuaternario de Los Andes del norte de Suramérica (Trenkamp *et al.*, 2002; Backé *et al.*, 2006; Egbue and Kellogg, 2010).

El levantamiento y la exhumación Miocena tardía de la Sierra Nevada es consistente con el incremento de flujos detríticos hacia las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure y con el inicio de la estructura doble vergente (Colletta *et al.*, 1997; Mann *et al.*, 2006). Esta fase resultó en la deflexión Miocena tardía de los paleoríos Orinoco y Magdalena (Fig. 1 en Bermúdez *et al.*, 2011), esto ultimo inferido del registro sedimentario Neógeno (Hoorn *et al.*, 1995; Díaz de Gamero, 1996).

La estructura de Los Andes de Venezuela es característica de un cinturón montañoso producido por convergencia oblicua de bloques (Colletta *et al.*, 1997). Los patrones espaciales y temporales de exhumación en tales sistemas son complejos y son controlados por diversos parámetros, por ejemplo: la oblicuidad del movimiento de las placas con respecto a fallas preexistentes controlan los patrones de acortamiento, levantamiento, particionamiento, exhumación y fallamiento rumbo-deslizante (e.g., Braun and Beaumont, 1995; Burbidge and Braun, 1998).

El levantamiento y exhumación de Los Andes de Mérida no está relacionado de manera obvia a cambios locales en la orientación de la falla de Boconó, el

segmento de esta falla en la parte central de Los Andes de Mérida es más transtensional que transpresional en el régimen tectónico actual (Cortés and Angelier, 2005; Backé *et al.*, 2006). En lugar de esto, nosotros sugerimos que cambios temporales en las condiciones de bordes, relacionadas a la acreción del arco de Panamá Instead (Taboada *et al.*, 2000) y la indentación oblicua del bloque de Maracaibo (Monod *et al.*, 2010), controlan los patrones de exhumación espacial y temporal observados en los Andes de Mérida.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al programa de Beca-Sueldo Exterior Docente del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV) otorgado al Prof. Mauricio A. Bermúdez Cella. También agradecemos el financiamiento dado por el CDCH-UCV al proyecto PI 08-00-6219-2006, y al Proyecto ECOS Nord V08U01. Al Instituto Nacional de Parques (INPARQUES) de la Región Andina y al Sistema Teléférico de Mérida por la permisología y ayuda logística para la toma y transporte de muestras. A Jean Braun, Bernard Colletta, Christoph Glotzbach y Roelant van der Lelij por sus comentarios y sugerencias.

Referencias

- BACKÉ, G., DHONT, D., AND HERVOUET, Y., 2006. *Tectonophysics*, v. 425, p. 25-53.
- BERMÚDEZ, M.A., KOHN, B.P., VAN DER BEEK, P.A., BERNET, M., O’SULLIVAN, P.B., AND SHAGAM, R., 2010. *Tectonics*, v. 29, TC5009.
- BERMÚDEZ, M.A., VAN DER BEEK, P.A., BERNET, M., 2011. *Geology*, Vol. 39; no. 2; p. 139–142.
- BRAUN, J., AND BEAUMONT, C., 1995. *Journal*

- of *Geophysical Research*, v. 100, p. 18059-18074.
- BRAUN, J., 2002. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 200, p. 331-343.
- BURBIDGE, D.R., AND BRAUN, J., 1998. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 15221-15237.
- CASE, J. E., SHAGAM, R., AND GIEGENGACK, R. F., 1990. *Geology of the Northern Andes; an overview*, in Dengo, G., and Case, J.E., eds., *The Caribbean Region: The Geology of North America, H: Boulder, CO, Geological Society of America*, p. 177-200.
- COLLETTA, B., ROURE, F., DE TONI, B., LOUREIRO, D., PASSALACQUA, H., AND GOU, Y., 1997. *Tectonics*, v. 16, p. 777-794.
- CORTÉS, M., AND ANGELIER, J., 2005. *Tectonophysics*, v. 403, p. 29-58.
- CRUZ, L., FAYON, A., TEYSSIER, C., AND WEBER, J., 2007 IN TILL, A.B., ROESKE, S. M., SAMPLE, J.C., AND FOSTER, D.A., eds., *Exhumation Associated with Continental Strike-Slip Fault Systems: Geological Society of America Special Paper*, 434, p. 149-165.
- DÍAZ DE GAMERO, M.L., 1996. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 123, p. 385-402.
- EGBUE, O., AND KELLOGG, J., 2010. *Tectonophysics*, v. 489, p. 248-257.
- FITZGERALD, P.G., SORKHABI, R.B., REDFIELD, T. F., AND STUMP, E., 1995. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 20175-20191.
- GÓMEZ, E., JORDAN, T.E., ALLMENDINGER, R. W., AND CARDOZO, N., 2005. *Geological Society of America Bulletin*, v. 117, p. 1272-1292.
- HOORN, C., GUERRERO, J., SARMIENTO, G.A., AND LORENTE, M.A., 1995. *Geology*, v. 23, p. 237-240.
- HORTON, B.K., PARRA, M., SAYLOR, J.E., NIE, J., MORA, A., TORRES, V., STOCKLI, D.F., AND STRECKER, M.R., 2010. *GSA Today*, v. 20, p. 4-10.
- KOHN, B.P., SHAGAM, R., BANKS, P.O., AND BURKLEY, L.A., 1984 IN BONINI, W.E., HARGRAVES, R.B., AND SHAGAM, R., eds., *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics: Geological Society of America Memoir*, 162, p. 365-384.
- MANN, P., ESCALONA, A., AND CASTILLO, M.V., 2006. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 90, p. 445-477.
- MCCULLAGH, P., AND NELDER, J.A., 1989. *Generalized linear models: London, Chapman & Hall*, 511 p.
- MONOD, B., DHONT, D., AND HERVOUËT, Y., 2010. *Tectonophysics*, v. 490, p. 123-135.
- PARRA, M., MORA, A., SOBEL, E.R., STRECKER, M.R., AND GONZALEZ, R., 2009. *Tectonics*, v. 28, doi:10.1029/2008TC002423.
- PINDELL, J., AND BARRETT, S., 1990 IN DENG, G., AND CASE, J., eds., *The Caribbean region: The geology of North America, H: Boulder, Geological Society of America*, p. 405-432.
- SPOTILA, J.A., HOUSE, M.A., NIEMI, N.A., BRADY, R.C., OSKIN, M., AND BUSCHER, J.T., 2007 IN TILL, A.B., ROESKE, S.M., SAMPLE, J.C., AND FOSTER, D.A., eds., *Exhumation Associated with Continental Strike-Slip Fault Systems: Geological Society of America Special Paper*, 434, p. 15-33.
- TABOADA, A., RIVERA, L.A., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J., AND RIVERA, C., 2000. *Tectonics*, v. 19, p. 787-813.
- TRENKAMP, R., KELLOGG, J.N., FREYMUËLLER, J.T., AND MORA, H.P., 2002. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 157-171.
- VALLA, P.G., HERMAN, F., VAN DER BEEK, P.A., AND BRAUN, J., 2010. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 295, p. 511-522.