

Impacto de los proyectos GEODINOS y BOLIVAR en el conocimiento geodinámico de Venezuela

Schmitz, Michael¹, Levander, Alan², Audemard, Franck¹, Ughi, Antonio³, Padrón, Crelia⁴, Torres, Wuilian⁵, Bosch, Miguel⁶, Niu, Fenglin², Herbert, Rendón¹, Urbani, Franco^{1,3}, Orihuela, Nuris³, Yepez, Santiago⁵, Masy, Jeniffer^{1,2}, Bezada, Maximiliano^{2,7}, Paolini, Mónica¹, Sánchez, Cristhian^{1,8}

1) *Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, mschmitz@funvisis.gob.ve*

2) *Rice University, Houston, Texas, alan@rice.edu*

3) *Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV, antonioughi@gmail.com*

4) *Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, cpadron@usb.ve*

5) *Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, FII, wtorres@fii.gob.ve*

6) *Laboratorio de Simulación e Inversión Geofísica, UCV, miguel.bosch@ucv.ve*

7) *ahora en: Department of Geological Sciences, University of Oregon, mbezadav@uoregon.edu*

8) *ahora en: Luminageo, Houston, Texas, cristhian.sanchez@luminageo.com*

Resumen

El norte de Venezuela está ubicada en la zona de interacción de las placas del Caribe y de Sudamérica, lo que ha generado una compleja zona de interacción a nivel de las litosferas. Durante los estudios realizados en el marco de los proyectos GEODINOS y BOLIVAR desde el año 2003 se determinaron las principales estructuras del norte de Venezuela, tanto a nivel del manto como en la corteza. Los estudios sismológicos y gravimétricos se complementaron con estudios geológicos destinados a conocer la historia de deformación de las unidades metamórficas, así como las cuencas cuaternarias asociadas a los principales sistemas de deformación.

Introducción

Venezuela está ubicado en una compleja zona de interacción de las placas del Caribe (CAR) y de Sudamérica (SA), limitado en el este por la subducción de las Antillas Menores por debajo de CAR, y en el oeste por la subducción de CAR debajo de SA (e.g. Molnar y Sykes, 1969). En el norte, el movimiento relativo de 2 cm/a entre CAR y SA, es acomodado en las zonas de fallas transcurrentes de los sistemas Oca-Ancón, San Sebastián y El Pilar, de 1000 km de largo y 100 km de ancho (e.g. Schubert, 1984). Los estudios geológicos y geofísicos realizados en el marco de los proyectos GEODINOS y BOLIVAR desde el año 2003 (Levander et al., 2006) se enfocaron en la estructura y la dinámica de la litósfera en la zona de interacción de ambas placas, aplicando métodos sísmicos (reflexión y refracción), sismológicos (70 estaciones de banda ancha), gravimétricos y geológicos (neotectónica, petrología). En el presente trabajo se presentan los principales resultados de estos

estudios y su implicación para el conocimiento geodinámico en Venezuela.

Estructura de la litósfera y modelado flexural

La convergencia entre las placas de América del Norte y SA desde 55 Ma resultó en la subducción del límite sur de CAR debajo de SA, y del movimiento hacia el este de CAR respectivo a SA con 2 cm/a (e.g. Pérez et al., 2001). En el año 2003, se instalaron aproximadamente 40 equipos sismológicos de banda ancha durante uno a dos años en complemento de las 35 estaciones de la Red Sismológica Nacional (Levander *et al.*, 2006). De estos registros se derivaron modelos fundamentales de la configuración de la litósfera en la región, aplicando métodos de funciones receptoras (Niu et al., 2007), tomografía de ondas superficiales (Miller et al., 2009) y tomografía telesísmica de ondas P (Bezada et al., 2010a).

Para un análisis de la anisotropía en el manto fueron instaladas en los años 2008 y 2009, 7 estaciones sismológicas adicionales en un perfil entre Falcón y Apure (Figura 1), lo que permitió la diferenciación de 3 regímenes litosféricos diferentes, uno asociado a CAR en el norte con direcciones O-E del flujo mantelar rápido, una región asociada a la influencia de la falla de Boconó en los Andes, y la región del sur asociada a SA estable.

Una de las incógnitas en la configuración litosférica en la región se refiere a la existencia del slab de subducción de CAR en el oeste, para el cual Bezada et al. (2010a) asumen un bajo ángulo de subducción hasta el centro del lago de Maracaibo y una profundización hasta 600 km debajo de los Andes. La extensión de la loza de subducción hacia el este se estimó mediante el análisis geoestadístico de datos gravimétricos y magnéticos (Blanco et al., 2008), quedando

evidenciada su limitada extensión en el este. Los análisis tomográficos (Miller et al., 2009; Bezada et al., 2010a) no muestran evidencia de la continuidad de la subducción relacionada al cinturón deformado del CAR y la subducción profunda debajo de los Andes.

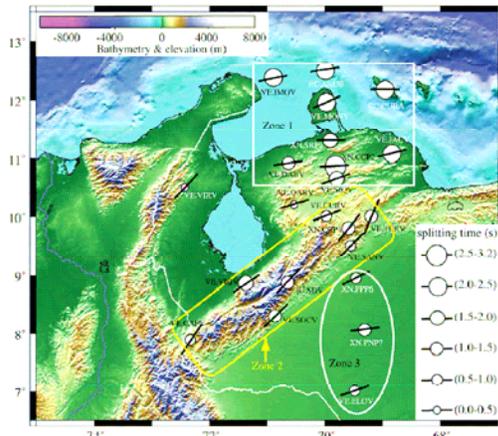


Figura 1. Parámetros de anisotropía sísmica y topografía (Masy et al., 2011). La orientación de las líneas negras corresponde a la orientación de la dirección rápida.

Espesores corticales y estructura interna de la corteza

Entre las latitudes 64°O y 70°O, 4 perfiles sísmicos profundos fueron adquiridos en el año 2004 perpendicular al límite CAR – SA, desde la cuenca de Venezuela en el norte, pasando por el Sistema Montañoso del Caribe hasta las cuencas de antepaís en el sur. En la misma zona, se evaluaron los registros en las estaciones sismológicas, aplicando el método de funciones receptoras. Esto permitió la elaboración de dos mapas de espesores corticales (Figura 2), que coinciden en sus rasgos principales. En el este, el espesor cortical alcanza 55 km debajo de la cuenca oriental, disminuyendo su espesor hacia el sur (cratón de Guayana con 40 km) y hacia el norte (25-30 km en las cuencas ubicadas al norte de SA. Hacia el oeste, en términos generales disminuye el espesor cortical ligeramente.

La estructura detallada de la zona de interacción de ambas placas es investigada en 4 perfiles perpendiculares al límite (de oeste a este: Guédez, 2007; Magnani et al., 2009; Bezada et al., 2010b; Clark et al., 2008). De manera ejemplar se muestra el perfil a lo largo de la latitud 67°O (Figura 3), donde se evidencia la fuerte disminución del espesor cortical al pasar el sistema de fallas transcurrentes en la costa. Al mismo sistema de fallas (San Sebastián) se asocia una zona de alta velocidad en la corteza superior, asociada a la exhumación de material oceánico (posiblemente peridotita serpentinizada) asociado al sistema de fallas.

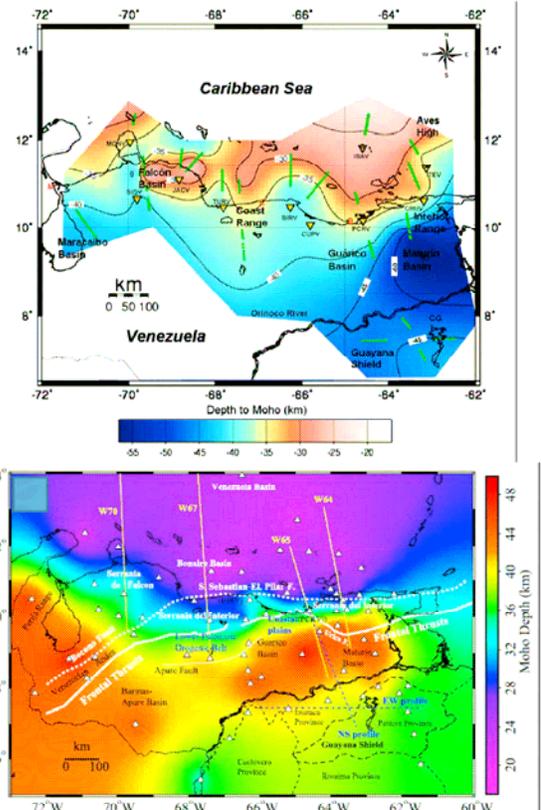


Figura 2. Mapas de espesores corticales del norte de Venezuela basadas en el análisis de datos sísmicos de refracción (Schmitz et al., 2008; arriba) y análisis de funciones receptoras (Niu et al., 2007; abajo).

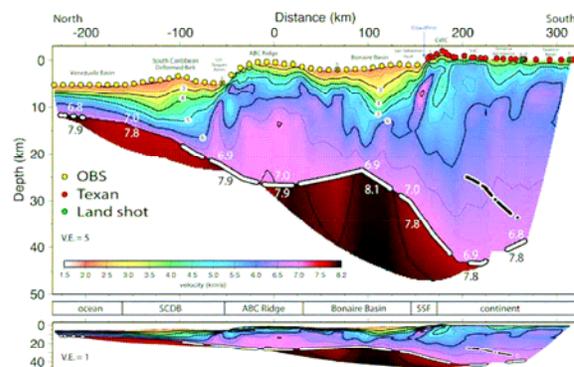


Figura 3. Modelo de velocidad a lo largo del perfil 67°O (Magnani et al., 2009). Destaca el aumento del espesor cortical debajo del cinturón deformado de la Cordillera de la Costa y el reflector inclinado que marca el tope de la corteza inferior. Una estructura de alta velocidad a nivel de la corteza superior se puede asociar al sistema de fallas de San Sebastián.

Las estructuras corticales fueron modelados con métodos gravimétricos y magnéticos a diferente escala, de manera de tener un control espacial de las respectivas anomalías (e.g. Orihuela et al., 2011; Sánchez et al., 2010).

Deformaciones en superficie y cuencas sedimentarias

Mediante diferentes métodos geológicos se caracterizaron los distintos estilos de deformación neógena y cuaternaria presentes a lo largo del cinturón sismotectónico del norte y noroeste de Venezuela, combinando datos dinámicos y estáticos para determinar la cinemática de las principales fallas. En la zona del triángulo entre las fallas de Oca-Ancón, Valera y Boconó se realiza un estudio cronoestratigráfico que genere la información necesaria para emplazar el modelo geodinámico en un marco cronológico, en estrecha asociación con la evolución de la cadena andina adyacente. Las deformaciones cinemáticas son controladas mediante el empleo de redes geodésicas densas, inicialmente instaladas en el Oriente venezolano, para el cual se evidenciaron altas tasas de repteo (Jouanne et al., 2011). Este año se inició la monumentación y medición de estaciones en el occidente.

Con la intención de iluminar en detalle la actividad reciente de las fallas activas tanto en el Golfo de Cariaco como en el Lago de Maracaibo, se realizaron perfiles sísmicos de alta y muy alta resolución (e.g. van Daele et al., 2011; Sánchez et al., en prep.), que permitieron identificar el detalles de la zona de deformación y comprobar la actividad de la falla Pueblo Viejo (Figura 4), respectivamente.

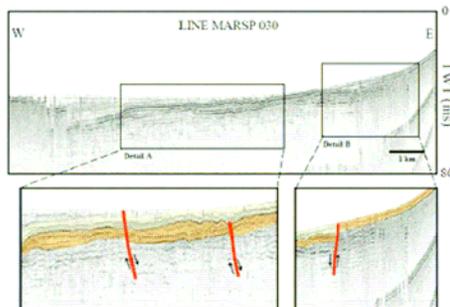


Figura 4. Perfil con sparker a lo largo de la falla de Pueblo Viejo (Lago de Maracaibo) con evidencia de actividad cuaternaria (Sánchez et al., en prep.).

Determinación de edades

El objetivo fundamental ha sido la utilización de las técnicas geológicas de superficie, la petrología, geoquímica y geocronología, para contribuir al conocimiento de la historia geológica de la región. Los trabajos petrográficos se realizan a través del estudio de las secciones finas para identificar los minerales presentes en la roca, y al menos

parcialmente, deducir el orden de cristalización de los minerales, su grado de metamorfismo y demás detalles de su evolución, en especial estas condiciones de máximas temperaturas y presiones a que fueron sometidas. A la fecha se dispone de mapas geológicos actualizados de gran parte de la costa norte con las respectivas historias de metamórficas (e.g. Ellero et al., 2007, Viscarret, et al., 2009; Urbani, 2010; Urbani, 2011; Noguera, et al., 2011).

Integración de la información en un SIG

En el marco del proyecto GEODINOS se diseñó un Sistema de Información Geográfico que permite a los investigadores asociados al proyecto consultar y analizar datos geológicos, geofísicos y geográficos tanto en 2D como en 3D (Yépez, 2011). Al terminar el proyecto en el año 2012, el SIG será alojado en un servidor con acceso público, de manera de permitir el manejo de las distintas variables y módulos de visualización y consulta espacial desde plataformas remotas. El objeto de este sistema es que sirva de referencia para futuras investigaciones en este campo, donde constantemente se haga un mantenimiento y actualización a la base de datos.

Conclusiones

Los estudios realizados en el marco de los proyectos GEODINOS y BOLIVAR desde el año 2003 han permitido un avance significativo en el conocimiento de las estructuras litosféricas, desde las observaciones en superficie hasta estructuras del manto superior. Sin embargo, el grueso de las investigaciones fue concentrado en el centro-este de Venezuela. Por esta razón se sugiere que en el futuro las investigaciones litosféricas se concentren en el occidente, de manera de permitir una visión equilibrada de las estructuras litosféricas en el norte de Venezuela. Los datos y modelos del proyecto se harán disponibles a la comunidad científica mediante un SIG alojado en una página WEB accesible libremente.

Agradecimientos

Los estudios han sido financiados en el marco de los proyectos GEODINOS (Geodinámica reciente del límite norte de la placa Sudamericana, FONACIT G-2002000478), con fondos adicionales del contrato PDVSA-INTEVEP – FUNVISIS N° 04-141 (Estudios sísmicos adicionales con fuentes en tierra,) y BOLIVAR (Broadband Ocean-Land Investigations of Venezuela and the Antilles arc Region, NSF- Continental Dynamics Program).

Referencias

- Bezada M.J., A. Levander, B. Schmandt, 2010a. Subduction in the Southern Caribbean: Images from finite-frequency P-wave tomography. *J. Geophys. Res.*, 115, B12333, doi:10.1029/2010JB007682.

- Bezada M. J., Magnani M., Zelt C. A., Schmitz, M., Levander A., 2010b. The Caribbean–South American plate boundary at 65°W: Results from wide angle seismic data. *J. Geophys. Res.*, 115, B08402, doi:10.1029/2009JB007070.
- Blanco, R., Bosch, M., Merchan, J., 2008. Modelado tridimensional de la estructura litosférica de la región nor-occidental de Venezuela y norte de Colombia con base en datos de tiempos de viaje, gravedad y magnetismo. Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 8 pp.
- Clark, S. A., C. A. Zelt, M. B. Magnani, and A. Levander, 2008. Characterizing the Caribbean–South American plate boundary at 64°W using wide–angle seismic data, *J. Geophys. Res.*, 113, B07401, doi:10.1029/2007JB005329.
- Ellero P, F. Siena, Urbani F. 2007. Tectono-metamorphic history of the Tacagua ophiolitic unit (Cordillera de la Costa, northern Venezuela): Insights in the evolution of the southern margin of the Caribbean Plate. *Island Arcs*, 16: 105-123.
- Guédez, M.C., 2007. Crustal structure across the Caribbean–South American plate boundary at 70W—Results from seismic refraction and reflection data, M.S. thesis, Dep. of Earth Sci., Rice Univ., Houston, Tex.
- Jouanne, F., Audemard, F.A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., Reinoza, C., 2011. Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics* 51, 398–410.
- Levander, A., Schmitz, M., Avé Lallemand, H.G., Zelt, C.A., Sawyer, D.S., Magnani, M.B., Mam, P., Christeson, G., Wright, J., Pavlis, D., Pindell, J., 2006. Evolution of the Southern Caribbean Plate Boundary. *EOS* 87 (Nr. 9), 97, 100.
- Magnani, M. B., C. A. Zelt, A. Levander, and M. Schmitz, 2009. Crustal structure of the South American–Caribbean plate boundary at 67°W from controlled source seismic data, *J. Geophys. Res.*, 114, B02312, doi:10.1029/2008JB005817.
- Masy, J., F. Niu, A. Levander, and M. Schmitz, 2011. Mantle flow beneath northwestern Venezuela: Seismic evidence for a deep origin of the Merida Andes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 305, 396-404, doi:10.1016/j.epsl.2011.03.024.
- Miller, M.S., Levander, A., Niu, F., Li, A., 2009. Upper mantle structure beneath the Caribbean–South American plate boundary from surface wave tomography. *J. Geophys. Res.* 114, B01312. doi:10.1029/2007JB005507.
- Molnar, P., Sykes, L., 1969. Tectonics of the Caribbean and middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geological Society of America Bulletin* 80, 1639–1684.
- Niu, F., Baldwin, T., Pavlis, G., Vernon, F., Rendon, H., Bezada, M., Levander, A., 2007. Receiver function study of the crustal structure of the Southeastern Caribbean Plate Boundary and Venezuela. *J. Geophys. Res.* 112, B11308. doi:10.1029/2006JB004802.
- Noguera M., J. E. Wright, F. Urbani & J. Pindell. 2011. U-Pb geochronology of detrital zircons from the Venezuelan passive margin: Implications for an Early Cretaceous proto-Orinoco river system and proto-Caribbean ocean basin paleogeography. *Geologica Acta*, 9 (3-4), 265-272.
- Orihuela Guevara, N., García, A., Tabare, T., 2011. Mapa de anomalías gravimétricas de Venezuela derivado de datos satelitales. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, sometido a arbitraje.
- Pérez, O. J., R. Bilham, R. Bendick, J. R. Velandia, N. Hernandez, C. Moncayo, M. Hoyer, and M. Kozuch, 2001. Velocity field across the southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean/South–American plate motion using GPS geodesy 1994–2000, *Geophys. Res. Lett.*, 28(15), 2987–2990.
- Sánchez, C., F.A., Audemard, C., Padrón, M., Schmitz, C., De Batist, K., De Rycker, K. Heirman, M. Van Daele, H. Bello, en preparación. High resolution seismic evidence for quaternary activity of Pueblo Viejo fault, Maracaibo lake, western Venezuela.
- Sánchez, J., Götze, H.-J., Schmitz, M., 2010. A 3-D lithospheric model of the Caribbean–South American plate boundary. *International Journal of Geophysics*, accepted, doi: 10.1007/s00531-010-0600-8.
- Schubert, C., 1984. Basin formation along Boconó–Morón–El Pilar fault system, Venezuela. *J. Geophys. Res.*, 89, 5711–5718.
- Urbani F. 2010. Las capas de peñones de la Formación Matatere, estado Lara, Venezuela. *Bol. Acad. Cienc. Fis., Mat. y Nat.*, Caracas 70(1): 9-37.
- Urbani F. 2011. Review of terranes, belts and nappes of the Cordillera de la Costa, Northern Venezuela. *Geologica Acta*, aceptado.
- van Daele, M., van Welden, M., Moernaut, J., Beck, C., Audemard, F. A., Sánchez, J., Jouanne, F., Carrillo, E., Malavé, G., Lemus, A. & de Batist, M., 2011. Reconstruction of Late Quaternary sea- and lake-level changes in a tectonically active marginal basin using seismic stratigraphy: the Gulf of Cariaco, NE Venezuela. *Marine Geology* 279: 37-51.
- Viscarret, P., Wright, J., Urbani, F. 2009. New U-Pb ages of El Baúl Massif, Cojedes State, Venezuela. *Rev. Técn. Fac. Ingeniería, Univ. del Zulia*, Maracaibo, 32(3), 210-221.
- Yépez, S., 2011. Medición de deformaciones de la falla El Pilar y su rol en la interacción con los límites de placa Caribe Sudamérica. Tesis de maestría, Universidad Simón Bolívar, 127pp.