

# Aplicación de la Geodesia Espacial en el Estudio de Fallas Activas en Venezuela

## Space Geodesy Applied to the Study of Active Faults in Venezuela

Carlos E. Reinoza, *Investigador, FUNVISIS*, Franck A. Audemard, *Investigador, FUNVISIS*, Gabriela Quintana, *Investigadora, FUNVISIS*, Léa Pousse-Beltrán, *Investigador, USMB-ISTerre*, François Jouanne, *Investigador, USMB-ISTerre*, Ricardo J. López, *Investigador, FUNVISIS*, y Jesús A. Moncada, *Investigador, FUNVISIS*

**Resumen**— Con el propósito de estudiar la cinemática de las fallas generadoras de terremotos en Venezuela, desde el año 2003 se han adelantado estudios que contemplan campañas de medición de datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) en más de 70 puntos distribuidos en el oriente y occidente del país, así como su procesamiento, modelado y análisis. Desde el año 2015 se inició la instalación de estaciones de monitoreo continuo (cGNSS) en el territorio continental e insular venezolano con 8 estaciones, restando aún 7 estaciones por instalar en esta primera fase. Recientemente, se ha incorporado la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) al estudio de las fallas El Pilar y Boconó con resultados satisfactorios. En general, la geodesia espacial ofrece enormes potencialidades relacionadas con el estudio de la geometría de las fallas y bloques geológicos, comportamiento pre, durante y post al evento sísmico, deformación superficial, estudio de eventos transitorios (reptación, sismos lentos), tasas de movimiento horizontal y vertical, etc. El futuro apunta a fortalecer la adquisición, descarga y almacenamiento de datos, procesamiento, así como el intercambio técnico con instituciones nacionales e internacionales. Si bien desde nuestro punto de vista manejamos las implicaciones en los estudios de amenaza sísmica, la capacidad instalada seguramente será puesta al servicio de otras instituciones que manejen, por ejemplo, estudios de subsidencia del suelo asociada con la explotación petrolera, deslizamientos, generación de modelos digitales de elevación (MDE), entre muchos otros.

**Palabras clave**— geodesia espacial, GNSS, DInSAR, deformación, amenaza sísmica.

Este artículo fue enviado al II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial en el mes de agosto de 2017.

C. E. Reinoza es investigador en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela (correo electrónico: creinoza@funvisis.gob.ve).

F. A. Audemard es investigador en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela (correo electrónico: faudemard@funvisis.gob.ve).

G. Quintana es investigadora en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela (correo electrónico: gquintana@funvisis.gob.ve).

**Abstract**— In order to study the kinematics of faults associated with earthquakes in Venezuela, several studies have been carried out since 2003. This effort includes field observations of the Global Navigation Satellite System (GNSS) in more than 70 points in eastern and western country, data processing, modelling, and analysis. From 2015 and 2016, 8 from a 15 total continuous monitoring stations (cGNSS) were installed in the continental and insular territory. Recently, the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) was applied to the study of El Pilar and Bocono faults with satisfactory results. In general, the space geodesy is a powerful tool in order to study the geometry of the geological faults and blocks, application to the pre-, co- and post seismic patterns, surface deformation, transient events, horizontal and vertical slip rates, etc. The idea for the future is to enhance the acquisition, download and storage of geodetic data, processing, as well as, the exchange with local and international institutions. Although our approach is the space geodesy applied to the seismic hazard studies, the knowledge and installed capacity could be applied to subsidence studies in oil fields, landslides, creation of digital elevation models (DEMs), among others.

**Index terms**— space geodesy, GNSS, DInSAR, deformation, seismic hazard.

### I. INTRODUCCIÓN

POR más de 15 años investigadores de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) han incursionado en el uso de diferentes técnicas de la geodesia espacial con el fin de caracterizar la cinemática de las

L. Pousse-Beltrán fue estudiante de doctorado en la Université de Savoie Mont-Blanc, ISTerre, Le Bourget du Lac, Francia. Actualmente, es docente e investigador a tiempo convencional en el ISTerre de la Université Grenoble Alpes (correo electrónico: pousselea@gmail.com).

F. Jouanne es investigador en la Université de Savoie Mont-Blanc, ISTerre, Le Bourget du Lac, Francia (correo electrónico : fjoua@univ-smb.fr).

R. J. López es investigador en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela (correo electrónico: rlopez@funvisis.gob.ve).

J. A. Moncada es investigador en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela (correo electrónico: jmoncada@funvisis.gob.ve).

principales fallas geológicas de Venezuela. Principalmente, en el uso del Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System -GPS), hoy en día ampliado al GNSS [1; 2] y recientemente se han dado los primeros pasos en el uso del DInSAR [3].

En este trabajo presentamos a la comunidad venezolana de tecnología espacial, los principales avances en materia de geodesia espacial por parte de investigadores relacionados con FUNVISIS.

## II. MEDICIONES GNSS EN VENEZUELA

Previo a los estudios realizados por investigadores de FUNVISIS, desde el año 1988 numerosos autores han realizado aportes significativos en materia de la aplicación del GNSS a los estudios de geodinámica local y regional, con el fin de dilucidar la interacción de las placas tectónicas Caribe y Suramérica, así como el movimiento de fallas geológicas venezolanas, entre otros muchos enfoques [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

### A. Mediciones por campaña

A raíz del terremoto de Cariaco ocurrido el 9 de Julio de 1997, el grupo de trabajo alemán para terremotos (German Task Force for Earthquakes -GTFE) fue invitado por FUNVISIS para realizar estudios geofísicos e ingenieriles. Entre los aportes de esta misión, se incluyó la instalación de una pequeña red de receptores GPS de doble frecuencia, con intervalo de muestreo de 30 s, a lo largo de la Falla El Pilar (FEP) con el objetivo de detectar deformaciones postsísmicas. Se consiguió determinar un movimiento lateral-derecho de aproximadamente 10 cm entre el 19 de julio y el 22 de agosto del año 1997 cerca de la terminación este de la zona de ruptura, los resultados igualmente indicaron que las componentes norte- sur y vertical eran considerablemente pequeñas [16]. Sin embargo, la incursión directa por parte de los investigadores de FUNVISIS en el uso de las técnicas de geodesia espacial, se inicia cuando el Dr. Franck Audemard (coautor) celebra reuniones en 1999 con investigadores de instituciones francesas, Universidad de Sophia Antipolis (Niza; Dr. Eric Calais) y de Savoie Mont Blanc (USMB, Chambéry; Dr. François Jouanne – coautor).

De estas reuniones resultó como futura tarea, la instalación de una red geodésica en Venezuela y su posterior medición u ocupación. Para el año 2003, el Dpto. de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS instaló una densa red GNSS cubriendo el oriente venezolano, desde el cratón Precámbrico en el sur (sur del río Orinoco) hasta las islas de Coche, Cubagua y Margarita en el norte. La red consiste de 36 dispositivos de latón plantados en afloramientos estables, lo que representa una nueva configuración que sustituye la metodología tradicional de usar trípodes para montar la antena geodésica (Fig. 1, 2). Además la distribución geográfica de los sitios responde a objetivos específicos como el estudio de la tasa de desplazamiento de fallas individuales, independiente de su potencial sismogénico, y la rotación de bloques tectónicos discretos [17].

Con el fin de mejorar la distribución de la red recién instalada, se consideraron 4 sitios preexistentes (1 de Petróleos de Venezuela, 2 de la Red Geocéntrica Venezolana -REGVEN

y 1 de la campaña CARIVEN 94). A finales de 2003, el equipo conformado por investigadores de FUNVISIS y de la USMB midieron 33 estaciones de las 40 posibles, y a finales de 2005 se medirían 24 sitios de los 40 originales. Recientemente, a comienzos de 2013, se realizó una campaña de recuperación de los sitios en el oriente y una nueva medición de 30 estaciones. Se instaló un nuevo sitio (UVA0) en la Isla de Coche y se recuperaron dos sitios preexistentes (MAN1- HOR1). En las tres campañas de medición (2003, 2005 y 2013) los sitios han sido medidos con receptores doble frecuencia y antenas geodésicas por un periodo de al menos dos sesiones continuas de 24 horas, extendiéndose a 72 h en algunos casos, mientras que la estación AUDO ha sido medida continuamente durante todas las campañas.

Las observaciones en el Oriente venezolano han permitido determinar el campo de velocidades geodésicas para esta región [1, 2]. El modelado de las observaciones GNSS desde 2003 hasta 2013 ha permitido determinar la existencia de una importante componente de desplazamiento asísmico o reptación (creep) en la parte superior de la FEP. Esta conclusión es reforzada con la observación de marcadores (carreteras, alcantarillas, aceras, construcciones, etc.) progresivamente desplazados [18].

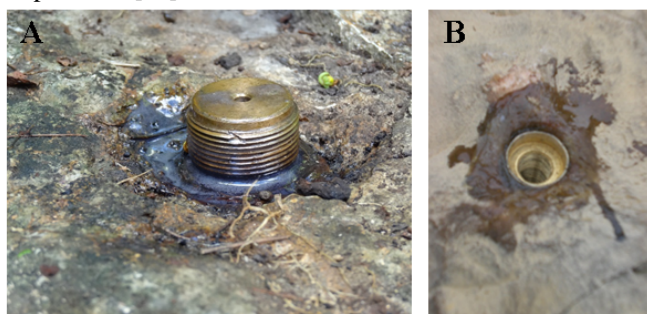


Fig. 1. Dispositivos de latón plantados en afloramientos estables. (A) Modelo de rosca externa y (B) modelo de rosca interna.



Fig. 2. Antena modelo Choke Ring instalada en el vértice MAN1 (Punta Manzanillo, Nueva Esparta). El dispositivo de rosca externa se encontró degradado por vandalismo (se observa ligeramente a la izquierda de la extensión de la antena) y fue sustituido por un modelo de rosca interna.

En los últimos años en FUNVISIS, se han dado importantes pasos para estudiar el occidente venezolano aplicando la técnica



GNSS. Entre 2011, 2013 y recientemente en 2016 se han realizado mediciones en un total de 37 sitios diferentes, de los cuales 21 han sido instalados desde finales de 2011 siguiendo la metodología de dispositivos de latón plantados en los afloramientos rocosos. Las observaciones restantes se complementaron con sitios instalados previamente (Redes PDVSA, Instituto Geográfico Venezolano “Simón Bolívar” - IGVSb y Universidad Simón Bolívar -USB). Específicamente, para finales del año 2011, profesionales de FUNVISIS, PDVSA y el IGVSb midieron 30 sitios y a comienzos del año 2013, 26 fueron reocupados. Los receptores GNSS permanecieron entre 48 y 72 horas continuas con un intervalo de muestreo de 30 s. Entre el 18 enero y 05 de febrero del año 2016, en un trabajo conjunto de FUNVISIS y PDVSA un total de 33 sitios fueron re-ocupados, extendiendo las mediciones a una duración promedio de 120 h (5 días) con el fin de mejorar la precisión de los resultados.

En la Fig. 3 se muestra la distribución de los puntos de medición por campaña en el territorio venezolano.

### B. Mediciones continuas

En tiempos más recientes, los avances tecnológicos han permitido el establecimiento de redes de monitoreo permanente con el fin de obtener una ventana de observación mucho más completa que la permitida por las observaciones esporádicas en campañas de adquisición. Desde inicios del año 2015 y en el marco del proyecto Red de Observación de Operación Continua GPS del Caribe (Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network -COCONet) se han instalado seis estaciones de observación continua GPS y meteorología en el territorio venezolano (El Baúl-CN41, Quebrada Arriba-CN39, Isla de Aves-CN49, Los Roques-CN42, Isla de Margarita-CN44 e Isla La Blanquilla-CN43).

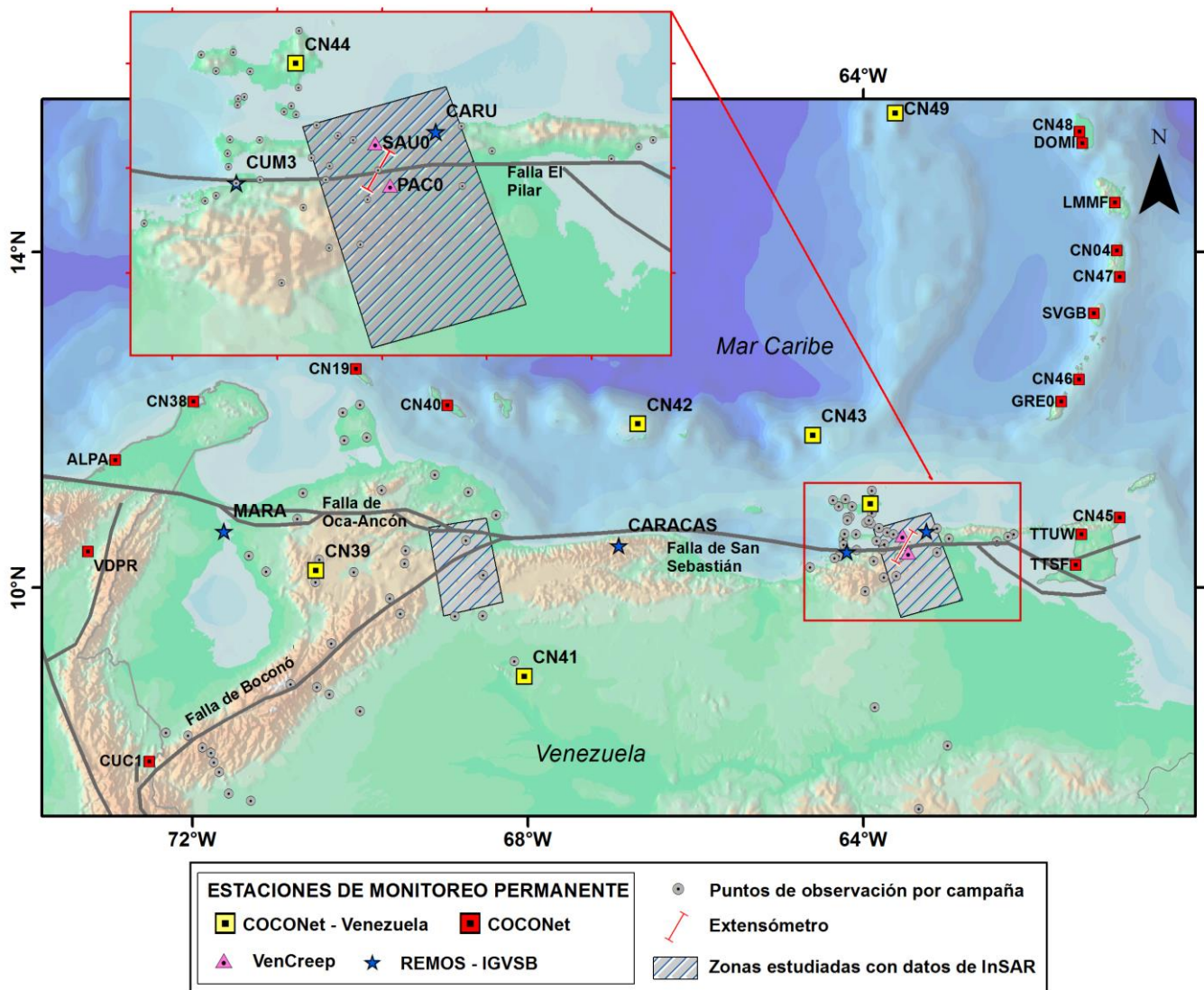


Fig. 3. Distribución de los puntos de observación geodésica en Venezuela. Los recuadros amarillos representan las estaciones COCONet en territorio venezolano. Los recuadros rojos indican el resto de estaciones COCONet localizadas en países vecinos que se pueden observar en el presente mapa. Los triángulos magenta representan las estaciones GNSS permanentes del proyecto VenCreep al norte y sur de la Falla El Pilar, así como la localización de un extensómetro que complementa la instrumentación de este proyecto. Las estrellas azules se corresponden a estaciones de la red REMOS del IGVSb. Adicionalmente, se muestra la distribución de puntos de observación geodésica por campaña en círculos grises y finalmente, se muestran las dos zonas estudiadas con datos de InSAR a través de las fallas de Boconó y El Pilar.

La red COCONet tiene el propósito de desarrollar una infraestructura geodésica y atmosférica de gran escala en el Caribe. Esta red pretende ser la columna vertebral para una amplia gama de investigaciones, así como responder interrogantes relevantes en materia de geoamenazas. Además, en materia de almacenamiento y distribución de datos, el Proyecto COCONet proporcionó apoyo para el desarrollo de “Dataworks” y para tres Centros Regionales de Datos (Regional Data Centers -RDCs) seleccionados a través de un concurso de propuestas. Los datos pueden ser vistos en cualquiera de los tres centros regionales. Sin embargo, los datos actuales de las estaciones COCONet también pueden ser descargados desde la Interfaz de archivos de datos de UNAVCO (coconet.unavco.org).

Como parte del proyecto VenCreep (ANR-Francia) entre FUNVISIS y la USMB, se instalaron otras dos estaciones geodésicas: Saucedo-SAU0 y La Pica Arriba de Catuaro-PAC0, así como un extensómetro a través de la FEP. El objetivo de este arreglo instrumental es determinar si el movimiento de la FEP es constante o por el contrario es el resultado de crisis muy puntuales del fenómeno de reptación. Por un lado, el extensómetro permite realizar una medición directa sobre el segmento de la falla en superficie con una precisión de 0,1 mm. Y por otro lado, gracias al modelado elástico de los datos suministrados por las dos estaciones geodésicas instaladas al norte y sur de la FEP respectivamente, se podrá detectar y cuantificar el desplazamiento en profundidad.

En el marco del proyecto Tsunami FONACIT 2013000361 ya han sido adquiridas siete estaciones permanentes de nueva generación de las 15 previstas, las cuales serán estratégicamente ubicadas para densificar la red existente en el corto plazo. Estas estaciones permitirán mejorar la resolución espacial, de manera de comprender mejor la geodinámica local y regional con implicaciones importantes en el estudio de la amenaza sísmica. La ubicación de las estaciones de monitoreo continuo se muestran en la Fig. 3.

### C. Procesamiento de datos

Desde las primeras mediciones en el Proyecto CASA, varios autores [1, 2, 5, 12, 14] han utilizado el paquete BERNESE de la Universidad de Berna [19, 20, 21], incluidos los parámetros del Servicio GNSS Internacional (International GNSS Service -IGS), a fin de procesar los datos. Otros autores [10, 11, 15] han elegido el programa GYPSY (GYPSY OASIS, GYPSY OASIS II o simplemente GYPSY) desarrollado por el Laboratorio de Propulsión a Reacción (Jet Propulsion Laboratory -JPL) en el Instituto de Tecnología de California (California Technology Institute -CALTECH) con sus archivos de efemérides y relojes satelitales [22, 23, 24, 25]. La mayoría de los autores han referenciado los resultados al ITRF96, ITRF97, ITRF2005 e ITRF 2008 [26, 27, 28]. Recientemente, el sistema de referencia ITRF 2014 ha sido publicado [29], por lo que los nuevos procesamientos de datos desde FUNVISIS serán a futuro encaminados a generar resultados enmarcados en esta solución. Para este nuevo sistema, se incorporaron correcciones por deformaciones postsísmicas (PSD).

### III. APLICACIÓN DE LA INTERFEROMETRÍA RADAR

El DInSAR es una técnica que permite estudiar deformaciones de la superficie en zonas de estudio extensas con muy alta resolución espacial. En Venezuela, recién se comienzan a dar avances en este sentido. Con el propósito de estudiar las variaciones espacio-temporales del movimiento asísmico en la FEP, se realizó el análisis de series de tiempo DInSAR. Se aplicó el método NSBAS (New Small Baseline Subset) a 18 imágenes del Satélite Avanzado de Observación Terrestre (Advanced Land Observing Satellite -ALOS-1) para un periodo de 3,5 años entre 2007 y 2011 [30]. Las observaciones InSAR mostraron un decrecimiento del movimiento asísmico hacia el este a lo largo de la FEP. La tasa de repteo del segmento oeste (Muelle de Cariaco-Cerezal-Oeste de Casanay) alcanza los  $25,3 \pm 9,4$  mm/a en promedio, comparado a  $13,4 \pm 6,9$  mm/a en promedio para el segmento este. Los resultados durante este periodo de tiempo, también permitieron observar cierta variación temporal en el segmento oeste, con ciertas aceleraciones en la tasa de repteo en mm/a. Adicionalmente, a partir de los modelos de distribución del desplazamiento a partir de datos GNSS e InSAR se pudo estimar que entre 2007 y 2011, se liberó un desplazamiento de momento  $8,0-8,5 \times 10^{17}$  N m, el cual se correspondería a un terremoto de Mw ~6,26.

En un trabajo adicional [31], para el segmento noreste de la Falla de Boconó en las cercanías de la ciudad de San Felipe, se aplicó el mismo método NSBAS a 16 imágenes para el periodo 2007-2011. Sin embargo, a diferencia de lo observado en la FEP, se notó la ausencia de un salto de alta-velocidad cruzando la falla Boconó, lo que implica la falta de desplazamiento asísmico durante el periodo de observación. Solo en algunos lugares se observó cierta deformación por subsidencia, posiblemente debido al bombeo de aguas subterráneas. En la Fig. 3 se muestra la ubicación de las zonas estudiadas sobre las fallas de Boconó y El Pilar.

### IV. FUTURO DE LA GEODESIA ESPACIAL EN VENEZUELA

En lo que respecta a la técnica GNSS aplicada a la cinemática de fallas, el trabajo permanente consiste en la densificación de las redes actuales con criterios de estabilidad y durabilidad en el tiempo de los monumentos, así como la seguridad del personal y equipos durante las campañas de medición. El proyecto FONACIT 2013000361, tiene previsto replicar en la parte central del país lo avanzado en el Oriente y Occidente, con el fin de estudiar en detalle la deformación actual, el comportamiento sísmico-asísmico de la falla, posibles asperidades en el plano de la falla, la profundidad de bloqueo relacionado a la reología de la corteza, la segmentación de la falla y la tasa de desplazamiento geodésico a lo largo de la falla, entre otros muchos aspectos. Por otro lado, la conformación de una sólida red cGNSS será uno de los desafíos más importantes para los próximos años. Adicionalmente a las actividades que se vienen realizando, FUNVISIS ha comenzado a colaborar con el IGVS con el fin de fortalecer su Red de Monitoreo Satelital GNSS (REMOS). El futuro de estas redes de observación continuas debe ser multipropósito y de libre acceso (usos en predicción de eventos meteorológicos, planificación urbana,

biología, etc.). Como un ejemplo, desde el año 2015 el Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia, ha comenzado a utilizar las estaciones COCONet, de forma experimental, para el cálculo y ajuste de soluciones semanales para sistemas de referencia regionales [32]. En sintonía con lo expresado anteriormente, desde hace algunos años se ha contemplado la idea de conformar un fondo nacional de equipos GNSS, un conjunto de equipos pertenecientes a instituciones y universidades disponible para realizar campañas de reocupación y ocurrencia de eventos extraordinarios. El más reciente e importante avance en materia de geodesia espacial es la aceptación por parte del FONACIT del proyecto Instalación, Manejo y Aplicación de la Geodesia Espacial a Nivel de Estudios Sismológicos (IMÁGENES). El objetivo principal de esta iniciativa es fortalecer la capacidad instalada en FUNVISIS, desde el punto de vista profesional y de equipamiento, así como promover nuevos aspectos orientados al desarrollo del manejo de la geodesia espacial, con énfasis en el uso de la técnica DInSAR aplicada al estudio de las fallas generadoras de terremotos.

#### REFERENCIAS

- [1] Jouanne, F., F. A. Audemard, C. Beck, A. Van Welden, R. Ollarves, and C. Reinoza (2011), Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary, *Journal of Geodynamics*, 51(5), 398-410, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2010.11.003>.
- [2] Reinoza, C., F. Jouanne, F. A. Audemard, M. Schmitz, and C. Beck (2015), Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 2014JB011483, doi:[10.1002/2014JB011483](https://doi.org/10.1002/2014JB011483).
- [3] Pousse Beltran, L., E. Pathier, F. Jouanne, R. Vassallo, C. Reinoza, F. Audemard, M. P. Doin, and M. Volat (2016), Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11), 2016JB013121, doi:[10.1002/2016JB013121](https://doi.org/10.1002/2016JB013121).
- [4] Drewes, H., C. Reigber, K. Stuber, M. Suarez, H. Tremel, H. Henneberg, M. Hoyer, O. Chourio, and S. Rekkedal (1989), The Venezuelan part of the CASA/UNO GPS Project. *Manuscripta Geodaetica*, 14, 339-344.
- [5] Drewes, H., K. Kaniuth, K. Stuber, H. Tremel, H.G. Kahle, C. Straub, N. Hernandez, M. Hoyer, y E. Wildermann (1995), The CASA'93 GPS Campaign for Crustal Deformation Research along the South Caribbean Plate Boundary. *J. Geodyn.* 20 (2), 129-144.
- [6] Kellogg, J. N., y T.H. Dixon (1990), Central and South America GPS geodesy - CASA Uno. *Geophys. Res. Lett.* 17(3), 195-198, doi:[10.1029/GL017i003.p00195](https://doi.org/10.1029/GL017i003.p00195).
- [7] Bilham, R. (1994). Project CARIVEN: Caribbean/Venezuela relative motion from GPS geodesy. *NFS Proposal and Project*.
- [8] DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1990), Current plate motions, *Geophysical Journal International*, 101(2), 425-478, doi:[10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x).
- [9] DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994), Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions, *Geophys Res Lett*, 21(20), 2191-2194, doi:[10.1029/94gl02118](https://doi.org/10.1029/94gl02118).
- [10] DeMets, C., P. E. Jansma, G. S. Mattioli, T. H. Dixon, F. Farina, R. Bilham, E. Calais, and P. Mann (2000), GPS geodetic constraints on Caribbean-North America Plate Motion, *Geophysical Research Letters*, 27(3), 437-440, doi:[10.1029/1999GL005436](https://doi.org/10.1029/1999GL005436).
- [11] Weber, J. C., T. H. Dixon, C. DeMets, W. B. Ambeh, P. Jansma, G. Mattioli, J. Saleh, G. Sella, R. Bilham, and O. Perez (2001), GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela, *Geology*, 29(1), 75-a-78, doi:[10.1130/0091-7613](https://doi.org/10.1130/0091-7613).
- [12] Perez, O. J., R. Bilham, R. Bendick, J. R. Velandía, N. Hernández, C. Moncayo, M. Hoyer, y 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, doi:[10.1029/2001gl013183](https://doi.org/10.1029/2001gl013183).
- [13] Pérez, O. J., R. Bilham, R. Bendick, N. Hernández, M. Hoyer, J. R. Velandía, C. Moncayo y M. Kozuch (2001), Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela, *Interciencia* 26 (2), 69-74.
- [14] Pérez, O. J., R. Bilham, M. Sequera, L. Molina, P. Gavotti, H. Codallo, C. Moncayo, C., Rodríguez, R. Velandía, M. Guzmán, y P. Molnar (2011), Campo de Velocidades GPS en el Occidente de Venezuela: Componente Lateral Derecha asociada a la Falla de Boconó y Componente Convergente perpendicular a Los Andes. *Interciencia*, Vol. 36, No. 1, 39-44.
- [15] Trenkamp, R., J. N. Kellogg, J. T. Freymueller, and H. P. Mora (2002), Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
- [16] Baumbach, M., H. Grosser, G. Romero Torres, J. L. Rojas Gonzales, M. Sobiesiak, y W. Welle (2004), Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela, *Tectonophysics*, 379(1-4), 1-23.
- [17] Audemard, F.A., Beck, C., Jouanne, F., Reinoza, C. et al. (2013). GPS-derived slip rates of active faults in eastern Venezuela, along the southeastern Caribbean PBZ. *Proceedings AGU Meeting of the Americas*, Cancún, México (resumen).
- [18] Audemard, F. A. (2006), Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela, *Tectonophysics*, 424(1-2), 19-39, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.04.018>.
- [19] Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann, y L. Mervart (1993), Bernese GPS Software version 4.0 Documentation, Astronomical Institute, University of Berne.
- [20] Hugentobler, U., R. Dach, y P. Fridez (2005), Bernese GPS Software. Version 5.0. Astronomical Institute. University of Bern, Switzerland, 388 pp.
- [21] Dach, R. y P. Walser (2013), Bernese GPS Software, Version. 5.2, Astronomical Institute, University of Bern.
- [22] Lichten, S. M., y J.S. Border (1987), Strategies for High-Precision Global Positioning System Orbit Determination. *J. Geophys. Res.* 92(B12), 12,751-12,762, doi:[10.1029/JB092iB12p12751](https://doi.org/10.1029/JB092iB12p12751).



- [23] Blewitt, G. (1989), Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km. *J. Geophys. Res.* 94 (B8), 10187-10283.
- [24] Blewitt, G. (1990), An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 17 (3), 199-202.
- [25] Zumberge, J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.* 102(B3), 5005-5017, doi:10.1029/96JB03860.
- [26] Boucher, C., Altamimi, Z., and P. Sillard (1999), The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF 1997). IERS Technical Note 27, Observatoire de Paris, Paris.
- [27] Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9), B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- [28] Altamimi, Z., L. Métivier, and X. Collilieux (2012), ITRF2008 plate motion model, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7), B07402, doi:10.1029/2011JB008930.
- [29] Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, y X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109-6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- [30] Pousse-Beltran, L., E. Pathier, F. Jouanne, R. Vassallo, C. Reinoza, F. Audemard, M. P. Doin, y M. Volat (2016), Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 8276-8296, doi:10.1002/2016JB013121.
- [31] Pousse-Beltran, L., R. Vassallo, F. Audemard, F. Jouanne, J. Carcaillet, E. Pathier, y M. Volat (2017), Pleistocene slip rates on the Boconó fault along the North Andean Block plate boundary, Venezuela, *Tectonics*, 36, doi:10.1002/2016TC004305.
- [32] Cioce, V., Rincón, M. F., Morales, R., Wildermann, E., Royero, G., Reinoza, C., Audemard, F. A. & L. Sánchez (2015). Una alternativa para el mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela. Simposio SIRGAS 2015, Santo Domingo-República Dominicana. (Resumen extendido).



**Carlos E. Reinoza** nació en Mérida, Venezuela en 1983. Obtuvo su título como Ingeniero Geólogo en el año 2006 en la Universidad de Los Andes, y su título de Doctor Mención: Tierra, Universo y Ambiente en la Universidad Grenoble Alpes (Francia) en 2014.

En la actualidad, trabaja como investigador del Dpto. de Geofísica de FUNVISIS desde 2006 y dicta la cátedra de Cinemática de Fallas en la Universidad Central de Venezuela (UCV) desde 2016. Sus intereses de investigaciones incluyen varios aspectos de la geodesia espacial como mediciones GNSS, instalación de estaciones permanentes, InSAR, etc., así como estudios de deformación superficial, neotectónica, geodinámica, amenaza sísmica y sismología en general.

En 2015 recibió una mención honorífica en los Premios Nacionales de Ciencia, Tecnología e Innovación (PNCTI) como Mejor Trabajo Mención: Ciencias Naturales. En los PNCTI 2016, recibe el premio nacional como Grupo de Investigación Consolidado como miembro del Departamento de Geofísica de FUNVISIS.



**Franck A. Audemard** nació en Cumaná, Venezuela en 1959. Obtuvo su título como Ingeniero Geólogo en la UCV en 1985 y su título de Doctor en Tectónica de la Universidad de Montpellier II (Francia) en 1993.

Actualmente, trabaja como investigador del Dpto. de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS desde 1986 y es profesor de la Escuela de Geología, Geofísica y Minas de la UCV desde 1995. Sus intereses de investigaciones incluyen sismotectónica, sismología, geología de terremotos, paleosismología, neotectónica, sismología histórica, efectos de sitio, geología marina y sísmica costa-afuera, geología del Cuaternario, Geodesia, GPS, Paleo-tsunamis, entre otros. Es editor regional de la publicación *Journal of South American Earth Sciences*, así como miembro de los comité editorial o científico de las siguientes publicaciones: *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, *Geología Colombiana*, *Geología Norandina*, *Earth Sciences Research Journal*, *Geociencias Aplicadas Latinoamericanas (EAGE)* y *Revista Ciencia & Ingeniería Neogranadina*.

El Dr. Audemard es vice-presidente de la Unión Internacional para la Investigación del Cuaternario (International Union for Quaternary Research –INQUA, 2015-2019), Presidente de la Sociedad Venezolana de Geólogos (SVG, 2008-) y miembro del Comité Ejecutivo del Comisión Sismológica para el Latino América y el Caribe (LACSC-IASPEI, 2016-2018). El Dr. Audemard ha sido premiado con varios galardones, entre ellos, la mención honorífica como Investigador de Amplia Trayectoria en el PNCTI 2010. E Igualmente, en la edición de 2015 y 2016, forma parte del equipo que gana la mención honorífica al mejor trabajo en ciencias naturales y grupo consolidado, respectivamente.



**Gabriela Quintana** nacida en Caracas, Venezuela. Obtuvo su título de Licenciada en Geografía en la UCV en 2008. Especialista en Sensores Remotos y GIS en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) en 2009. Especialista en Sistemas de Aplicaciones Terrestres en 2013. Y actualmente cursa la Maestría en Ciencias Geológicas –UCV.

Actualmente es parte del Dpto. de Geofísica de FUNVISIS como investigador desde 2016. Sus intereses de investigación incluyen el estudio de la deformación de la superficie con datos GNSS y DInSAR, detección de cambios coherentes e incoherentes.



**Léa Pousse Beltrán** franco-venezolana nacida en París en 1990. Obtuvo su grado de Magister en Ingeniería en la Escuela Nacional Superior de Geología (Nancy, Francia) en 2013 y su título de Doctor Mención: Tierra, Universo y Ambiente en la Universidad Grenoble Alpes en 2016.

Actualmente se desempeña como docente e investigador a tiempo convencional en el Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) de la Université Grenoble Alpes, dictando los cursos de Teledetección SIG, Introducción a la Geología y Campo. Sus intereses de investigaciones incluyen sismotectónica, InSAR, paleosismología, neotectónica entre otros. A partir de octubre de 2017, comenzará un post doctorado en CEREGE (Aix en Provence, France) para enfocarse en la crisis sísmica de Italia que ocurrió en octubre 2016.



**François Jouanne** nació en París en 1967. Obtuvo el título de Magíster en Ciencias de la Tierra en la Escuela Normal Superior de París en 1990 y realizó su doctorado en la Université de Savoie (1990-1994).

Actualmente se desempeña como profesor universitario e investigador en la Universidad de Savoie Mont-Blanc, además de formar parte del ISTerre. Se ha desempeñado como docente universitario desde 1993. Sus intereses de investigación están consagrados a la comprensión de los mecanismos que actúan sobre la deformación reciente y actual, a escala de cadenas montañosas, fronteras de placa y a diferentes escalas de tiempo, desde la deformación instantánea hasta la deformación cuaternaria.

El Dr. Jouanne ha contribuido activamente a la cooperación franco-venezolana desde el año 2003. En el año 2015, formó parte del equipo que ganó la mención honorífica al mejor trabajo en ciencias naturales en los PNCTI.



**Ricardo J. López** nacido en Maracaibo, Venezuela en 1976. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica en la Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín (Zulia) en 1998. En el año 2013 siguió un curso de entrenamiento de campo para la instalación de estaciones permanentes GPS dictado por UNAVCO (Estados Unidos).

Es parte del Dpto. de Instrumentación Electrónica de FUNVISIS desde 1999. Sus intereses de investigación son la sustentabilidad de estaciones remotas, rendimiento de arreglos solares en sitios remotos, y estabilidad de operatividad de enlaces satelitales con altos rendimientos.



**Jesús A. Moncada** obtuvo su título de Ingeniero Geofísico en 2005 en la UCV. Especialista en Sensores Remotos y GIS en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) en 2009.

Actualmente se desempeña como Coordinador de la Unidad de Geomática de

FUNVISIS.