

GEODESIA Y GEODINÁMICA

GEODESY AND GEODINAMICS

Carlos E. Reinoza

RESUMEN

La geodesia y geodinámica como disciplinas coinciden en Venezuela en el año 1988 gracias al Proyecto CASA UNO, donde más de 25 instituciones en 13 países aplicaron por primera vez la tecnología GPS con propósitos civiles. A partir del año 1994, la Universidad Simón Bolívar e instituciones aliadas incursionan en esta área aportando datos relevantes en la dinámica de las placas Caribe y Suramérica, entre otros muchos aspectos. Con la ocurrencia del terremoto de Cariaco de 1997, el interés de estudiar la cinemática de las fallas venezolanas con geodesia tomó un importante impulso. FUNVISIS desde entonces y hasta la actualidad ha buscado la manera de enfocar la geodesia satelital dentro de las actividades propias de un instituto de investigación sismológico. Camino a las tres décadas de la geodesia aplicada a la geodinámica en Venezuela, existe una red establecida de puntos que han permitido determinar el campo de velocidades geodésicas para el occidente y oriente del país, y recientemente se ha comenzado por implementar una serie de estaciones de observación permanente. Claramente, el futuro de la disciplina apunta a la densificación de las redes actuales y la conformación de la red en el centro del país, la densificación de la red de monitoreo continuo, la puesta en marcha de servicios de descarga de datos que faciliten el intercambio de datos con investigadores nacionales y de países vecinos, así como la conformación de un fondo común de receptores GNSS disponibles para la comunidad científica venezolana.

ABSTRACT

The geodesy and geodynamics as fields of study were applied in Venezuela in 1998 thanks to CASA UNO Project. By first time, 25 institutions of 13 countries applied the GPS technology with civil purposes. Since 1994, a team led by the University Simon Bolivar has participated in this area with significant contributions for the Caribbean and South American plates' knowledge. The study of the kinematics of Venezuelan faults with a geodetic approach has gained momentum since the 1997 Cariaco Earthquake. Since then FUNVISIS has tried to combine the satellite geodesy with the own tasks inside a seismological research institute. After almost three decades of the geodesy applied to Geodynamics in Venezuela, there is an established network of sites that has allowed determinate the geodetic velocity field for the west and east of the country, and the first steps towards the establishment of the cGNSS network have been given. The future of discipline aims to the densification of the current networks, the creation of a new network for the central Venezuela, establishment of new permanent GNSS stations, development of download data services, as well as the conformation of a common pool of GNSS receivers available for the whole research community in Venezuela.

Palabras clave: Cinemática de fallas, GPS; GNSS, Placas Caribe y Suramérica.

Key words: Fault kinematics, GPS, GNSS, Caribbean and South America plates.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones geodésicas precisas con el Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) han permitido

determinar en un muy corto periodo de tiempo: la tasa de movimiento de las placas tectónicas, la dinámica entre los límites de las mismas, la deformación intra-cortical y cortical, así como la cinemática de las fallas geológicas, entre otros muchos aspectos (e.g. Beutler *et al.*, 1987; DeMets *et al.*, 1990; Lisowski *et al.*, 1991). Aun cuando la tectónica activa en Venezuela ha sido

largamente trabajada por diversos autores durante décadas (Stephan *et al.*, 1990; Beltrán, 1993; Audemard *et al.*, 2000), las mediciones GNSS aportan datos precisos que pueden ayudar a esclarecer temas de fuerte debate. La aplicación de la geodesia satelital a la caracterización cinemática de las fallas más importantes en Venezuela, las cuales representan también el borde noreste de la placa Suramérica, está ayudando a resolver ciertos aspectos.

En este trabajo damos una mirada a casi tres décadas de mediciones GNSS en Venezuela, particularmente en la instalación de redes, aspectos metodológicos, procesamiento y análisis de datos, y perspectivas de esta disciplina en el futuro próximo.

MEDICIONES GNSS EN VENEZUELA

Primeros pasos: *Proyecto CASA*

Las primeras mediciones GPS realizadas en el territorio venezolano, comienzan con el proyecto CASA UNO, un acrónimo para Centro-América y Sur-América y uno es español para designar la primera época de mediciones (Fig. 1). Este proyecto fue uno de los primeros esfuerzos civiles en establecer una red GPS (Kellogg y Dixon, 1990). Se inició en 1988 por un grupo aproximado de 30 instituciones de 13 países incluyendo Venezuela. El objetivo principal era monitorear deformaciones geodinámicas en la compleja zona tectónica de los límites de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica. Entre enero y febrero de 1988 fueron medidas cinco estaciones situadas a ambos lados de la Falla de Boconó, en sesiones discontinuas de 6 horas, llevadas a cabo en cuatro sesiones de dos días y dos sesiones de tres días. Los sitios seleccionados se caracterizaban de monumentos de concreto con placas metálicas rodeadas por varios marcadores de referencia. Estas mediciones se realizaron también con el objetivo de unir las redes geodésicas locales (Henneberg, 1983; Henneberg y Schubert, 1986) y conectarse con la red de control gravimétrico instalada a lo largo de la Falla de Boconó (Drewes *et al.*, 1991).

La primera repetición para la mayor parte de la red CASA se realizó en 1991. Sin embargo, las estaciones de Venezuela no se midieron por problemas logísticos relacionados con la Guerra del Golfo Pérsico. La red en Venezuela fue remedida en el año 1993, extendiéndose a 21 estaciones que cruzaban las fallas El Pilar y Boconó con seis perfiles de tres estaciones cada uno, las estaciones remanentes se utilizaron como estaciones de referencia. Estas mediciones se realizaron entre el 15 y 25 de febrero con al menos 3 sesiones de 7 h por día. Adicionalmente, las estaciones de Maracaibo-Mamón y Mérida se midieron durante toda la campaña, así como la estación del Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF, por sus siglas en inglés) en el Observatorio Naval de Estados Unidos en Richmond, Florida (Drewes *et al.*, 1989, 1995; Kellogg y Dixon, 1990).

La comparación de la posición de las primeras cinco estaciones medidas en 1988 y 1993, indicó la tendencia de un movimiento transcurrente dextral caracterizado por un movimiento hacia el este de la placa Caribe, y otro hacia el oeste de la placa Suramericana en un orden de 1 cm/año. Los primeros resultados del Proyecto CASA indicaban que la estación Mérida, situada muy cerca de la Falla de Boconó, era el único sitio que parecía seguir el movimiento de la placa Caribe, lo cual simulaba representar una reducción del movimiento de la placa por deformación local en la falla. A pesar de las pocas estaciones, la poca exactitud debido a la baja densidad de la constelación de satélites y la pobre calidad del GPS para la época, los resultados mostraron datos provisionales para la determinación de movimientos corticales a lo largo de la falla de Boconó (Drewes *et al.* 1995). Si bien Pennington (1981) y otros autores más tarde (e.g. Audemard, 1993; Ego *et al.*, 1993, entre otros) ya habían propuesto un escape del Bloque Nor-Andino, Drewes *et al.*, (1995) no señaló que el bloque de Maracaibo estaba siendo expulsado hacia el NNE a partir de sus vectores. Adicionalmente, la estación de Mérida puede estar reflejando el escape NNE, combinado o acompañado por un proceso cinemático local, el cual suma a la componente este.

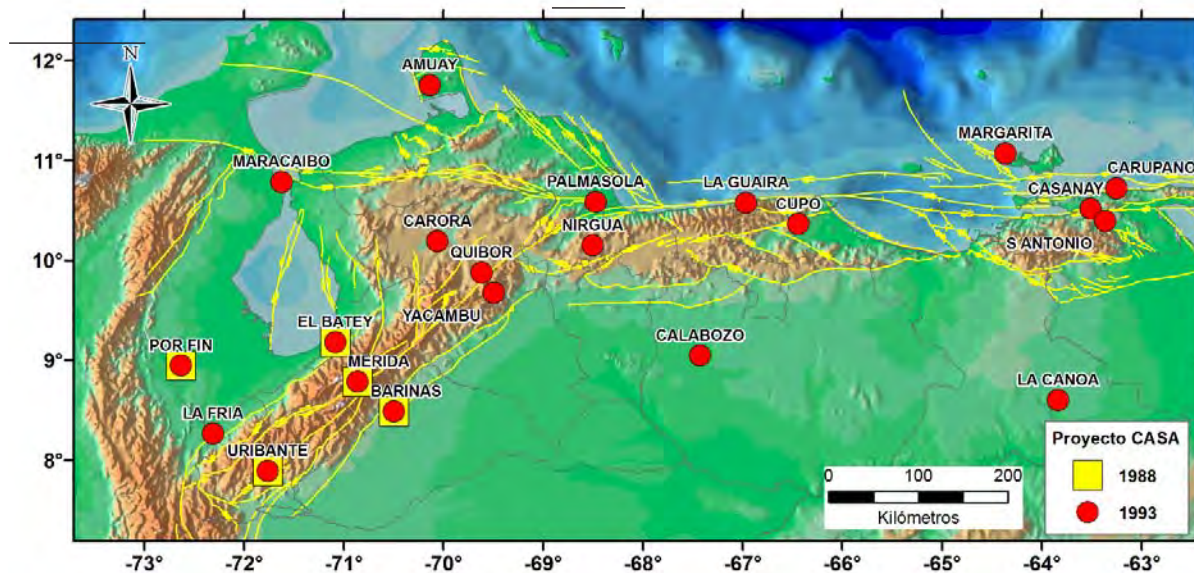


Figura 1. Distribución de las estaciones del Proyecto Casa UNO. Red instalada y medida en 1988 así como los sitios medidos en 1993. (Mapa de Relieve de Garrity *et al.* 2004 y fallas activas de Venezuela a partir de Audemard *et al.* 2000).

Trenkamp *et al.*, (2002), a partir de las mediciones de cuarenta y cuatro estaciones pertenecientes al *Proyecto CASA* desde 1991 hasta 1998, entre ellas cinco realizadas en Venezuela (ELBA, URIB, MERI, BARI, JUNQ), se propusieron estudiar la subducción oblicua en la fosa del Ecuador y escape tectónico de los Andes del Norte hacia el noreste, la acumulación de deformación en la fosa del Ecuador, la colisión activa arco de isla-continente (Panamá-Colombia) y la subducción de la placa Caribe. Sin embargo la mediciones no fueron suficientes para delimitar los diferentes bloques en los Andes del Norte y el bloque de Maracaibo (Mann y Burke, 1984), incluso cuando los resultados fueron consistentes con el movimiento transcurrente sinestral de la falla de Santa Marta-Bucaramanga.

Hacia la consolidación de la disciplina: Contribución del equipo liderado por la Universidad Simón Bolívar

A partir de 1994, un grupo de investigación conformado por instituciones nacionales e internacionales, entre ellas la Universidad Simón Bolívar (USB), la Universidad de Colorado (UC), el

Instituto Geográfico Venezolano “Simón Bolívar” (IGVSB, antigua Dirección de Cartografía Nacional) y la Universidad del Zulia (LUZ), han realizado diversas campañas de medición GPS (Fig. 2). Estas observaciones han permitido estimar la tasa y dirección del desplazamiento de la placa del Caribe con respecto a la sudamericana, así como el rol cinemático que juega el sistema de fallas de Boconó en el acomodo de parte del movimiento relativo entre las placas del Caribe y Suramérica, y además la cuantificación del campo de velocidades en el noroeste de Suramérica y occidente de Venezuela. En mayo de 1994 y marzo de 1998, se realizaron dos campañas conocidas comúnmente como CARIVEN94 y Venezuela 1998 respectivamente (Billham, 1994 www.unavco.org), y seguidamente a estas iniciativas se realizaron mediciones en 1999, 2000, 2004 y 2006.

CARIVEN94 se realizó en 20 sitios con múltiples sesiones de 8 horas distribuidas en tres sesiones de dos y cuatro días, y medidas simultáneamente en de 8 a 10 sitios. En 1998, se remidieron solo siete sitios (ARAY, AVES, CANO, CARU, COCH, JUAN, MARG; (Ver:

Venezuela, 1998 en: Bilham (1994), (www.unavco.org). Sin embargo, en junio de 1999 (CARIVEN99) se midieron once sitios y se completaron 10 más en marzo de 2000. A partir de 1999 hasta 2006, se incrementó el tiempo de medición a sesiones de 12 horas por día durante periodos de cinco días. Durante todas las campañas, se utilizaron re-

ceptores doble frecuencia GPS con intervalos de muestreo de 30 s y antenas montadas sobre trípodes con una máscara de elevación de 15°. Los sitios seleccionados se corresponden a placas metálicas embebidas en monumentos de concreto. Las estaciones Caracas, Maracaibo y Canoa se han usado comúnmente como estaciones

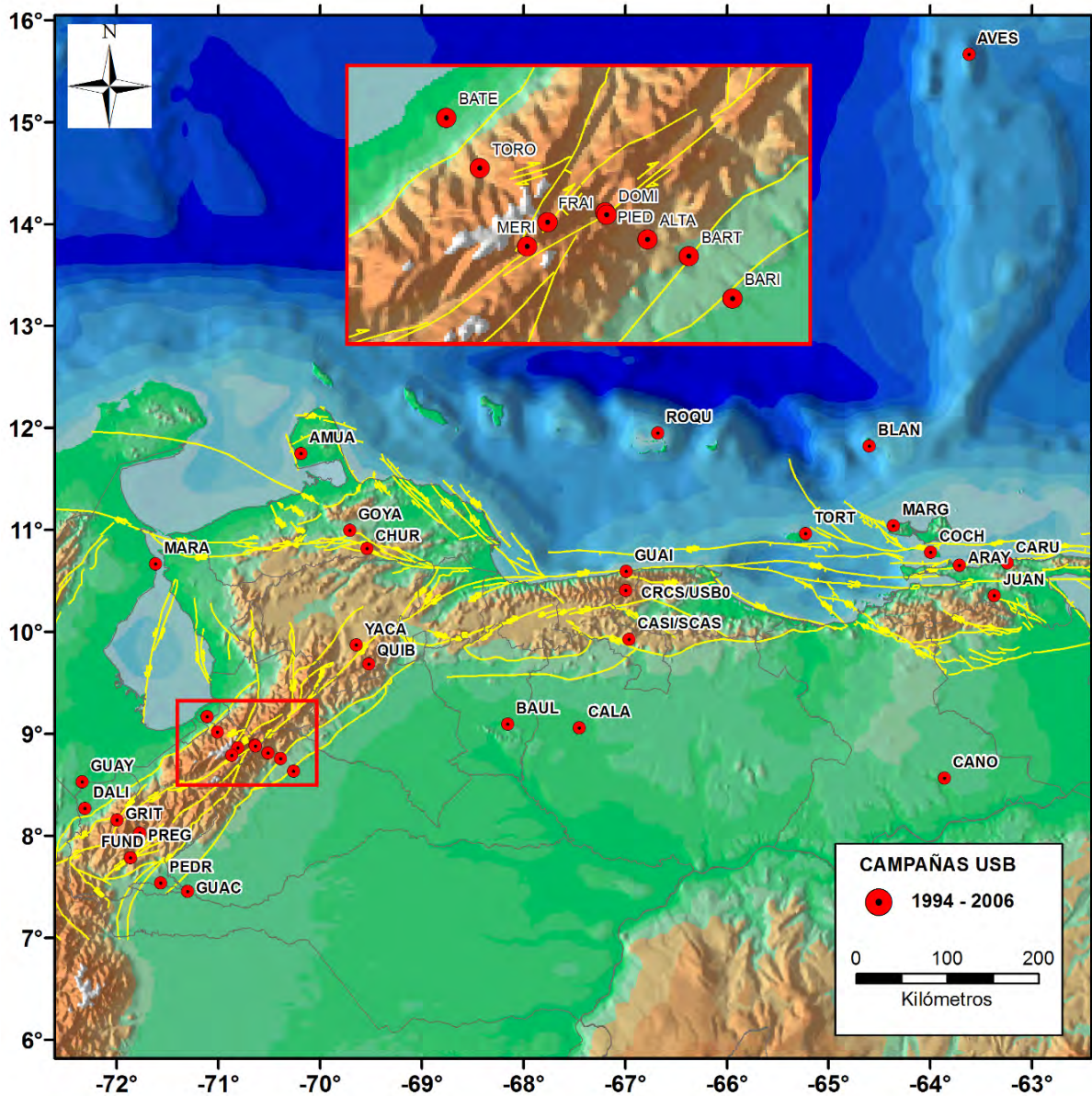


Figura 2. Estaciones observadas por el grupo liderado por la Universidad Simón Bolívar entre 1994 y 2006 (círculos rojos).

de control (Pérez *et al.*, 2001a,b, 2011).

Pérez *et al.*, (2001b), a partir del análisis de las observaciones GPS realizadas entre 1994 y 2000 en 22 sitios en las Antillas Menores y el norte de Suramérica, determinaron que la placa Caribe, a lo largo de su límite sur, se desplaza a una tasa de $20,5 \pm 2$ mm/a con un acimut de $N 84^\circ \pm 2^\circ E$ en $65^\circ W$ relativo a la placa Suramérica. Los resultados de este trabajo indicaron que al este de $68^\circ W$, el campo de velocidades a través del límite de placas Caribe-Suramérica está confinado a una zona de cizalla angosta (<100 km), y el 80% de la deformación en superficie está contenida dentro de una zona de 80 km de ancho centrada a algunos kilómetros al norte de la Falla El Pilar (FEP). Por el contrario, al oeste del $68^\circ W$, el límite de placas se amplía a más de 300 km con cizallamiento dextral compartido entre la Falla de Boconó (con 9-11 mm/a con una convergencia menor de 1 mm/a) y un sistema costa-afuera cerca de la costa norte (2-5 mm de cizalla dextral) sobre el sistema de fallas de La Victoria. Adicionalmente, se estimó el deslizamiento co-sísmico asociado con el terremoto de Cariaco de 1997 utilizando el método de elemento de frontera (King y Nostro, 1999) para estimar los desplazamientos en superficie (Okada, 1985) generados por una compleja dislocación del subsuelo determinadas a partir de modelos sísmicos de ruptura (Mendoza, 2000).

Las mediciones realizadas entre 1994 y 1999 incluían además de la deformación del límite de placas, una componente importante de deformación co-sísmica. La mejor solución se correspondía a un plano de falla segmentado en tres parches con un buzamiento de $N 84^\circ E$. La profundidad de bloqueo se estimó en 14 ± 2 km y el desplazamiento co-sísmico se estimó en 0,94, 1,25 y 1,1 m metros para cada segmento rectangular de oeste a este.

Pérez *et al.*, (2011) reportan nuevos resultados a partir de las mediciones realizadas entre 1999 y 2006. Señalan que los vectores de velocidad de los sitios localizados en la parte más noroeste de Sudamérica, a distancias mayores de

200 km del eje central de los Andes venezolanos, muestran un movimiento hacia el este bastante uniforme de esas regiones con respecto al cratón Suramericano, a una tasa de ~ 15 mm/a. La dirección de este movimiento es oblicua a los Andes venezolanos y a la falla de Boconó, de rumbo aproximado $N50^\circ E$. Esta oblicuidad también se observa en los vectores de velocidad de los sitios localizados a ambos flancos de la Falla de Boconó a lo largo y ancho de los Andes, lo cual de inmediato sugiere que los 20 ± 2 mm/año de desplazamiento relativo (Pérez *et al.*, 2001b, Weber *et al.*, 2001) al este de la placa del Caribe con respecto a la Sudamericana se parten en dos componentes (Pérez *et al.*, 1997; Audemard y Audemard, 2002), por un lado en 12 ± 2 mm/año de movimiento transcurrente lateral derecho confinados en una zona de deformación de ~ 100 km de ancho centrada aproximadamente a lo largo de la traza principal de la Falla de Boconó, la cual repta por debajo de una profundidad de bloqueo de 14 ± 4 km; y por otro lado una componente de convergencia perpendicular a los Andes, la cual se calcula entre los 12 y 16 mm/año. Aproximadamente un tercio de esta convergencia ($4-5$ mm/año) se concentra en las cercanías de la Falla de Boconó y se manifiesta a lo largo de fallas inversas subparalelas a ésta, que buzan hacia la cordillera, localizadas a una distancia de ~ 25 km a ambos flancos de la falla.

DeMets *et al.*, (2000), utilizando las mediciones de la estación AVES (CARIVEN94 y Venezuela 1998) más otras tres ubicadas también en la parte interna de la placa (ROJO, SANA, CROI), promediaron 18-20 mm/a (2σ) en varios lugares a lo largo del límite de placa con una estimación máxima de aproximadamente 4-6 mm/a para la de formación interna de la placa Caribe. En el mismo sentido, Weber *et al.*, (2001) utilizaron datos de siete sitios más sobre la Placa Caribe (incluyendo de nuevo la estación AVES) y cinco sobre la placa Suramericana, para indicar un movimiento hacia el este relativo a la placa Suramericana de ~ 20 mm/a a lo largo del límite de placa, significativamente más rápido que el modelo para la época NUVEL-1A (DeMets *et al.* 1990, 1994); sin embargo, la Placa

Caribe, mantenía una dirección de acimut similar. Desafortunadamente, la estación AVES, medida en 1994 y 1998 y utilizada para estimar el movimiento de la placa Caribe, fue destruida por el Huracán Mitch a finales de 1998 (DeMets *et al.*, 2000).

La visión desde la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas

En 1997, el GTFE (*German Task Force for Earthquakes*), invitado por FUNVISIS, realiza estudios geofísicos e ingenieriles relacionados con el terremoto de Cariaco ocurrido el 9 de Julio de 1997. Entre los diversos estudios que realizó el GTFE, se incluyó la instalación de una pequeña red de receptores GPS doble frecuencia, con intervalo de muestreo a 30 s, a lo largo de la FEP con el objeto de detectar deformaciones post-sísmicas. 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, así mismo indicaron que las componentes norte-sur y vertical eran considerablemente pequeñas (Baumbach *et al.*, 2004). En los años sucesivos el Dr. Franck Audemard decide incursionar directamente en la disciplina y para ello celebra reuniones en 1999 con investigadores de instituciones francesas, de las cuales las universidades francesas de Sophia Antipolis (Niza; Dr. Eric Calais) y de Savoie Mont Blanc (USMB, Chambéry; Dr. François Jouanne), Francia, muestran interés en desarrollar geodesia satelital con fines cinemáticos en Venezuela con las instalación de redes geodésicas. De esta manera, para el año 2003, el Dpto. de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS instala 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 (Fig. 3). 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. Con el fin de mejorar la distribución de la red recién instalada, se

consideraron 4 sitios pre-existentes (1 de PDVSA, 2 REGVEN y 1 CARIVEN 94). A finales de 2003 (29 de noviembre hasta el 14 de diciembre), el equipo conformado por investigadores de FUNVISIS y de la USMB midieron 33 estaciones de las 40 posibles, y a finales 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 recuperaron dos sitios pre-existentes (MAN1-HOR1). En las tres campañas de medición (2003, 2005 y 2013) los sitios han sido medidos con receptores GPS (Recientemente se han utilizado receptores GNSS) doble frecuencia y antenas geodésicas por un periodo de al menos dos sesiones continuas de 24 horas, extendiéndose a 72 horas en algunos casos, mientras que la estación AUD0 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 (Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015). 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 (Audemard, 2006). Reinoza *et al.*, (2015) a partir de los modelos en un semi-espacio elástico simple (Savage y Burford, 1973) y asimétrico (Jolivet *et al.*, 2009) indican una profundidad de bloqueo somero que sugiere reptación de la falla. Los mismos autores, aplicaron un modelo de zona de complacencia (ZC) (Barbot *et al.*, 2008), así como una actualización del modelo de simulación del desplazamiento usando dislocaciones no verticales aplicado por Jouanne *et al.*, (2011) con las campañas de 2003 y 2005, lo cual indicó entre 40% y 50% de desplazamiento bloqueado para los segmentos este y oeste respectivamente entre 12 km y la superficie. La porción oeste del segmento oeste (Cumaná-Casanay) de la FEP se corresponde al segmento afectado por el evento

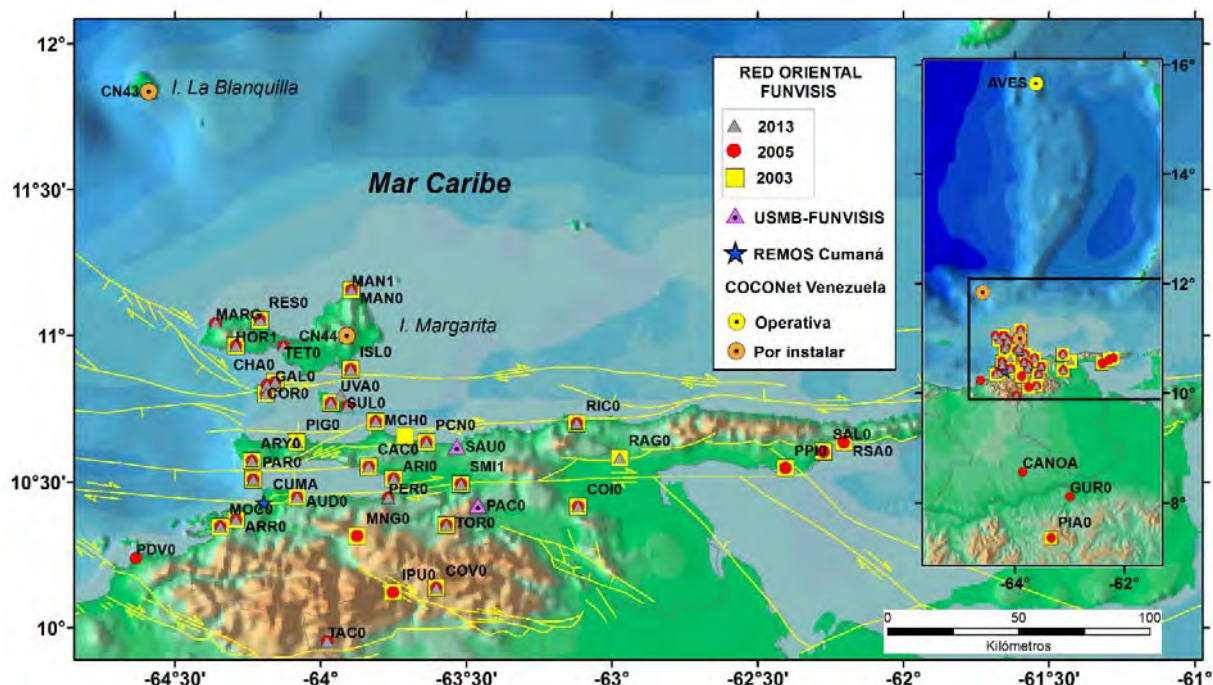


Figura 3. Distribución de estaciones GNSS en el oriente venezolano. Los recuadros amarillos, círculos rojos y círculos grises representan los sitios de medición en los años 2003, 2005 y 2013 respectivamente. Los triángulos magenta representan las estaciones GNSS permanentes del convenio de la USMB y FUNVISIS, la estrella azul se corresponde a la estación cGNSS CUMA de la red REMOS-IGVSB. En círculos amarillos y naranja se observan las estaciones COCONet operativas y por instalar en Venezuela.

de 1929 (Audemard, 2007) y la porción este, está relacionado más al terremoto de Cariaco de 1997 (Audemard, 2006, Jouanne *et al.*, 2011). Adicionalmente, a partir de un modelo complementario considerando la discretización de segmentos en varios parches (Wang *et al.*, 2013), se concluye que el deslizamiento intersísmico no es uniforme. Se destaca una zona con baja tasa de deslizamiento en la zona este de la ciudad de Cumaná, de unos 12 km de ancho y 8 km de profundidad y probablemente relacionada a la zona de ruptura del terremoto de 1929, correspondiéndose entonces con una asperidad a lo largo de la falla. Sin embargo, la reptación total o parcial es presente en ambos segmentos de la FEP. El deslizamiento posterior al evento de 1997 pudiera ayudar a explicar la reptación en el segmento este (Casanay-Paria). Para el segmento oeste, la reptación puede ser explicada de diferentes formas: un efecto post-sísmico del terre-

moto de 1929, después del cual la reptación debe haber continuado hasta disminuir con el tiempo o como una consecuencia de un efecto post-sísmico del terremoto de 1997 que afecta otro segmento de la FEP. Sin embargo, en un estudio reciente Audemard (2011) reveló al menos 13 eventos alrededor de Ms 7,0 (Terremotos moderados) en los pasados 5600 años, lo que representa un periodo de retorno de 430 años, lo cual es significativamente diferente de los 195 años de periodo de retorno estimados en el caso de un bloqueo completo de los 12 km superiores de la FEP (Jouanne *et al.*, 2011). Esta observación soporta la hipótesis de una reptación significativa durante los periodos intersísmicos, y no solo después de un gran terremoto. Como consecuencia, la reptación observada no puede ser observada como el deslizamiento post-sísmico clásico de un gran terremoto. La distribución de la sismicidad en profundidad pudiera sugerir la presencia de

reptación somera en la parte superior, con una transición gradual a una zona sismogénica parcialmente bloqueada entre 1,5 a 12 km, y la existencia de una zona dúctil bajo los 12 km.

En los últimos años en FUNVISIS se ha dirigido la mirada sobre el occidente venezolano (Fig. 4). 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 marcas de bronce plantadas en los afloramientos rocosos, y el resto se complementó con sitios pre-existentes (Redes PDVSA, IGVSB y USB). Para finales del año 2011, FUNVISIS con el apoyo de PDVSA y el IGVSB midió 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). Es importante mencionar que los sitios instalados por FUNVISIS desde 2003, muestran dos nuevos aspectos: a) los “spits” o piezas metálicas están embebidos en los afloramientos rocosos o monumentos de concreto existentes, la distribución geográfica de los sitios responde a objetivos específicos como la tasa de desplazamiento de fallas individuales, independiente de su potencial sismogénico, y la rotación de bloques tectónicos discretos (Audemard *et al.*, 2013).

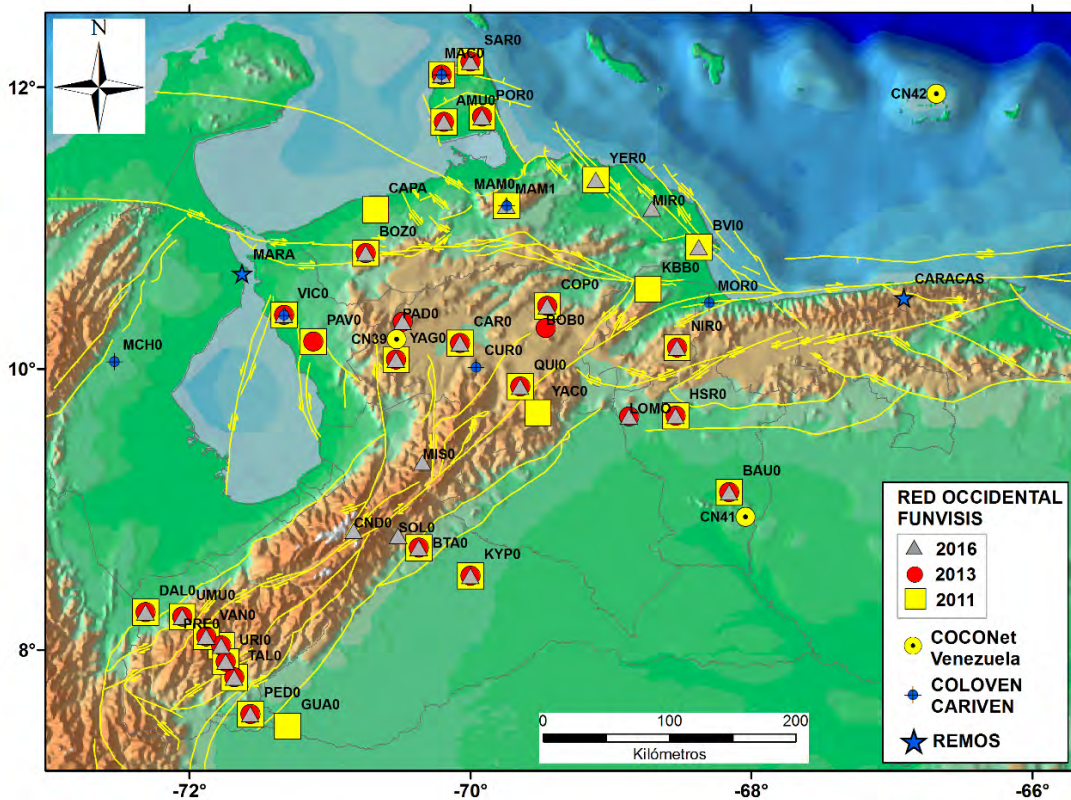


Figura 4. Distribución de las estaciones GNSS en el centro y occidente venezolano. Los recuadros amarillos, círculos rojos y triángulos grises representan los sitios de medición en los años 2011, 2013 y 2016 respectivamente de la red de FUNVISIS. En círculos amarillos se observan las estaciones COCONet ya instaladas en Venezuela (CN39, CN41 y CN42). El círculo azul con una cruz indica la ubicación de las estaciones temporales del proyecto COLOVEN-CARIVEN. Las estrellas azules se corresponden a la estaciones cGNSS MARA y CARACAS de la red REMOS-IGVSB.

Estrategias para el procesamiento de datos

Desde las primeras mediciones en el Proyecto CASA, varios autores (Drewes *et al.*, 1995; Pérez *et al.*, 2001b, 2011; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015) han utilizado el paquete Bernese de la Universidad de Berna (Rothacher *et al.*, 1993; Hugentobler *et al.*, 2005, Dach y Walser, 2013) así como los parámetros del IGS (*International GNSS Service*), a fin de procesar los datos. Otros autores (De Mets *et al.*, 2000; Weber *et al.* 2001; Trenkamp *et al.*, 2002) han elegido el programa GYPSY (GYPSY OASIS, GYPSY OASIS II o simplemente GYPSY) desarrollado por el JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) en CALTECH (*California Technology Institute*) con sus archivos de efemérides y relojes satelitales (Lichten & Border, 1987; Blewitt, 1989, 1990; Zumberge *et al.*, 1997). La mayoría de los autores han referenciado los resultados al ITRF96, ITRF97, ITRF2005 e ITRF 2008 (Boucher *et al.*, 1999; Altamimi *et al.*, 2007; Altamimi *et al.*, 2012), excepto para el proyecto CASA debido a que el ITRF no existía para el momento (DREWES *et al.* 1995).

PERSPECTIVAS-VISION FUTURA

El futuro de la disciplina GNSS aplicada a la cinemática de fallas pasa en primer lugar por la densificación de las redes actuales, considerando criterios de estabilidad geológica, durabilidad en el tiempo de los monumentos y seguridad del personal y equipos durante las campañas de medición. El trabajo avanzado en el Oriente y Occidente del país debe ser replicado en la parte central, lo cual está ya previsto en proyecto FONACIT 2013000361, coordinado por F. Audemard.

Con el fin de estudiar en detalle la deformación actual, el comportamiento sísmico-asísmico de la falla, posibles asperidades en el plano de 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, investigadores de FUNVISIS con la colaboración de la

Universidad de Savoie Mont Blanc, en varias fases de trabajo comprendidas entre junio y noviembre de 2015, instalaron dos receptores cGNSS ubicados en la población de Saucedo (SAU0) y la Pica Arriba de Catuaro (PAC0), al norte y sur de la FEP respectivamente, así como un extensómetro a través de la ruptura del terremoto de 1997 (Sector Las Manosas, Cariaco). Este último instrumental permitirá evidenciar los pulsos o variaciones del repteo a través del tiempo con alta precisión. En el mismo sentido, desde hace unos años el mismo equipo de trabajo ha dado pasos en el análisis de interferogramas radar (Satélite ALOS 1, próximamente ALOS-2). El estudio de 18 imágenes SAR espaciadas entre 2008 y 2011 comienza a dar luces sobre la variación temporal y espacial de repteo en la zona afectada por la FEP.

La conformación de una sólida red cGNSS es uno de los desafíos más importantes para los próximos años. En este sentido, a través del proyecto COCONet (Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network) y con la colaboración de FUNVISIS, como contraparte venezolana, se instalaron durante el año 2015 cuatro estaciones de monitoreo continuo, no solo con potencialidades geodésicas sino meteorológicas (CN39, CN41, CN42 y Aves). En el año 2016, está planteado la instalación de dos estaciones similares: CN44 y CN52 ubicadas en las islas Margarita y Blanquilla respectivamente. En paralelo, FUNVISIS en el marco del proyecto Tsunami (FONACIT 2013000361) cuenta ya con siete equipos cGNSS propios desde fines de 2015, a instalar a lo largo del país en el año 2016. Asimismo, está proyectado la adquisición de 8 estaciones cGNSS más, de los cuales cuatro receptores serían para campañas. Recientemente, FUNVISIS ha comenzado a colaborar con el IGVSb con el fin de fortalecer su Red de Monitoreo Satelital GNSS (REMOS). Es así, como 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 Proce-

samiento 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 (Cioce *et al.* 2015). 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 re-ocupación y ocurrencia de eventos extraordinarios.

En particular con el uso de la geodesia con fines geodinámicos, la densificación de estaciones nos abre una frontera de posibilidades en la resolución de numerosas incertidumbres. Las campañas periódicas y el uso de estaciones cGNSS permiten detectar y medir desplazamientos de tipo co-, inter- y post-sísmicos, así como la deformación de bloques limitados por fallas, el estudio de fallas “menores” pero con igual o mayor poder sismogénico, la concepción de nuevos modelos considerando algoritmos modernos. Todo esto reportaría resultados significativos en términos de amenaza sísmica.

LITERATURA CITADA

- ALTAMIMI, Z., X. COLLILIEUX, J. LEGRAND, B. GARAYTB y C. BOUCHER
2007. ITRF2005: a new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and earth orientation parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, B09401.
- ALTAMIMI, Z., L. MÉTIVIER y X. COLLILIEUX
2012. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7): B07402.
- AUDEMARD, F. A.
1993. *Néotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (Système de failles d'Oca-Ancón)*. Université Montpellier II, PhD Thesis, France, 369 pp + appendix. Reproducido en: *Geos* 40: 78 + 355 p. y 1 mapa en carpeta 49 de DVD, 2010.
2006. Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 424(1-2): 19-39.
2011. Multiple-trench investigations across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela after the 1997 Cariaco earthquake. *Geological Society of America Special Papers*, 479: 133-157.
- AUDEMARD, F. E. y F. A. AUDEMARD
2002. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345, 299-327.
- AUDEMARD, F. A., C. BECK, F. JOUANNE, C. REINOZA, 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)*.
- AUDEMARD, F., C. BECK, J. MOERNAUT, K. DE RYCKER, M. DE BATIST, ET AL
2007. La depresión submarina de Guaracayal, estado Sucre, Venezuela: Una barrera para la propagación de la ruptura cosísmica a lo largo de la falla de el pilar. *Interciencia*, 32: 735-741.
- AUDEMARD, F. A., M. MACHETTE, J. COX, R. HART y, K. HALLER,
2000. *Map of Quaternary Faults of Venezuela. Scale 1:2,000,000. Accompanied by report: Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and Offshore regions*. USGS Open-File Report 00-18,78 p.
- BARBOT, S., Y FIALKO y D. SANDWELL
2008. Effect of a compliant fault zone on the inferred earthquake slip distribution. *J. Geophys. Res.*, 113, B06404, doi: 10.1029/2007JB005256.
- BAUMBACH, M., H. GROSSER, G. ROMERO, J. ROJAS, M. SOBIESIAK y W. WELLE
2004. Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw= 6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 379, 1-23.
- BELTRÁN, C.
1993. *Neotectonic Map of Venezuela, scale 1:2 000 000*, FUNVISIS, Caracas, Venezuela.
- BEUTLER, G., I. BAUERSIMA, W. GURTNER, M. ROTHACHER, T. SCHILDKNECHT, ET AL.
1987. Evaluation of the 1984 Alaska Global Positioning System campaign with the Bernese GPS Software. *J. Geophys. Res.*, 92(B2): 1295-1303.
- BILHAM, R.
1994. Project CARIVEN: Caribbean /Venezuela relative motion from GPS geodesy. *NFS Proposal and Project*.
- 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.

- BLEWITT, G.
1990. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 17 (3): 199-202.
- BOUCHER, C., Z. ALTAMIMI y P. SILLARD
1999. The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF 1997). IERS Technical Note 27, Observatoire de Paris, Paris.
- CIOCE, V., M. F. RINCÓN, R. MORALES, E. WILDERMANN, G. ROYERO, ET AL.
2015. Una alternativa para el mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela. *Simposio SIRGAS 2015, Santo Domingo-República Dominicana*, 18 al 20 de noviembre.
- DACH, R. y P. WALSER
2013, *Bernese GPS Software, Version. 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern.
- DEMETS, C., R. G. GORDON, D. F. ARGUS y S. STEIN
1990. Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101 (2): 425-478.
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.
- DEMETS, C., P. E. JANSMA, G. S. MATTIOLI, T. H. DIXON, F. FARINA, ET AL.
2000. GPS geodetic constraints on Caribbean North America Plate Motion. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (3): 437-440.
- DREWES, H., K. KANIUTH, K. STUBER, H. TREMEL, H. G. KAHLE, ET AL.
1995. The CASA'93 GPS Campaign for Crustal Deformation Research along the South Caribbean Plate Boundary. *J. Geodyn.*, 20 (2): 129-144.
- DREWES, H., C. REIGBER, K. STUBER, M. SUAREZ, H. TREMEL, ET AL.
1989. The Venezuelan part of the CASA/UNO GPS Project. *Manuscripta Geodaetica*, 14: 339-344.
- DREWES, H., W. TORGE, R. H. RODER, C. BADELL, D. BRAVO y O. CHOURIO
1991. Absolute and relative gravimetric surveys of national and geodynamic networks in Venezuela. *J. South Am. Earth Sci.*, 4 (4): 273-286.
- EGO, F., M. SEBRIED, A. LAVENU, H. YEPEZ y A. EGUEZ
1993. A new geodynamical model for the northern Ecuador Andes. EUG VII, 4-8 April 1993, *Terra abstract*, 5(1): 203.
- GARRITY, C., HACKLEY, D., URBANI, F.
2004. *Digital shaded – relief map of Venezuela*. <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1322>.
- HENNEBERG, H. G.
1983. Geodetic control of neotectonics in Venezuela. *Tectonophysics*, 97 (1-4): 1-15.
- HENNEBERG, H. G. y C. SCHUBERT
1986. Geodetic networks along the Caribbean-South-American plate boundary. *Tectonophysics*, 130 (1-4): 77-94.
- HUGENTOBLER, U., R. DACH y P. FRIDEZ
2005. *Bernese GPS Software. Version 5.0*. Astronomical Institute. University of Bern, Switzerland, 388 p.
- JOLIVET, R. R BÜRGMANN y N. HOULIÉ
2009. Geodetic exploration of the elastic properties across and within the northern San Andreas Fault zone, Earth Planet. *Sci. Lett.*, 288:126-131.
- JOUANNE, F., F. AUDEMARD, C. BECK, A. VAN VELDEN, R. OLLARVES y C. REINOZA
2011. Present-day deformation along the El Pilar Fault in Eastern Venezuela: Evidence of creep along a major strike-slip fault. *J. Geodyn.*, 51: 398-410.
- KELLOGG, J. N. y T. H. DIXON
1990. Central and South America GPS geodesy - CASA Uno. *Geophys. Res. Lett.*, 17(3): 195-198.
- KING, G. y C. NOSTRO
1999. *Almond Lite v.2.02: A program to calculate Coulomb stresses around rectangular faults or dykes. Manual d' Utilisation*, Institute de Physique du globe, Paris.
- LISOWSKI, M., J. C. SAVAGE y W. H. PRESCOTT
1991. The velocity field along the San Andreas Fault in central and southern California, *J. Geophys. Res.*, 96: 8369-8389.
- LITCHEN, S. M. y J. S. BORDER
1987. Strategies for High-Precision Global Positioning System Orbit Determination. *J. Geophys. Res.*, 92(B12), 12: 751-762.
- MANN, P. y K. BURKE
1984. Neotectonics of the Caribbean. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 22: 309-362.
- MENDOZA, C.
2000. Rupture history of the 1997 Cariaco, Venezuela, earthquake from teleseismic P waves. *Geophys. Res. Lett.* 27(10): 1555-1158.
- OKADA, Y.
1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75 (4): 1135-1154.
- PENNINGTON, W.
1981. Subduction of the eastern Panama basin and seismotectonics of northwestern South America. *J. Geophys. Res.*, 86 (B11): 10753- 10770.
- PÉREZ, O. J., R. BILHAM, R. BENDICK, N., HERNÁNDEZ, M. HOYER, ET AL.
2001a. 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.

- PÉREZ, O. J., R. BILHAM, R., BENDICK, J. R. VELANDIA, N. HERNANDEZ ET AL.
2001b. 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, 2987–2990.
- PÉREZ, O., R. BILHAM, M. SEQUERA, L. MOLINA, P. GAVOTTI, ET AL.
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*, 36 (1): 39-44.
- PÉREZ, O. J., M. JAIMES Y E. GARCIACARO
1997. Microseismicity evidence for subduction of the Caribbean plate beneath the South-American plate in northwestern Venezuela. *J. Geophys. Res.* 102: 17875-17881.
- REINOZA, C., F. JOUANNE, F. A. AUDEMARD, M. SCHMITZ Y C. BECK
2015. Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3): 2014JB011483.
- ROTHACHER, M., G. BEUTLER, W. GURTNER, E. BROCKMANN Y L. MERVART
1993. *Bernese GPS Software version 4.0 Documentation*, Astronomical Institute, University of Berne.
- SAVAGE, J. C. Y R. O. BURFORD
1973. Geodetic determination of relative plate motion in Central California. *J. Geophys. Res.*, 78:832-845. doi. 10.1029/JB078i005p00832.
- STÉPHAN, J. F., B. MERCIER DE LÉPINAY, E. CALAIS, M. TARDY, C. BECK, ET AL.
1990. Paleo-geodynamic maps of the Caribbean: 14 steps from Lias to Present. *Bull. Société Géologique de France*, 8 (VI): 915–919, 14 appendices.
- TRENKAMP, R., J. N. KELLOGG, J. T. FREYMUELLER Y H. P. MORA
2002. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. South Am. Earth Sci.*, 15 (2): 157-171.
- WANG, R., S. PAROLAI, M. GE, M. JIN, T. R. WALTER Y J. ZSCHAU
2013. The 2011 Mw 9.0, Tohoku earthquake: Comparison of GPS and strong-motion data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103(2B):1336-1347, doi:10.1785/012011o264.
- WEBER, J., T. DIXON, C. DEMETS, W. AMBEH, P. JANSMA, ET AL.
2001. GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates and geologic implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*, 29 (1): 75–78.
- ZUMBERGE, J. F., M. B. HEFLIN, D. C. JEFFERSON, M. M. WATKINS Y 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.