

# Geometría, cinemática, paleoesfuerzos y modelo tectónico del sistema de fallas extensionales que deforma a las calizas Plio-Pleistocenas en el sureste de la República Dominicana

J. García-Senz<sup>(1)</sup>, J. Escuder-Viruete<sup>(1)</sup> y A. Pérez-Estaún<sup>(2)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España, La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid, Spain  
jesus.garcia@igme.es; j.escuder@igme.es

(2) Instituto Ciencias Tierra Jaume Almera-CSIC, Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain  
andres@ija.csic.es

## RESUMEN

Se describe un sistema de fallas extensivas de escala regional orientadas NO-SE, NNO-SSE y ENE-OSO que produce un relieve tectónico en semigrabens en las formaciones arrecifales emergidas Plio-Pleistocenas en el sureste de la República Dominicana. Estas fallas constituyen la continuación de un sistema de fallas previamente reconocido en el oeste de Puerto Rico y el Pasaje de la Mona. El análisis de paleoesfuerzos en las fallas que cortan a la caliza del Plioceno permite establecer un esfuerzo mínimo  $\sigma_3$  subhorizontal de dirección NE-SO, que cambia a SSO en las fallas que cortan a calizas del Pleistoceno, gradando entre una fracturación normal pura a normal direccional. En contraste, la inversión de los mecanismos focales de los terremotos profundos, intermedios y someros proporciona mecanismos inversos, en dirección y más raramente normales. La extensión en la parte alta de la corteza Caribeña está acompañada de movimientos verticales de elevación y subsidencia de la plataforma de coral en el post-Plioceno. Estos movimientos se han modelado como una placa elástica rota flexionada hacia la fosa e integrado en un modelo más general que incorpora extensión por *necking* en la lámina Atlántica que subduce. Sin embargo, la actuación de un único mecanismo flexural difícilmente explica la extensión regional observada. Esta última se atribuye mejor a un proceso de *rifting* difuso dentro del bloque de Puerto Rico-La Española, tal vez causada por la continuidad a baja velocidad del proceso de rotación levógira de Puerto Rico.

Palabras clave: fallas extensionales, análisis de paleoesfuerzos, plataforma de coral, rifting difuso, escape tectónico lateral.

## ***Geometry, kinematics, paleostress analysis and tectonic model of the extensional fault system deforming the Plio-Pleistocene reefal limestone in southeastern Dominican Republic***

### ABSTRACT

*This paper describes a system of extensional faults oriented NW-SE, NNW-SSE and ENE-WSW responsible for the tectonic relief of semi-grabens in southeastern Dominican Republic. These faults constitute the natural extension of a previously recognized fault system in western Puerto Rico and the Mona Passage. Paleostress analysis carried out on the faults and fractures in the Pliocene limestone results in a minimum NE-SW stress axis, changing to SSW in the faults that affect the Pleistocene limestone. In contrast, the inversion of focal mechanisms of deep, intermediate and shallow earthquakes provides a mechanism characteristic of pure thrust, oblique thrust, strike-slip and normal. Extension in the upper part of the Caribbean crust is accompanied by vertical movements of uplift and subsidence that deform the Plio-Pleistocene coral platform. These movements have been modelled as a broken elastic plate flexed to the trench and incorporated in a more general model of necking in the subducted Atlantic slab. Nevertheless, the flexural mechanism alone can hardly explain the regional extension observed, which is better explained as diffuse rifting, maybe due to the continuity at low rate of the counterclockwise rotation of Puerto Rico.*

*Key words: extensional faults, paleostress analysis, coral platform, diffuse rifting, lateral tectonic scape.*

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

Southeastern Hispaniola, Mona Passage, the island of Puerto Rico, and the Virgin Islands form the eastern end of the Great Antilles, the remnant of an intra-oceanic arc formed along the boundary between the Caribbean and North American plates in the Cretaceous-early Eocene (Donnelly, 1989). Between the middle/late Eocene to early Oligocene, convergence between Caribbean and North American plates changed from a northern direction to a more easterly direction as a result of the collision of the arc with the Bahama carbonate platform (Pindell and Barrett, 1990). The current Caribbean plate motion relative to North America is  $19.7 \pm 0.4$  mm/yr towards  $075.6^\circ \pm 0.9^\circ$  (DeMets *et al.*, 2007). The boundary between both plates, known as the Northern Caribbean plate boundary zone (Mann *et al.*, 2002), is dominated by left-lateral motion, collision, and oblique subduction of the North American plate beneath the Caribbean plate.

Neogene and Quaternary rocks located in southeastern Hispaniola allow us to study the recent deformations developed in the Caribbean-North America plate boundary zone. In this zone, regional to meso-scale faults are widely represented. These structures are normal to oblique-normal faults with WNW-ESE mean strike and steep dips, affecting up to Quaternary carbonate deposits of the Haitises and Isabela Formations (Braga *et al.*, 2011). Faults cut the 65-90 m raised coral-reef platform (Pliocene?-Pleistocene) that form the bulk of the Caribbean coastal plain, the 27-30 m reef terrace ( $247.2 \pm 26.3$ - $20.05$  ka, middle Pleistocene), and the 6-7 m reef terrace (~125ka, middle-late Pleistocene boundary). Cumulative fault activity in the 65-90 m reef produced half-grabens with north polarity that controls the tributary water drainage. Their bounding faults attain 10-20 km in length and are segmented with transverse ramps developed at relay areas. The maximum throw calculated from fault scarps is about 75 m. When represented in a length *versus* strike diagram, line scarps oriented in a prominent WNW set and a subordinate ENE set, are in good agreement with field measurements of 540 fractures, which are grouped into WNW, NNE and ENE sets.

Sidescan imagery, seismic profiles, and structural mapping (Mann *et al.*, 2005a; ten Brink *et al.*, 2009; Chaytor and ten Brink, 2010; and this study) indicate that WNW to NW-trending extensional structures are developed in Eastern Hispaniola, the Mona Passage and Western Puerto Rico areas.

The interpreted section of the MCS-55 seismic reflection profile (Chaytor and ten Brink, 2010) shows the western continuation off-shore of the Desecheo Ridge fault in western Puerto Rico. In this profile, high-angle extensional faults cut late Oligocene-Pliocene carbonate platform deposits and syn-tectonic recent sediments filling half-grabens. The interpreted section of the VB1NA seismic reflection profile across the Caribbean arc complex at  $19^\circ$  N latitude (Larue and Ryan, 1998), also shows late Oligocene-Pliocene carbonate platform deposits deformed off-shore by WNW-trending, high-angle normal faults. A regional structural cross section through Eastern Hispaniola also illustrates similar lithostratigraphic units deformed on-land by WNW/NW-trending high-angle normal faults. Therefore, these faults can be regionally correlated from the eastern Dominican Republic to western Puerto Rico.

In the studied area, the paleostress analyses of tensional and hybrid fractures that affect the lower reef terraces indicate a NE-SW trend of subhorizontal extension. In the 65-90 m reef platform, the fault analysis establishes a stress ellipsoid characterized by a near-subvertical 1 axis and a near-subhorizontal SSW to SW-trending  $\sigma_3$  axis. The resulting type of brittle deformation in the Pleistocene ranges from (near) pure normal to normal strike-slip faulting. In contrast, focal mechanisms solutions of earthquakes are characteristic of reverse, reverse oblique and strike-slip faulting, though shallow normal mechanisms also occur. Inversion gives a disperse orientation of the compressional and tensional axes, being the NNE-SSW direction the most probable orientation of P, with T vertical. These results suggest that a compressional to reverse strike-slip type of deformation affects the deep lithosphere of southeastern Hispaniola. Therefore, the studied system of extensional faults is active and differs from the transpressive structures present in western, central and northern Hispaniola.

This scenery is however more complex because the extensional faulting is coeval with arching of the Caribbean arc at a crustal scale, as evidenced by the rapid sinking of the coral platform towards the Puerto Rico and los Muertos trenches (Birch, 1986, Masson and Scanlon, 1991, Larue and Ryan, 1998, van Gestel *et al.*, 1998, Mann *et al.*, 2005b, Mondziel *et al.*, 2010). Following the work of Birch (1986), the flexure of the arc-crust landward of the Puerto Rico trench has been modelled as an elastic broken plate and compared with the observed topography in two profiles with good results. A tectonic model that integrates all the above mentioned observations is thus proposed. The model speculates about the existence of a necking zone in the subducted Atlantic crust due to the opposing buoyancy (similar model as Sacks and Secor, 1990) that controls the inclination of the Atlantic slab, and the dynamic topography of the overriding Caribbean arc-crust.

However, the flexural mechanism cannot explain the N-S normal faults in the Mona Passage. Evidence of an active rifting process is the west-east opening of the Yuma and Mona canyons, which has been related to the Puerto Rico movement northeasterly away from Hispaniola at a rate of approximately  $5 \pm 3$  mm/yr (Jansma and Mattioli, 2005). It is important to stress that this strongly localized extension differs from the diffuse exten-

sional WNW-ESE to NW-SE fault system studied here, which is more possibly related to the rotation of Puerto Rico compared to Hispaniola island.

In conclusion, the geological mapping and structural analyses of fault zones suggest that two distinct stress regimes have controlled tectonism in the south-eastern Dominican Republic since, at least, the Late Pliocene. The development of these high-angle WNW-ESE normal faults indicates that extension affects the upper part of the Caribbean arc crust. Historical description of destructive earthquakes, field evidence of seismites in the Late Pleistocene reef terraces, and the almost daily seismic activity are indicative of a seismic risk still not yet assessed in the south-eastern Dominican Republic.

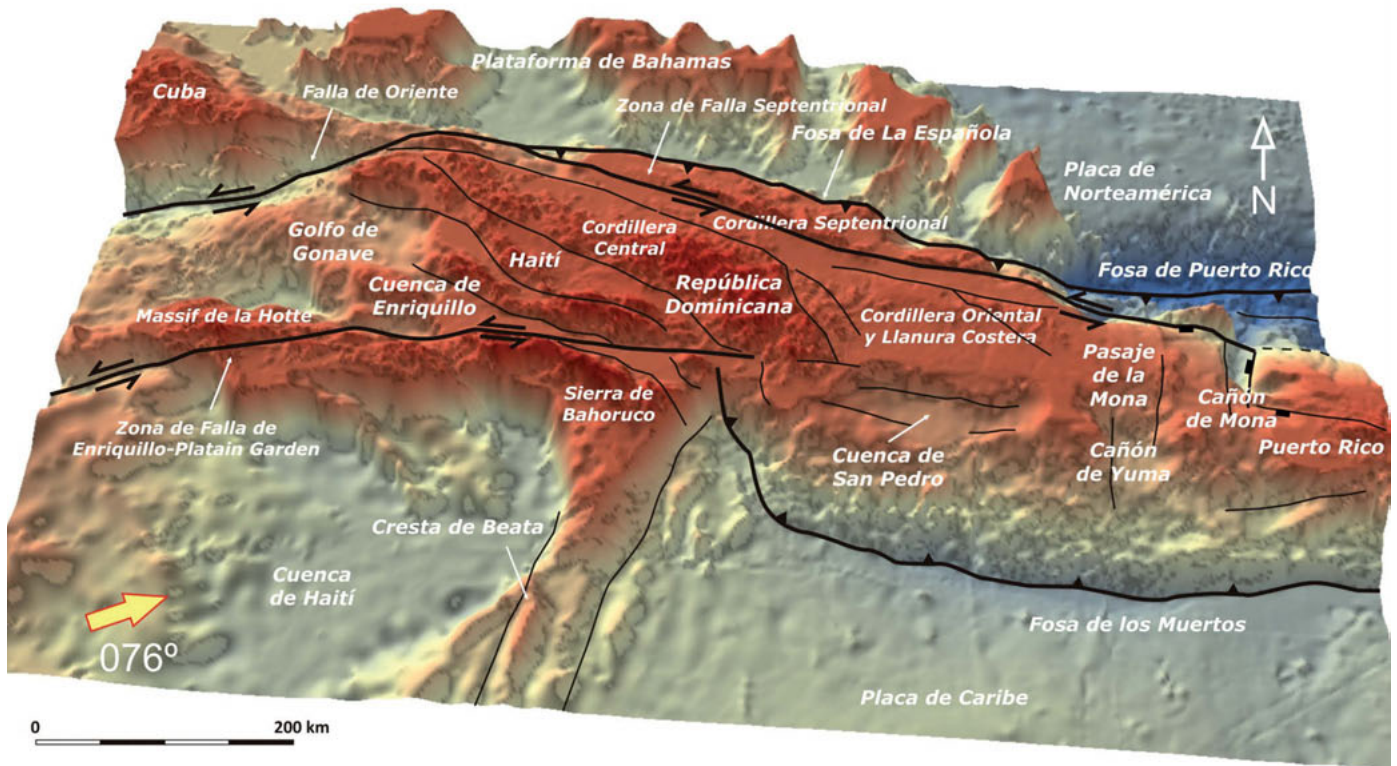
## Introducción

El terremoto del 12 de Enero de 2010 en Haití, de  $M_w=7.0$ , supuso un dramático recordatorio de la amenaza sísmica que afecta al límite entre las placas Caribeña y Norteamericana en proceso de subducción y colisión oblicua. En esta zona de límite continúa desarrollándose una compleja banda de deformación con fallas de desgarre, cabalgamientos y fallas extensivas que acomodan el movimiento de bloques de pequeña a gran escala (Fig. 1). Esta complejidad es la causa de que, a pesar del esfuerzo de investigación realizado en los últimos 50 años, existan todavía incógnitas en la interpretación de la geología regional y sus relaciones con los procesos tectónicos activos. Durante la realización del Proyecto SYSMIN-II en 2010 en el sector sureste de la República Dominicana, que es una de las áreas de mayor y más rápido desarrollo económico del país, se cartografió un sistema de fallas y escarpes de falla que afecta a los depósitos de coral Plio-Pleistocenos, e incluso a los más recientes corales del Holoceno. La gran anchura de la zona fallada: 71 km de costa a costa y el patrón en planta de las fallas individuales con terminaciones, relevos y rampas transversas, recuerda más que a áreas deformadas por una tectónica de fallas en dirección, a las típicas provincias extensionales (ej., la zona de Taupo en Nueva Zelanda, Nicol *et al.*, 2010). Por otra parte, la interpretación de las líneas sísmicas en el Pasaje de la Mona -el área sumergida situada entre La Española y Puerto Rico- ya había revelado la existencia de sistemas de fallas de decenas de kilómetros de longitud y con un movimiento vertical normal (Mason and Scanlon, 1991; Larue and Ryan, 1998; van Gestel *et al.*, 1998, 1999; Mondziel *et al.*, 2010), de características similares a los del sureste de República Dominicana. También las medidas de paleoesfuerzos en el oeste y sur de Puerto Rico indicaban la existencia de una neotectónica extensional (Mann *et al.* 2005a, b; Hippolyte *et al.* 2005; Laó-Dávila and Anderson, 2009).

Con el objetivo de caracterizar cinemáticamente el sistema de fallas se realizó una campaña de mediciones microestructurales en el sureste de la República

Dominicana en el marco del Proyecto ARCO durante 2012, corroborándose por primera vez que se trata de fallas extensionales (García-Senz *et al.*, 2012). Sin embargo, la deformación extensional normalmente ocurre en las regiones de antearco y de trasarco de la zona de subducción (Uyeda and Kanamori, 1979), así como en la placa que subduce inducida por la flexión, pero no es habitual en la región de intra-arco por lo que no quedaban claros los procesos tectónicos que han generado estas estructuras. Una información adicional la proporcionan los numerosos terremotos que afectan el este de la República Dominicana, el Pasaje de la Mona y el oeste de Puerto Rico, con eventos profundos e intermedios relacionados con la subducción de la placas Norteamericana y Caribeña, y eventos someros asociados a la interfaz de subducción y a las grandes fallas de desgarre, como es el caso de la Falla Septentrional (Dolan *et al.*, 1998). Los terremotos intraplaca de baja magnitud abundan particularmente en el Pasaje de la Mona, que excepcionalmente ha registrado terremotos históricos destructivos y tsunamis, (síntesis en ten Brink *et al.*, 2011). Debido a que el sector sureste de la República Dominicana posee unas características tectónicas similares al Pasaje de la Mona, con estructuras individuales de al menos 50 km de longitud, existe la posibilidad de que el sistema de que se puedan generar terremotos con magnitudes del orden de  $M_w=6.5-7$ .

En este trabajo se presentan los primeros datos obtenidos sobre la geometría y cinemática del sistema de fallas que afecta el sureste de la República Dominicana. Estos datos se integran con la sismicidad regional tomada del catálogo CMT: (<http://www.globalcmt.org/> Ekström *et al.*, 2012), así como con perfiles topográficos realizados a partir de las mallas de la SRTM (<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/> Farr *et al.*, 2007), perfiles batimétricos (datos del GEBCO <http://www.gebco.net/> IOC, IHO and BODC, 2003) y secciones sísmicas procedentes de bases de datos accesibles a la academia y al público en general (<http://www.ig.utexas.edu/sdc/>), con el fin de determinar el régimen de esfuerzos y el contexto geotectónico capaces de generar un sistema de fallas extensionales en una región de intra-arco. Los resul-



**Figura 1.** Bloque 3-D del borde septentrional de la placa Caribeña, incluyendo la Isla de La Española (República Dominicana y Haití), el Pasaje de la Mona, y el occidente de Puerto Rico, mostrando las principales fallas inversas, de desgarre y extensivas del límite de placas, así como la nomenclatura de las principales rasgos estructurales. El vector de convergencia de placas (flecha sólida amarilla) es de DeMets et al. (2007).

**Figure 1.** (a) 3-D block of the northern boundary of the Caribbean plate, including Hispaniola Island (Dominican Republic and Haiti), Mona Passage and western Puerto Rico, showing the main plate boundary thrust, strike-slip and normal faults and the nomenclature of the major structural features. The Caribbean and North America plate convergence vector (solid yellow arrow) is from DeMets et al. (2007).

tados son integrados en un modelo tectónico de gran escala, que posee implicaciones para la amenaza sísmica y de tsunamis en el sureste de la República Dominicana.

### Marco geológico y tectónico

La Isla de La Española (República Dominicana y Haití), el Pasaje de la Mona, la Isla de Puerto Rico y las Islas Vírgenes forman la terminación oriental de las Antillas Mayores (Fig. 1). Las Antillas Mayores constituyen los restos de un arco-isla intra-oceánico edificado sobre la placa Caribeña durante el intervalo Cretácico-Eoceno inferior, hasta el cese de su actividad por colisión con el margen meridional de la placa de Norteamérica (Mann et al., 1991; Pérez-Estaún, 2002). Como consecuencia de la colisión arco-continente, el movimiento relativo entre las placas Caribeña y Norteamericana cambia desde el Eoceno medio/superior hasta el Oligoceno inferior, desde una dirección aproximada-

mente N-S a una dirección con componente este (Pindell and Barrett, 1990). Actualmente, el movimiento es de  $19.7 \pm 0.4$  mm/año hacia la dirección  $075.6 \pm 0.9^\circ$ , según el modelo de placas basado en medidas de GPS (DeMets et al., 2007).

La Fig. 1 muestra también las principales zonas de falla y límites de placa en La Española, el Pasaje de la Mona y el sector occidental de la Isla de Puerto Rico. Al norte de este conjunto, la placa de Norteamérica subduce a lo largo de la Fosa de Puerto Rico y la Fosa de La Española. Los vectores de velocidad de las placas obtenidos a partir de GPS a lo largo de este borde convergente son consistentes con una transición desde la transtensión en la esquina noroeste de la placa (Fosa de Caimán), a la colisión oblicua de la placa Caribeña en la región de La Española y la subducción oblicua en la región de Puerto Rico y las Islas Vírgenes (Mann et al., 2002). Al sur, la Cresta de Beata colisiona con el sector suroccidental de La Española y la corteza oceánica del Mar Caribe se subduce en la Fosa de los Muertos.

La geología del sector sureste de la República Dominicana (Fig. 2b) se compone esencialmente de rocas ígneas y sedimentarias de edad Cretácico-Paleógeno del arco-isla Caribeño aflorantes en la Cordillera Oriental (García-Senz *et al.*, 2007) y de carbonatos arrecifales Plio-Pleistocenos de la Llanura Costera del Caribe que bordean la Cordillera Oriental (Braga *et al.*, 2010; Díaz de Neira *et al.*, este volumen). Las principales unidades litoestratigráficas en el sector sureste son la Formación Yanigua del Plioceno inferior (Zancliense)-Pleistoceno inferior (Braga *et al.*, 2010), la Fm Haitises del Plioceno-Pleistoceno inferior, la terraza levantada superior de la Fm Isabela atribuida al Pleistoceno medio, la terraza levantada inferior de la Fm Isabela atribuida al Pleistoceno superior, y los depósitos arenosos costeros del Pleistoceno superior. La descripción detallada de estas unidades puede encontrarse en Braga *et al.* (2010) y Díaz de Neira *et al.* (este volumen).

### **Deformación reciente en el sureste de la República Dominicana**

La plataforma arrecifal coralina levantada a unos 65-90 m (Plioceno?-Pleistoceno) que constituye la parte principal de la llanura costera caribeña y las terrazas arrecifales que bordean la costa a alturas de 27-30 m (247.2+26.3-20.05 ka, Pleistoceno medio) y de 6-7 m (~125 ka, límite Pleistoceno medio-superior), están deformadas por un sistema de fallas de media y gran escala de orientación dominante NO-SE a ONO-ESE y, en menor medida, por fallas oblicuas NNO-SSE y ENE-OSO. Este sistema de fallas ha generado un paisaje tectónico bien preservado de escarpes de falla y bloques basculados (Fig. 2a). Las fallas más importantes de polaridad norte forman estructuras en semi-graben que desnivelan sistemáticamente a un largo flanco de inclinación SO. El relieve estructural producido por las fallas disminuye de forma paralela a la dirección de los bloques basculados, indicando que el desplazamiento de las fallas disminuye hacia el oeste.

Las fallas más importantes son las denominadas 3, 4, 5 y 7 en el mapa y en el corte geológico de las Figs. 2b y 3a. El área entre la Isla Saona y la falla 3 es un bloque largo con un perfil cóncavo interrumpido por la falla 3 de unos 84 m de escarpe, que defleca hacia el este la trayectoria del río Yuma (nombre local del río Duey en su zona de desembocadura). El bloque entre las fallas 3 y 4 muestra en contraste un perfil convexo con una cresta anticlinal adyacente a la falla 4. Esta cresta se interpreta debida al arrastre de la cizalla actuando en el bloque inferior de la falla extensiva, un estilo de deformación que también se ha

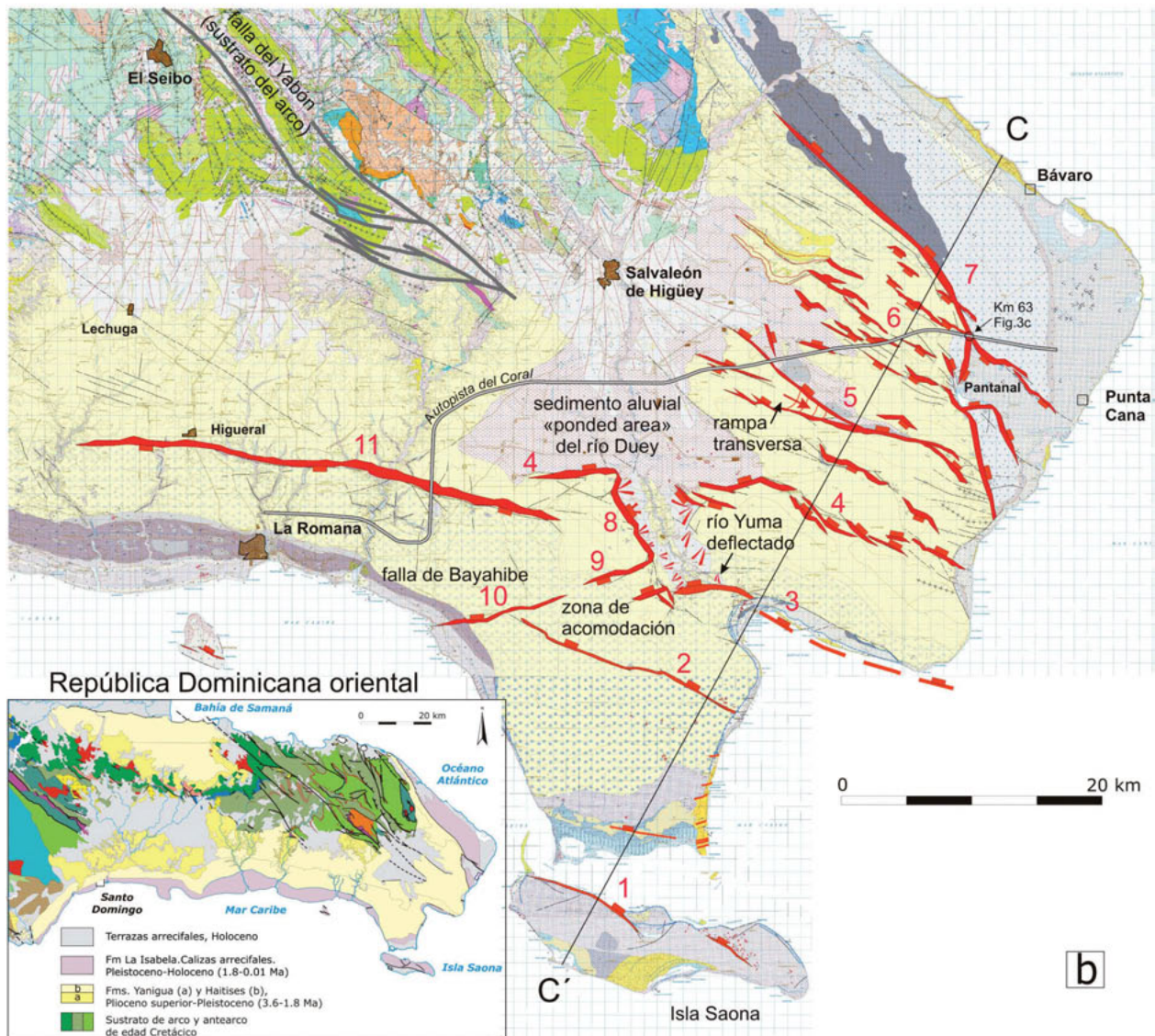
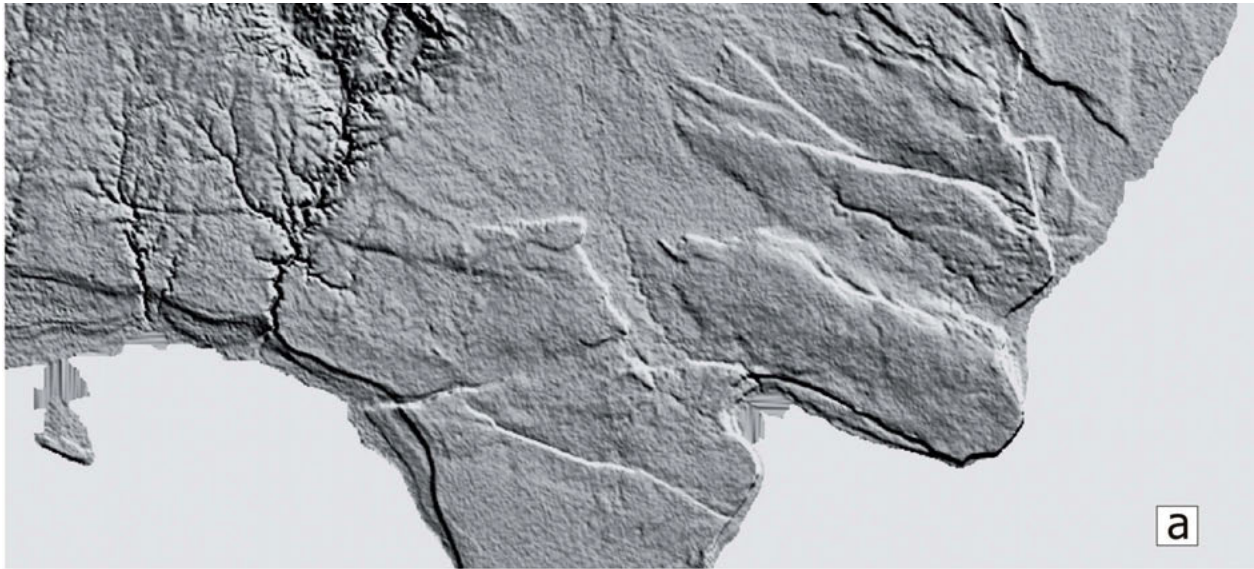
observado en los cortes del talud de la autovía del Coral (Fig. 3c). La falla 4 se compone de numerosos segmentos oblicuos escalonados de forma sinistral. La falla 5 forma un escarpe único de unos 75 m que se bifurca hacia el NO en dos fallas en 'Y' inclinadas en la misma dirección separadas por una rampa transversa de relevo. El conjunto de pequeñas fallas 6 es antitético a las fallas principales definiendo una amplia zona de graben. Finalmente, la falla más septentrional 7 con unos 48m de escarpe limita en su bloque hundido una extensa llanura costera que expone playas, arrecifes y dunas levantadas.

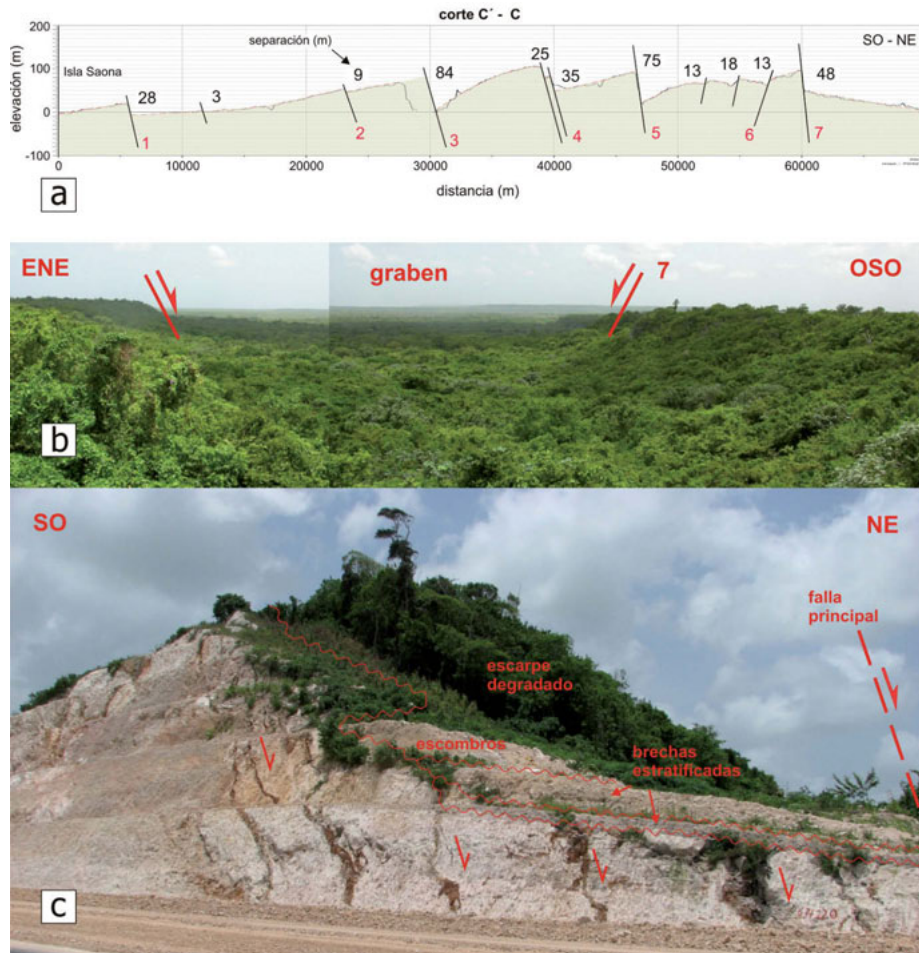
Al oeste del corte transverso C'-C, el valle del río Duey cruza una extensa llanura aluvial de naturaleza arcillosa a microconglomerática, interpretada como un área estancada relictas represada por la falla 4 (*ponded area*; de la Fig. 2b), cuyo escarpe está actualmente erosionado por el río Duey. Aguas abajo de la falla 4, el cauce del Duey discurre paralelo al escarpe de la falla 8 orientado a 330°, que conecta en ángulo recto con la falla 9, relevada lateralmente por la falla 10 de polaridad opuesta (falla de Bayahibe). La falla más occidental del sistema extensivo es la falla 11 paralela a la costa sur de la llanura costera, que queda evidenciada en el relieve por el cambio de pendiente que ocasiona, aunque su escarpe de falla se halla totalmente degradado.

La presencia de zonas de debilidad en el sustrato del arco parece controlar la posición y la orientación de las fallas extensivas principales que son paralelas a las fallas de la Cordillera Oriental que afectan a las rocas cretácicas (Fig. 2b). En especial puede haberse reactivado en extensión la falla del Yabón y algunas de las estructuras contractivas eocenas que involucran serpentinitas. Una situación similar es sugerida por Grindlay *et al.* (2005) para las fallas en el Pasaje de la Mona y por Laó-Dávila y Anderson (2009) para las fallas formadas en la última etapa extensiva (Mioceno-Plioceno) en el oeste de Puerto Rico.

### **Análisis de paleoesfuerzos de las estructuras frágiles recientes**

La dirección de los escarpes morfológicos de las fallas es consistente con las medidas de 540 fracturas en afloramientos a la meso-escala, para las que se obtienen las familias ONO-ESE, NNE-SSO y ENE-OSO (Figs. 4, 5a y 5b). Sin embargo, estas orientaciones pueden ser perpendiculares, oblicuas o paralelas a la dirección de extensión, que debe precisarse mediante un estudio cinemático. El análisis de paleoesfuerzos de las estructuras frágiles de media y pequeña escala permite establecer la dirección de los ejes prin-





**Figura 3.** (a) Perfil topográfico que ilustra la separación normal del techo de la plataforma coralina del Plio-Pleistoceno, definida por los escarpes de las fallas, y el estilo de extensión en semigrabens. La elevación de las crestas del bloque superior a casi 100 m indica, ya sea que la superficie inicial estaba sobre el nivel del mar antes de la rotación de los bloques, o que los bloques rotados se han elevado. La escala vertical está muy exagerada (X52). (b) Vista panorámica hacia el SE (hacia Pantanal) de un graben de escala kilométrica limitado por fallas normales NO-SE a ONO-ESE de alto ángulo. (c) Escarpe de falla degradado en la caliza arrecifal del Plio-Pleistoceno. Su bloque inferior está cortado por fallas menores NO-SE a NNO-SSE, subparalelas, sintéticas a la principal y buzando hacia el NO con un ángulo medio a alto. Talud en el Km 63 de la Autopista del Coral (ver situación en la figura 2).

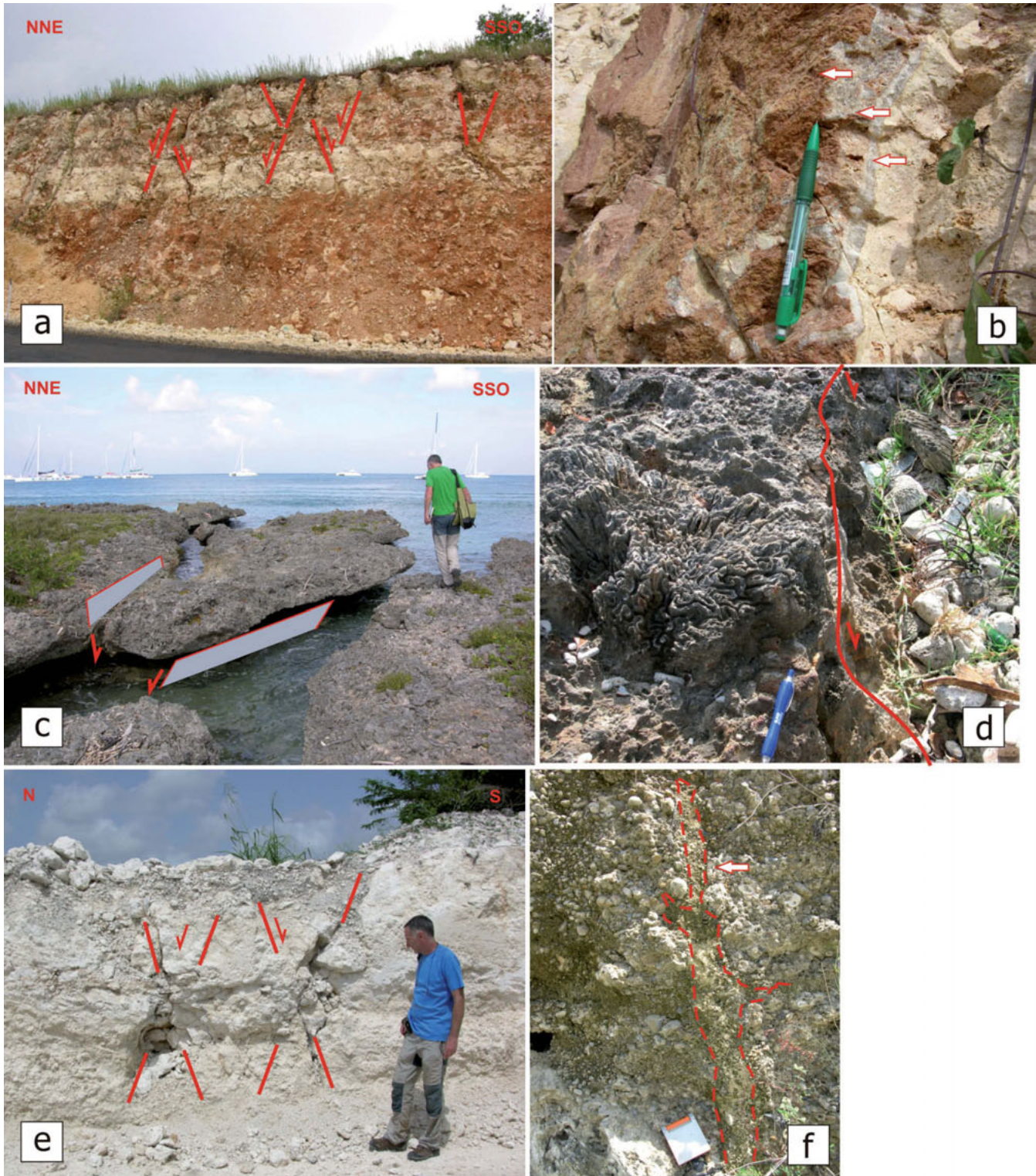
**Figure 3.** (a) Topographic profile that illustrates the normal separation of the top of the Plio-Pleistocene coral platform defined by the scarps of the faults, and the half-graben style of extension. The elevation of the hangingwall crests to almost 100 m indicates, either that the initial surface was over sea level before block rotation, or that the tilted blocks experience uplift. Vertical scale is greatly exaggerated (X52). (b) Panoramic view to the SE (towards Pantanal) of a Km-scale graben structure bounded by high angle NW-SE to WNW-ESE-trending normal faults. (c) Degraded fault scarp in the Plio-Pleistocene reef limestone. The footwall rock is cut by NW-SE to NNW-SSE-trending, sub-parallel, synthetic, minor normal faults. Coral Highway Km 63 (see location in Figure 2).

**Figura 2.** (a) Modelo digital del relieve del sureste de la República Dominicana generado a partir del sombreado las mallas de la SRTM mostrando el relieve tectónico de fallas y bloques basculados que desnivela el techo de la plataforma de coral Plio-Pleistocena levantada. El modelo muestra también el cinturón curvado de terrazas levantadas coralinas de edad pleistocena que bordea la costa de la República Dominicana oriental. (b) Mosaico del mapa geológico 1:50.000 (mod. Proyecto SYSMIN I y II) modificado con la interpretación del sistema de fallas extensivas estudiado (en rojo y con símbolo en el bloque hundido). Los números nombran las fallas individuales descritas en el texto y la línea C'-C marca la posición del perfil topográfico de la Fig.3a. El recuadro es un mapa geológico de síntesis con la leyenda del sustrato del arco y su cobertera discordante del Plio-Pleistoceno.

**Figure 2.** Shadow DEM topography of southeastern Dominican Republic generated from the SRTM grid showing the tectonic relief of faults and tilted blocks cutting the top of the coral platform, and the curved belt of raised Pleistocene reef terraces fringing the coast of eastern Dominican Republic. (b) Mosaic of geological maps 1:50.000 (modified from the SYSMIN Project, 2004 and 2010) modified to show the studied extensional fault system (red lines with barbs on hangingwall block). Individual faults described in text are numbered. C'-C is the topographic profile of Figure 3a. Inset: Geological map of eastern Dominican Republic to show the main units of the arc basement and the Plio-Pleistocene cover.

cipales del elipsoide de esfuerzos y su relación axial (forma del elipsoide)  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . Para este análisis fue utilizado el programa *FaultKin* (Marrett and Allmendinger, 1990). Los resultados se interpre-

tan en combinación con otros tipos de datos de significado cinemático, como fracturas de cizalla conjugadas, fracturas de tensión y grietas de extensión rellenas de calcita.





En afloramientos de la Fm Haitises se seleccionaron seis estaciones de medida de datos estructurales para la determinación de paleoesfuerzos (Fig. 5c). En cada estación, la orientación de pequeñas fallas y de fracturas híbridas y de cizalla está frecuentemente distribuida en dos familias conjugadas, generalmente de alto ángulo de buzamiento ( $>60^\circ$ ) y con un sentido de movimiento normal y opuesto para cada familia. En otras estaciones aparecen una o dos familias de fracturas subverticales con un buzamiento  $>75^\circ$ , de carácter tensional. Las direcciones más frecuentes observadas son NO-SE, ONO-ESE, OSO-ENE y NNE-SSO.

El análisis de paleoesfuerzos realizado en las fallas y fracturas que afectan a la terraza arrecifal inferior establece una dirección de extensión subhorizontal NE-SO. En la plataforma arrecifal de 65-90 m, el análisis de las fallas establece un elipsoide de esfuerzos caracterizado por un eje  $\sigma_1$  sub-vertical y un eje  $\sigma_3$  de dirección SSO a SO subhorizontal ( $0.94 < R < 0.76$ ). Por lo tanto, el tipo de deformación frágil resultante en el Pleistoceno gradúa entre una fracturación (aproximadamente) normal pura a normal direccional.

### Soluciones de mecanismos focales

En contraste con el régimen de fracturación extensional obtenido a partir de las mesoestructuras frágiles, las soluciones de los mecanismos focales de gran parte de los 43 terremotos compilados del catálogo CMT son características de un fallamiento inverso,

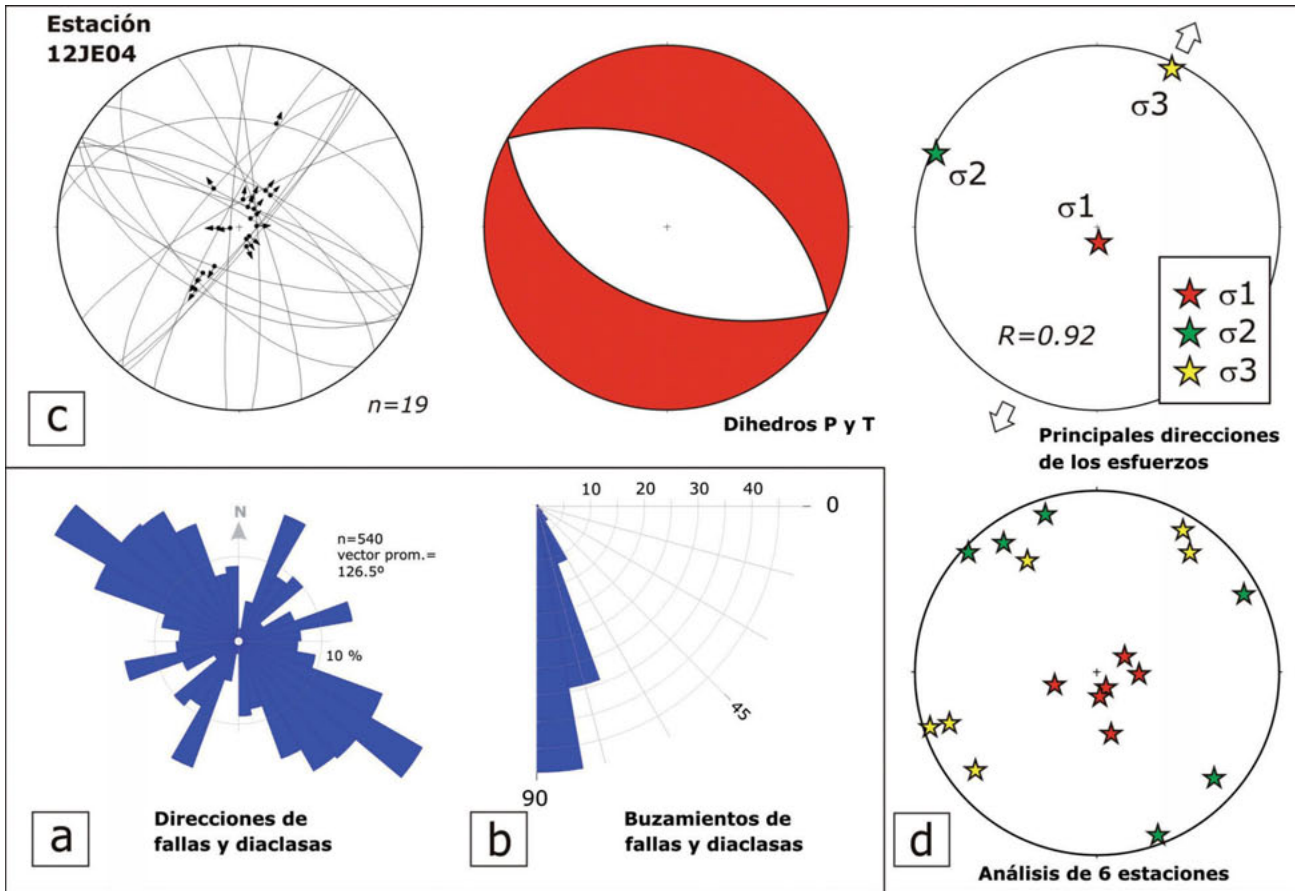
inverso oblicuo y de desgarre simple, aunque mecanismos focales de tipo normal también aparecen en niveles de corteza más someros (Fig. 6a, b y Tabla 1). La orientación de los ejes P y T (presión y tensión) determinados por la inversión de los datos de mecanismos focales es bastante dispersa, siendo la más probable hacia el NNE para el eje P, con el eje T sub-vertical. Estos resultados sugieren que una deformación compresional y de desgarre inverso afecta a la litosfera profunda en el sureste de La Española. Este estado de esfuerzos profundo contrasta con las evidencias de campo que indican un régimen tectónico extensional, activo en los niveles corticales más superficiales. Por otro lado, el sistema de fallas extensionales desarrollado en el sector meridional y oriental de La Española difiere de las estructuras transpresivas presentes en los sectores occidental, central y septentrional de la Isla.

### Correlación con el sistema de fallas del pasaje de la mona y el oeste de Puerto Rico

En el Pasaje de La Mona y hasta Puerto Rico occidental se ha descrito un sistema de fallas de alto ángulo y dirección ONO-ESE a NO-SE, a partir de imágenes de *sidescan*, perfiles sísmicos y análisis morfoestructural (Larue and Ryan, 1998; Mann *et al.*, 2005; van Gestel *et al.*, 1999, ten Brink *et al.*, 2009; Mondziel *et al.*, 2010, Chaytor and ten Brink, 2010). Este sistema de fallas es análogo a las fallas extensionales observadas en el sureste de la República Dominicana, por lo

**Figura 4.** Ejemplos de afloramientos de fallas extensionales. (a) Familia sintética y antitética de fallas normales NO-SE a ONO-ESE en calizas del Plioceno-Pleistoceno. El análisis del desplazamiento de las fallas y de las relaciones geométricas de las fracturas de cizalla revela una deformación por extensión horizontal uniaxial NNE/NE. (b) Relleno multi-episódico de un plano de falla en calizas del Plioceno-Pleistoceno. A remarcar el relleno drúsico externo de calcita blanca syntaxial sub-perpendicular a la superficie de la falla, y el relleno interno de calcita roja de grano fino brechificada y karstificada. Corte en la Autopista del Coral. (c) Familia sintética y antitética de fallas normales ONO-ESE a O-E desarrollada en la terraza arrecifal de 1.5 m de altura del Pleistoceno Medio/Superior. La geometría conjugada de las fracturas de cizalla indica una extensión uniaxial subhorizontal de dirección NNE/NE. Costa junto a Bayahibe. (d) Detalle de un coral (*Diploria cf. Labyrinthiformis*) truncado por una pequeña falla normal de alto ángulo en el mismo afloramiento costero de Bayahibe. (e) Sistema conjugado de fallas normales NO-SE to ONO-ESE de alto ángulo desarrollado en carbonatos limosos arrecifales del Pleistoceno Medio-Superior, compatible con una extensión horizontal NE-SO. Cantera situada 2,8 km al NO de Punta Cana. (f) Estructura de licuefacción (seismita) formada en sedimentos clásticos aluviales de grano grueso a 31 m de elevación atribuidos al Pleistoceno Superior. Talud de carretera junto al puente sobre el río Higüamo en las proximidades de San Pedro de Macoris.

**Figure 4.** Field outcrops of extensional faults. (a) Synthetic and antithetic set of NW-SE to WNW-ESE normal faults in Pliocene-Pleistocene limestone. Fault-slip analysis and shear fracture geometry indicate NNE/NE uniaxial horizontal extension. (b) Multi-episodic fill of a fault plane in Plio-Pleistocene limestone. Note the external drusic fill by syntaxial white calcite sub-orthogonal to the fault surface, filled with brecciated and karstified fine-grained red calcite. Coral Highway road cut. (c) Synthetic and antithetic set of WNW-ESE to W-E-trending normal faults developed in the 1.5m high reef terrace of Middle/Late Pleistocene age. The conjugate geometry of fracture shears indicates a NNE/NE uniaxial horizontal extension. Bayahibe coast. (d) Detailed view of a coral (*Diploria cf. Labyrinthiformis*) truncated by a small high-angle normal fault in the same exposure of Bayahibe. (e) Conjugate set of NW-SE to WNW-ESE high-angle normal faults cutting middle-late Pleistocene silty-limestones, consistent with a NE-directed horizontal extension. Quarry located 2,8 km NW of Punta Cana. (f) Seismita developed in coarse-grained alluvial detritics 31m above sea level, assigned to the Late Pleistocene. Road cut next to the bridge over the Higüamo River near San Pedro de Macoris.



**Figura 5.** Análisis de las estructuras frágiles que deforman a calizas de edades comprendidas entre el Plioceno y el Holoceno en estaciones de medida distribuidas por el sureste de la República Dominicana. Diagrama de rosa de la (a) dirección y (b) el buzamiento de pequeñas fallas y diaclasas. (c) Ejemplo representativo del cálculo de paleoesfuerzos en la estación 12JE04 a partir del método de los Diedros Rectos (Angelier and Mechler, 1977) y el método propuesto por Marrett and Almendinger (1990). (d) Proyección estereográfica de los ejes principales de esfuerzos obtenidos en seis estaciones de medida.

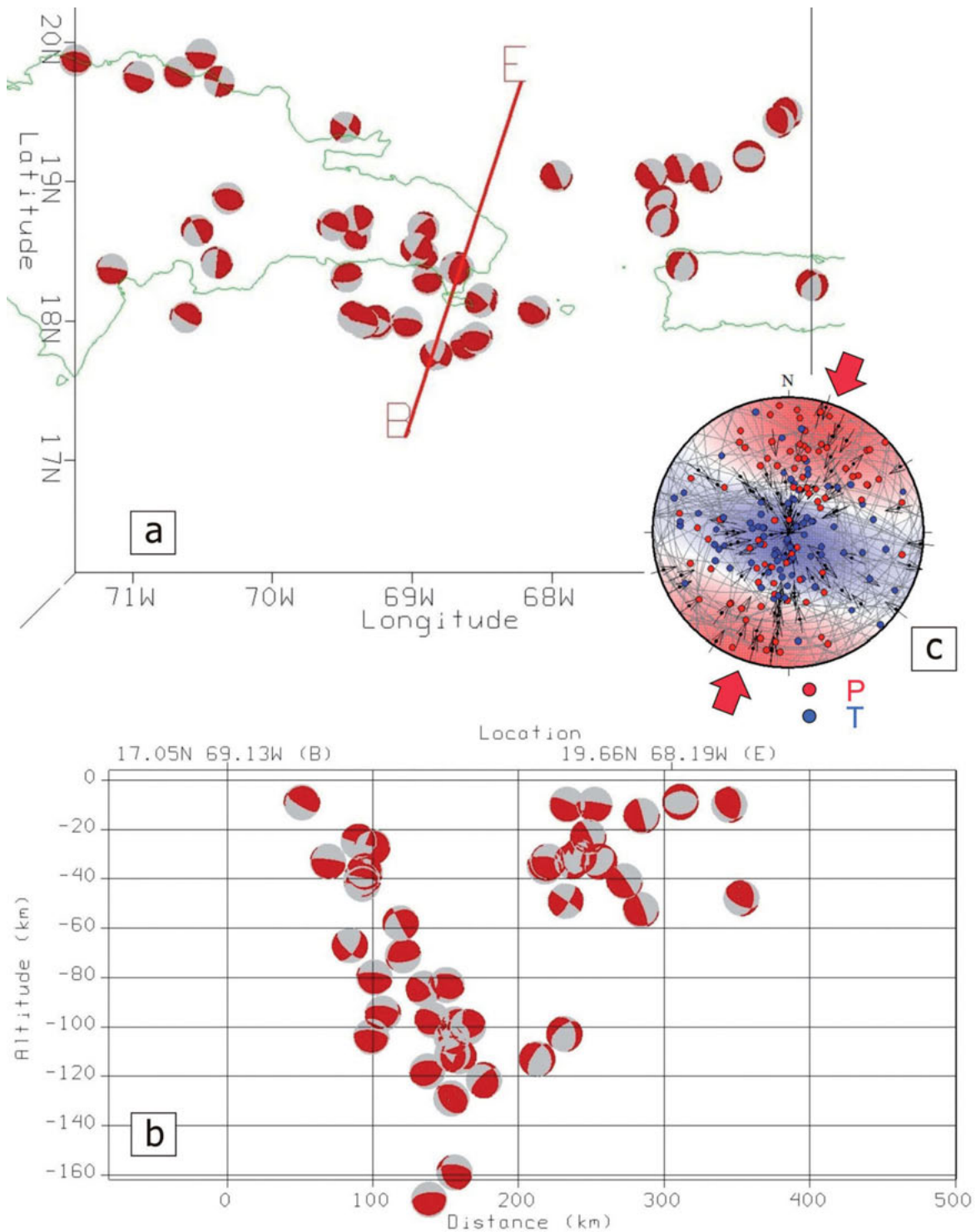
**Figure 5.** Analysis of brittle structures affecting Pliocene and Quaternary limestone from several measurement sites in southeastern Dominican Republic. Rose diagram of (a) trend and (b) dip. (c). Representative example of paleostress calculation for a fault-dataset in 12JE04 location using the Right Dihedra method (Angelier and Mechler, 1977) and the method of Marrett and Almendinger (1990). (d) Stereoplot of stress axes obtained in six stations.

que éstas presentan una continuación bajo el mar hacia el este por más de 150 km (Figs. 7a y b).

A gran escala, el plegamiento de la plataforma de carbonatos de edad Oligoceno superior-Plioceno entre las fosas de Puerto Rico y de Los Muertos describe un gran antiforme conocido como el Arco de Puerto Rico-Islas Vírgenes (PRVI; Speed and Larue, 1991). Su forma puede compararse de este a oeste en los perfiles de sísmica de reflexión MCS-55 y VB1NA realizados en el mar y en un corte geológico simplificado por el este de la República Dominicana (cortes A-A', B-B', y C-C'; Fig. 7c). Se observa que las fallas extensionales aquí descritas ocupan la zona crestal del arco, cuyo perfil varía desde un anticlinal formado por la rotación de los estratos hacia fallas de polari-

dades opuestas en la plataforma occidental de Puerto Rico (corte A-A'), a fallas inclinadas hacia los flancos en el Pasaje de la Mona (corte B-B') y a fallas de polaridad dominante norte en la costa oriental de la República Dominicana (corte C-C'). En todos los perfiles, las fallas forman crestas y escarpes topográficos, acomodando en el bloque hundido cuñas de sedimentos clásticos con relaciones de *onlap* y *pinch-out*.

Chaytor and ten Brink (2010) interpretan la geometría en planta de un sector del Pasaje de la Mona con fallas intra-rift NO-SE, limitadas por fallas de borde de dirección O a ONO, como producida por una extensión oblicua de dirección aproximada N055. Esta dirección es próxima a la dirección NNE-SSO a NE-SO obtenida mediante el análisis de paleoesfuerzos



**Figura 6.** (a) Soluciones Focales proyectadas al hemisferio inferior de 43 terremotos moderados a grandes en el Caribe central septentrional, compilados del catálogo CMT (Tabla 1). (b) Proyección de los mecanismos focales al plano del corte B-E. Las esferas focales no están rotadas en el plano vertical (programa Geon Integrated Data Viewer, UNAVCO, ([www.geongrid.org](http://www.geongrid.org))). (c) Inversión de los datos de mecanismos focales de la Tabla 1, la orientación de los ejes P y T es bastante dispersa, siendo la más probable hacia el NNE para el eje P, con el eje T subvertical. Programa T-TECTO, ([http://www2.arnes.si/~jzaloh/t-tecto\\_homepage.htm](http://www2.arnes.si/~jzaloh/t-tecto_homepage.htm)).

**Figure 6.** (a) Fault plane solutions (lower hemisphere) obtained from 43 earthquakes in the north-central Caribbean compiled from the CMT Catalog (events in Table 1). (b) Focal mechanisms projected to the section B-E (focal spheres are not rotated to view from side). (c) Inversion of the focal mechanisms data of Table 1, showing a disperse orientation of the P and T axes, being the NNE-SSW direction the most probable orientation of P, with T vertical.

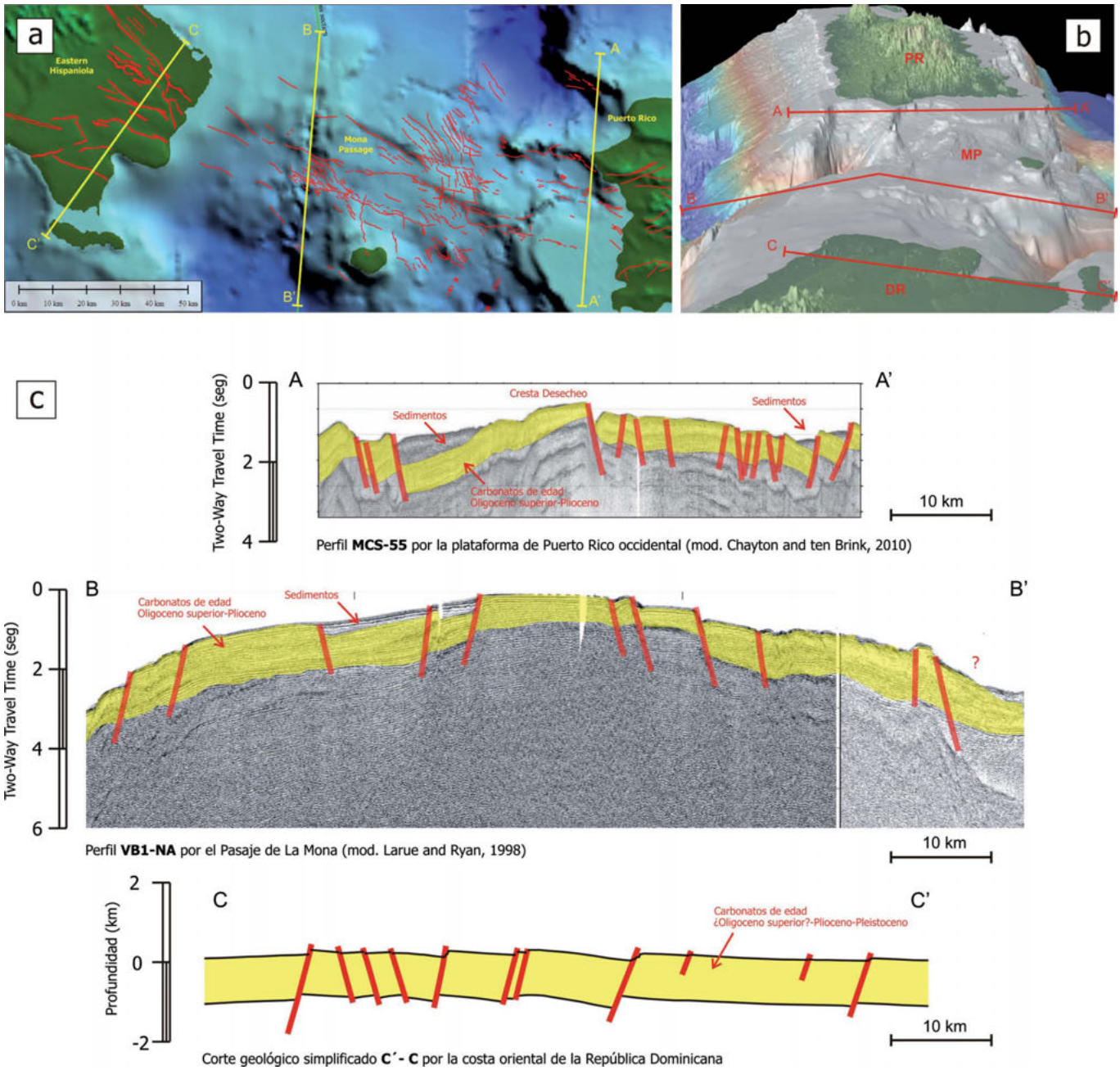
Time [fmt=yyyy/MM/dd HH:mm:ss]	Latitude [unit=deg]	Longitude [unit=deg]	Altitude [unit=km]	mb [unit=null]	Ms [unit=null]	magnitude [unit=null]	strike [unit=deg]	dip [unit=deg]	rake [unit=deg]
06/06/77 06:38	19.39	-69.48	-49.0	4.9	4.2	4.9	304	88	168
15/03/79 06:58	18.38	-68.67	-111.0	4.9	0.0	4.9	203	54	112
23/03/79 19:32	17.99	-69.04	-80.0	6.1	0.0	6.1	276	74	83
05/11/79 01:51	17.83	-68.62	-104.0	5.9	0.0	5.9	277	68	91
17/11/79 14:17	18.69	-69.57	-99.0	5.1	0.0	5.1	115	76	128
27/09/80 06:25	18.48	-68.93	-159.0	4.9	0.0	4.9	279	63	55
15/02/81 14:36	18.52	-68.97	-112.0	5.1	0.0	5.1	216	90	32
14/09/81 12:44	18.30	-68.89	-170.0	5.8	0.0	5.8	263	66	92
20/05/83 17:40	18.03	-69.42	-40.0	5.2	4.9	5.2	115	82	78
20/09/83 08:50	18.16	-68.50	-118.0	5.6	0.0	5.6	264	52	113
24/06/84 11:17	17.99	-69.35	-25.0	6.0	6.7	6.7	107	88	85
24/06/84 18:18	18.00	-69.26	-37.0	5.1	4.8	5.1	287	75	-71
25/06/84 18:45	17.98	-69.25	-42.0	5.1	5.0	5.1	98	66	97
01/09/84 23:39	18.32	-69.47	-71.0	5.2	0.0	5.2	81	68	111
21/07/85 13:10	19.04	-67.97	-23.0	5.7	5.4	5.7	333	84	113
05/09/88 06:13	18.42	-70.40	-27.0	5.5	5.0	5.5	185	90	108
03/11/88 19:42	19.05	-67.29	-41.0	5.3	5.7	5.7	324	85	97
02/03/89 07:13	18.38	-68.69	-129.0	5.6	0.0	5.6	141	52	103
18/06/89 14:06	17.76	-68.83	-67.0	5.9	0.0	5.9	134	70	-153
11/10/90 15:14	18.72	-69.39	-100.0	5.4	0.0	5.4	168	80	42
26/03/91 12:34	19.72	-70.38	-33.0	5.6	5.9	5.9	195	86	-174
15/01/92 06:58	18.03	-70.62	-9.0	5.8	5.2	5.8	122	78	103
23/11/92 06:31	18.72	-67.21	-31.0	4.9	4.7	4.9	10	52	-112
08/04/93 19:13	18.37	-71.15	-33.0	5.1	4.7	5.1	277	83	84
12/07/94 13:47	19.75	-70.96	-33.0	4.9	5.1	5.1	287	84	82
24/04/96 18:56	18.88	-70.32	-83.0	5.2	0.0	5.2	278	50	76
10/08/98 21:02	18.65	-70.54	-58.0	4.9	0.0	4.9	150	88	132
18/01/99 19:41	18.86	-67.22	-33.0	4.9	4.4	4.9	47	45	-94
11/12/00 18:54	19.09	-67.09	-52.6	5.1	4.8	5.1	338	81	106
21/03/03 01:09	18.07	-68.13	-97.2	4.9	0.0	4.9	302	66	114
22/09/03 04:45	19.78	-70.67	-10.0	6.2	6.6	6.6	295	80	91
22/09/03 05:30	19.91	-70.51	-10.0	5.1	5.5	5.5	278	82	91
04/02/08 07:43	19.03	-66.90	-14.5	5.3	5.2	5.3	343	88	103
02/11/08 20:42	19.43	-66.38	-10.0	5.3	5.4	5.4	135	50	59
23/11/08 09:05	19.49	-66.32	-47.8	4.9	4.8	4.9	119	65	52
18/12/08 17:13	18.62	-69.41	-104.4	5.3	0.0	5.3	317	51	77
14/02/09 07:48	18.67	-68.92	-121.6	5.1	4.8	5.1	224	74	122
13/06/09 16:12	19.18	-66.59	-8.8	5.0	4.9	5.0	264	49	-92
04/09/09 09:45	19.87	-71.41	-35.0	4.4	0.0	4.4	277	55	83
18/04/10 20:16	18.14	-68.51	-84.5	5.1	5.0	5.1	310	76	146
16/05/10 05:16	18.40	-67.07	-113.0	5.4	5.8	5.8	210	69	-63
13/11/10 04:35	17.88	-68.54	-94.6	5.6	5.6	5.6	277	64	113
24/12/10 23:43	18.26	-66.14	-102.9	5.0	5.4	5.4	227	61	-51

**Tabla 1.** Eventos usados para calcular las soluciones de mecanismos focales extraídos del Catálogo Global CMT ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)).  
**Table 1.** Events used to construct focal mechanisms, extracted from the CMT Catalog.

en el sureste de La Española. Laó-Dávila and Anderson (2009) establecen que, en el oeste de Puerto Rico, la última etapa de deformación visible en fallas de orientación E-O se corresponde con una dirección de extensión N-S. La importancia de estas estructuras en la deformación de la litosfera se discute en el siguiente apartado.

### Modelo tectónico

La Fig. 8 es un bloque diagrama que integra las observaciones sobre la geometría y cinemática de las fallas extensionales reconocidas en el sector suroccidental de La Española y el Pasaje de la Mona, con los planos de falla resultantes de la solución de mecanis-



**Figura 7.** (a) Deformaciones extensionales del sector Oriental de La Española-Pasaje de la Mona-Occidente de Puerto Rico visibles sobre una imagen batimétrica-topográfica de la malla GEBCO sombreada. La cartografía del sistema de fallas ONO-ESE a NO-SE se marca en color rojo. (b) Perspectiva 3-D hacia el este del mismo sector. (c) Perfiles sísmicos de reflexión y corte estructural (situación en las figuras a y b) a la misma escala horizontal que muestran la variación de este a oeste de la estructura de bloques rotados sobre fallas normales que desplazan a la plataforma de carbonatos de edad Oligoceno superior-Plioceno arqueada a gran escala.

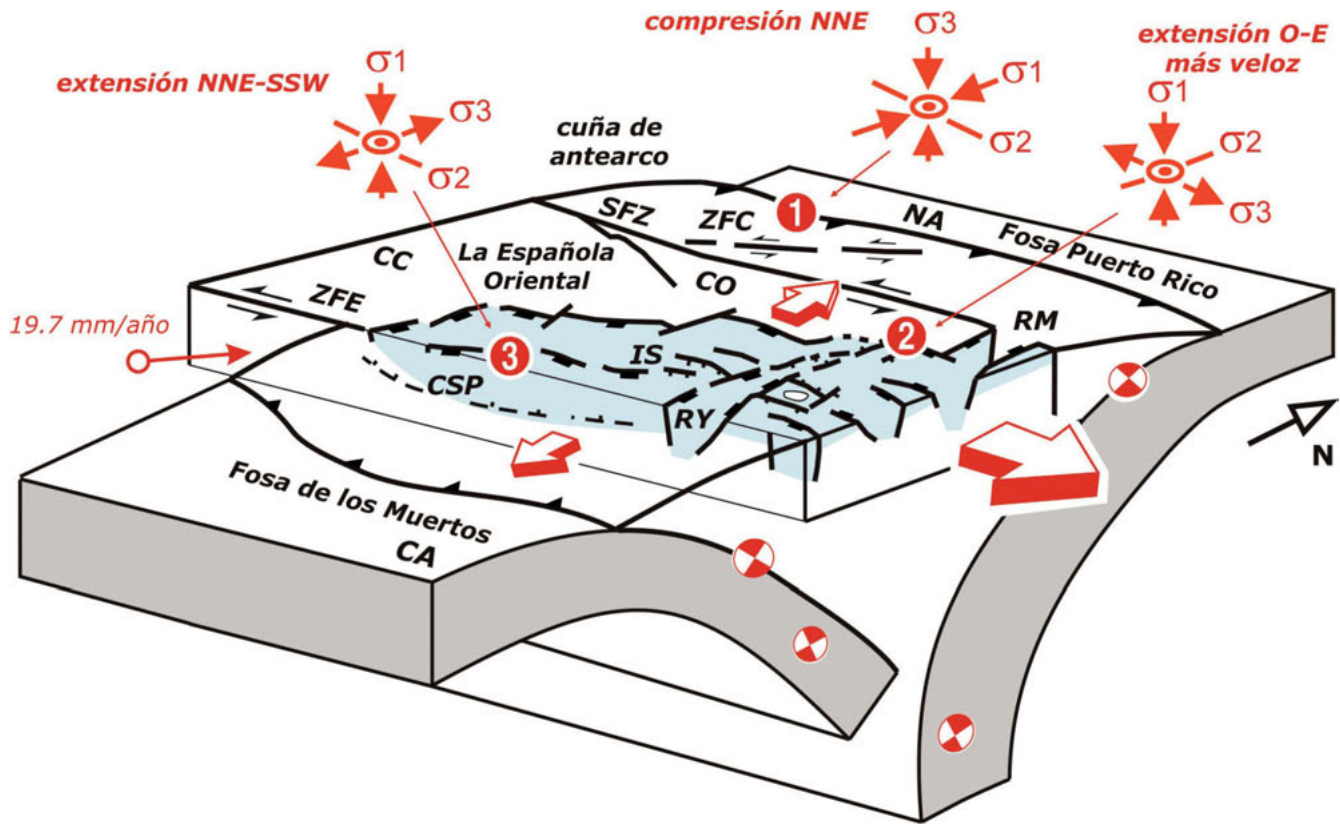
**Figure 7.** (a) GEBCO bathymetric-topographic image of the eastern Hispaniola-Mona Passage-western Puerto Rico area showing extensional deformation features. Mapped faults marked in red colour delineate a WNW-ESE to NW-SE system. (b) 3D perspective of the area looking eastwards. (c) Interpreted seismic profiles and structural cross section (location in a and b) showing rotated hangingwall blocks on high angle faults displacing the Late Oligocene-Pliocene carbonate platform, which is arched on a large scale.

mos focales de los terremotos producidos en los bordes de placa. Estos datos permiten proponer la existencia de dos regímenes de esfuerzos contrastados,

que afectan a niveles corticales distintos. Los terremotos de profundidad intermedia (entre 42-107 km) con mecanismos de falla inversa, inversa oblicua y de

desgarre producidos por la convergencia oblicua entre las placas Caribeña y Norteamericana y que ocurren a lo largo de la Fosa de Puerto Rico y en el complejo de subducción-acreción Caribeño suprayacente, indican una compresión regional NNE-SSO. Esta deformación regional es transpresiva y está repartida en un movimiento normal y un movimiento

paralelo a los bordes de los bloques a lo largo de la Falla Septentrional (Mann *et al.*, 2002). En contraste, en los niveles someros de la corteza del Arco Caribeño situados por encima del cabalgamiento basal de la Fosa de los Muertos, los terremotos presentan un mecanismo de falla normal e indican una orientación subvertical del esfuerzo máximo y una



**NA = Placa de Norteamérica**  
**CA = Placa Caribeña**  
**ZFE = Zona Falla Enriquillo**  
**ZFS = Zona Falla Septentrional**  
**ZFC = Zona Falla Camú**  
**CC = Cordillera Central**  
**CO = Cordillera Oriental**  
**CSP = Cuenca San Pedro**

**IS = Isla Saona**  
**RY = Rift Yuma**  
**RM = Rift de la Mona**

**La flecha roja muestra la velocidad placa derivada de GPS (DeMets et al., 2007)**

 Dominio Extensional  
 Solución de Mecanismos Focales

**Figura 8.** Bloque diagrama que esquematiza la tectónica activa dominada por cabalgamientos de subducción en las fosas de Puerto Rico y los Muertos, por fallas en dirección en la Cordillera Septentrional y Enriquillo y por el sistema extensivo estudiado paralelo al eje del arco, cortado hacia el E por los rifts de la Mona y de Yuma, que representan una extensión longitudinal al arco más rápida. En la dimensión vertical, el dominio extensional ocupa la parte alta de la corteza presumiblemente en transición con el régimen compresivo NNE-SSO a NE-SO deducido por la solución de los mecanismos focales de los sismos de intraplaca y de subducción.

**Figure 8.** Schematic block diagram that outlines the active tectonics dominated by the subduction megathrusts at the Puerto Rico and Los Muertos troughs, strike-slip faulting in the Septentrional Cordillera and Enriquillo zones, and the observed extensional system parallel to the arc axis, cut by the more northerly Mona and Yuma rifts that represent a faster longitudinal extension. In the vertical dimension, the extensional domain occupy the upper part of the crust, presumably in transition with the compressive NNE-SSO to NE-SO regime interpreted by the focal solutions of the intraplate and subduction earthquakes.

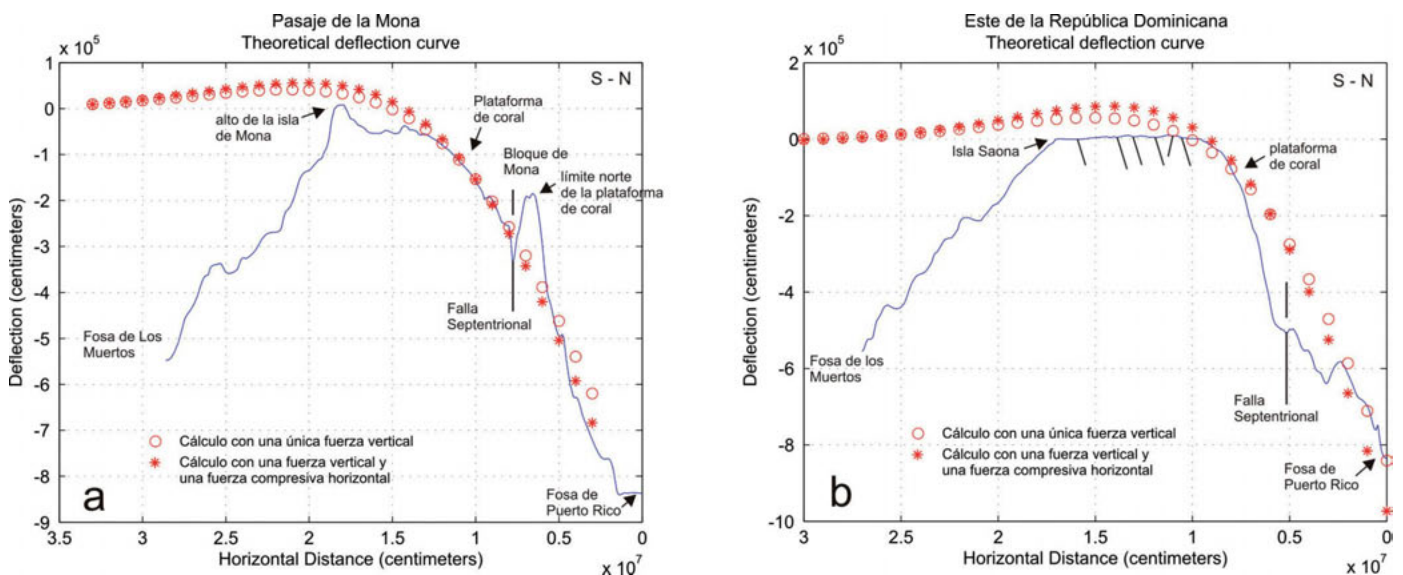
dirección de extensión regional NNE-SSO. McCann (2006) describe una situación similar en el estudio de la sismicidad actual en el suroeste de Puerto Rico.

El escenario tectónico resulta ser por lo tanto complicado, ya que la fracturación extensional desarrollada entre el sureste de la República Dominicana y Puerto Rico resulta ser coetánea con el arqueamiento de gran escala de la corteza del Arco Caribeño y con la elevación regional que afecta al este de La Española y que ha elevado las terrazas de coral (Mann *et al.*, 1995). Por lo tanto, resulta necesario plantear la existencia de un mecanismo común que explique su formación. El plegamiento de la corteza del Arco posteriormente al Plioceno inferior queda registrado en el rápido evento de subsidencia de la plataforma de coral y su basculamiento tanto hacia la Fosa de Puerto Rico hacia el norte como hacia la Fosa de los Muertos al sur (Birch, 1986; Masson and Scanlon, 1991; Larue and Ryan, 1998; van Gestel *et al.*, 1998; Mann *et al.*, 2005b; Mondziel *et al.*, 2010).

La flexión del Arco hacia la Fosa de Puerto Rico ha sido aproximada por Birch (1986) por un mecanismo de isostasia flexural, en el que a una placa de comportamiento elástico resulta doblada al aplicarse una carga vertical en su extremidad. En el presente se han reproducido sus cálculos aplicándolos en dos perfiles de orientación norte-sur localizados en el Pasaje de la Mona y en el sector oriental de la República

Dominicana (Fig. 9). Para ello, se ha utilizado la rutina descrita en el Apéndice, que utiliza las ecuaciones de Watts y Talvani (1974) y los parámetros de Birch (1986), ligeramente modificados para conseguir un mejor ajuste. En el perfil por el Pasaje de la Mona (Fig. 9a), la curva de flexión calculada (circunferencias rojas) concuerda de forma aceptable con el perfil batimétrico del talud, siendo muy buena la concordancia en el tramo sobre la Falla Septentrional. El punto más alto del 'bulge' se encuentra cerca del alto de la Isla de Mona. En el perfil por el este de la República Dominicana (Fig. 9b) la curva calculada solo aproxima a la observada como una envolvente, aunque reproduce de forma aceptable la curvatura del inicio del talud y la inclinación ascendente-descendente de la topografía producida por la tectónica (comparar con el corte C-C', Fig. 3a). Por lo tanto, el plegamiento de la corteza del Arco Caribeño pudo haber sido producido por un mecanismo de flexión a gran escala. Para Birch (1986) la carga aplicada que produce la flexión pudo ser generada por un proceso de erosión tectónica iniciado hace unos 7 Ma a lo largo de la interfase de las placas en la zona de subducción de Puerto Rico. Dicho proceso de erosión produjo el reemplazamiento de la corteza del Arco Caribeño relativamente liviana por corteza oceánica Atlántica más densa.

Sea o no la flexión del Arco consecuencia de la



**Figura 9.** Flexión teórica de una placa elástica rota calculada para una carga vertical aplicada en su extremidad y para una carga vertical y una fuerza compresiva horizontal. Las curvas se comparan con el perfil topográfico-batimétrico de la placa superior desde la fosa de Puerto Rico hacia tierra en (a) el Pasaje de la Mona y (b) el este de la República Dominicana.

**Figure 9.** Theoretical deflection curve of a split plate calculated for a vertical concentrated load applied at the origin and for a vertical load with the addition of a horizontal compressive force. Curves are compared with the landward trench topography in (a) Mona Passage and (b) the east of the Dominican Republic.

erosión tectónica, se trata de un problema de topografía dinámica donde interviene el balance de las fuerzas tectónicas entre las placas convergentes y la fuerza generada por la flotabilidad de la litosfera que subduce. En el caso que nos ocupa (Fig. 10), la convergencia ha sido descrita como una doble subducción de las placas oceánicas Atlántica y del Caribe bajo la corteza del arco Caribeño (Ludwig, 1989; Dolan *et al.*, 1998; Mann *et al.*, 2002; ten Brink *et al.*, 2010). Esta configuración queda mostrada por la distribución espacial de la sismicidad siguiendo una transversal norte-sur (Fig. 10), que muestra la existencia de dos láminas (*slabs*) opuestas bajo La Española. La lámina de corteza oceánica del Caribe queda definida por la consistencia de los ejes compresionales de los terremotos paralelos a la inclinación de la zona sísmica (Fig. 10a). Su continuidad hacia el norte está interrumpida por otra lámina de corteza Atlántica de buzamiento opuesto, en la que la distribución de la sismicidad define un aumento del ángulo de subducción con la profundidad en la fosa de Puerto Rico, desde unos 26° hasta casi la vertical.

Por otro lado, Dolan *et al.* (1998) propone que al incluir la corteza Atlántica subducida bajo Puerto Rico y La Española parte de la Plataforma de Bahamas, ésta resulta ser más ligera y por tanto más difícilmente subducible. De acuerdo con el modelo general de Sacks y Secor Jr. (1990), la flotabilidad positiva de parte de la lámina que subduce podría haber facilitado el estiramiento de la lámina y el levantamiento y la extensión en los niveles altos de la corteza del Arco Caribeño (Fig. 10b). Este proceso sería responsable de la verticalización de la lámina Atlántica que subduce así como de las estructuras extensionales que afectan a los niveles corticales someros en el sector sureste de la República Dominicana. Ten Brink (2005) considera adicionalmente el efecto de la migración de la astenosfera a través de una rotura transversa de la placa Atlántica que subduce, deducida a partir de la distribución de la sismicidad profunda y su práctica ausencia más hacia el oeste. En cualquier caso, ambos procesos pueden explicar el movimiento vertical que ocurre en la corteza del Arco Caribeño simultáneamente con el régimen de compresión que impera en sus bordes y en la infraestructura de las láminas subducidas.

No obstante, la actuación de un mecanismo flexural no explica de forma satisfactoria el sistema de fallas normales N-S y NO-SE desarrollado en un área amplia del Arco Caribeño. Los datos de GPS (Jansma and Mattioli, 2015) indican que el bloque de Puerto Rico-Islas Vírgenes se comporta como una microplaca que se desplaza hacia el NE en relación a La Española a una tasa aproximada de  $5\pm 3$  mm/año. Un

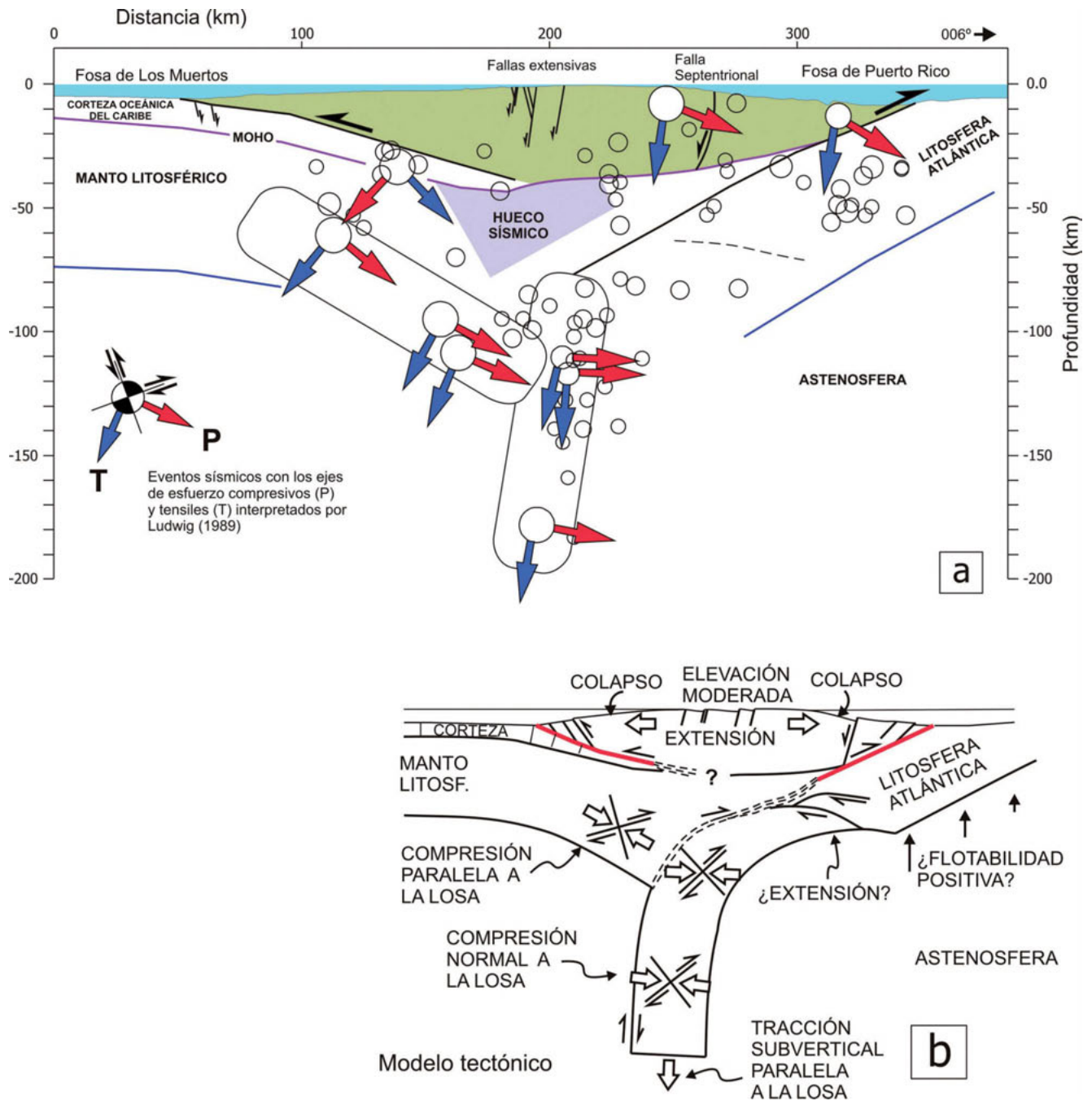
límite de bloques más preciso ha sido propuesto a través del eje del Rift de la Mona y la esquina SO de la Isla de Puerto Rico (ten Brink and López-Venegas, 2012). Para estos autores, el movimiento relativo entre los bloques presenta una diferencia de velocidad en dirección SO-NE que puede explicar de forma simultánea tanto la extensión localizada en el Rift de la Mona, similar a un rift transverso N-S (Mann *et al.*, 2005; Chaytor and ten Brink, 2010) como el sistema difuso de fallas del Pasaje de la Mona axial al Arco. La hipótesis de un fallamiento simultáneo no explica de forma satisfactoria la existencia de fallas extensionales N-S, por ejemplo en el Cañón de Yuma (Fig. 1) que cortan a las fallas extensionales NO-SE del Pasaje de la Mona, indicando que la génesis de éstas últimas puede ser debida a otro proceso.

Un mecanismo adicional capaz de generar extensión cortical en el Arco según la dirección NNE-SSO, obtenida a partir del análisis de paleoesfuerzos en este trabajo, puede ser la rotación antihoraria de Puerto Rico en el intervalo 11-4.5 Ma identificada mediante paleomagnetismo por Reid *et al.* (1991). Según estos autores, el proceso de rotación sería continuo y tuvo lugar a una velocidad relativamente baja desde el Tortonense (Mioceno) al Zancliceno (Plioceno inferior). La variación en la declinación de  $1.7\pm 9.9$  grados obtenida en la Fm Quebradillas, que es la unidad más reciente estudiada por Reid *et al.* (1991) sugiere que una rotación de Puerto Rico a una velocidad muy baja es posible en la actualidad. Los trabajos de paleomagnetismo en curso en el sureste de la República Dominicana en la Fm Yanigua equivalente temporal de la Fm Quebradillas podrán aportar datos que refuercen o descarten esta hipótesis.

## Conclusiones

La cartografía geológico-estructural, el análisis geométrico-cinemático de las zonas de falla y la solución de mecanismos focales de terremotos relevantes sugiere que la evolución tectónica del sector sureste de la República Dominicana está controlada por una tectónica extensional desde al menos el Plioceno superior. El desarrollo de un sistema de fallas normales de orientación general ONO-ESE a NO-SE y alto ángulo indica que la extensión afecta a la parte superior de la corteza del Arco de la placa Caribeña. Los movimientos verticales de elevación del Arco evidenciado por la sucesión de terrazas arrecifales levantadas y el basculamiento hacia las fosas registrado por el hundimiento de la plataforma de coral a profundidades batiales, han sido modelados como la flexión elástica de una lámina Atlántica que subduce. Otros





**Figura 10.** (a) Perfil vertical de la sismicidad que muestra dos losas ('slabs') opuestas definidas por las zonas con sismicidad y por la dirección de los ejes P y T. Numerosos terremotos profundos e intermedios dentro de las losas indican una compresión N-S, normal a las losas, con mecanismos de cabalgamiento. Un enjambre sísmico en la litosfera Atlántica bajo el talud que baja hacia la fosa de Puerto Rico define otra zona sísmica dentro de la litosfera Atlántica. Los tres eventos someros en la corteza del arco y en la interface de placas se resuelven en cabalgamientos y en cabalgamientos oblicuos (modificado de Ludwig, 1989). (b) Modelo tectónico que ilustra los procesos de extensión, elevación tectónica, y rápida flexión que ocurren en la placa superior simultáneos con compresión en las losas subducidas y extensión local por 'necking' en la placa Atlántica para explicar la peculiaridad del colapso de la plataforma coralina.

**Figure 10.** (a) Vertical seismicity profile (modified after Ludwig, 1989) showing two opposing double subduction slabs defined by the seismic zones and the direction of the P and T axes. Numerous deep and intermediate events within the slabs indicate N-S slab-normal compression with thrust mechanisms. A cluster of seismicity beneath the slope descending to the Puerto Rico trench defines another seismic zone within the Atlantic lithosphere. The three shallow events in the arc crust and the slip layers indicate oblique thrust and thrust motion. (b) Tectonic model illustrating extension, rock uplift and rapid flexure in the upper plate crust simultaneous with compression and hypothetical necking and extension in the subducting slabs, to explain the peculiarity of the coral platform collapse. Thick red lines mark the seismic slip layers of interface thrusts.

modelos incluyen la ruptura de la lámina Atlántica y su pérdida de continuidad en profundidad, o los esfuerzos extensivos generados entre partes de flotabilidad positiva y negativa en la lámina subducida. La fracturación extensional de dirección ONO-ESE a NO-SE podría ser también debida a la continuidad actual del proceso de rotación de la isla de Puerto Rico respecto a La Española. Finalmente, las descripciones históricas de terremotos destructivos (terremoto de M7.2 y tsunami en 1918, localizado en el Cañón de la Mona), las relativas grandes dimensiones de las zonas de falla (que por su longitud pueden llegar a producir terremotos de  $\leq M_w$  6.5), las evidencias de campo de seismitas afectando a terrazas coralinas del Pleistoceno superior, y la actividad sísmica frecuente (somera y generalmente de baja magnitud), son indicativos de un riesgo sísmico en el sureste de la República Dominicana que no ha sido todavía establecido.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el interés por nuestro trabajo y la colaboración prestada por el Servicio Geológico Nacional de la República Dominicana, en especial a su Director Ing. Santiago Muñoz. Agradecemos también la revisión constructiva del manuscrito realizada por Daniel A. Laó Dávila y Francesc Sàbat. Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos CGL2009-08674/BTE y CGL2012-33669/BTE.

### Apéndice

```
'Script' para Matlab®
% Deflection curve of a split plate with compressive
vertical and horizontal
% forces applied at their origin. Application to the
flexure of the Caribbean
% island-arc crust in northeastern Hispaniola and
northern Puerto Rico
% Written by Jesús García-Senz (2015)
%-----
% Import the file: distmeters= distancia desde el ori-
gen, elevmeters= elevación
newData1 = importdata (filename.txt'); file with the
distance and elevation points of the topographic-
bathymetric profile in meters
% Create new variables in the base workspace from
those fields.
for i = 1:size(newData1.colheaders, 2)
    assignin ('base', genvarname (newData1.colhead-
ers{i}), newData1.data(:,i));
```

```
end
%-----
% Constants and equations, Watts & Talwani(1974)
% Parameters for Puerto Rico, modified from Francis
S. Birch(1986)
g= 980.6; % Gravity acceleration cm/s2 []
Pw= 1.035; % water density g/cm3 []
Pm= 3.300; % density mantle g/cm3 []
E= 10^12; % Young's modulus dyne/cm2 []
n= 0.25; % Poisson's ratio (adimensional) []
H= 2200000; % elastic plate thickness cm []
Pb= 5.85*10^15; % downward load applied at the
end of the plate dyne/cm;
Nb= -8*10^15; %horizontal compressive force
applied at the end of the plate dyne/cm []
%-----
%Horizontal array
x= (0:1000000:30000000); % position of the load
with respect to the origin x=0 at
% the trench, horizontal distance in centimeters with
intervals of 1000000 centimeters []
%-----
% Moment of Inertia I of the plate calculation, and
effective flexural rigidity D calculation, Watts &
Talwani 1974
I= H^3/(12*(1-n^2)) ;
D= E*I;
%-----
% Flexural parameter lambda calculation
Lambda = (g*(Pm-Pw)/(4*D))^(1/4);
%-----
% Topographic-bathymetric profile plot
Distcentimeters = distmeters*100; elevcentimeters=
elevmeters*100;
plot (distcentimeters,elevcentimeters), hold on
set (gca, 'XDir','reverse')
grid on
%-----
% Vertical displacement y at horizontal distance x
calculation, Model A, Watts & Talwani 1974
y bend= ((Pb*2*lambda)*exp(-lambda.*x).*cos(lamb-
da.*x))/(g*(Pm-Pw));
plot (x,-y bend,'or')
xlabel ('Horizontal Distance (centimeters)')
ylabel ('Deflection (centimeters)')
title ('Theoretical deflection curve')
%-----
% Addition of a horizontal compressive force applied
at the origin, Model B, Watts & Talwani 1974
alfa= (lambda^2+(Nb/(4*D)))^(1/2);
beta= (lambda^2-(Nb/(4*D)))^(1/2);
ytotal= (Pb/(beta*(Pm-
Pw)*g))*(2*lambda^2)/(3*alfa^2-beta^2)*exp(-
alfa.*x).*(2*alfa*beta*cos(beta.*x)+(alfa^2-
```

```
beta^2)*sin(beta.*x));  
plot (x,-yttotal,'*r'), hold off  
% end of the script
```

## Referencias

- Angelier, J. and Mechler, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en sismologie: La méthode des diedres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 19, 1309-1318.
- Birch, F.S. 1986. Isostatic, thermal, and flexural models of the subsidence of the north coast of Puerto Rico. *Geology*, 14, 427-429.
- Braga, J.C., Díaz de Neira, A., Lasseur, E., Mediato, J., Aguirre, J., Abad, M., Hernaiz-Huerta, P.P., Monthel, J., Pérez-Valera, F. and Lopera, E. 2012. Pliocene-Lower Pleistocene shallow-water mixed siliciclastics and carbonates (Yanigua and Los Haitises formations) in eastern Hispaniola (Dominican Republic). *Sedimentary Geology*, 265-266, 182-194.
- Chaytor, J.D. and ten Brink, U.S. 2010. Extension in Mona Passage, Northeast Caribbean. *Tectonophysics*, 493, 74-92.
- DeMets, C., Mattioli, G.S., Jansma, P.E., Rogers, R., Tenorio, C. and Turner, H.L. 2007. Present motion and deformation of the Caribbean Plate; constraints from new GPS geodetic measurements from Honduras and Nicaragua. In: Mann, P. (ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Northern Central America, Geological Society of America Special Paper*, 428, 21-36.
- Dolan, J.F., Mullins, H.T. and Wald, D.J. 1998. Active tectonics of the north-central Caribbean: Oblique collision, strain partitioning, and opposing subducted slabs. *Geological Society of America Special Paper*, 326, 1-61.
- Donnelly, T.W., 1989. Geologic history of the Caribbean and Central America. An Overview. In: Bally, A.W. and Palmer, A.R. (eds.), *The Geology of North America. Geological Society of America*, Boulder, Colorado, Vol. A, 299-321.
- Draper, G. and Lewis J.F. 1991. Geologic map of the Central Dominican Republic (1:150,000). In: Mann P., Draper G. and Lewis J.F. (eds.), *Geological and tectonic development of the North American-Caribbean plate boundary in Hispaniola. Geological Society America Special Paper*, 262.
- Ekström, G., Nettles, M. and Dziewonski, A.M. 2012. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9.
- Farr, T. G. Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45, 1-43., RG2004, doi: 10.1029/2005RG000183.
- García-Senz, J., Monthel, J., Díaz de Neira, J.A., Hernaiz Huerta, P.P., Calvo, J.P. and Escuder-Viruete, J. 2007. Estratigrafía del Cretácico Superior de la Cordillera Oriental de la República Dominicana. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (2), 269-291.
- García-Senz, J., Escuder-Viruete, J. and Pérez-Estaún, A. 2012. Map pattern and paleostress analysis of extensional faults deforming the Quaternary coral-reef deposits of the southeastern Dominican Republic: Implications for earthquake hazard. ePoster and Abstract in *AGU Fall Meeting*, San Francisco, publ. in: <http://fallmeeting.agu.org/2012/eposters/eposter/t41a-2568/>
- Granja Bruña, J.L., ten Brink, U.S., Carbó-Gorosabel, A., Muñoz-Martín, A., and Gómez Ballesteros, M. 2009. Morphotectonics of central Muertos thrust belt and Muertos Trough (northeast Caribbean). *Marine Geology*, 263, 7-33.
- Grindlay, N.R., Mann, P., Dolan, J. and van Gestel, J-P. 2005. Neotectonics and subsidence of the northern Puerto Rico-Virgin Islands Margin in response to the oblique subduction of high-standing ridges. In: Mann, P. (ed.), *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas, Geological Society of America Special Paper*, 385, 31-60.
- Hippolyte, J.-C., Mann, P., and Grindlay, N.R. 2005. Geologic evidence for the prolongation of active normal faults of the Mona rift into northwestern Puerto Rico. In: Mann, P. (ed.), *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas, Geological Society of America Special Paper*, 385, 161-171.
- IOC, IHO and BODC 2003. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.
- Jansma, P.E. and Mattioli, G. 2005. GPS results from Puerto Rico and the Virgin Islands: constraints on tectonic setting and rates of active faulting. In: Mann, P. (ed.), *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas, Geological Society of America Special Paper*, 385, 13-30.
- Larue, D.K. and Ryan, H.F. 1998. Seismic reflection profiles of the Puerto Rico trench: Shortening between the North American and Caribbean plates. *Geological Society of America, Special Paper*, 322, 193-210.
- Laó-Dávila, D.A. and Anderson, T.H. 2009. Kinematic analysis of serpentinite structures and the manifestation of transpression in southwestern Puerto Rico. *Journal of Structural Geology*, 31, 1472-1489.
- Ludwig, R., 1989. Double subduction beneath Hispaniola?. An investigation of earthquakes by body wave inversion. MSc thesis, Oregon State University, 88 p.
- McCann, W.R. 2006. Seismotectonics of south and western Puerto Rico: Muertos trough downgoing seismic zone and overriding plate seismicity. Informe inédito. USGS/NEHRP Final Technical Report, Grant Award N° 06HQGR0152, 17 págs.
- Manaker, D.M., Calais, E., Freed, A.M., Ali, S.T., Przybylski, P.,

- Mattioli, G., Jansma, P., Prépetit, C., and de Chabalière, J.B. 2008. Interseismic plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean. *Geophysical Journal International*, 174, 889–903.
- Mann, P., Draper, G. and Lewis, J.F. 1991. An overview of the geologic and tectonic development of Hispaniola. *Geological Society of America, Special Paper*, 262, 1-28.
- Mann, P., Taylor, F.W., Edwards, R.L., and Ku, T. 1995. Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: an example from the northeastern Caribbean plate margin. *Tectonophysics*, 246, 1–69.
- Mann, P., Calais, E., Ruegg, J.-C., DeMets, C., Jansma, P.E., and Mattioli, G.S. 2002. Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, 21 (6), 1057, doi:10.1029/2001TC001304.
- Mann, P., Hippolyte, J.-C., Grindlay, N.R., and Abrams, L.J. 2005a. Neotectonics of southern Puerto Rico and its offshore margin; active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas. In: Mann, P. (ed.), *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, The Virgin Islands, and Offshore Areas, Geological Society of America Special Paper*, 385, 173–214.
- Mann, P., Prentice, C.S., Hippolyte, J.-C., Grindlay, N.R., Abrams, L.J., and Laó-Dávila, D. 2005b. Reconnaissance study of late Quaternary faulting along Cerro Goden fault zone, western Puerto Rico. In: Mann, P. (ed.), *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas, Geological Society of America Special Paper*, 385, 115–137.
- Marrett, R. A., and Allmendinger, R. W. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data: *Journal of Structural Geology*, 12, 973-986.
- Masson, D.G. and Scanlon, K.M. 1991. The neotectonic setting of Puerto Rico. *Geological Society of America Bulletin*, 103 (1), 144-154.
- Mondziel, S., Grindlay, N., Mann, P., Escalona, A. and Abrams, L. 2010. Morphology, structure, and tectonic evolution of the Mona canyon (northern Mona passage) from multibeam bathymetry, side-scan sonar, and seismic reflection profiles. *Tectonics*, 29, 1-23.
- Nicol, A., Walsh, J.J., Villamor, P., Seebeck, H. and Berryman, K.R. 2010. Normal fault interactions, paleoearthquakes and growth in an active rift. *Journal of Structural Geology*, 32, 1101-1113.
- Pérez Estaún, A., Hernaiz Huerta, P.P., Lopera, E., Joubert, M. y grupo SYSMIN (Escuder-Viruete, J., Díaz de Neira, A., Monthel, J., García-Senz, J., Ubrien, P., Contreras, F., Bernárdez, E., Stein, G., Deschamps, I., García-Lobón, J.L. and Ayala, C). Geología de la República Dominicana: de la construcción de arcos-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero de España*, 118, (2), 157-173.
- Pindell, J.L. and Barrett, S.F. 1990. Geologic evolution of the Caribbean: A plate-tectonic perspective. In: Dengo, G. and Case, J.E. (eds.), *The Caribbean Region, The Geology of North America*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 405-432.
- Reid, J.A., Plumley, P.W. and Schellekens, J.H. 1991. Paleomagnetic evidence for late Miocene counterclockwise rotation of North Coast carbonate sequence, Puerto Rico. *Geophysical Research Letters*, 18, 565-568.
- Sacks, P.E. and Secor Jr., D.T. 1990. Delamination in collisional orogens: *Geology*, 18, 999-1002.
- Speed, R.C. and Larue, D.K. 1991. Extension and transtension in the plate boundary zone of the northeastern Caribbean. *Geophysical Research Letters*, 18, 573-576.
- Ten Brink, U. 2005. Vertical motions of the Puerto Rico trench and Puerto Rico and their cause. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-16.
- ten Brink, U.S., Marshak, S. and Granja Bruña, J.L. 2009. Bivergent thrust wedges surrounding island arcs: insights from observations and sandbox models of the northeastern Caribbean plate. *Geological Society of America Bulletin*, 121, 1522–1536.
- ten Brink, U.S., Bakun, W.H. and Flores, C. 2011. Historical perspective on seismic hazard to Hispaniola and the northeast Caribbean region. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1-15.
- ten Brink, U.S. and López-Venegas, A.M. 2012. Plate interaction in the NE Caribbean subduction zone from continuous GPS observations. *Geophysical Research Letters*, 39: doi: 10.1029/2012GL051485. issn: 0094-8276.
- Uyeda, S. and Kanamori, H. 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B3), 1049-1061.
- van Gestel, J.P., Mann, P., Dolan, J.F. and Grindlay, N.R. 1998. Structure and tectonics of the upper Cenozoic Puerto Rico-Virgin Islands carbonate platform as determined from seismic reflection studies. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B12), 30,505-30,530.
- van Gestel, J.P., Mann, P., Grindlay, N.R. and Dolan, J.F. 1999. Three-phase tectonic evolution of the northern margin of Puerto Rico as inferred from an integration of seismic reflection, well, and outcrop data. *Marine Geology*, 161, 257–286.
- Watts, A.B. and Talwani, M. (1974). Gravity anomalies seaward of deep-sea trenches and their tectonic implications. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 36, 57-90.

Recibido: abril 2015

Revisado: junio 2015

Aceptado: Agosto 2015

Publicado: septiembre 2017