

Análisis Morfotectónico de la Isla Puerto Rico, Caribe

Mario Octavio Cotilla Rodríguez*
Diego Córdoba Barba*

Abstract

Puerto Rico is a relatively small sub aerial exposure of the Greater Antilles Arc. New morphotectonic analyses indicate that Puerto Rico is an emergent and tectonically active macroblock at the northeast edge of the Caribbean-North American plate boundary. The delimited macroblock is asymmetric from the morphotectonic point of view, and consists of a northern mesoblock and a southern mesoblock. The northern mesoblock is larger and more tectonically active. The northern and southern mesoblocks include a total of 18 blocks, 31 microblocks and 55 nanoblocks. Ten major lineaments and 83 lineament intersections, 12 of which are the principal intersections, are identified within the northern and southern mesoblocks. The principal intersections are the most tectonically active part of the studied area, and indicate fault segmentation, block rotation and low seismic activity. All the quantitative and qualitative information and cartographic materials are on a GIS.

Key words: *Caribbean, morfotectonics, Puerto Rico.*

Resumen

Puerto Rico, la menor en cuanto a superficie territorial de las islas del arco de las Antillas Mayores, es un macrobloque emergido y activo del extremo nordeste de la zona límite de placas litosféricas Caribe-Norteamérica, por la metodología morfotectónica aplicada. El macrobloque delimitado es asimétrico desde el punto de vista morfotectónico y en su taxonomía incluye dos mesobloques, Septentrional y Meridional. El mesobloque Septentrional es el mayor y donde la actividad resulta ser significativamente más importante. Estas dos unidades territoriales incluyen un total de 18 bloques, 31 microbloques y 55 nanobloques. Entre las estructuras delimitadas se distingue un conjunto de 10 morfoalineamientos principales y un total de 83 intersecciones, pero sólo 12 de ellas se clasifican como intersecciones principales. Estas últimas son las áreas más activas del territorio y justifican la segmentación de

* Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica 1, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, España.

las fallas, la rotación de las estructuras y la actividad sísmica de baja energía. Toda la información, cuantitativa y cualitativa, y los esquemas y mapas obtenidos están en un SIG.

Palabras clave: *Caribe, morfotectónica, Puerto Rico.*

Introducción

Las investigaciones realizadas en el campo morfotectónico con la metodología de Rantsman (1979) en los últimos años han estado dirigidas al Caribe Norte (Figura 1A), concretamente a sus islas. En este sentido están los siguientes resultados de: 1) la parte occidental de Cuba (Díaz, 1985), 2) la parte oriental de Cuba (Hernández *et al.*, 1990), 3) La Española (Cotilla *et al.*, 2007, 1997), 4) Cuba (González *et al.*, 2003), 5) Jamaica (Cotilla y Córdoba, 2009). Así que sólo resta en esa relación Puerto Rico [PR] y éste resulta ser ahora nuestro objetivo (Figura 1B). Además, con todo este terreno recorrido es posible realizar una comparación, breve y objetiva, de las características morfotectónicas de las distintas zonas estudiadas.

Se puede asegurar que los métodos estructuro-morfoestructurales permiten determinar el carácter diferenciado de la evolución neotectónica de las morfoestructuras de un territorio y del desarrollo heterogéneo de sus complejos morfoestructurales, hasta la determinación en el relieve, de los elementos estructuro-tectónicos y de las deformaciones de los niveles geomorfológicos (incluidas las superficies de planación). De esa forma es factible delimitar tres importantes conjuntos bajo un prisma morfocronológico: 1) las unidades territoriales [UT] o unidades morfotectónicas, 2) los elementos lineales o alineamientos (morfoalineamientos), que son los límites principales de las UT, 3) las intersecciones de esos alineamientos. Evidentemente, todos ellos están interrelacionados y jerárquicamente organizados.

Alekseevskaya *et al.* (1977) demostraron que el conocimiento morfotectónico es muy importante para el estudio de muchos problemas geofísicos y de hecho Cotilla y Córdoba (2003) lo comprobaron en Galicia. También con el análisis morfoestructural se pueden elaborar criterios interdisciplinarios para la determinación de las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de terremotos fuertes (Bhatia *et al.*, 1992; Chigariov, 1977; Gorshkov *et al.*, 2009, 2004; Krestnikov, 1979; Krestnikov *et al.*, 1992; Liu *et al.*, 1999; Zhidkov *et al.*, 1975). Así se ha puesto de manifiesto la existencia del sistema morfoestructura —movimientos tectónicos recientes— sísmicidad (Dumitrashko y Lilienberg, 1954; Gorielov *et al.*, 1973) y definido la estructura general de una investigación morfoestructural (Cotilla *et al.*, 1997). Sin embargo, éste no es el objetivo del trabajo, ya que esas zonas sismoactivas principales están, para el caso de PR, en la zona marítima (Clinton *et al.*, 2006; Cotilla *et al.*, 1997A).

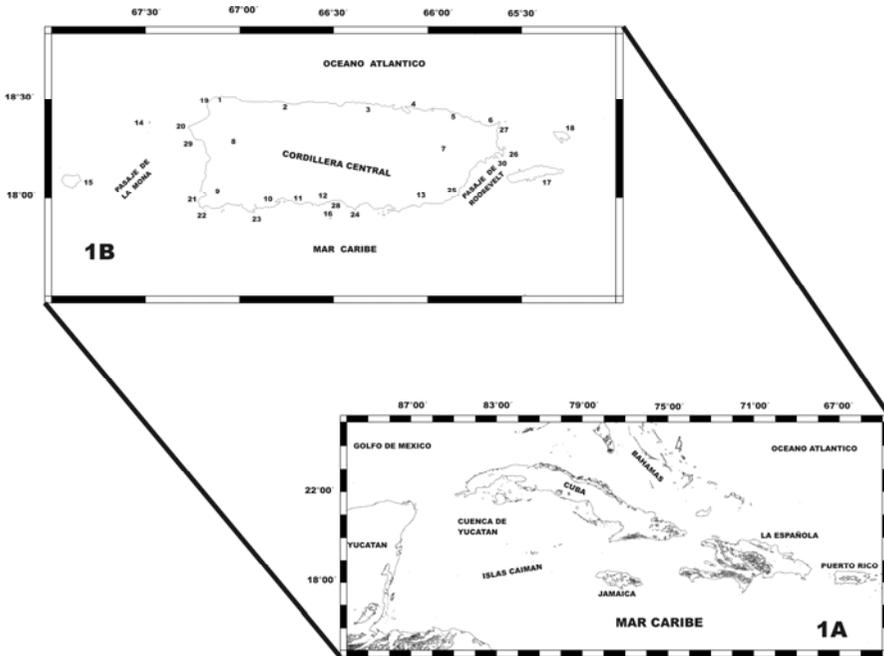


Figura 1A. Esquema de las Antillas Mayores.

Aparecen las islas: 1= Cuba, 2= Jamaica, 3= La Española, 4= Puerto Rico

Figura 1B. Puerto Rico.

Aparecen las: A) localidades (1= Aguadilla, 2= Arecibo, 3= Bayamón, 4= San Juan, 5= Carolina, 6= Fajardo, 7= Caguas, 8= Mayagüez, 9= Guánica, 10= Guayanilla, 11= Playa de Ponce, 12= Ponce, 13= Guayama); B) islas (14= Desecheo, 15= La Mona, 16= Caja de Muertos, 17= Vieques, 18= Culebra); C) puntas (19= Borinquen, 20= Higüero, 21= Melones, 22= Jagüey, 23= Brea, 24= Petrona, 25= Quebrada Honda, 26= Puerca, 27= Gorda, 28= Carenero, 29= Cadena, 30= Algodones).

La actualidad y la validez de las investigaciones morfotectónicas está, con este enfoque, sustentada y demostrada con los siguientes resultados: Alekseevskaya *et al.* (1977), Arzovsky y Hadzievsky (1970), Assinovskaya y Solovyev (1994), Bhatia *et al.* (1992), Cisternas *et al.* (1985), Cotilla y Córdoba (2009, 2009a, 2004, 2004a, 2003), Cotilla *et al.* (2007, 2004), Gatinsky y Rundquist (2004), Gorshkov *et al.* (2009, 2004, 2000), Guerasimov (1973, 1946), Guerasimov y Rantsman (1973), Gvishiani *et al.* (1987), Hernández *et al.* (1990), Rantsman (1979, 1961), y Schenkova *et al.* (1995). Es importante indicar que en ninguno de estos trabajos se ha pretendido encontrar elementos de la dinámica de placas y de la evolución geotectónica regional. Por lo que tampoco ése será objetivo en el presente trabajo.

PR (Figura 1B) es un archipiélago que incluye a las siguientes islas: Caja de Muertos, Culebra, Desecheo, Mona, PR, y Vieques; aunque se le conoce al conjunto como isla de PR por ser la mayor, y así nos referiremos aquí. Las características físico-geográficas de PR pueden localizarse en Abbad (1970), y Picó (1975). En este sentido es posible conocer que PR es una isla del nordeste del Caribe y uno de los cuatro componentes del arco de las Antillas Mayores (Cuba, Jamaica, La Española, y PR) (Figura 1A). Su superficie territorial, para una Figura rectangular en el sentido latitudinal, es de 9,104 km². Ella tiene una longitud de ~178km y un ancho de ~64km. Su relieve se caracteriza por ser de tipo montañoso, que ocupa ~40% de su superficie. Las elevaciones más importantes están en la Cordillera Central (Cerro de la Punta con 1,338m y Monte Jayuya con 1,310m). El resto de la superficie son 35% de alturas y 25% de llanuras. La línea de costa tiene 501km de longitud y poca sinuosidad. Su localización espacial es al este de la República Dominicana (parte oriental de La Española) y al oeste de las Islas Vírgenes, en los 18°15'N y 66°30'O.

Geología y tectónica

Datos sobre la geología y la tectónica de PR se encuentran en los siguientes trabajos: Berkey (1915), Bunce y Fahlquist (1962), Burke *et al.* (1984), Briggs y Akers (1965), Byrne *et al.* (1985), Calais *et al.* (2002), Case y Holcombe (1980), Case *et al.* (1984), Deng y Sykes (1995), Dolan *et al.* (1998), Dixon *et al.* (1998), Horsfield (1975), Jansma *et al.* (2000); Kaye (1959), Ladd *et al.* (1990), Larne y Ryan (1990), Larue (1994), Lewis y Drapper (1990), Mann y Burke (1984), Mann *et al.* (2002, 1995, 1984a), Masson y Scanlon (1991), Meyerhoff (1933), Mitchell (1954), Molnar y Sykes (1969), Monroe (1980, 1980a, 1976), Moussa *et al.* (1987), Müller *et al.* (2000), Rona (1980), Schwab *et al.* (1991), Speed y Larue (1991), Stein *et al.* (1988), Sykes *et al.* (1982), Taber (1922), van Gestel *et al.* (1999, 1998), Westbrook *et al.* (1973), y Zapp *et al.* (1948).

PR, desde el punto de vista tectónico, está ubicada en la placa del Caribe (Figura 2A), concretamente en el extremo nortoriental. En su entorno hay dos importantes fosas oceánicas al Norte la homónima (-8,340m) que la separa del Océano Atlántico y al Sur la fosa de Muertos (~-5,600m), en el Mar Caribe. La primera tiene una edad aproximada de 100Ma, y también se caracteriza por altos valores negativos de anomalías de aire libre de la gravedad (-380mGal). En la fosa de Muertos hay una ligera subducción de la corteza oceánica de la cuenca de Venezuela bajo la región La Española-PR. En el arco de las Antillas Menores, al este de PR, se ha determinado un nítido perfil de subducción (Westbrook *et al.*, 1973). Al norte de PR está la placa de Norteamérica que también subduce, pero en la fosa de PR.

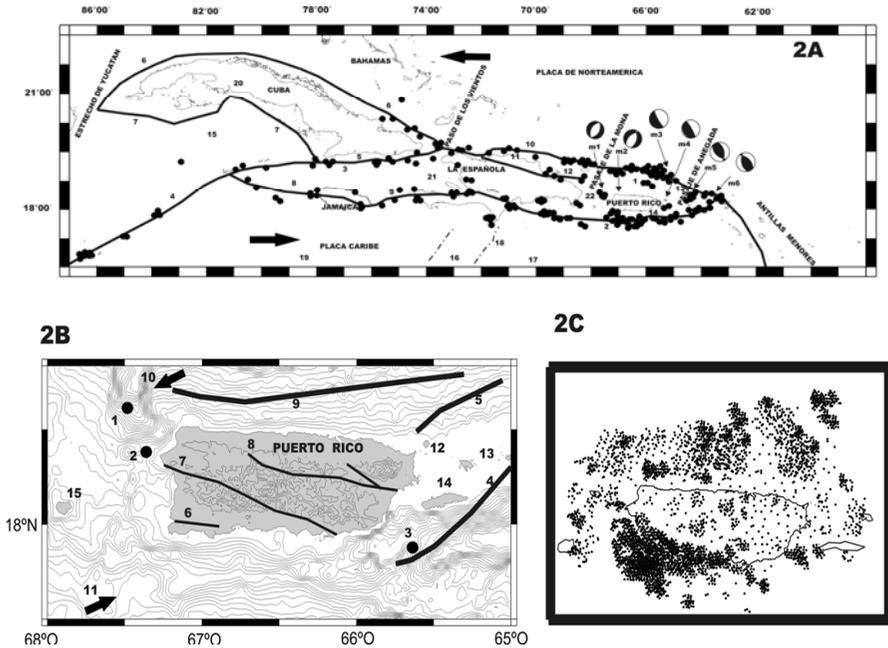


Figura 2A. Esquema tectónico del Caribe.

Aparecen: A) fosas (1= Puerto Rico, 2= Muertos, 3= Oriente); B) fallas [líneas negras gruesas] (4= Swan, 5= Oriente, 6= Nortecubana, 7= Surcubana, 8= Walton, 9= Enriquillo - Plantain Garden, 10= Norte de Haití, 11= Septentrional, 12= Sur de la Bahía de Samaná, 13= Frente de la Fosa de Puerto Rico, 14= Frente de la Fosa de Muertos); C) cuencas (15= Yucatán, 16= Colombia, 17= Venezuela); D) crestas y elevados (18= Beata, 19= Nicaragua); E) microplacas (20= Cubana, 21= Gonave, 22= La Española - Puerto Rico); F) epicentros de terremotos [círculos negros]; G) mecanismos focales [m1]; H) flechas gruesas negras [sentido del desplazamiento de las placas].

Figura 2B. Esquema del contexto geodinámico de Puerto Rico.

Aparecen: A) epicentros de terremotos [círculos negros] (1= 1943 [M7.5], 2= 1918 [M7.3], 3= 1867 [M7.3]); B) Fallas [líneas negras] (4= Depresión de Anegada, 5= Zona Sísmica del Sombrero, 6= Lajas, 7= Gran Zona de falla del sureste, 8= Gran Zona de falla del Norte, 9= Zona de fallas 19°N); Vectores de desplazamiento (según Jansma *et al.*, 2000) [flechas negras] (10= 2.4 mm/año, 11= 16.9 mm/año); Islas (12= Cayo Hicacos - Farallones, 13= Culebra, 14= Vieques, 15= Mona).

Figura 2C. Sismicidad de Puerto Rico.

A partir de los datos de la Red Sísmica de Puerto Rico (01.1986 – 03.2006).

Concretamente, los datos de Jansma *et al.* (2000), a partir de medidas con GPS, para el movimiento del segmento PR - Islas Vírgenes de la placa del Caribe relativo a la placa de Norteamérica es de dirección N70°E con una velocidad de 16.9mm/año (Figura 2B). Masson y Scanlon (1991) han determinado que en la fosa de PR la parte sur de la corteza oceánica de la placa de Norteamérica está fuertemente deformada y hundida en sistemas de horts y graben. Esto demuestra que aunque el movimiento es fundamentalmente de tipo lateral izquierdo existe una ligera componente de subducción.

De otra parte, la Figura 3 de Masson y Scanlon (1991) ilustra muy bien el contexto tectónico de PR, donde se diferencian seis provincias marinas. Un poco más al Oeste, en La Española, los datos muestran que esta última tiene un movimiento de dirección N80°E y una velocidad de 17mm/año respecto a la placa de Norteamérica. Es decir, que existe una apreciable diferencia cinemática en segmentos litosféricos adyacentes. Esta diferencia se puede explicar a partir del muy distinto frente de interacción Norte, la Plataforma de Bahamas y la fosa de PR, respectivamente. De forma similar Cotilla *et al.* (1991) argumentaron las diferencias de las partes septentrionales de Cuba Central y Cuba Oriental para justificar los límites de los macrobloques.

En el Caribe se han propuesto diversos modelos tectónicos, pero los más significativos resultan ser los que emplean estructuras de microplacas y bloques (Byrne *et al.*, 1985; Jansma *et al.*, 2000; Levchenko y Riabujin, 1971; Mann *et al.*, 1995; Masson y Scanlon, 1991; Ushakov *et al.*, 1979). Así están las microplacas Cubana, Gonave y La Española - PR (Figura 2A). También se ha considerado que La Española y PR están en bloques diferentes, pero su límite es ambiguo hasta el momento, aunque se sitúa en el Pasaje de la Mona. No obstante, PR puede entenderse como una entidad tectónica diferenciada del contexto Norte caribeño (Figura 2B). Concretamente, al norte de PR, en la fosa homónima, se determina con mucha precisión un proceso de subducción oblicua de la placa de Norteamérica hacia la placa del Caribe (focos sísmicos de $h > 150\text{km}$). Mientras que al sur, en la fosa de Muertos hay una subducción débil-incipiente (o relict) de la corteza oceánica de la cuenca de Venezuela bajo la antes mencionada microplaca. Está determinado que el nivel de actividad sísmica es diferente en ambos frentes, siendo más activo el Norte, donde colisionan las placas del Caribe y de Norteamérica.

Puerto Rico y las Islas Vírgenes están situadas en un arco de islas del Cretácico – Terciario Temprano. Ellas están cubiertas por una plataforma carbonatada del Oligoceno Tardío que fue depositada de forma horizontal y en aguas poco profundas; pero que en la actualidad tiene una inclinación al Norte de 4° aproximadamente, y alcanza profundidades de 4,000m en una extensión lineal de unos 200km. Esta plataforma tiene dos particularidades: 1) la parte septentrional

tiene grandes áreas de derrumbamientos y deslizamientos en dirección a la fosa (zona tectónicamente inestable). Sin embargo, en la zona insular emergida de PR se eleva hasta unos 140m, donde tiene un definido perfil en escalera; 2) la segunda particularidad es la diferenciación lateral hacia el Este (Islas Vírgenes) y al Oeste (La Española). En las Islas Vírgenes, la plataforma es aproximadamente horizontal y está muy cercana a la superficie del mar; mientras que hacia La Española está muy fallada y deformada, que es el área más activa del sector Norte caribeño.

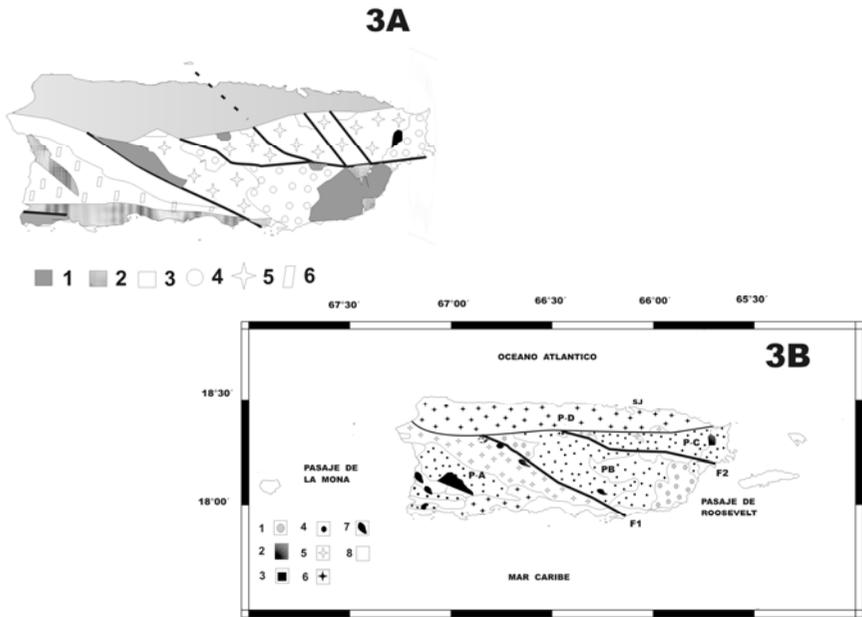


Figura 3A. Esquema geológico de Puerto Rico. Aparecen: 1) rocas intrusivas del Cretácico sin diferenciar, 2) rocas y sedimentos post-Eoceno, 3) rocas ígneas y sedimentarias del Eoceno, 4) rocas estratificadas del Cretácico Inferior, 5) rocas estratificadas del Cretácico Superior, 6) rocas del Cretácico sin diferenciar. Las líneas negras corresponden a fallas.

Figura 3B. Esquema de las Provincias Tectónicas de Puerto Rico (de acuerdo con Briggs y Akers, 1965). Aparecen: 1) las provincias: P-A= Ignea del suroeste, P-B= Ignea central, P-C= Ignea del nordeste, P-D= Terciario Medio y rocas sedimentarias; 2) las fallas (líneas negras gruesas [F1, F2]); 3) SJ= localidad de San Juan; 4) litología: 1= Intrusitas (Cretácico), 2= Intrusitas (Terciario Temprano), 3= Rocas estratificadas (Cretácico Superior), 4= Rocas estratificadas (Cretácico Inferior), 5= Rocas estratificadas (Eoceno), 6= Rocas sedimentarias (Terciario Medio – Reciente), 7= Serpentinitas y metabasitas, 8= Sedimentos (Reciente).

Es posible sostener que desde el Eoceno PR y las Islas Vírgenes están sometidas a un desplazamiento lateral izquierdo por la movilidad de las placas de Norteamérica y del Caribe. Esas islas están en una zona de complejas deformaciones tectónicas de aproximadamente 300km de ancho. En ella hay elementos de tipo extensivo, como fosas oceánicas y depresiones marinas, y elementos compresivos, como cadenas de montañas submarinas. La mencionada movilidad de las placas es aún difícil de comprender completamente, ya que hay acomodación del desplazamiento lateral izquierdo en la zona del Norte con la fosa de PR y en la zona del Sur con la subducción en la fosa de Muertos. Además, entre PR y las Islas Vírgenes se determina un movimiento extensional en el Pasaje de Anegada, que se ha considerado como una estructura de tipo *pull-apart*. Así este segmento litosférico activo está enmarcado en la denominada zona límite de placas [ZLP] Caribe-Norteamérica con una densidad de terremotos muy elevada y con la posibilidad de generar tsunamis.

El mapa geológico de PR incluye distintos tipos de rocas y algunas de sus principales estructuras de fallas. Así, en el esquema que se presenta en la Figura 3A aparecen en la parte central del territorio (3/4 partes del total de la superficie) rocas del Cretácico al Eoceno de los tipos: volcánicas, plutónicas (cuarcitas y granodioríticas), y metamórficas (serpentinitas), ígneas y sedimentarias. En ese sector se localiza la mayor cantidad de fallas, principalmente normales y transcurrentes. Pero todas ellas de dimensiones mucho menores que las estructuras disyuntivas marinas ya comentadas. Es en el sector medio insular donde está emplazada la Cordillera Central. Mientras que en las partes del Norte y del Sur, colindantes con la línea de costa, aparecen en sucesión unas bandas latitudinales estrechas e irregulares, la mayor parte de las veces en forma discontinua, de rocas del Mioceno al Cuaternario. Destacándose en la parte suroccidental los sistemas de terrazas con las calizas de la Formación Ponce, mientras que al Norte predomina, en su parte occidental, la Formación Quebradillas, también de calizas. De otra parte, la sucesión de Formaciones calcáreas del Mioceno está mejor definida y conservada en el segmento septentrional de la isla. Entre ellas están: 1) los Miembros: Guajataca, Río Indio y Montebello; 2) las Formaciones: Arenas Quebradas, Cibao, Guanajibo, Aguada y Ayamón. Todos los valles fluviales está rellenos de depósitos aluviales de diversa granulometría y espesor. Desde aproximadamente la mitad septentrional costera y hacia el Este hay grandes áreas de depósitos de playas y ciénagas.

Una interpretación inicial y somera del mapa geológico, permite sostener que PR es una estructura emergida del arco nortecaribeño, que tiene su núcleo de rocas antiguas sometido a movimientos de ascensos diferenciales. Destacándose en ese sector, varios conjuntos aislados de superficies de cimas (o superficies de planación) deformadas que configuran un sistema de escalera, que empalman a su

alrededor, en niveles altimétricos inferiores, con las rocas más jóvenes y menos deformadas. Esto se corresponde con un modelo de evolución en bloques descrito por Krestnikov (1987) y Jain (1980).

Los especialistas Briggs y Akers (1965) sostienen que PR tiene cuatro grandes zonas o provincias tectónicas: 1) Ignea del suroeste, 2) Ignea central, 3) Ignea del nordeste; 4) Terciario Medio y rocas sedimentarias jóvenes (Figura 3B). Las tres primeras zonas tienen una definida direccionalidad al NO, y la cuarta está localizada en la parte septentrional y costera, con Figura rectangular, donde aparecen muy bien desarrolladas las terrazas marinas. Los límites entre esas zonas no están siempre bien definidos ni son continuos. En general, las estructuras disyuntivas en la zona insular emergida nunca son extensas. En otras palabras, PR está compuesta de rocas volcánicas y plutónicas del Cretácico y del Eoceno, que están cubiertas por calizas del Oligoceno y depósitos aluviales recientes. En ese marco o fundamento se desarrolla el relieve, en el que Masson y Scanlon (1991) determinaron indicadores de la actividad reciente del movimiento de las placas. Posteriormente, Hernández *et al.* (2002) realizaron un estudio del relieve costero y submarino de las islas PR y Culebra, donde confirman que hay un sistema de fracturas direccionales que son producto de la colisión de las placas inmediatas.

Sismicidad

Las características de la sismicidad de PR y su entorno se localizan principalmente en: Asencio (1980), Clinton *et al.* (2006), Díaz Hernández (1985), Dolan *et al.* (1998), Dudleye y LeeMin (1998), Fielding y Taber (1919), Grindlay *et al.* (2005), Kafka y Weiden (1979), Kelleher *et al.* (1973), Lander y Locknidge (1989), McCann (2000), McCann y Pennigton (1990), McCann y Sykes (1984), Pacheco y Sykes (1992), Panagiotopoulos (1995), Prentice *et al.* (2000), Prentice y Mann (2005), Reid y Taber (1919), Reyes (1977), Rubio (1982), Shepherd y Lynch (1992), Sykes y Seeber (1985), Sykes y Ewing (1965), United States Geological Survey (2009), y United States Geological Survey Catalog (1984-1988).

Sobre esa base se puede decir que PR está en las inmediaciones de la ZLP del nordeste Caribe-Norteamérica (Figura 2A). En ella la sismicidad es destacada y se conocen tanto terremotos históricos como del periodo instrumental (Tabla 1), incluso algunos de ellos con tsunamis asociados. A muchos de los terremotos, todos en las zona marítima, ha sido factible determinarles un mecanismo focal. Y dada su inmediata cercanía a las Islas Vírgenes y La Española, los eventos sísmicos fuertes de esas zonas también afectan a PR como se indica en la Tabla 2. De acuerdo con esas fuentes antes relacionadas, en PR y su entorno inmediato, los datos por intervalo temporal de la ocurrencia de terremotos fuertes muestran lo siguiente: 1615-1787= 5, 1824-1890= 16, 1902-1987= 18. Esto da una proporción de años /

terremotos fuertes de: $172 / 5 = 34.4$, $66 / 16 = 4.1$ y $85 / 18 = 4.7$, respectivamente. Es decir, que con el transcurso del tiempo se ha prestado más atención a los terremotos y esto, evidentemente está relacionado con el poblamiento y las inversiones en infraestructuras. Además, se puede asegurar que PR está sujeta a un peligro mayor por tsunamis que cualquier otra zona del Caribe; sin embargo, los terremotos más fuertes se han producido históricamente en las inmediaciones de Haití y del norte de la República Dominicana.

Tabla 1
Terremotos más significativos y fuertes de Puerto Rico

<i>Nº</i>	<i>Fecha</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Localidad</i>	<i>Tsunami</i>
1	1670	8.0	San Germán	-
2	02.05.1787	8.0	Fosa de Puerto Rico	-
3	18.11.1867	7.3	Pasaje de Anegada	SI
4	11.10.1918	7.3	Pasaje de la Mona-Aguadilla	SI

Tabla 2
Terremotos de las Islas La Española y Vírgenes que han afectado a Puerto Rico

<i>Nº</i>	<i>Fecha</i>	<i>Isla</i>
1	08.09.1615	(M~8.0) La Española
2	20.04.1824	Santo Tomás
3	18.11.1867	Santo Tomás-Santa Cruz
4	17.09.1869	Santo Tomás
5	28.07.1943	Pasaje de la Mona
6	04.08.1946	(M~7.8) La Española

Empleando los datos del periodo 01.1986-03.2006 de la Red Sísmica Nacional se observa que el mapa de PR y su entorno inmediato están cubiertos prácticamente por epicentros (~15,000) (Figura 2C). En el mapa predominan focos sísmicos con profundidades inferiores a 120km en la parte central. Esta significativa densidad epicentral se debe, principalmente, al importante número de estaciones sísmicas de la red de PR, que se diferencia en mucho del resto del arco caribeño, en cuanto a cantidad de equipos, calidad y eficiencia. También se identifica, muy bien, una zona con la mayor agrupación epicentral, todos superficiales, localizada en la parte sur-suroeste de PR. No obstante, la mayor cantidad de terremotos está en la zona septentrional, específicamente en las inmediaciones de la fosa de PR. Así, parece que se confirman las propuestas de Cotilla *et al.* (1977A) en cuanto a los potenciales sísmicos del Caribe Norte y que las principales estructuras sismogénicas son de tipo marino. También está determinada, con gran fiabilidad, la diferencia de la aceleración pico de la gravedad en PR. Así hay en ella dos partes o zonas, occidental y centro-oriental, con valores respectivos de 2.4-3.2 y 1.6-2.4m/s².

Morfotectónica

Materiales y métodos

Toda la metodología morfotectónica y ejemplos de su aplicación aparecen en los trabajos citados en la Introducción del norte del Caribe, y también en Cotilla y Córdoba (2004, 2003), y Cotilla *et al.* (2007, 2004). No obstante, aquí se presenta un resumen de la metodología que facilita al lector la comprensión del trabajo. Además, con la metodología que los autores han aplicado en Cuba, La Española, la Península Ibérica y Jamaica se ha comprobado que el control tectónico puede ser ejercido de dos formas, no necesariamente excluyentes, en el desarrollo de los sistemas fluviales: 1) tectónica activa (fallas y basculamiento del terreno), 2) tectónica pasiva (control estructural).

Se puede asegurar que los criterios y los principios de la clasificación morfoestructural son numerosos y diversos. Ellos permiten el análisis e interpretación: 1) de mapas topográficos a escala: a) grande (1:50,000-1:100,000) y de las fotos aéreas, b) escala media y pequeña (1:500,000-1:1,000,000) y de las imágenes y fotos satelitarias; 2) de mapas batimétricos; 3) morfométrica del relieve (a partir de la confección de los mapas o esquemas: hipsométrico, de cotas máximas y cotas mínimas, disección vertical y horizontal, ángulos de pendientes (medios y máximos), intensidad potencial de la erosión fluvial, mofoisohipsas, isobasitas, diferencia de isobasitas, etc. (Jain, 1980; Nikolaev, 1982); 4) de los elementos lineales del relieve a diferentes escalas (dirección y magnitud); 5) de la red hidrográfica (ríos, divisorias y cuencas); 6) de las características geológicas, tectónicas y geofísicas (incluyendo la sismicidad). Cotilla *et al.* (1991) recomienda emplear además los métodos: a) Fluviales (Cox, 1994; Filosofov, 1960; Hack, 1973; Korzhuev, 1979; Merritts y Herterbergs, 1994; Sherve, 1966; Strahler, 1957) {A) El coeficiente de sinuosidad, K_s (relación entre la medida recta y la medida curva de los elementos lineales del relieve [ríos, divisorias de agua, etc.); B) El factor de cambio significativo de pendiente en las cuencas y los ríos, FC_{cf} ; C) El índice de simetría/asimetría de las cuencas fluviales por sus divisorias y por el curso fluvial, IS_{cf} / IAS_{cf} ; D) El índice de la forma y orientación de las cuencas, IF_{cf} / IO_{cf} ; 5) El factor de cambio espectral de las cuencas F_{ccc} }; b) Hipsométrico-Fluviales {A) La intensidad potencial de la erosión fluvial, IPEF; B) El índice de altitud / número de intersecciones de ríos, I_{ai} ; C) El índice de orientación / longitud de río, I_{oi} ; D) El vector de asimetría de la cuenca de drenaje ($T=Da / Dd$); E) El índice del gradiente de la corriente principal [$SL=(\Delta H / \Delta L) L$]}. Aquí se determina no sólo el gradiente de los movimientos neotectónicos verticales y la influencia de los procesos exógenos (Cotilla *et al.*, 1997; Hernández *et al.*, 1990), sino que también es factible distinguir las tres categorías principales y jerarquizadas del relieve considerados en la metodología morfotectónica: 1) Unidades Territoriales (bloques de distinto rango); 2) Zonas limitrofes entre

ellas (morfoalineamientos); 3) Lugares de interacción entre los morfoalineamientos (intersecciones).

Todo el conjunto de métodos se ha implementado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Cotilla y Córdoba, 2003). Este sistema se ha probado en las investigaciones realizadas por los autores en Cuba, España, Jamaica y La Española.

Resultados

Mapas y esquemas

Los resultados principales del trabajo están agrupados fundamentalmente en dos conjuntos de mapas y esquemas: 1) Geomorfológicos: corrientes fluviales y sus divisorias principales, cuencas fluviales, hipsométrico, pendientes medias, disección vertical, disección horizontal, intensidad potencial de la erosión fluvial, morfoisohipsas, superficies básicas, superficies de cimas, alineaciones del relieve, y fracturación; 2) Morfoestructurales: unidades territoriales, zonas de alineamientos e intersecciones principales. Todos estos materiales ayudan, junto con los índices geomórficos, en la determinación de la influencia de la litología y las formas del relieve con las afectaciones tectónicas y climáticas. Ellos son una herramienta sencilla y útil, pero sobre todo de rápida aplicación, de la Geomorfología Tectónica. En particular, los índices geomórficos se pueden obtener a partir de mapas topográficos y fotos aéreas, además con trabajos de campo.

Concretamente, los mapas hipsométrico y de intensidad potencial de la erosión fluvial indican que PR tiene un relieve con estructura de bloques. Mientras que los mapas de pendientes medias y de disección vertical y disección horizontal, además de confirmar lo anterior, muestran que el relieve es más enérgico en la parte central y sur de la isla, y que los contrastes altimétricos más significativos se encuentran en los límites de los bloques. Además, el conjunto de estos métodos demuestra que hay asimetría transversal del relieve y que en él predominan los alineamientos del NE, NO y E-O.

Además, dada la poca dimensión superficial de la isla de PR se ha determinado, en las tres generalizaciones realizadas de morfoisohipsas, la existencia de: 1) un macrobloque a partir de los 10m de altitud; 2) un bloque central con valor altimétrico desde los 500m y que se corresponde prácticamente con la Cordillera Central; 3) cinco bloques de 700m y 900m; y 4) diversas fracturas del relieve, todas de poca extensión. Los límites del macrobloque están en la parte marina y comprenden a zonas activas regionales, donde se generan los terremotos más importantes de la región. Ninguna de estas grandes fallas cruza el territorio de PR, como son los casos de Jamaica y La Española.

El mapa de cantidad de alineaciones y fracturas (Figura 4A) muestra la diferenciación del relieve y la tendencia en dirección de las zonas al E-O (Figuras 4D y 4E) y NE (Figuras 4F y 4G). En específico, las áreas de mayores valores están localizadas en dos zonas del: 1) Oeste (en el extremo Oeste-suroeste de la Cordillera Central, coincidiendo con las Montañas de Uroyan donde hay una gran cantidad de desprendimientos de bloques) (Figura 4B), 2) Este (al nordeste de la Cordillera Central, coincidiendo con la Sierra de Luquillo). Concretamente, en el norte de la Cordillera Central hemos determinado: 1) una falla entre Maricao e Indiera Alta. Esta zona coincide con la rama SO de la cuenca N2 (Río Grande de Añasco) y se observan en las deformaciones transversales a dos afluentes (Río Guaba y Río Prieto) de dirección S-N. Además, desvía todas las alineaciones fluviales N-S de la cuenca N1 (Río Guanajibo), y en particular a su vertiente norte (en Sabana Grande); 2) cortes en varias pequeñas fallas de dirección N-S que alteran la DPPO en el norte de Susúa; 3) una falla E-O que modifica el curso del río Loco en su mitad inicial (cuenca S10); 4) en varios afloramientos en Indiera Alta se han cartografiado dos familias de fallas (108° SE - 286° NO y 116° SE- 294° NO) subordinadas a la falla principal de dirección E-O (Figura 4C).

El resultado del estudio detallado de las fracturas en las rocas de los bloques de PR aparece en la Tabla 3. De esta Tabla 3 es factible colegir que el fracturamiento es diverso, y que predominan las direcciones NE, NO y E-O. Mientras que las Figuras 5A, 5B y 5C muestran las direcciones medias determinadas en las cuencas fluviales, los microbloques y los nanobloques, respectivamente. En todos los casos prevalecen las tres direcciones antes indicadas. Además, al comentar sobre la Figura 4A se mostró la existencia de dos zonas de máximos valores de la fracturación, y ahora se añade que éstas se corresponden con dos pares de bloques. Estos bloques están vinculados con los extremos occidental y oriental de la Cordillera Central y con áreas de importantes valores de ascensos neotectónicos (Figura 5D) donde hay predominio de valles fluviales encajados y saltos de agua, no vinculados con la litología.

De otra parte, la configuración de las dos islas inmediatas al este de la isla de PR, Vieques y Culebra es totalmente diferente. La isla de Vieques tiene forma rectangular estrecha y compacta con un ligero arco convexo al Norte, mientras que la Culebra es prácticamente cuadrada y está fragmentada en al menos tres cayos o islotes. Además, las direcciones principales del fracturamiento en ellas también son diferentes; así en Vieques es predominantemente del NE y en Culebra del NO. Todo esto puede confirmar la tendencia a un desplazamiento antihorario de la región propuesto por Masson y Scalón (1991).

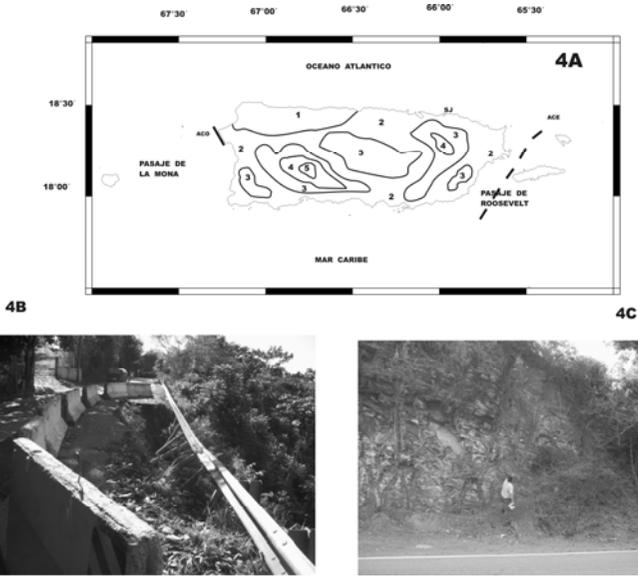


Figura 4A. Mapa de cantidad de alineamientos de Puerto Rico
 Cálculos para las zonas de alineamientos de $L > 2 \text{ km/km}^2$: $1 = [0-4) < 2 = (4-8) < 3 = (8-11) < 4 = (11-15) < 5 = (>15)$.

Figura 4B. Foto de desprendimientos en la localidad de Maricao (adyacente al río Guaba, afluente del río Grande de Añasco = cuenca N2).

Figura 4C. Ejemplo de lugar de mediciones en la localidad de Indiera Alta.



Figura 4D. Alineación E-O entre Río Grande y Fajardo (NE de Puerto Rico).

Figura 4E. Alineación E-O en Jayuya, norte de la Cordillera Central.

Figura 4F. Escarpe en Caguas.

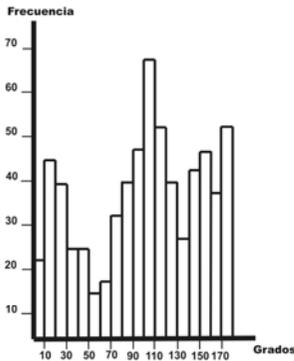
Figura 4G. Escarpe en Indiera Alta, Cordillera Central.

Tabla 3
Fracturas en los bloques

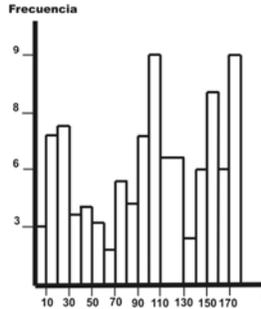
<i>Bloque</i>	<i>Longitud de fracturas</i>		
	$\geq 2 \text{ km}$	$\geq 5 \text{ km}$	$\geq 10 \text{ km}$
B1	$0^\circ - 10^\circ = 20$	$0^\circ - 10^\circ = 11$	$0^\circ - 10^\circ = 5$
	$40^\circ - 50^\circ = 11$	$40^\circ - 50^\circ = 2$	$80^\circ - 90^\circ = 2$
	$70^\circ - 80^\circ = 10$	$70^\circ - 80^\circ = 3$	
	$80^\circ - 90^\circ = 10$	$80^\circ - 90^\circ = 5$	
B2	$70^\circ - 80^\circ = 30$	$70^\circ - 80^\circ = 10$	$70^\circ - 80^\circ = 3$
	$80^\circ - 90^\circ = 25$	$80^\circ - 90^\circ = 7$	$80^\circ - 90^\circ = 3$
	$90^\circ - 100^\circ = 25$	$90^\circ - 100^\circ = 5$	$90^\circ - 100^\circ = 1$
	$110^\circ - 120^\circ = 10$		
B3	$70^\circ - 80^\circ = 6$	$70^\circ - 80^\circ = 3$	$70^\circ - 80^\circ = 1$
	$80^\circ - 90^\circ = 6$	$80^\circ - 90^\circ = 2$	
B4	$0^\circ - 10^\circ = 5$	$0^\circ - 10^\circ = 1$	$80^\circ - 90^\circ = 2$
	$70^\circ - 80^\circ = 10$	$70^\circ - 80^\circ = 5$	
	$80^\circ - 90^\circ = 10$	$80^\circ - 90^\circ = 6$	
	$90^\circ - 100^\circ = 8$	$90^\circ - 100^\circ = 8$	
	$170^\circ - 180^\circ = 5$	$170^\circ - 180^\circ = 1$	
B5	$0^\circ - 10^\circ = 6$	$0^\circ - 10^\circ = 1$	$70^\circ - 80^\circ = 2$
	$70^\circ - 80^\circ = 11$	$70^\circ - 80^\circ = 6$	
	$80^\circ - 90^\circ = 9$	$80^\circ - 90^\circ = 3$	
	$90^\circ - 100^\circ = 7$	$90^\circ - 100^\circ = 1$	
	$170^\circ - 180^\circ = 5$	$170^\circ - 180^\circ = 1$	
B6	$0^\circ - 10^\circ = 10$	$0^\circ - 10^\circ = 2$	$70^\circ - 80^\circ = 1$
	$70^\circ - 80^\circ = 15$	$70^\circ - 80^\circ = 3$	$80^\circ - 90^\circ = 6$
	$80^\circ - 90^\circ = 20$	$80^\circ - 90^\circ = 15$	
	$90^\circ - 100^\circ = 12$	$90^\circ - 100^\circ = 2$	
	$170^\circ - 180^\circ = 8$	$170^\circ - 180^\circ = 1$	
B7	$0^\circ - 10^\circ = 2$	$0^\circ - 10^\circ = 1$	
	$70^\circ - 80^\circ = 4$		
	$80^\circ - 90^\circ = 2$		
B8	$0^\circ - 10^\circ = 15$	$0^\circ - 10^\circ = 4$	$0^\circ - 10^\circ = 1$
	$60^\circ - 70^\circ = 8$	$70^\circ - 80^\circ = 7$	$70^\circ - 80^\circ = 3$
	$70^\circ - 80^\circ = 15$	$80^\circ - 90^\circ = 3$	
	$80^\circ - 90^\circ = 12$	$90^\circ - 100^\circ = 2$	
	$90^\circ - 100^\circ = 11$	$160^\circ - 170^\circ = 3$	
	$160^\circ - 170^\circ = 5$		
B9	$170^\circ - 180^\circ = 7$		
	$0^\circ - 10^\circ = 13$	$0^\circ - 10^\circ = 4$	$70^\circ - 80^\circ = 2$
	$60^\circ - 70^\circ = 7$	$60^\circ - 70^\circ = 7$	
	$70^\circ - 80^\circ = 16$	$70^\circ - 80^\circ = 8$	
	$80^\circ - 90^\circ = 16$	$80^\circ - 90^\circ = 3$	
	$170^\circ - 180^\circ = 7$		

Continuación Tabla 3

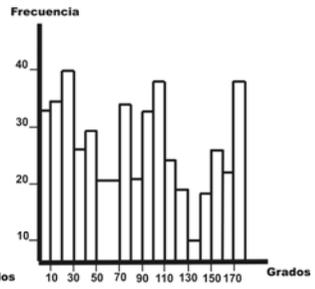
Bloque	Longitud de fracturas		
	≥ 2 km	≥ 5 km	≥ 10 km
B10	0° - 10° = 5 70° - 80° = 13 80° - 90° = 10 90° - 100° = 10	70° - 80° = 5 80° - 90° = 2	70° - 80° = 1
B11	70° - 80° = 3 80° - 90° = 5 90° - 100° = 2	80° - 90° = 2	
B12	0° - 10° = 10 10° - 20° = 5 60° - 70° = 6 70° - 80° = 3 80° - 90° = 10 90° - 100° = 7 170° - 180° = 5	0° - 10° = 1 70° - 80° = 1 80° - 90° = 3	
B13	0° - 10° = 7 10° - 20° = 3 80° - 90° = 10 90° - 100° = 10 170° - 180° = 3	0° - 10° = 1 80° - 90° = 1 90° - 100° = 2	
B14	0° - 10° = 5 10° - 20° = 5 70° - 80° = 10 80° - 90° = 11 90° - 100° = 5 170° - 180° = 2	70° - 80° = 3 80° - 90° = 3 170° - 180° = 1	
B15	0° - 10° = 3 60° - 70° = 10 70° - 80° = 16 80° - 90° = 15 90° - 100° = 11	60° - 70° = 3 70° - 80° = 4 80° - 90° = 4 90° - 100° = 2	70° - 80° = 2 90° - 100° = 2
B16	0° - 10° = 5 10° - 20° = 3 80° - 90° = 1 100° - 110° = 1 110° - 120° = 3	0° - 10° = 2 10° - 20° = 1	0° - 10° = 1
B17	0° - 10° = 20 10° - 20° = 10 80° - 90° = 11 90° - 100° = 15 100° - 110° = 12 170° - 180° = 7	0° - 10° = 4 90° - 100° = 7 100° - 110° = 2 170° - 180° = 1	0° - 10° = 2 90° - 100° = 1 100° - 110° = 1
B18	0° - 10° = 5 70° - 80° = 3 80° - 90° = 7 90° - 100° = 3 170° - 180° = 2	70° - 80° = 1 80° - 90° = 2	70° - 80° = 1 80° - 90° = 1



5A



5B



5C



5D

Figura 5A. Histograma de las direcciones de las cuencas fluviales.

Figura 5B. Histograma de las direcciones de los microbloques.

Figura 5C. Histograma de las direcciones de los nanobloques.

Figura 5D. Sector de un río encajado (valle en forma V) en Barranquitas (dirección E-O).

Red fluvial

La red fluvial de PR se caracteriza por dos cuencas principales: septentrional y meridional (Figura 6A). En las Tablas 4 y 5 están los datos obtenidos para las 33 cuencas fluviales (16 septentrionales y 17 meridionales) de un total de 48. Las cuencas no analizadas son de dimensiones muy pequeñas. Del estudio resulta que los ríos de 5° y 6° orden están sólo en la vertiente norte, siendo el de 6°, el Grande de Loiza. La Tabla 6 contiene las cantidades de cuencas principales por vertiente para las tres categorías mayores. En ella se ve que el mayor número de cuencas corresponde a las de 2° orden, lo cual resulta una anomalía, en la estructura jerárquica del método y que puede interpretarse por la importante actividad neotectónica más joven. Las direcciones predominantes del escurrimiento están la Tabla 7, prevaleciendo, con diferencia, las direcciones N-S y E-O. Esta última dirección coincide con la estructura regional del Caribe Norte; y que también hemos determinado,

como se expuso antes, en el estudio de las fracturas. En la Tabla 8 están los porcentajes de relaciones de bifurcación anómalas, sobresaliendo el orden 2-3 como el más numeroso. Este orden representa a las estructuras más jóvenes, las cuales predominan en la zona septentrional. Las cantidades de sectores anómalos por cuenca (septentrional y meridional) aparecen en la Tabla 9. Resulta de ella que hay una cantidad muy superior de sectores anómalos de los ríos en la parte septentrional.

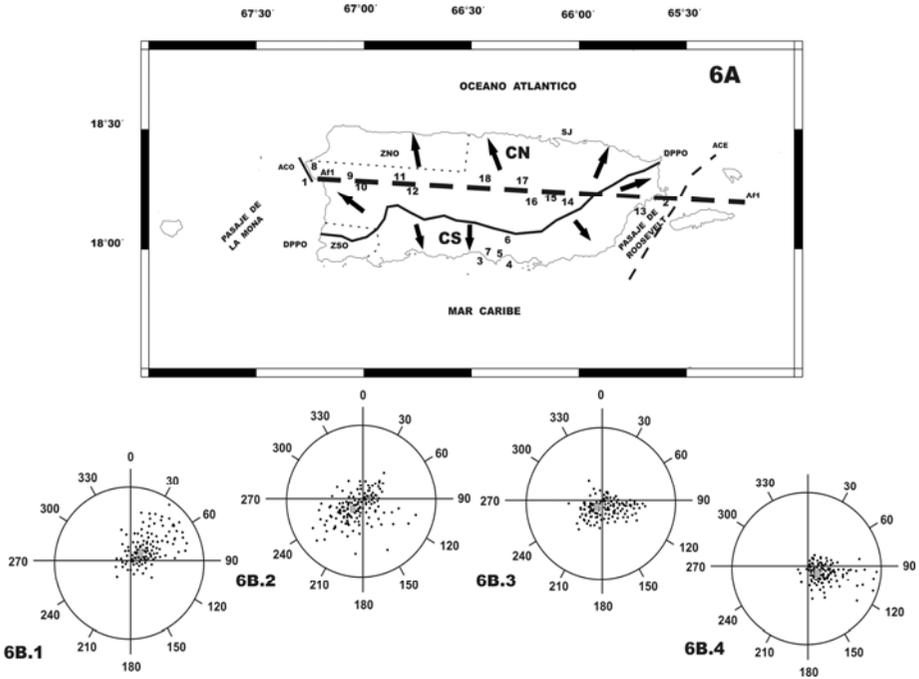


Figura 6A. Mapa de las Divisorias Principales de Agua de Puerto Rico. Aparecen: A) la Divisoria Principal de Primer Orden [DPPPO] (línea negra); B) las vertientes (cuencas) septentrional [CN] y meridional [CS]; C) el alineamiento fluvial 1 [Af1]; D) las zonas sin escurrimiento organizado [Z-NO, Z-SO]; E) las direcciones promedio del escurrimiento superficial (flechas negras); las localidades: 1= Punta Cadena, 2= Punta Algodones, 3= Punta Carenero, 4= Bahía Rincón, 5= Salinas, 6= Sabana Llana, 7= Boca Chica, 8= Córcega, 9= La Cadena de San Francisco, 10= Cerro Gordo, 11= Lares, 12= Perchas, 13= Punta Lima, 14= Juncos, 15= Cabuyas, 16= Aguas Buenas, 17= Naranjito, 18= Cerro Purrón.

Figura 6B. Diagramas polares de las cuencas: B.1= N2 (Río Grande de Añasco), B.2= N1 (Guanajibo), B.3= S11 (Yauco), B.4= S20 (Majada - Jajones) (Véase Tabla 4). El rango de magnitud es de 0 (en el centro) a 1 (en el extremo exterior). El cuadrado de color gris es el valor medio del vector.

Tabla 4
Ríos por cuenca

<i>Cuenca</i>			<i>Orde máximo del río</i>	<i>Asimetría del río Principal</i>
<i>Sigla</i>	<i>Localización</i>	<i>Nombre</i>		
CN1	Septentrional	Guanajibo	5	Si
CN2	Septentrional	Grande de Añasco	4	Si
CN3	Septentrional	Grande de Arecibo	5	No
CN4	Septentrional	Grande de Manatí	5	Si
CN5	Septentrional	Grande de la Plata	5	Si
CN6	Septentrional	Grande de Loiza	6	Si
CN7	Septentrional	Espíritu Santo	4	No
CN8	Septentrional	Mameyes	3	Si
Cn1	Septentrional	Llagues	-	Si
Cn2	Septentrional	Grande	-	Si
Cn3	Septentrional	Guayabo	-	Si
Cn4	Septentrional	Culebrinas	4	No
Cn6	Septentrional	Guajataca	3	Si
Cn7	Septentrional	Camuy	3	No
Cn9	Septentrional	Bayamón	4	Si
Cn10	Septentrional	Puerto Nuevo	-	Si
CS10	Meridional	Loco	3	Si
CS11	Meridional	Yauco	4	Si
CS12	Meridional	Guayanilla	3	Si
CS13	Meridional	Macana	-	Si
CS14	Meridional	Tallaboá	4	Si
CS15	Meridional	Matilde	4	Si
CS16	Meridional	Portugués	4	No
CS18	Meridional	Jacaguas	4	Si
CS19	Meridional	Coamo	4	Si
CS20	Meridional	Majada-Jajones	4	Si
CS22	Meridional	Grande Patillas	-	Si
CS23	Meridional	Guayanés	4	Si
CS24	Meridional	Humacao	3	No
CS25	Meridional	Antón Ruiz	3	Si
CS26	Meridional	Blanco	3	Si
Cs1	Meridional	Descalbrao	-	Si
Cs6	Merdional	Maunabo	-	Si

Nota: C= Cuenca; n, N= Septentrional; s, S= Meridional; CN, CS= delimitada por la Divisoria Principal de Primer Orden [DPPO] y Divisoria Principal de Segundo Orden [DPSO]; Cn, Cs= delimitada por DDPO, DPSO y Divisoria Principal de Tercer Orden [DPTO].

Tabla 5
Datos de las cuencas

<i>Parámetros</i>	<i>Cuencas Meridionales</i>						
	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>	<i>S14</i>	<i>S15</i>	<i>S16</i>	<i>S18</i>
Orden	3	4	3	4	4	4	4
Vertiente	S	S	S	S	S	S	S
Dirección predominante	N-S	SSE	N-S	N-S	SSE	SSE	SO
Dirección principal del drenaje superficial	N-S	NO-SE	N-S	N-S	N-S	N-S	SO
Altitud máxima de la cuenca (m)	640	660	815	840	600	870	650
Índice de Gavelius	0.5	0.21	0.23	0.31	0.27	0.31	0.36
Área (km ²)	39.6	64.8	28.8	28.8	37.8	38.4	48.6
Pendiente media de la cuenca (m/km)	30.1	37.7	72.5	60.1	34.0	34.2	32.0
Longitud del río principal (km)	30.0	36.1	24.4	21.6	18.0	28.3	31.0
Coefficiente de sinuosidad	0.83	0.91	0.76	0.76	0.96	0.68	0.85
Pendiente media del río principal (m/km)	27.08	36.54	69.44	57.69	33.33	33.01	30.31
Valles de tipo V	3	2	5	5	4	5	4
Vallles de tipo U	2	2	4	5	4	3	4
Sectores anómalos	2	4	3	4	1	3	2
Terrazas fluviales	5	6	6	6	6	5	5
Cascadas	2	3	3	4	3	4	4
Conos y abanicos	5	7	7	10	8	7	4

<i>Parámetros</i>	<i>Cuencas Meridionales</i>					
	<i>S19</i>	<i>S20</i>	<i>S23</i>	<i>S24</i>	<i>S25</i>	<i>S26</i>
Orden	4	4	4	3	3	3
Vertiente	S	S	S	S	S	S
Dirección predominante	SO	SO	O-E	O-E	O-E	SE
Dirección principal del drenaje superficial	SO	SO	SE	SE	O-E	SE
Altitud máxima de la cuenca (m)	730	300	630	310	180	800
Índice de Gavelius	0.43	0.39	0.6	0.52	0.25	0.25
Área (km ²)	57.2	39.5	55.7	30.5	25.8	29.7
Pendiente media de la cuenca (m/km)	27.7	42.1	23.3	16.7	18.2	57.3
Longitud del río principal (km)	24.1	13.2	27.4	16.79	11.0	14.4
Coefficiente de sinuosidad	0.88	0.87	0.76	0.61	0.85	0.65
Pendiente media del río principal (m/km)	25.0	39.06	20.83	14.89	16.67	55.56
Valles de tipo V	5	3	1	1	2	2
Vallles de tipo U	4	3	3	3	3	2
Sectores anómalos	5	2	2	2	1	2
Terrazas fluviales	5	5	4	3	4	4
Cascadas	3	3	2	2	3	2
Conos y abanicos	5	4	3	2	2	2

Continuación Tabla 5

<i>Parámetros</i>	<i>Cuencas Septentrionales</i>					
	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>
Orden	5	4	5	5	5	6
Vertiente	N	N	N	N	N	N
Dirección predominante	E-ONO	SE-O	S-N	S-N	S-N	S-N
Dirección principal del drenaje superficial	E-O	E-O	SE-NO	SE-NO	SE-NO	SO-NE
Altitud máxima de la cuenca (m)	550	890	1.338	1.200	730	1,075
Índice de Gavelius	0.82	0.61	0.72	0.8	0.6	0.85
Área (km ²)	132.2	192.4	180.2	364.8	240.0	230.0
Pendiente media de la cuenca (m/km)	19.2	23.3	36.1	35.2	19.0	15.2
Longitud del río principal (km)	31.2	.5	52.9	41.0	97.0	65.0
Coefficiente de sinuosidad	0.97	0.89	0.85	0.84	0.8	0.8
Pendiente media del río principal (m/km)	17.63	21.32	34.57	33.33	17.18	13.48

<i>Parámetros</i>	<i>Cuencas Septentrionales</i>					
	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>
Valles de tipo V	18	14	17	23	9	19
Vallles de tipo U	8	9	16	16	16	15
Sectores anómalos	6	7	12	10	15	10
Terrazas fluviales	8	8	9	9	8	9
Cascadas	6	7	7	7	7	7
Conos y abanicos	10	12	15	17	10	14

<i>Parámetros</i>	<i>Cuencas Septentrionales</i>					
	<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N4</i>	<i>n6</i>	<i>n7</i>	<i>n9</i>
Orden	4	3	4	3	3	4
Vertiente	N	N	N	N	N	N
Dirección predominante	S-N	S-N	SE-ONO	SSE-NNO	S-N	S-N
Dirección principal del drenaje superficial	SO-NE	S-N	E-O	SE-NO	S-N	SO-NE
Altitud máxima de la cuenca (m)	750	1.065	450	450	460	510
Índice de Gavelius	0.88	0.55	0.52	0.48	0.47	0.5
Área (km ²)	52.1	12.0	132.0	81.6	130.0	115.2
Pendiente media de la cuenca (m/km)	21.1	90.3	15.1	17.4	22.2	17.4
Longitud del río principal (km)	38.4	19.5	54.4	41.0	40.5	31.2
Coefficiente de sinuosidad	0.81	0.9	0.97	0.9	0.99	0.95
Pendiente media del río principal (m/km)	19.53	88.75	13.89	16.3	20.36	16.35
Valles de tipo V	8	3	5	5	7	12
Vallles de tipo U	10	4	7	7	8	8
Sectores anómalos	2	2	5	5	4	5
Terrazas fluviales	4	4	3	5	4	4
Cascadas	2	2	1	3	3	4
Conos y abanicos	3	2	5	3	3	5

Tabla 6
Cuencas a partir de las divisorias principales de agua

<i>Categoría</i>	<i>Septentrional</i>	<i>Meridional</i>	Σ
1	1	1	2
2	10	26	36
3	11	9	20

Tabla 7
Dirección predominante de la red fluvial

<i>Dirección</i>	<i>Cantidad</i>
N-S	320
E-O	225
ENE-OSE	95
ESE-ONO	87
NNE-SSO	160
NNO-SSE	143

Tabla 8
Relaciones de bifurcación anómalas

<i>Rb</i>	<i>%</i>
1-2	38
2-3	48
3-4	39

Tabla 9
Sectores anómalos de los ríos por cuencas

<i>Cuenca Meridional</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cuenca Septentrional</i>	<i>Cantidad</i>
CS10	1	CN1	4
CS11	2	CN2	5
CS12	1	CN3	6
CS14	2	CN4	10
CS16	3	CN5	10
CS18	4	CN6	15
CS19	3	Cn4	2
CS20	2	Cn6	3
CS24	2	Cn8	5
Cs6	1		
Cs12	2		
Total	23	Total	60

Nota: La notación se corresponde con la Tabla 4.

La inmensa mayoría de los ríos tiene su nacimiento en la Cordillera Central y ellos son mucho más largos en la porción Norte que en la Sur (Figura 6A). En consecuencia las cuencas septentrionales son siempre de mayor área. En el mapa se ilustra la existencia de una sola Divisoria Principal de Aguas de Primer Orden [DPPO] con longitud de 206.4km y $K_s=0.79$. Su dirección predominante es E-O, aunque desde el meridiano 66° toma la dirección SO-NE. A partir de esta DPPO se conforma el conjunto de cuencas fluviales. Destacamos que: 1) el relieve es más enérgico al norte de la DPPO; 2) el área de las cuencas es mucho mayor en la parte septentrional que en la meridional, lo cual se corresponde con el mayor orden de los ríos; 3) la DPPO está más alejada de la costa septentrional (~ 36 km) que de la meridional (~ 15 km); 4) la DPPO tiene cinco segmentos de oeste a este: a) O-E (Punta Carenero - cuenca del río Loco); b) N-S (el más corto. Parte oeste del río Loco); c) O-E (el segundo en longitud. Norte de la cuenca del río Loco - norte de la cuenca del río Jacaguas); d) NO-SE (norte de la cuenca del río Jacaguas - cuenca S21); e) SO-NE (cuenca S21 - Cabezas de San Juan), que coincide con la dirección del Pasaje de Roosevelt; 5) los ríos n6 (Guajataca) y n7 (Camuy) prácticamente no tienen afluentes, debido a la litología kárstica por la que discurren. Eso mismo se aprecia en los tramos medios y finales de los ríos N3 (Grande de Arecibo) y N4 (Grande Manatí); 6) las cuencas fluviales delimitadas se distinguen por sus Figuras aproximadamente rectangulares; 7) el 96.2% de los ríos estudiados tiene asimetría lateral con respecto a las divisorias de las cuencas. Esto se justifica por la influencia litológica y de las fallas (Tabla 4). Más adelante se retomará este punto; 8) los alineamientos fluviales son predominantemente de dirección E-O entre Punta Cadena y Punta Algodones ($\sim 18^\circ 17' N$) y que se puede extender al norte de las Islas Vieques. Esto involucra a los ríos Guajataca, Limón, Manatí, Bayamón, Gurabo y Blanco. Esta regularidad está determinada al norte de la alineación O-E de la DPPO sobre la Cordillera Central, y se corresponde con el borde norte de cuatro bloques, y que hemos denominado alineación fluvial I [Af1] (Figura 6A). A este alineamiento fluvial nos referiremos con más detalle posteriormente; 9) en la vertiente septentrional hemos determinado que al menos hay cuatro ríos asociados a fallas: Guanajibo (CN1), Grande de Añasco (CN2), Culebrinas (Cn4) y Guajataca (Cn6), lo cual se corresponde con el resultado de las fracturas determinadas con las morfoisohipsas; 10) en las cuencas meridionales hay un conjunto de bruscas inflexiones de los ríos, que hemos asociado con fallas, luego de un exhaustivo trabajo de campo (Figura 6B). Así, en la cuenca Cs3, el río Jajome que tiene dirección SE-NO y corre paralelo a la DPPO en las coordenadas $\sim 66^\circ 10'$ en el sector del Cerro de la Tabla, sufre una brusca inflexión en su curso de 90° al SO para drenar sus aguas en el río Majada (~ 20 km de longitud, $K_s=1$), que desemboca en la Bahía de Rincón. Aquí se localiza una falla entre las localidades de Salinas - Sabana Llana y el propio río Jajome. Más al Oeste, en la cuenca CS19 el río Cuyón, de curso E-O, se inflexiona

80° al SSO para drenar en el río Coamo de valle tipo “U” (fondo plano) y, con $K_s=0.97$ en 20km de longitud, que desemboca en la Playa Santa Isabel. Ésta es otra combinación de fallas. La tendencia en cuanto a inflexiones en los cursos fluviales de las cuencas meridionales se aprecia hasta la cuenca CS18, donde el río Toa-Vaca (valle tipo “V”) se desvía en al menos dos segmentos paralelos y de dirección E-O para confluir en el río Jacaguas ($K_s=0.95$, longitud de 15km) y que drena en Boca Chica con dirección prácticamente N-S. Esta cuenca es asimétrica con valle tipo “U” y tiene un vector $T=0.18$, 290°. A partir de esta última cuenca y hacia el Oeste el drenaje se organiza de forma inequívoca del Norte al Sur; mientras que al Este de la cuenca Cs3 (asimétrica con vector $T=0.16$, 120°) el drenaje se torna al SE. Esto puede ilustrar la existencia de un movimiento rotacional de los bloques.

Tabla 10
Características del macrobloque Puerto Rico

<i>N°</i>	<i>Características</i>	<i>Datos</i>
1	Tipo de relieve	Montaña
2	Altitud máxima (m)	1,338
3	Mesobloques	2
	Bloques	18
	Microbloques	31
	Nanobloques	55
4	Disección vertical (m)	485
5	Levantamiento (m) por diferencia de isobasitas de orden:	
	2-3	20
	4-5	100
	2-5	210
6	Áreas de descenso (%)	12
7	Divisoria Principal	1
8	Anomalías fluviales	83
9	Forma de los valles fluviales (V / U)	182/166
10	Superficies de cimas	534
11	Fosas oceánicas	2
12	Área (km ²)	9,104
13	Pendiente media (‰)	11.5
14	Dirección principal del drenaje superficial	N-S
15	Cantidad máxima de terrazas marinas	6
16	Altitud máxima de las terrazas marinas (m)	140
17	Estructura principal	Bloques
18	Tipo principal de drenaje	Superficial
19	Drenaje superficial promedio (km/km ²)	40.2
20	Cantidad de fracturas de $L > 2\text{km/km}^2$	28.5
21	Dirección principal de la estructura	NO
22	Orden máximo del río	6
23	Densidad epicentral, $h=0-300\text{km}$ (1970-2004)	10.3
24	Nudos	83

La mencionada Afl (Figura 6A) es una extensa estructura lineal de la parte centro-septentrional de la isla de PR y con dirección E-O. Esta Afl se ha identificado a partir de inflexiones en la red fluvial (ríos, cuencas y divisorias de aguas), localización de depósitos de sedimentos aluviales y fluviales, conos de deyección, alineaciones fluviales, y contacto entre rocas. De hecho el primer segmento de la alineación incluye a las cuencas Cn2-Cn7 y CN3, todas ellas localizadas en zonas kársticas. Ese alineamiento está definido al norte de la DPPO y es aproximadamente paralelo a ella desde su extremo occidental hasta la coordenada de 66° O y tiene un $K_s=0.93$. Además, afecta diferentemente a todas las cuencas fluviales septentrionales. El trazo del alineamiento se puede identificar, de Oeste a Este, por las siguientes localidades: Córcega, la Cadena de San Francisco, Cerro Gordo, Perchas, San Sebastián, Lares, ríos Camuy y Tanamá, ríos Grande de Arecibo y Limón, río Manatí, Cerro Purrón, Naranjito, Aguas Buenas, Caguas, Juncos, Río Blanco, y Punta Lima. En su parte central el Afl (Río Limón - Caguas) coincide con un morfoalineamiento que tiene varias inflexiones, pero definida tendencia E-O. Un poco más al sur, a mitad de distancia con respecto a la DPPO, se identifican significativas alineaciones fluviales E-O (de hasta 20km de longitud), desvíos de cursos y saltos de agua, pero que no configuran una estructura lineal extensa como la mencionada Afl. Estas alineaciones se vinculan con las siguientes localidades: río Grande de Jayuya (CN3), Barranquitas y río de la Plata. Tales estructuras pueden interpretarse como el resultado de compresiones N-S y que pueden explicar el desvío al NO de las cuencas septentrionales (Cn6-Cn9 y CN3-CN5). El Afl se puede extender sin argumentos hasta el norte de la Isla de Vieques.

En particular el alineamiento gravimétrico identificado con el número 15 (longitud ~30km) (Figura 7), en el extremo SO de PR, se corresponde con: 1) las direcciones predominantes del Valle de Lajas y de un sector de la DPPO (entre Puerto Real y Sabana Grande); 2) las inflexiones cóncavas de tres cursos fluviales (río Loco=S10,=S11, Guayamilla=S12. Todos drenando de Norte a Sur); 3) dos áreas de actividad paleosísmica (Prentice y Mann, 2005; Prentice *et al.*, 2000).

También hemos determinado el K_s para la línea de costa de PR en cuatro segmentos: 1) costa norte: Punta Borinquen - Punta Gorda (0.85); 2) costa sur: Punta Melones - Punta Quebrada Honda (0.77); 3) costa Oeste: Punta Melones - Punta Borinquen (0.80); 4) costa Este: Punta Quebrada Honda - Punta Gorda (0.75). Estos valores indican que las fallas del NE (ejemplo: en Playa Santa Isabel y Salinas, en la costa sur) y NO (ejemplo: entorno a San Juan en la costa norte, entorno a Puerto Maunabo, en la costa sur) han afectado la regularidad latitudinal del macrobloque. De hecho la costa oriental manifiesta una extensa alineación al NE muy definida, que se puede prolongar hasta el oeste de la isla de Culebra (~55km), y que hemos denominado alineamiento de la costa este [ACE] (Figuras 4A, 6A). Esta alineación es paralela al Pasaje de Anegada (~375km) y a la DPPO en el tramo Campamento

Real - Punta Gorda. Otro alineamiento, mucho menos extenso (~15km), de la costa está en la parte Oeste [ACO], entre Punta Cadena y Punta Higüero, que tiene dirección NO (Figuras 4A, 6A).

Alineaciones gravimétricas

Las alineaciones del relieve superficial deben ser determinadas con métodos de gabinete como los anteriormente comentados, y complementadas, al menos, con estudios de la parte superior de la corteza, con el propósito de conocer otras características y su posible relación con fallas. En este sentido, se pueden emplear los resultados gravimétricos conocidos.

En nuestro caso, el resultado del análisis con métodos matemáticos (Pratt, 1978), aplicando transformaciones y filtros, al mapa gravimétrico de Bouguer se presenta en la Figura 7. Esto permite: 1) la delimitación 65 alineamientos en total; 2) la determinación de 24 alineamientos principales y 3 zonas de intersección principales; 3) la identificación de tres zonas gravimétricas (Z-A= suroeste, Z-B= centro-Este, Z-C= nordeste). Al respecto de los alineamientos principales hay un 63% de coincidencia con el método de morfoisohipsas. Para Jamaica y La Española los autores obtuvieron valores similares, 65% y 61%, respectivamente. De otra parte las zonas gravimétricas se ajustan, bastante bien, a las zonas tectónicas de Briggs y Akers (1965). Además, indicamos que el alineamiento gravimétrico 15, de dirección E-O y cercano a la costa suroeste de PR, entre las localidades de Boquerón y Guayama, y con longitud aproximada de 90km, tiene manifestaciones claras en el relieve superficial y en particular, otros autores (Prentice y Mann, 2005; Prentice *et al.*, 2000) encontraron evidencias de actividad paleosísmica en las inmediaciones del Valle de Lajas. Este alineamiento tiene una relación espacial con la similar orientación de la DPPO entre las localidades de Puerto Real y Salinas. Por lo que consideramos que su categoría estructural es de importancia.

Las Figuras 7.1 – 7.4 muestran, para cuatro áreas diferentes, las características litológicas y estructurales de igual número de alineaciones.

Se presentan otros cuatro casos de la aplicación del vector de asimetría de la cuenca de drenaje (T) como ejemplos del muestreo realizado a diez cuencas de PR (Figura 6B). Este vector tiene dos valores, uno adimensional y otro en grados de desvío respecto del centro geométrico de la cuenca. Aquí se ha calculado, en diferentes rangos segmentos (125), y aunque su obtención no permite afirmar, con toda certeza, la existencia del basculamiento del terreno, sí es eficiente en cuanto a indicar las áreas más probables; y lógicamente, justifican la presencia de fallas.

Dos de las cuencas seleccionadas corresponden al lado NO (N1 y N2) e igual cantidad al suroccidente (S11 y S20). La litología asociada a esas cuencas es: B.1= rocas volcánicas y sedimentarias del Cr; B.2= aluvios del Cuaternario; B.3 y B.4=

aluvios del Cuaternario y rocas volcánicas y sedimentarias del Cr. En ellas hemos determinado que: 1) el rango de vectores en las Figuras 6B.1 y 6B.4 es 0 – 0.8, mientras en las otras dos Figuras 6B.2 y 6B.3 es 0 – 0.7; 2) la concentración de vectores por cuadrante es: Figura 6B.1=NE, Figuras 7.2 y 6B.3=SO, y Figura 6B.4=SE; 3) los datos cuantitativos son: $T_{B,1}=0.2$ (60°), $T_{B,2}=0.28$ (215°), $T_{B,3}=0.24$ (190°) y $T_{B,4}=0.22$ (125°); 4) el vector promedio tiene un valor de 0.24 (148°), lo que implica una migración del sistema al SE.

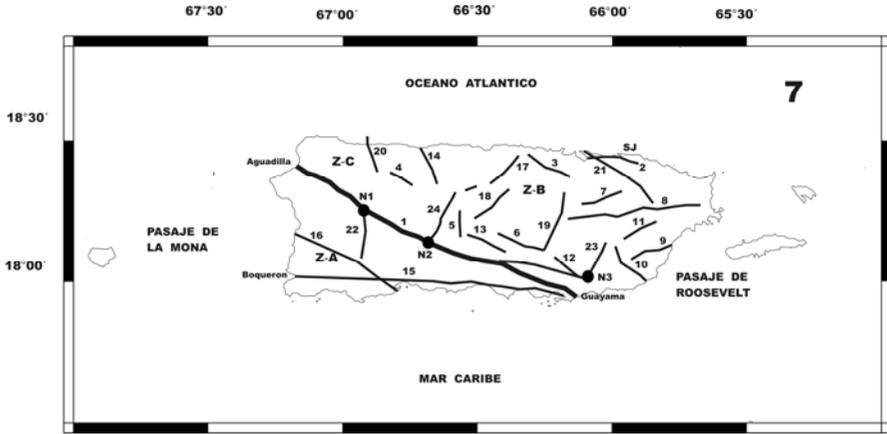


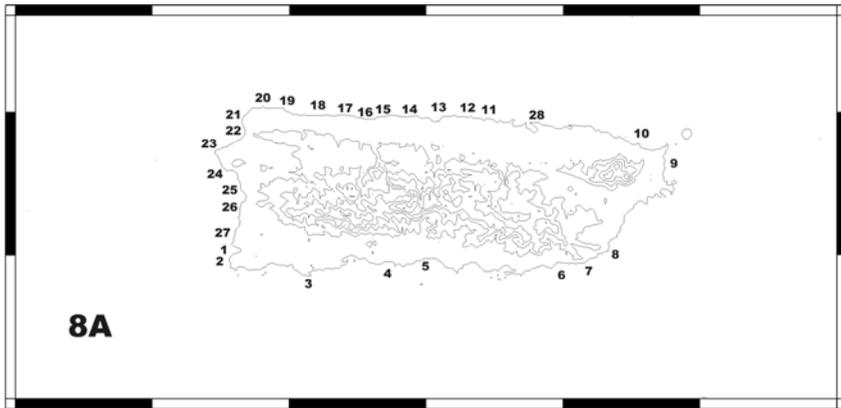
Figura 7. Esquema de los alineamientos, nudos y zonas del campo gravimétrico de Puerto Rico. Aparecen: A) los alineamientos principales [1] (línea negra); B) las intersecciones [N1] (círculo negro); C) las zonas [Z-A]; D) SJ= la localidad de San Juan.

- Figura 7.1.** Foto del segmento central del alineamiento 1 en las inmediaciones de Adjuntas.
- Figura 7.2.** Foto del extremo sureste del alineamiento 1 en las inmediaciones de Cuchilla de Panduras.
- Figura 7.3.** Foto de un escarpe del alineamiento 8 en las inmediaciones de Las Torres.
- Figura 7.4.** Foto del trazo este del alineamiento 15 en las inmediaciones de Tallaboa (oeste de Ponce).

Zonas kársticas

Se estudiaron sobre el terreno los sistemas de terrazas marinas en 28 puntos de PR (Figuras 8A y 8B). En este sentido y desplazándonos de Oeste a Este desde el extremo suroccidental, se dan las localidades con la cantidad de terrazas contabilizadas: 1) Playa Boquerón (3), 2) Punta Melones (3), 3) Frontón de la Brea (3), 4) Este de Tallaba (2), 5) Ponce (6), 6) Colonia Providencia (4), 7) Hacienda de San Isidro (5), 8) Punta Quebrada Honda (5), 9) Punta Fajardo (4), 10) Punta Gorda (4), 11) Punta La Bandera (3), 12) Punta Boca Juana (1), 13) Punta Puerto Nuevo (3), 14) Punta Cerro Gordo (4), 15) Punta Manatí (3), 16) Arecibo (5), 17) Punta Maracayo

(4), 18) Punta Peñón (4), 19) Quebradilla (4), 20) Punta Sardina (2), 21) Punta Jacinto (6), 22) Punta Borinquen (6), 23) Aguadilla (6), 24) Punta Gorda (6), 25) Punta Cadena (6), 26) Punta Algarrobo (5), 27) Punta Guanajibo (5), 28) Punta La Mela (3). Las terrazas están muy bien expresadas en el segmento noroesteccidental con un amplio desarrollo del lapiaz (karst) en las superficies inferiores (Figura 8B).



8B



8C



Figura 8A. Mapa de Puerto Rico con los puntos de estudio de terrazas marinas y zonas kársticas. Aparecen las localidades (1= Playa Boquerón, 2= Punta Melones, 3= Frontón de la Brea, 4= Tallaba, 5= Ponce, 6= Colonia Providencia, 7= Hacienda de San Isidro, 8= Punta Quebrada Honda, 9= Punta Fajardo, 10= Punta Gorda, 11= Punta Boca Juana, 12= Punta Puerto Nuevo, 13= Punta Cerro Gordo, 14= Punta Manatí, 15= Arecibo, 16= Punta Maracayo, 17= Punta Peñón, 18= Quebradilla, 19= Punta Sardina, 20= Punta Jacinto, 21= Punta Borinquen, 22= Aguadilla, 23= Punta Gorda, 24= Punta Cadena, 25= Punta Algarrobo, 26= Punta Guanajibo, 27= Punta La Mela, 28= San Juan).

Figura 8B. Foto de un sector de Puerto Rico con terrazas marinas.

Figura 8C. Foto de un ejemplo de un conjunto de estructuras kársticas elevadas y una depresión adyacente (Lago Guajataca).

Las zonas kársticas identificadas como ZNO y ZSO en la Figura 6A tiene unas formas del relieve elevadas típicas (mogotes, domos y cúpulas) con altitudes de hasta 450m y 300m, respectivamente (Figura 8C). En ella se han encontrado estructuras deprimidas como: nichos, cavernas y canales. También hay importantes alineaciones, en cuanto a extensión (~90km), con formas del relieve típicamente kársticas, como ejemplo la Figura 8D. En ella aparece un segmento del Valle de Lajas al suroeste de PR. Esta alineación se corresponde con la estructura comentada como alineamiento gravimétrico 15 (Figura 7). En la ZNO están la Cordillera Jai-coa y las Montañas Guarionex y entre ellas el Lago de Guajataca, y también vinculado con esta litología está el segmento litoral septentrional Arecibo - Punta La Bandera, que tiene aproximadamente 140km de longitud y conforma una banda regular de aproximadamente 5km de ancho con depósitos lacustres en un fondo calcáreo.



8D

Figura 8D. Vista desde el Sur al Norte de un sector del Valle de Lajas, SO de Puerto Rico.

La DPPO en el segmento Puerto Real-Cerro de los Bonelli de la parte suroccidental de la isla se extiende, en sentido latitudinal, sobre cimas calcáreas de la ZSO. Ella es el límite sur de la cuenca del río Guanajibo que drena al NO sobre un substrato calcáreo. Al sur del segmento mencionado se localiza una llanura carbonatada con ciénagas y lagunas (Rincón, Cartagena y de Guánica) dispuestas también en sentido latitudinal (Valle de Lajas). Destacan una serie de elevaciones como Cerro Mariquita-Sierra Bermeja (~300m de altitud) donde hay pequeñas superficies de planación y que contrastan con la uniformidad de la llanura.

Mapa morfotectónico

La Figura 9 contiene los resultados principales del estudio morfotectónico de PR. Este material muestra que el macrobloque tiene una Figura aproximadamente rectangular en el sentido latitudinal. Esta configuración está determinada por su localización espacio-temporal en el borde norte oriental de la placa Caribe y en inmediato contacto con la placa de Norteamérica dentro de la denominada ZLP. Las principa-

les características (24) del macrobloque PR están en la Tabla 10, y en la Figura 9 se representan: 1) los nueve alineamientos principales (Tabla 11); 2) las doce intersecciones principales (Tablas 12 y 13); 3) los dos mesobloques (Tabla 14); 4) los dieciocho bloques (Tablas 15 y 16); 5) el sentido del basculamiento promedio de los microbloques. Además, debido a la significativa actividad paleosísmica del alineamiento del Valle de Lajas, se incluye también en la Figura 9. Sin embargo, en la categorización de los elementos lineales aplicada a ese alineamiento es una estructura límite de microbloques y nanobloques.

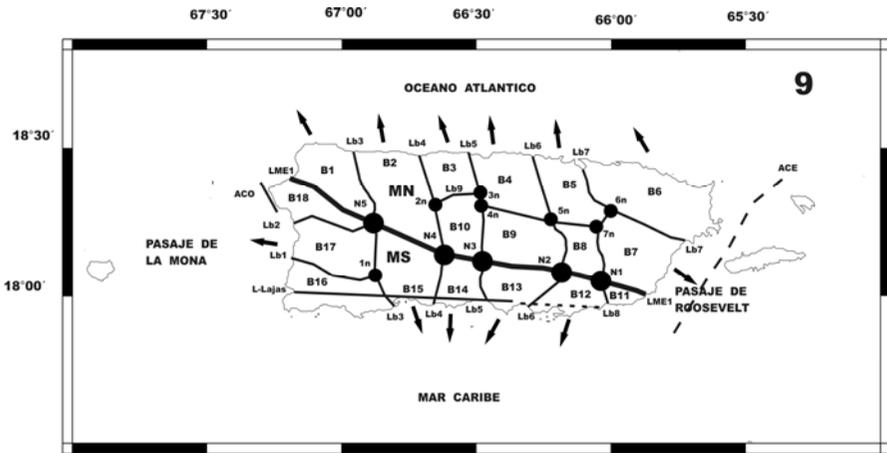


Figura 9. Esquema morfotectónico de Puerto Rico. Aparecen: A) los morfoalineamientos (líneas negras) de 3^{er} orden [LME1] y de 4^o orden [Lb1] (véase Tabla 11); B) las intersecciones (círculo negro) de 3^{er} orden [N1] y de 4^o orden [1n] (véase Tabla 12); C) los mesobloques: Septentrional [MN] y Meridional [MS]; D) los bloques [B1] (véase Tablas 16 y 17); E) el sentido del basculamiento estimado (flecha negra); F) los alineamientos: a) de la costa este [ACE] y de la costa oeste [ACO]; b) el alineamiento Lajas [L- Lajas, límite de nano y microbloques] (línea negra).

De otra parte, como se dijo anteriormente, el estudio realizado permite identificar un total de dos mesobloques (Septentrional y Meridional) y dieciocho bloques; pero también hay 18 microbloques y 32 nanobloques en la parte septentrional, y 13 microbloques y 23 nanobloques en la parte meridional. Se han determinado en los bloques septentrionales 356 superficies de cimas y en los meridionales 178. Esa misma proporción se da en cuanto a los tipos de cimas, planas 113 y 71 (0.63), y punteagudas 243 y 107 (0.44), respectivamente. Esto indica, sin margen a dudas, que la actividad neotectónica es mayor al Norte.

Tabla 11
Alineamientos principales (morfoalineamientos)

<i>Alineamientos / Orden</i>	<i>Dirección / Longitud (km) / Ks / Intersecciones</i>	<i>Localidades</i>
LME1 / 3	NO-SE / 150 / 0.81 / N1, N2, N3, N4, N5	Punta del Boquerón – Puerto Manuabo
Lb1 / 4	NO-SE / 37.2 / 0.90 / 1n	Punta Guanajibo – Sabana Grande
Lb2 / 4	O-E / 36.0 / 0.90 / N5	Añesco – Cerro La Torre
Lb3 / 4	NNO-SSE / 62.4 / 0.82 / N5, 1n	Quebradillas – Punta Ventana
Lb4 / 4	NNO-SSE / 54.0 / 0.91 / N4, 2n	Arecibo – Playa de Ponce
Lb5 / 4	NNO-SSE / 61.2 / 0.80 / N3, 3n, 4n	Punta Manatí – Velásquez
Lb6 / 4	N-S / 62.5 / 0.80 / N2, 5n	Punta Boca Juana – Salinas
Lb7 / 4	NNO-SE / 55.2 / 0.75 / 6n	Cataño – Playa de Naguabo
Lb8 / 4	N-S / 31.2 / 0.82 / N7, 7n	San Lorenzo – La Palma
Lb9 / 4	ONO-ESE / 76.8 / 0.67 / 2n, 3n, 4n, 5n, 7n	Montaña – San Lorenzo

Nota: Ks= coeficiente de sinuosidad.

Tabla 12
Resumen de las intersecciones principales

<i>Intersecciones / Orden / Composición</i>	<i>Denominación</i>	<i>Mesobloque</i>	<i>Bloques / Total</i>
N1 / 3 / LME1-Lb8	Campamento Real	Límite	B7, B8, B11, B12 / 4
N1 / 3 / LME1-Lb6	Las Tetas	Límite	B8, B9, B12, B13 / 4
N3 / 3 / LME1-Lb5	Cerro de las Cuevas	Límite	B9, B10, B13, B14 / 4
N4 / 3 / LME1-Lb4	Garaguao	Límite	B2, B10, B14, B15 / 4
N5 / 3 / Lb1-Lb3	Cerro La Torre	Límite	B1, B2, B15, B17, B18 / 5
1n / 4 / Lb4-Lb9	Yanco	Meridional	B15, B16, B17 / 3
2n / 4 / Lb5-Lb9	Montaña	Septentrional	B2, B3, B10 / 3
3n / 4 / Lb5-Lb9	Cerro Purrón	Septentrional	B3, B4, B10 / 3
4n / 4 / Lb5-Lb9	Cerro Purrón	Septentrional	B4, B9, B10 / 3
5n / 4 / Lb6-Lb9	Comerio	Septentrional	B4, B5, B8, B9 / 4
6n / 4 / Lb7-Lb8	Gurabo	Septentrional	B5, B6, B7 / 3
7n / 4 / Lb8-Lb9	San Lorenzo	Septentrional	B5, B7, B8 / 3

Tabla 13
Cantidad de nudos

<i>Orden</i>	<i>Cantidad</i>
2	5
3	7
4	25
5	46
Σ	83

Tabla 14
Composición de los mesobloques

<i>Mesobloque</i>	<i>Bloques</i>	<i>Microbloques</i>	<i>Nanobloques</i>	<i>Intersecciones</i>	<i>Valles (V/U)</i>
Septentrional	10	18	32	6	140/124
Meridional	8	13	23	1	42/ 42
Σ	18	31	55	7	182/166

Tabla 15
Careacterísticas de los bloques

<i>Bloques / Microbloques / Nanobloques</i>	<i>Localización / Puntos de control</i>	<i>Valles (V-U) / Superficies de cimas (Planas - Punteagudas) / Σ</i>
B1 / 2 / 3	Septentrional / 16	(0 - 5) / (25 - 0) / 25
B2 / 2 / 3	Septentrional / 18	(0 - 10) / (26 - 10) / 36
B3 / 1 / 2	Septentrional / 23	(0 - 4) / (23 - 38) / 61
B4 / 2 / 3	Septentrional / 19	(0 - 17) / (16 - 15) / 31
B5 / 2 / 4	Septentrional / 19	(4 - 16) / (10 - 19) / 29
B6 / 2 / 5	Septentrional / 15	(15 - 20) / (4 - 27) / 31
B7 / 2 / 5	Septentrional / 14	(18 - 10) / (4 - 25) / 29
B8 / 2 / 2	Septentrional / 10	(30 - 20) / (1 - 32) / 33
B9 / 2 / 3	Septentrional / 10	(35 - 12) / (2 - 34) / 36
B10 / 1 / 2	Septentrional / 11	(38 - 10) / (2 - 43) / 45
B11 / 1 / 2	Meridional / 9	(5 - 3) / (1 - 10) / 11
B12 / 1 / 2	Meridional / 10	(10 - 5) / (3 - 17) / 20
B13 / 2 / 2	Meridional / 15	(7 - 3) / (10 - 10) / 20
B14 / 2 / 3	Meridional / 12	(2 - 6) / (9 - 10) / 19
B15 / 2 / 4	Meridional / 20	(18 - 8) / (10 - 22) / 32
B16 / 1 / 2	Meridional / 11	(0 - 7) / (16 - 2) / 18
B17 / 2 / 5	Meridional / 10	(2 - 7) / (12 - 21) / 33
B18 / 2 / 3	Meridional / 10	(0 - 3) / (10 - 15) / 25
Σ 31 / 55	252	182

El límite entre los mesobloques Septentrional y Meridional es el alineamiento LME1 (Figura 9). Este morfoalineamiento de tercer orden y dirección NO-SE tiene una longitud de 150km con coeficiente de sinuosidad de 0.81. Esto significa que es una estructura lineal no poco afectada por deformaciones transversales, y que tiene las características de una falla activa. Es decir, no es una estructura continua (o extensa). Además, coincide con la falla que separa a las mencionadas Provincias Igneas del Suroeste y Central; y se corresponde, prácticamente, con la Gran Zona de Falla del Sur (Figura 3 de Masson y Scanlon, 1991). Mientras que la combinación de alineamientos Lb5 y Lb7 se corresponden con el límite entre las Provincias Igneas central y del nordeste. Se añade que los bloques B1, B3, B4 y la mayor parte del bloque B2 están en la provincia del Terciario Medio y de rocas sedimentarias jóvenes y los bloques B12-B18 están en la Provincia Ignea del suroeste. Además, el bloque B6 y la parte meridional del B5 se corresponden con la Provincia

Ignea del nordeste. Y la parte meridional del B2 y los bloques B7-B10 están en la Provincia Ignea Central. Estos últimos cuatro bloques están localizados entre las áreas de intersección de tercer orden (N1-N4) por su parte meridional, y entre las de cuarto orden (2n-5n y 7n) por su parte septentrional.

En la sección de Mapas y esquemas se dijo que la mayor densidad de fracturas se correspondía con dos pares de bloques. Estos bloques son los denominados como B2-B15 y B5-B8 (Figura 9). De esa forma y atendiendo a la dirección del drenaje en ellos y la disposición de los microbloques y nanobloques es posible concebir la posibilidad de rotaciones antihorarias, y un mayor nivel de actividad sísmica en este sector.

Al comparar los 24 alineamientos principales determinados por métodos matemáticos del campo gravimétrico (Figura 7) con los 10 morfoalineamientos principales del método morfotectónico (Figura 9) se obtiene una coincidencia del 48%. Esto se corresponde con lo obtenido para Jamaica (49%) y La Española (51%) por los autores. La coincidencia entre las alineaciones LME1 y el más extenso alineamiento (L1) determinado por el método matemático es del 78%. De otra parte, las 3 intersecciones gravimétricas (N1, N2, N3) se asocian con las correspondientes intersecciones morfotectónicas de 3^{er} orden (N5, N4 y N1), respectivamente. Es decir, que se confirma la presencia del LME1 y de tres áreas de intersección morfotectónica en otro resultado independiente.

Se ha visto que los dos mesobloques tienen una marcada diferenciación atendiendo a la Figura del valle fluvial (Tabla 14). Así el mesobloque Septentrional demuestra que es mucho más activo que el Meridional. La Tabla 17 contiene la cantidad de sectores de levantamientos más jóvenes (2°-3° orden) en los bloques. Con ella es posible añadir que predomina la actividad de los bloques septentrionales. Mientras que el porcentaje de bloques con diferente tendencia al levantamiento está en la Tabla 18. Consecuentemente, la parte septentrional del macrobloque PR es la más activa. Los sectores de levantamiento más recientes y más antiguos de los mesobloques se dan en la Tabla 19. Esto confirma lo expresado por Moussa *alii* (1987) en cuanto a que la parte septentrional de PR ha tenido fuertes movimientos verticales tectónicos desde el Plioceno.

Las cantidades de intersecciones en los bloques y el macrobloque aparecen en las Tablas 12 y 13, respectivamente; y como era de esperar, la cantidad de intersecciones morfotectónicas de mayor categoría es menor (12) que para categorías inferiores. Sin embargo, estas doce intersecciones deben ser los sitios más activos, pero a los que no es posible, por el momento, asociarles terremotos. Además, está determinado que los bloques: 1) intermedios B7-B10 tienen las cizalladuras de izquierda; 2) B8 y B12 tienen muchas y diversas cizallas del NE-SO; 3) B12-B14 tienen definida tendencia al descenso en la parte sur, mientras que en la parte norte de los bloques B3-B6 la tendencia es al levantamiento. Es decir, el relieve muestra la influencia de la interacción de las placas Caribe-Norteamérica.

Tabla 16
Descripción de los bloques

<i>Bloques / Denominación</i>	<i>Localidades</i>	<i>Hmáx (m)/ Alineamientos</i>
B1 / Aguadilla	Aguadilla, Centro Palmar, Cordillera Jalcoa, Isabela, Victoria, Moca, Ponce, Quebradillas,	Cordillera Jalcoa – 363 / Lb3, LME1
B2 / Camuy	Montañas Guarionex, Camuy, Hatillo, Alianza, Lechuga, Las Cunetas, Motojillo, Punta Brava, Bayaney, Cerro de la Torre, Cerro Roncador, Arecibo	620 / Lb3, Lb4, LME1
B3 / Montaña	Montaña, Florida, Montebello, Vigía, Caño Tiburo- nes, Barcelonesa	Montaña – 417/ Lb4, Lb5, Lb9
B4 / Manatí	Colonia Combate, Vega Baja, Dorado, Manatí, Higuillar, Manatí, Higuillar, El Campamento, Los Puertos, El Alto, Punto Cubano, El Polvorín, Corozal, Vega Alta	Montañas de Orazal – 500 / Lb5, Lb6, Lb8, Lb9
B6 / San Juan	Río Grande, La Bayamesa, Cerro Gordo, Campo Rico, El Verde, Río Grande, El Toro, Sierra de Loquillo, El Yunque, El Mango, Quebrada Seca, Colonia Fortuna, Fajardo, Colonia El Banco, Luquillo, Daguao, San Juan, Certaino, Los Ranchos, Leprocomio, Carolina, Colonia Monserrate, Lorza Aldea, Colonia Santa Bárbara, Colonia Dolores	El Toro - 1,074 / Lb7
B7 / Humacao	Cuchilla de Panduras, Sierra de Cavey, Buena Vista, Humacao, Playa Guayacanes, Juncos, Las Piedras	Sierra de Guadarraya – 400 / Lb7, Lb8, LME1
B8 / Caguas	Las Piñas, Cayey, San Lorenzo, Cidra, Cerro de la Tabla, La Plaza, Comerío, La Rampla, Caguas	Cerro de la Tabla – 890 / Lb6, Lb8, Lb9, LME1
B9 / La Torrecilla	Matacanas, Cerro Pío, La Torrecilla, Bananquitas	La Torrecilla – 948 / Lb5, Lb6, Lb9, LME1
B10 / Villalba	Cerro de Punta, Cerro Morales, Cerro Magoyo, Cerro Gordo, Villalba	Cerro de Purita - 1,388 / Lb4, Lb5, Lb9, LME1
B11 / Sierra Guadarraya	Sierra Guadarraya, Hacienda, San Isidro, Patillas, Pico Lebrón	Cuchilla de Panduras – 516 / Lb8, LME1
B12 / Guayama	Guayama, Arroyo, Colonia, Algarrobo, Cuatro Callos, Las Palmas, Hacienda Mercedes, Coquí, Jobos, Vázquez Proyecto, Cerro de la Tabla, Colonia Fortuna	Cerro de la Tabla – 890 / Lb6, Lb8, LME1
B13 / Coamo	Santa Isabel, Jauca, Arenal, Velásquez, Baños de Coamo, Coamo, Rabo del Búey, Hacienda Esmeralda, Hacienda San José, Los Llanos	- / Lb5, Lb6, LME1

Continuación Tabla 16

<i>Bloques / Denominación</i>	<i>Localidades</i>	<i>Hmáx (m) / Alineamientos</i>
B14 / Pastillo	Boca Chia, Calzada, Cerro de las Cuevas, Arus, Pa-seillito, Pastillo, Cuatro Calles, Guayabal, Sabarietas, Playa de Ponce, Cerro el Gato, Coto Laurel	Cerro de las Cuevas – 638 / Lb4, Lb5, LME1
B15 / Ponce	Ponce, Peñuelas, Seboruco, Tallaboa, Pastillo Bajo, El Farom Guayanilla, Los Rábanos, Monte Membrillo, Adjuntas, Monte Membrillo, Monte Marqueno	Monte Membrillo - 1,000 / Lb3, Lb4, LME1
B16 / Cabo Rojo	Cerro de los Bonillo, La Pica, Cabo Rojo, Joyuda, Guánica, Ensenada, Palomas, Barinas, Parquera, Sierra Bermeja, Peñones de Melones, Boquerón, Cuatro Caminos, Guanaquilla, Monte Grande, San Germán	288 / Lb1, Lb3
B17 / Maya-güez	Mayagüez, Poblado Sábalos, Las Mesas, Las Vegas, Las Marías, Indiera Actta, Puente las Vegas	Indiora Alta – 925 / Lb1, Lb2, Lb3
B18 / Cadena San Fco.	Córcega, Aguada, Rincón, Cerro Gordo, Tablonal, Perchas, Cadena Sen Francisco, Coloso	Cerro Gordo – 270 / Lb2, Lb3, LME1

Datos de Puerto Rico y Jamaica

En la Tabla 20 se dan algunas características principales (16) de las dos islas menores del arco de las Antillas Mayores, Jamaica y PR. Aunque ellas son dos macrobloques morfotectónicos del norte de la placa Caribe, y cada una tiene una fosa oceánica asociada a su parte septentrional, su contexto geodinámico es diferente. Otra diferencia morfotectónica regional significativa respecto de las fosas más profundas, Oriente y PR, está en el gradiente neotectónico del relieve. Así, la fosa de Oriente (~-7,500m) tiene una relación directa y muy fuerte con el relieve del macrobloque de Cuba Oriental (1,974m). El desnivel es de aproximadamente 10km; mientras que eso no se presenta en el segmento de la ZLP de PR. De esta forma se puede comprender que los desplazamientos laterales de las dos grandes placas Caribe y Norteamérica tienen importantes componentes de movimiento vertical, directo e inverso, así como de rotación de los bloques o microplacas. Es decir, PR y su entorno se ajustan más a la rotación, mientras que en Cuba Oriental prevalecen los movimientos verticales.

Tabla 17
Sectores de levantamiento de 2°-3° orden en los bloques

<i>Bloques</i>	<i>Cantidad</i>
B9, B10, B15	20
B6, B7, B8	10
B5, B17	8
Σ	38

Tabla 18
Porcentaje de la actividad en los bloques por área

<i>Intensidad de levantamiento</i>	<i>Muy activo</i>	<i>Activo</i>	<i>Débil</i>
%	15	27	41

Tabla 19
Diferencia de isobasitas en los mesobloques [para distinguir la intensidad de los levantamientos (muy activo, activo y débil)]

<i>Diferencia de isobasitas</i>	<i>Mesobloques</i>	
	<i>Septentrional</i>	<i>Meridional</i>
2-3	13 %	2 %
4-5	18 %	9 %
Clasificación	Activo	Débil

Tabla 20
Características de los macrobloques Jamaica y Puerto Rico

<i>Características</i>	<i>Jamaica</i>	<i>Puerto Rico</i>
Área (km ²)	11,424	9,104
Longitud de costas (km)	800	501
Altitud máxima (m)	2,230	1,338
Altitud media (m)	725	650
Cantidad de Divisoria Principal de Primer Orden	1	1
Longitud de la DPPO (km)	300	206.4
Dirección predominante de la DPPO	E-O	E-O
Coefficiente de sinuosidad de la DPPO	0.69	0.79
Cantidad de cuencas fluviales (Septentrionales / Meridionales)	22 / 36	22 / 36
Orden máximo del río	7	6
Cantidad de sectores anómalos en los ríos	175 (90 %)	83 (61 %)
Cantidad de superficie de cimas	1,022	534
Cantidad de mesobloques / bloques / microbloques / nanobloques	2 / 11 / 29 / 65	2 / 18 / 31 / 55
Cantidad de intersecciones principales 3 ^{er} / 4 ^o orden	7 / 9	5 / 7
Dirección predominante del fracturamiento	NO	NE, NO, E-O
Magnitud del terremoto más fuerte	7.9	8.0

Apuntes finales y conclusiones

Se ha establecido, por primera vez, con la metódica morfotectónica que PR es un macrobloque emergido, asimétrico y activo dentro la ZLP del Caribe-Norteamérica. En el relieve de esta estructura de Figura rectangular, se identifican, con diversos métodos, los elementos de la interacción de las placas. El macrobloque está compuesto de 2 mesobloques, 18 bloques, 31 microbloques y 55 nanobloques. Hay un total de 10 zonas de alineamientos principales y 12 intersecciones, 5 de tercer orden y 7 de cuarto orden. Estas intersecciones tienen la mayor posibilidad de asociación de terremotos (de baja energía) y articular las rotaciones de las UT. Sin embargo, el mayor nivel de actividad sísmica, y con gran diferencia, está en la parte marina, en los límites externos del macrobloque.

Las características cuantitativas y cualitativas de las UT delimitadas en el macrobloque se recogen en un conjunto de tablas, a modo de ilustración de los métodos aplicados. Así, el macrobloque PR se diferencia muy bien, en cuanto a las características del relieve superficial (método de morfoisohipsas) y de la red fluvial. Para esta última aplicación hay dos grandes cuencas, una septentrional y otra meridional, que no se corresponde con las áreas de los mesobloques. El límite entre las dos cuencas es la DPPO que muestra en su trazo aproximadamente latitudinal la influencia de los movimientos de las placas tectónicas Caribe y Norteamérica, ya por su asimetría y valor del $K_s=0.79$. La cuenca septentrional es la más activa y la de mayor área, y en ella hay muchos sectores de levantamientos neotectónicos.

Como un resultado paralelo se presentan 16 características morfotectónicas de los macrobloques caribeños de Jamaica y PR. Así se comprende que es más activo el primer macrobloque. Además, se dan elementos para distinguir las muy diferentes características geodinámicas y neotectónicas de las fosas de PR y Oriente en su relación con los macrobloques de PR y Cuba Oriental, respectivamente. La fosa de PR es la más profunda de la región, pero la diferencia altimétrica entre la tierra emergida (macrobloque) y la depresión (fosa aladaña) es significativamente superior en el sector de Cuba, con $\sim 10\text{km}$, en un gradiente del relieve muy fuerte. Es decir, que para ambos casos la interacción de las placas del Caribe y de Norteamérica, se resuelve fundamentalmente con desplazamiento lateral izquierdo de las placas; aunque existen importantes movimientos verticales, de tipo directo e inverso, y de rotación de sus bloques o microplacas.

Agradecimientos

El trabajo es una contribución de los proyectos REN2003-08520-C02-02, REN2002-1249E/RIES y CGL2005-25012-E. Un especial y sincero agradecimiento a los especialistas Christa von Hillebrandt y Paul Mann por la ayuda para los traba-

jos de campo. La becaria Diana Núñez Escribano preparó las bases cartográficas. Las tareas de laboratorio se realizaron en el Departamento de Geofísica y Meteorología, de la Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.

Referencias

- Abbad F. I., 1970, *Historia geográfica civil y natural de la Isla de San Juan Bautista de Puerto Rico*, Editorial Unversitaria, Río Piedras.
- Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I, Gvishiani A. y Rantsman E., 1977, "Formal morphostructural zoning in mountain territories", *J. Geophys.*, 43:227-233 (en inglés).
- Arsovsky M. y Hadzievsky D., 1970, "Correlation between neotectonics and the seismicity of Macedonia", *Tectonophysics*, 9:129-142 (en inglés).
- Asencio E., 1980, *Western Puerto Rico seismicity*, USGS OFR80-192, 135 pp. (en inglés).
- Assinovskaya B. A. y Solovyev S. L., 1994, "Definition and description of the sources zone of potencial earthquakes in the Barents Sea", *Physics of the Solid Earth*, 29(8):664-675 (en inglés).
- Bhathia S. C., Chetty T. R. K, Filomonov M., Gorshkov A., Rantsman E. y Rao M.N., 1992, *Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan Arc region*, Proc. Indian Acad.Sci. Earth Planet. Ser., 101(4):369-385 (en inglés).
- Berkey C. P., 1915, *Geological reconnoissance of Puerto Rico*, Editorial Academia de Ciencias de Nueva York, New York (en inglés).
- Briggs R. P. y Akers J. P., 1965. "Hydrogeologic map of Puerto Rico and adjacent islands", *Hydrologic investigations, Atlas HA-197*, Editado por Geological Survey.
- Bunce E. T. y Fahlquist D. A., 1962, "Geophysical investigation of the Puerto Rico trench and outer ridge", *J. Geophys. Res.*, 67(10):3,955-3,972 (en inglés).
- Burke K., Cooper C., Dewey J. F., Mann P. y Pindell J. L., 1984, *Caribbean tectonics and relative plate motions*. Geological Society of America Memoir, 162:31-63 (en inglés).
- Byrne D. B., Suárez G. y McCann W. R., 1985, "Muertos trough subduction-microplate tectonics in the northern Caribbean?", *Nature*, 317:420-421 (en inglés).
- Calais E., Mazabraud Y., Mercier de Lèpinay B., Mann P., Mattioli G. y Jansma P., 2002, "Strain partitioning and fault slip rates in the NE Caribbean from GPS measurements", *Geoph. Res. Letters*, 29:18 (en inglés).

- Case J. E. y Holcombe T. L., 1980, "Tectonic map of Caribbean. U.S.", *Geol.Surv.Misc.Invest.Ser.*, Map I-1100 (scale 1:2,500,000).
- Case J. E., Holcombe T. L. y Martin R. G., 1984, "Map of geologic provinces in the Caribbean region", *Geol.Soc.Am. Memor.*, 162:1-31 (en inglés).
- Chigariov V. P., 1977, Aspectos teóricos y regionales del análisis morfoestructural. en *Compendio de la Sociedad Moscovita de Experimentadores de la Naturaleza*, Editorial de la Universidad de Moscú, 12, 85-95 (en ruso).
- Cisternas A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A. I., Kosobokov V., Lambert M., Ranzman E., Sallantin J., Soldano H., Soloviev A. y Weber C., 1985, "A dual approach to recognition of earthquake prone areas in western Alps", *Annales Geophysicae*, 3(2):249-270 (en inglés).
- Clinton J. F., Cua G., Huérfano V., Hillebrandt-Andrade Ch. Von y Martínez Cruzado J., 2006, "The current state of seismic monitoring in Puerto Rico", *Seismological Research Letters*, 77(5):532-543 (en inglés).
- Cotilla M. O. y Córdoba D., 2003, "Caracterización morfotectónica de Galicia, España", *Revista Geofísica*, 58:5-56.
- , 2004, "Morphotectonics of the Iberian Peninsula", *Pure appl. geophys.*, 42(4):589-602 (en inglés).
- , 2004a, "Present geomorphological characteristics of Alboran islet and surroundings, Spain: a diagnosis", *Geogr.Fis.Dinam.Quat.*, 27:3-19 (en inglés).
- , 2009, "Morphostructural analysis of Jamaica", *Geotectonics*, 43(5):420-431 (en inglés).
- , 2009a, "Morfotectónica de Murcia, España", *Rev. Geográfica*, 146:77-110.
- Cotilla M. O., Córdoba D. y Calzadilla M., 2007, "Morphotectonic study of Hispaniola", *Geotectonics*, 41(5):368-391 (en inglés).
- Cotilla M. O., Córdoba D. y Herráiz M., 2004, "Main morphotectonic characteristics of Asturias, Spain", *Geofísica Internacional*, 44(1):65-101 (en inglés).
- Cotilla M. O., Díaz L., González D., Fundora M. y Pacheco M., 1997, "Estudio morfoestructural de La Española", *Revista Minería y Geología*, 14(3):3-88.
- Cotilla M. O., González E. C., Franzke H. J., Díaz J. L., Arteaga F. y Alvarez L., 1991, "Mapa neotectónico de Cuba, escala 1:1,000,000", *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 22, 37 p.
- Cotilla M. O., Rubio M., Alvarez L. y Grünthal G., 1997a, "Potenciales sísmicos del sector Centro-Occidental del arco de Las Antillas Mayores", *Revista Geofísica*, 46:127-150.
- Cox R. T., 1994a, "Analysis of the drainage symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment", *Geol.Soc.Am.Bull.*, 106, 571-581 (en inglés).

- Deng J. y Sykes L. R., 1995, "Determination of Euler pole for contemporary relative motion of Caribbean and North American plates using slip vectors of intraplate earthquakes", *Tectonics*, 14:39-53 (en inglés).
- Díaz J. L., 1985, "Morfoestructura de Cuba occidental y su dinámica", Phd Thesis, Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de la URSS, 200 pp. (en ruso).
- Díaz Hernández L. E., 1985, *Temblores y terremotos de Puerto Rico*, Ponce, Puerto Rico.
- Dixon T. H., Farina F., Demets Ch., Jansma P., Mann P. y Calais E., 1998, "Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone deformation from decade of GPS observations", *J.Geophys.Res.*, 103(B7):15,157-15,182 (en inglés).
- Dolan J. F., Mullins H. T. y Wald D. J., 1998, "Active tectonics of north-central Caribbean: Oblique collision, strain partitioning and opposing subducted slabs. Special Paper", *Geol.Soc. of Am.*, 326:1-62 (en inglés).
- Dudley W. C. y Lee Min, 1998, *Tsunami*, 2nd ed. Honolulu, University of Hawaii Press (en inglés).
- Dumistrashko N. V. y Lilienberg D. A., 1954, "Utilización de los métodos geomorfológicos en las investigaciones sismotectónicas", en *Trudy Geofizika*, Academia de Ciencias de la URSS, Moscú, 25, 152 pp. (en ruso).
- Fielding H. y Taber S., 1919, "The Porto Rico earthquakes of October-November 1918", *Bull.Seism.Soc.Am.*, 9 (4):95-127 (en inglés).
- Filosofov V. P., 1960, *Short guide of morphometric methods to search tectonic structures*, Academy of Sciences of the URSS, Saratov, 45 p. (en ruso).
- Gatinsky Yu. G. y Rundquist D. V., 2004, "Geodynamics of Eurasia: Plate tectonics and block tectonics", *Geotectonics*, 38(1):1-16 (en inglés).
- González E., Cotilla M., Cañete C., Carral R., Díaz J. y Arteaga F., 2003, "Estudio morfoestructural de Cuba", *Geogr.Fís.Dinam.Quat.*, 26:49-69.
- Gorielov S. K., Kulmammedov M. y Kurbanov M., 1973, *Relación entre el relieve, las estructuras profundas y la sismicidad en Kopetdag*, Editorial Nauka, Moscú, 108 pp. (en ruso).
- Gorshkov A. I. y Soloviev A. A., 2009: Recognition of posible locations of future $M \geq 6.0$ earthquakes: the Mediterranean mountain belts, *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(3):219-319 (en inglés).
- Gorshkov A. I., Panza G. F., Solov'Ev A. A. y Aoundia A., 2004, "Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides", *Bolletino della Societa Geologica Italiana*, 123:3-18 (en inglés).
- Gorshkov A. I., Kuznetsov I. V., Panza G. F. y Soloviev A. A., 2000, "Identification of future earthquake sources in the Carpatho-Balkan orogenic belt using morphostructural criteria", *Pure appl.geophys.*, 157:79-95 (en inglés).

- Grindlay N. R., Hearne M. y Mann P., 2005, "High risk of tsunami in the northern Caribbean", *EOS, Trans.Amer.Geophys. Union*, 86(12):121-126 (en inglés).
- Guerasimov I. P., 1946, "Experiences on the geomorphological interpretation of the general scheme of geological structure of the URSS", *Phys.Geogr.Jour.*, 12:33-46 (en ruso).
- , 1973, "Dinamic correlation between recent crustal movements and the exogene processes", en *Recent Crustal Movements*. Academy of Sciences of the URSS, Esthonia (en ruso).
- Guerasimov I. P. y Rantsman E. Ya., 1973, "Morphostructures of mountain countries and the seismicity", *Geomorphology*, 1:3-13 (en ruso).
- Gvishiani A., Gorkhov A., Kosobokov V., Cisternas A., Philip H. y Weber C., 1987, "Identification of seismically dangerous zones in the Pyrenees", *Annales Geophysicae*, 87(06B):681-690 (en inglés).
- Hack J., 1973, "Stream profile analysis and stream gradient index", *U.S. Geol. Survey J. Res.*, 1:421-429 (en inglés).
- Hernández J. R., Seguinot J. y Reyes R., 2002, "Islas de Puerto Rico y de Culebra: regularidades geomorfológicas de su relieve costero y submarino", *Investigaciones Geográficas*, UNAM, 47:7-19.
- Hernández J. R., Lilienberg D. A. y González R., 1990, "Principales nudos morfoestructurales sismoactivos de Cuba Suroriental", Academia de Ciencias de Cuba, *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 17:67-77.
- Horsfield W. T., 1975, "Quaternary vertical movements in the Greater Antilles", *Geol.Soc.Am.Bull.*, 86:933-938 (en inglés).
- Jain V. E., 1980, *Geotectónica general*, Editorial Mir, Moscú, vols. 1 y 2.
- Jansma P. E., Mattioli G. S., López A., Demets A. Ch., Dixon T. H., Mann P. y Calais E., 2000, "Neotectonics of Puerto Rico and the Virgin Islands, northeastern California, from GPS geodesy", *Tectonics*, 19(6):1,021-1,037 (en inglés).
- Kafka A. L. y Weiden T. J., 1979, "The focal mechanisms and depths of small earthquakes as determined from Rayleigh wave radiation pattern", *Bull.Seismol.Soc.Am.*, 69:1,379-1,390 (en inglés).
- Kaye C. A., 1959, *Shoreline feature and Quaternary shoreline changes in Puerto Rico*, Editorial del Servicio Geológico Federal, Washington, D.C. (en inglés).
- Kelleher J., Sykes L. y Oliver J., 1973, "Possible criteria for predicting earthquake locations and their applications to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean", *J.Geophys.Res.*, 78:2,547-2,581 (en inglés).
- Korzhev S. S., 1979, "Estudio del diseño general de la red fluvial", en *Análisis morfoestructural de los sistemas fluviales en la URSS*. Editorial Nauka, Moscú, 5-9 pp. (en ruso).

- Krestnikov T. P., 1987, "Geological aspects of earthquakes hazard", en *Proceedings of the UNDRO/USSR/UNESCO/UNDP/Training Seminar on Earthquake Prediction and Mitigation of Earthquake Losses*, URSS., 28 pp. (en inglés).
- Krestnikov V. N., Neresov I. L. y Shtange D. V., 1992, "Seismic zoning of the Pamir and Tien Shan areas", *Izvestiya Earth Physics*, 28(10):833-847 (en ruso).
- Ladd J., Holcombe J. L., Westbrook G. K. y Edgar N. J., 1990, *Caribbean marine geology: active margins of the plate boundary*, en *The Geology of North America, Vol. H. The Caribbean Region (A decade of North American Geology)*. (Dengo, G. y Case, J. E., Eds.), Boulder, Colorado, Geological Society of America, 1990, 261-290 pp. (en inglés).
- Lander J. F. y Lockridge P. A., 1989, *United States Tsunamis (Including United States Possessions) 1690-1988*, Boulder: National Geophysical Data Center (en inglés).
- Larne D. K. y Ryan H. F., 1990, *Extensional tectonism in the Mona Passage, Puerto Rico and Hispaniola: A preliminary study*, *Trans. Caribbean Geol.Conf.*, 12:301-313 (en inglés).
- Larue D. K., 1994, *Puerto Rico and the Virgin Islands*, en *Caribbean geology: an introduction*. Edited by S. K. Donovan y T. A. Jackson, University of the West Indies Publisher's Association, Kingston (en inglés).
- Levchenko V. A. y Riabujin A. G., 1971, "Sobre la estructura en bloques del shelf septentrional de Cuba", *Geotectonics*, 5 (en ruso).
- Lewis J. y Drapper G., 1990, "Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean region. The Geology of North America, vol. H. The Caribbean Region", *The Geol.Soc. of Am.*, chapter 4:77-140, 1990 (en inglés).
- Liu Z., Zhao G. y Xu X., 1999, "Inferred seismic fault associated with the 1998, M=6.22 Zhanbei-Shanys earthquake, Hebei province, China", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89(2):550-554 (en inglés).
- Mann P. y Burke K., 1984, *Neotectonics of the Caribbean. Review of Geophysics and Space Physics*, 22(4):309-392 (en inglés).
- Mann P., Calais E., Ruegg J. C., DeMets C. y Jansma P. E., 2002, "Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations", *Tectonics*, 2(6) (en inglés).
- Mann P., Schubert C. y Burke K., 1984a, "Review of Caribbean neotectonics", en Dengo, G. y Case, J. E. (Eds.). *The Caribbean Region*. Bulder Colorado. Geological Society of America, *The Geology of North America*, vol. H, 307-338, 1984a (en inglés).
- Mann P., Taylor F. W., Lawrence E. y Teh-Lung K. U., 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 (en inglés).

- Masson D. G. y Scanlon K. M., 1991, "The neotectonic setting of Puerto Rico", *Geol.Soc.Am.Bull.*, 103:144-154 (en inglés).
- McCann W. R., 2000, "Microearthquake data elucidate details of Caribbean subduction zone", *Geoph.Res.Letters*, 73(1):25-32 (en inglés).
- McCann W. R. y Pennigton W. D., 1990, "Seismicity large earthquakes and the margin of the Caribbean plate. The Geol. of North America, Vol. H. The Caribbean Region", *The Geol.Soc. of Am.*, chapter 4:291-305 (en inglés).
- McCann W. R. y Sykes L. R., 1984, "Subduction and aseismic ridges beneath the Caribbean Plate: implications for the tectonics and seismic potential of the northeastern Caribbean", *J.Geophys.Res.*, 89(6):4,493-4,519 (en inglés).
- Merritts D. y Herterbergs T., 1994, "Stream networks and long term surface uplift in the New Madrid seismic zone", *Nature*, 265:1,081-1,084 (en inglés).
- Meyerhoff H. A., 1933, *Geology of Puerto Rico. Editorial Universidad de Puerto Rico*, Río Piedras (en inglés).
- Mitchell R. C., 1954, *A survey of the Geology of Puerto Rico*, Editorial Estación Experimental Agrícola, Río Piedras, (en inglés).
- Molnar P. y Sykes L. R., 1969, "Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity", *Geol.Soc.Am.Bull.*, 80:1,639-1,684 (en inglés).
- Monroe W., 1976, *Some tropical landforms of Puerto Rico*, Editorial Servicio Geológico, Washington (en inglés).
- Monroe W., 1980, "Geology of the Middle Tertiary formations of Puerto Rico. U.S.", *Geological Survey Professional Paper*, P593, 93, (en inglés).
- Monroe W., 1980a, *The karst landform of Puerto Rico*, Editorial Servicio Geológico, Washington (en inglés).
- Morisawa M., 1985, *Rivers*. Longman, Londo and New York (en inglés).
- Moussa M. T., Seiglie G. A., Meyerhoff A. A. y Taner I., 1987, "The Quebradillas limestone (Miocene-Pliocene), northern Puerto Rico and tectonics of the northeastern Caribbean margin", *Geol.Soc.Am.Bull.*, 99(3):427-439 (en inglés).
- Müeller B., Reinecker J., Heibach O. y Fuchs K., 2000, *The 2000 release of the World Stress Map* (available online at www.world-stress-map.org).
- Nikolaev N. I., 1982, *Neotectonic and its representation on the structure and relief of the URSS*, Geosgeoltejuzdat, Esthonia, 392 pp. (en ruso).
- Osborn G. y du Toit C., 1991, "Lateral plantation of river as a geomorphic agent", *Geomorphology*, 4:249-260 (en inglés).
- Pacheco J. F. y Sykes L. R., 1992, "Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989", *Bull.Seismol.Soc.Am.*, 82:1,306-1,349 (en ruso).
- Panagiotopoulos D. G., 1995, "Long-term earthquake prediction in Central America and Caribbean Sea based on the times and magnitude-predictable model", *Bull.Seism.Soc.Am.*, 85(4):1,190-1,201 (en inglés).

- Picó R., 1975, *Nueva Geografía de Puerto Rico: física y económica*, Editorial Universidad de Puerto Rico, San Juan.
- Pratt W. K., 1978, *Digital image processing*, A Willey - Interscience Publication, John Willey y Sons. New York, 749 pp. (en inglés).
- Prentice C. S., Mann P. y Burr G., 2000, *Prehistoric earthquakes associated with a Late Quaternary fault in the Lajas Valley, southwestern Puerto Rico*, Eos, Transactions of the American Geophysical Union, 81, F1182 (abstract) (en inglés).
- Prentice C. S. y Mann P., 2005, "Paleoseismic study of the South Lajas fault: First documentation of an onshore Holocene fault in Puerto Rico", in *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas*, ed. P. Mann, Geological Society of America Special Paper 385, pp. 215-222 (en inglés).
- Rantsman E. Ya., 1961, "Modern and recent tectonics of seismic regions of Middle Asia according to geomorphological data", en *Recent crustal movements and methods of studying them*, Moscú, 135-149 pp. (en ruso).
- , 1979, *Sites of earthquakes and morphostructures of mountain countries*, Editorial Nauka, Moscú, 171 p. (en inglés).
- Reid H. F. y Taber S., 1919, *The Porto Rico Earthquake of 1918: With descriptions of earlier earthquakes*, Report of the earthquake investigation commission, United States House of Representatives Document No. 269, Government Printing Office, Washington D.C. (en inglés).
- Reyes L., 1977, "Sismicidad y riesgo sísmico de La Española, Jamaica y Puerto Rico", *Boletín del IMME*, XV:59-60.
- Rona P. A., 1980, *The central North Atlantic Ocean basin and continental margin: Geology, geophysics, geochemistry and resources including the Trans-Atlantic geotransverse (TAG)*, Miami, Florida, NOAA Environmental Research Laboratories, Report 99 (en inglés).
- Rubio M., 1982, "Ocurrencia de tsunamis en el Caribe", *Revista Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 2:170-180 (1982).
- Schenkova Z., Schenck V., Pospissil C. y Kottnauer P., 1995, "Seismogeological pattern of transition area between the eastern Alps and the western Carpathians", *Tectonophysics*, 248:235-245 (en inglés).
- Schwab W. C., Danforth W. W., Scalon K. M. y Masson D. G., 1991, "A giant submarine slope failure on the northern insular slope of Puerto Rico", *Mar. Geol.*, 96:237-246 (en inglés).
- Shepherd J. B. y Lynch L. L., 1992, "An earthquake catalogue for the Caribbean Part I, the instrumental period 1502-1900", Informe en la Reunión del Comité Ejecutivo del Programa Latinoamericano y del Caribe de Vulnerabilidad Sísmica, 59 p.

- Sherve R. L., 1966, "Statistical law of stream numbers", *J. Geology*, 74:17-37 (en inglés).
- Speed R. C. y Larue D. K., 1991, "Extension and transtension in the plate boundary zone of the northeastern Caribbean", *Geoph.Res.Lett.*, 18(3):573-576 (en inglés).
- Stein S., Demets C., Gordon R. G., Brodholt J., Argus D., Engeln J. F., Lundgren P., Stein C., Weins D. S. y Woods D. F., 1988, "A test of alternative Caribbean plate relative motion models", *J.Geophys.Res.*, 93:3,041-3,050 (en inglés).
- Strahler A. N., 1957, "Quantitative analysis of watershed geomorphology", *A.Geophys. Union Trans.*, 38(6):913-920 (en inglés).
- Sykes L. R. y Seeber L., 1985, "Great earthquakes and great asperities, San Andreas fault, southern California", *Geology*, 13:835-838 (en inglés).
- Sykes L. R. y Ewing M., 1965, "The seismicity of the Caribbean region", *J.Geophys.Res.*, 70(20):5,065-5,074 (en inglés).
- Sykes L. R., McCann W. R. y Kafka A. L., 1982, "Motion of Caribbean plate during last 7 million yr and implications for earlier Cenozoic movements", *J.Geophys.Res.*, 87:10,656-10,676 (en inglés).
- Taber S., 1922, "The great fault troughs of the Antilles", *J.Geol.*, 30:89-114 (en inglés).
- United States Geological Survey, 1988, *Catalog of first motion focal mechanisms 1984-1988*, Open File Rep., 86-520 A.
- , 2009, Puerto Rico and the Virgin Islands earthquake information. <http://earthquake.usgs.gov/regional/world/index>.
- Ushakov S. A., Avgaev A. I., Galushkin Yu. I. y Dubikin E. P., 1979, "Destrucción de la isostasia de la litósfera de la región del Caribe y análisis geodinámico de su naturaleza", en *Tectónica y geodinámica de la región del Caribe*, Editorial Nauka, 63-77 pp., Moscú (en ruso).
- Van Gestel J. P., Mann P., Grindlay N. R. y 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(2-4):259-288 (en inglés).
- Van Gestel J. P., Mann P., Dolan J. F. y Grindlay N. R., 1998, "Structure and tectonics of the Upper Cenozoic Puerto Rico-Virgin Islands carbonate platform as determined from seismic reflection studies", *J.Geophys.Res.*, 103(12):30,505-30,530 (en inglés).
- Westbrook G. K., Boot H. P. y Peacock J. H., 1973, "Lesser Antilles subduction zone in the vicinity of Barbados", *Nature Physical Science*, 244:118-120 (en inglés).

Zapp A. D., Bergquist H. R., Thomas C. R. y Berquist H. R., 1948, "Tertiary geology of the coastal plains of Puerto Rico", en *Oil and gas investigations map OM-0085*, 52-54 pp., USGS.

Zhidkov M. P., Rotvain I. M. y Sadowskiy A. M., 1975, *Forecast of the more probable sites occurrence of strongest earthquakes, IV*, Papers of Seismology, 8:53-70 (en ruso).