

Islas de Puerto Rico y de Culebra: regularidades geomorfológicas de su relieve costero y submarino

José Ramón Hernández Santana*
José Seguinot Barbosa**
Ramiro Reyes González*

Recibido: 10 de julio de 2001
Aceptado en versión final: 29 de marzo de 2002

Resumen. El reconocimiento morfodinámico del litoral, su correlación con los diseños tectónicos principales y el análisis morfoescultural costero de la isla de Puerto Rico, y en especial de la isla Culebra, permitió diferenciar y valorar la destacada influencia de la tectogénesis insular en la configuración de los patrones geomorfológicos del interfase tierra-mar y de su entorno submarino.

Dentro de las principales regularidades tectogenéticas de la morfoestructura insular y de su morfoescultura litoral se destacan: la alineación morfotectónica de pequeños grupos insulares y de sus rasgos morfoesculturales internos; la aparición y alineación de cordones de afloramientos pétreos abrasivos; la alineación paralela y quebrada del litoral; el control tectónico de la configuración de la línea costera y de sus accidentes por diseño ortogonal de los sistemas disyuntivos diagonales predominantes NW-SE y NE-SW; el desarrollo de tómbolos por fallamiento paralelo a la costa y ascenso de pequeños bloques insulares contiguos; la distribución amplia de microbahías y microensenadas condicionadas por alta densidad de fallamiento y agrietamiento transversal paralelo; la difusión de costas cóncavas en forma de concha, de carácter acumulativo biogénico entre salientes abrasivos discretos; y la presencia de sistemas alternos de *horst* y graben, como factor condicionante de la alternancia de costas abrasivas (puntas, cabos y promontorios) y acumulativas (playas, pantanos, manglares) o ensenadas y bahías. Este último rasgo es distintivo y determinante en la morfodinámica de la costa occidental de la isla de Puerto Rico y la septentrional de la isla Culebra.

Por otra parte, se presenta el esquema estructuro-geomorfológico del relieve submarino de los mares y océanos circundantes a la isla de Puerto Rico, bajo la evolución de los elementos mayores y más característicos de la corteza terrestre del Caribe septentrional. Los principios de su clasificación tipológica distinguen las grandes estructuras, en las cuales se desarrollan los complejos morfogenéticos. En los bordes sumergidos de las placas continental Norteamericana y oceánica Caribe, se caracterizan las grandes categorías del relieve submarino (plataforma y talud insulares, depresiones y fosas profundas), utilizando los rasgos morfológicos, genéticos e hipsométricos de los distintos complejos morfogenéticos (llanuras, mesetas y cadenas montañosas) de las cuencas marinas y oceánicas, y se presentan en un mapa estructuro-geomorfológico.

Palabras clave: Geomorfología marina, formas litorales, relieve submarino.

Puerto Rico and Culebra Islands: geomorphological features of the coastal and submarine relief

Abstract. The littoral's morphodynamic survey, its correlation with the main tectonic designs and the coastal morpho-structural analysis of Puerto Rico, and especially of the Culebra island, allowed to differentiate and assess the significant influence of island tectogenesis upon the configuration of geomorphological patterns at the land-sea interface as well as its submarine surroundings.

The major tectogenetic peculiarities of island morphostructure and its littoral morpho-sculpture include: the morphotectonic alignment of small groups of islands as well as their internal morpho-sculptural features; the appearance and alignment of abrasive rock outcrop ranges; the littoral's parallel and interrupted alignment; the tectonic control of the coastal configuration and its accidents derived from the orthogonal design of the prevailing NW-SE and NE-SW diagonal disjunctive systems; tomolos development by faulting parallel to the coastline and uprising of small contiguous island blocks; ample distribution of microbays and microinlets generated by a high faulting density and parallel transversal cracking, the diffusion of concave shell-shaped coasts of a cumulative and biogenic nature between discreet abrasive projections; and the presence of alternating *horst* and graben systems as a conditioning factor for the alternation of abrasive (ends, capes and promontories) and cumulative coasts (beaches, marshes and

* Instituto de Geografía Tropical, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Calle 13 No. 409, esquina a F, Vedado, C.P. 10400, La Habana, Cuba. Email: igt@ceniai.inf.cu; geootrop@unepnet.inf.cu

**Centro de Informática y Estudios Interdisciplinarios, Universidad de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

mangroves) or inlets and bays. This latter features is unique and determinant in coastal morpho-dynamics at western Puerto Rico and the Northern coast of Culebra island.

Separately, this work includes the structural-geomorphic pattern of submarine relief of seas and oceans surrounding the Puerto Rico island, derived from the evolution of the major and most characteristic elements of the northern Caribbean's earth crust. The principles of its typological classification differentiate the major structures within which morpho-genetic complexes develop. At the submerged edges of the North American and oceanic Caribbean continental plates the major categories of submarine relief (island platform and slope, depressions and deep trenches) are characterized using the morphological, genetic and hypsometrical features of the different morpho-genetic complexes (plains, plateaus and mountain ranges) of marine and oceanic basins, and these are shown in a structural-geomorphic map.

Key words: Marine geomorphology, littoral forms, submarine relief.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones sobre la morfología, la estructura, la génesis y la dinámica del relieve submarino, en especial de las zonas de transición oceánico-continental, como lo es el Mediterráneo Americano o Gran Caribe, constituyen uno de los objetivos básicos de la ciencia geomorfológica contemporánea.

Las particularidades de la situación geodinámica y del desarrollo morfoestructural de esta región están determinadas por su ubicación entre los continentes de América del Norte y América del Sur, y entre las cuencas oceánicas del Pacífico y del Atlántico, estando compuesta por sistemas de arcos insulares de diferente edad, por fosas y cuencas profundas y cadenas montañosas submarinas.

Estas características la ubican como una región singular de geoformaciones de transición.

El objetivo central del presente trabajo es revelar los rasgos esenciales del relieve del fondo de los mares y océanos circundantes a la islas de Puerto Rico y Culebra, así como determinar la influencia de la tectogénesis en sus diseños geomorfológicos costeros y en la dinámica de los procesos litorales.

La posición geográfica de las islas de Puerto Rico y de Culebra, en el borde nororiental de la zona de interacción entre las placas continental Norteamericana y oceánica Caribe,

constituye uno de los factores principales de su desarrollo geólogo-tectónico insular. El largo proceso de consolidación geotectónica en el Caribe septentrional estuvo marcado por dos etapas bien diferenciadas: la mesozoica de colisión convergente interplacas Norteamericana-Suramericana, y la neógeno-cuaternaria de desplazamiento horizontal y colisión tangencial interplacas Norteamericana-Caribe.

Bajo los campos de esfuerzos máximos de ambos mecanismos de la corteza terrestre se desarrollaron diferentes sistemas disyuntivos y diseños estructurales, claramente reflejados en los estudios geológicos de Briggs y Akers (1965), en las interpretaciones morfoestructurales del reconocimiento geomorfológico del territorio, así como de otros sectores antillanos, como Cuba suroriental (Hernández, 1987).

Sobresale por su extensión y preponderancia el sistema de fallas de dirección SE-NW y ESE-WNW, que atraviesa, desde las costas de Fajardo, Humacao, Maunabo y Guayama al este, a todo el interior montañoso central de Puerto Rico, reflejándose en el relieve costero occidental de Aguadilla, Rincón, Mayagüez, Cabo Rojo y Melones, continuando hacia el NW, a lo largo del eje dorsal insular.

Precisamente este es el sistema disyuntivo que define y controla la morfoestructura y la morfoescultura litorales de la isla Culebra, ubicada al noreste de la isla Grande.

Desde el sur, se distingue, con menor difusión, el sistema de fracturamiento SW-NE, que corta fundamentalmente la región centro-oriental de Puerto Rico, reflejándose en el relieve de Santa Isabel, Salinas y Guayama.

El diseño disyuntivo sublatitudinal, de dirección oeste-este, se desplaza a lo largo de la región kárstica norteña y de los llanos costaneros aluviales.

Este sistema es intersectado por el fallamiento submeridional, de dirección norte-sur, que en su superposición al anterior, determina una disección kárstica ortogonal en la región geológica más joven de la isla.

A grande rasgos, estos sistemas disyuntivos definen y controlan el desarrollo morfoestructural insular y regulan los procesos morfodinámicos, proporcionando una rica y diversa morfología litoral.

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

- Analizar el papel del mecanismo geotectónico de desplazamiento lateral de izquierda entre las placas Norteamericana y Caribe, imperante a lo largo del Caribe septentrional, en la formación del relieve submarino y emergido de la isla de Puerto Rico e islas vecinas.
- Revelar la influencia de la tectogénesis en la morfología costera insular y contribuir con dicha plataforma estructural a los estudios futuros de morfodinámica litoral.
- Establecer las bases para los levantamientos morfotectónico y morfoestructural de la isla de Puerto Rico, como continuidad de dichas investigaciones en las Grandes Antillas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis y la interpretación del relieve submarino y litoral de las islas de Puerto Rico y Culebra, así como los grupos insulares y cayos adyacentes, se emplearon los métodos siguientes:

- ♦ *Análisis del relieve emergido mediante el empleo de los mapas hipsométricos y topográficos a gran escala (1:20 000), y del submarino, con la ayuda de los batimétricos a escalas media y pequeña.* Permitted obtener una visión cualitativa y una caracterización cuantitativa del relieve, proporcionando datos sobre la diferenciación de los movimientos neotectónicos, el grado de disección, las direcciones predominantes de las zonas de fallas y elementos lineales del relieve, así como los rasgos generales y regionales de las categorías geomorfológicas del relieve del fondo de los mares y océanos. Este método constituye la base principal para los cálculos cuantitativos y una de las primeras etapas del estudio estructuro-geomorfológico.
- ♦ *Análisis de las imágenes satelitales y fotos aéreas.* Facilitó la caracterización morfológica litoral del relieve, de determinadas formas y complejos geomorfológicos, así como la determinación de los límites de su contraste.
- ♦ *Análisis de los elementos lineales del relieve.* Permitted la determinación de los sistemas de fallas, morfoalineamientos y grietas de distinta orientación, y la formulación de la diferenciación estructuro-geomorfológica del territorio.
- ♦ *Métodos morfométricos del estudio del relieve.* Se utilizaron los mapas de densidad y profundidad de disección e hipsométrico, los cuales permitieron determinar la extensión de los bloques morfoestructurales.

- ♦ *Mapeo geomorfológico expedicionario.* Constituyó el soporte básico de las investigaciones sobre la morfología litoral de la isla de Puerto Rico, incluyendo un "bojeo terrestre" a lo largo de todas sus costas.

RELIEVE SUBMARINO DE PUERTO RICO Y REGIONES CIRCUNDANTES

Las raíces estructurales, tanto de la isla de Puerto Rico como de la extensa plataforma oriental de las islas Vírgenes, descansan en su posición geotectónica transicional entre las placas continental Norteamericana y oceánica Caribe.

Como resultado de las colisiones mesozoicas entre las grandes placas continentales Norteamericana y Suramericana, grandes y heterogéneos elementos morfotectónicos de la corteza terrestre, continentales y oceánicos, fueron desplazados horizontalmente, sobrecorridos e imbricados y finalmente acrecionados, determinando el cinturón orogénico de las Grandes Antillas (Seguinot, 1997).

A partir del Oligoceno, los cambios geodinámicos ocurridos en el complejo nudo interplacas del Caribe septentrional, establecieron un régimen de desplazamientos horizontales con componente de izquierda, que como explicamos anteriormente, deformaron y dislocaron ambas márgenes corticales bajo la influencia de sistemas de cizalla, derivados de los movimientos regionales tangenciales.

Estos sistemas disyuntivos, de dirección predominante del NW y NNW, así como del NE en la región meridional de la isla, conforman el diseño geomorfológico general de la Cordillera Central, la dirección de las principales cuencas y ríos, la configuración y morfología de las costas, el rumbo de pequeños grupos insulares, así como algunos elementos morfoestructurales de su

relieve submarino.

La evolución y consolidación de la gran macrounidad morfoestructural de la dorsal insular de la isla de Puerto Rico y la plataforma de las islas Vírgenes, así como el trazado de los rasgos fundamentales de su relieve submarino, también descansan en la historia del desarrollo de la fosa Los Muertos, al sur, y de Puerto Rico, al norte. Algunos autores (Mc Cann *et al.*, 1984) consideran el predominio de un mecanismo de subcorrimento en la fosa Los Muertos, a través del cual el lecho oceánico de la Cuenca de Venezuela se desplaza por debajo de la pequeña placa o bloque de Puerto Rico.

El reconocimiento y análisis batimétrico del talud insular en dicha región presenta, desde el sur de la isla Mona hasta el extremo suroriental de la isla Grande, un sistema escalonado de mesetas planas y onduladas, y de cadenas montañosas, separadas por sectores de fuerte y moderada inclinación del talud, lo cual puede aseverar el carácter pulsátil del mecanismo subductivo propuesto. Gran parte de estas morfoestructuras están controladas por un sistema disyuntivo sublatitudinal, paralelo a la fosa Los Muertos (Figura 1).

Este flanco sureño se caracteriza por la presencia de largos y profundos cañones transversales submarinos, entre los que sobresalen, de oeste a este, los cañones ramificados meridionales de isla Mona, Guanica, Aguayanilla, Cuchara, Muertos y los anónimos del extremo sureste de la isla.

Hacia el este, la complejidad geotectónica del talud aumenta con la presencia de un sistema alterno de depresiones profundas con cadenas montañosas y mesetas planas y onduladas de gran extensión, controladas por el conjunto de fallas de dirección noreste, con 45° aproximadamente con respecto al eje de máximos esfuerzos tangenciales interplacas Norteamericana-Caribe, y que

constituye el eje estructural principal que separa las megamorfoestructuras de las Antillas Mayores y Menores. A partir de esta zona de sutura, y hacia el sur, la endogénesis adopta mecanismos geotectónicos diferentes, con la consiguiente expresión geomorfológica del patrón insular volcánico de la zona de subducción del Atlántico.

Los elementos morfoestructurales más contrastantes son las depresiones profundas y alargadas del Paso Anegada, la cadena montañosa de Barracuda y la depresión profunda de Santa Cruz (St. Croix), esta última articulando con el extremo septentrional del arco insular de Aves, de configuración meridional. Hacia el oeste, la fosa de las islas Vírgenes contrasta con la plataforma homónima, al norte, y con la isla Santa Cruz y las mesetas montañosas de igual nombre. Esta última zona estructural presenta la mayor actividad sísmica suroriental.

Desde el arco volcánico de Aves hacia el oeste, se extiende un sistema escalonado de llanuras submarinas, transitando de *colinosas* y onduladas a planas en el sector abisal de la fosa Los Muertos.

Al norte de la isla de Puerto Rico se produce una alternancia de pendientes fuertes y suaves en el talud. El sector más meridional, cercano a la plataforma insular, sobresale por el amplio desarrollo de cañones submarinos, tales como Icacos, Sabana, Mameyes, Loiza, Río de La Plata, Tortuguero, Arecibo y Guajataca. Al este, a lo largo de la porción norte de la plataforma de islas Vírgenes, este elemento estructural está prácticamente ausente, lo cual puede atestiguar una moderada a débil intensidad de la dinámica neotectónica con su correspondiente diferenciación morfoestructural.

Hacia el extremo noroccidental se localiza el relieve submarino más complejo y dinámico, compuesto por el cañón Mona, el sistema escalonado de mesetas planas, ubicado al

norte de la isla Monito y la prolongación montañosa La Cadena. Estos últimos como límites estructurales del cañón Mona. Realmente, este singular cañón se abre al noroeste y luego al norte, como continuación del graben de la cuenca del río Culebrinas, que desemboca en la Ensenada de Aguadilla. En esta región noroccidental el diseño tectónico posee rumbo noroeste y controla todos los rasgos morfoestructurales de la dorsal insular (plataforma y talud insulares, sistemas montañosos y de mesetas escalonadas y tercio superior del cañón Mona), atendiendo a los patrones de cizallas derivados del desplazamiento tangencial máximo de la zona de sutura interplacas.

DISEÑO TECTÓNICO Y MORFOGÉNESIS LITORAL DE LAS ISLAS DE PUERTO RICO Y CULEBRA

A la luz del principio genético básico de la formación del relieve, como resultado de la interacción entre los procesos endógenos y exógenos, y tomando en consideración las evidencias geomorfológicas litorales de la isla de Puerto Rico e islas adyacentes, asimiladas durante reconocimientos geográficos expedicionarios, que reflejan el papel de la tectogénesis en el desarrollo morfo-dinámico del interfase tierra-mar, se presentan las principales regularidades siguientes (Figura 2):

- ♦ Alineación estructuro-disyuntiva de los pequeños grupos insulares y de sus rasgos morfoestructurales internos.

La influencia del fracturamiento tectónico, de dirección NW-SE, se refleja directamente en la configuración rectilínea y alineada de las islas e islotes nororientales (isla Culebra, grupo La Cordillera, islas Palominos, isla de Ramón, isla de Piñeros, Punta Puerca, Cayos de Luis Peña-Lobo-Lobito, isla Culebrita-Cayo Norte, Cayos Alcarraza-Los Gemelos) y occidentales (islas Desecho, islas Mona-Monito).

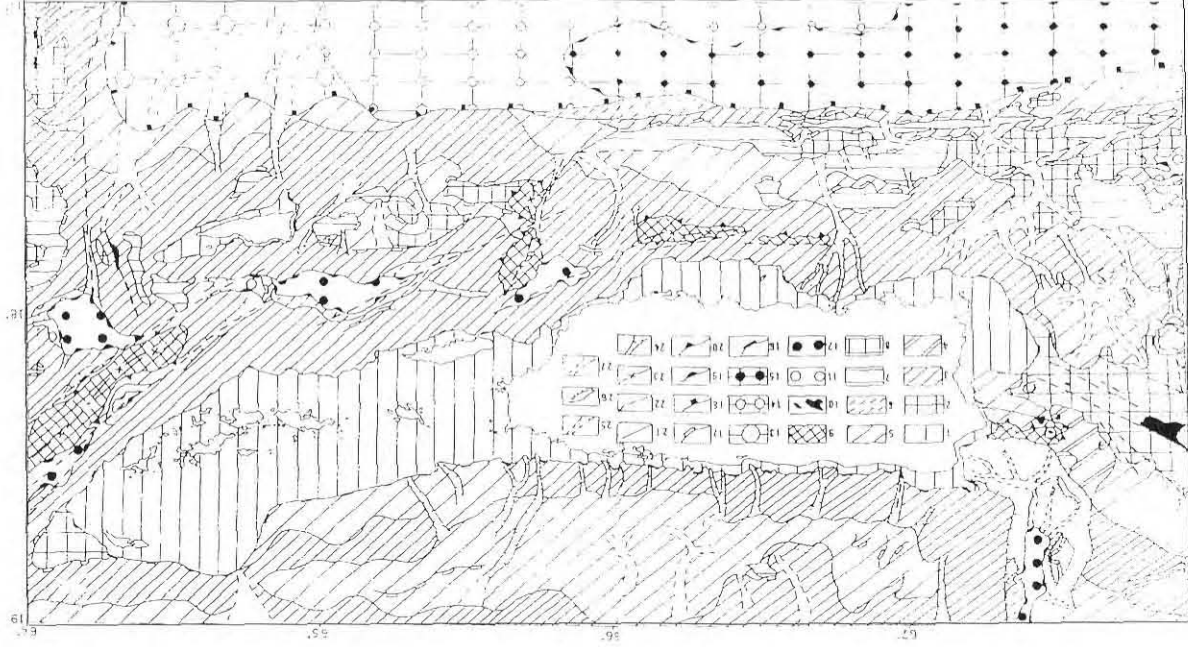
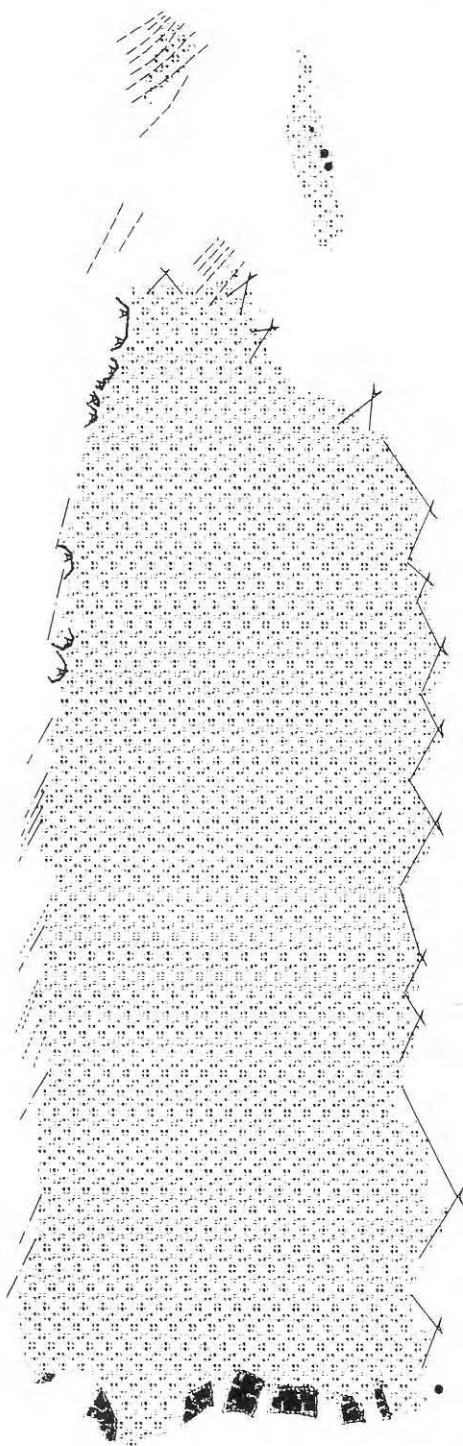


Figura 1. Mapa estructuro-geomorfológico del fondo de los mares y océanos circundantes a Puerto Rico.

Legenda: **TIPOS ESTRUCTURO-GEOMORFOLÓGICOS DEL RELIEVE SUBMARINO:** Dorsal insular submarina; **Plataforma insular:** 1. Llanuras abrasivo-acumulativas; 2. Mesetas escalonadas, pseudo-periclinales, prolongaciones axiales; **Talud insular:** 3. Pendientes abruptas, fuertemente disecionadas; 4. Pendientes escalonadas; 5. Pendientes suaves, débilmente disecionadas; 6. Llanuras inclinadas, colinosas, disecionadas; 7. Mesetas onduladas; 8. Mesetas planas; 9. Macizos y cadenas montañosas; 10. Depresiones estructurales locales; **Depresiones profundas:** 11. Llanuras inclinadas del fondo, perfléricas; 12. Llanuras abisales del fondo, planas; **Fosas profundas:** 13. Llanuras muy inclinadas, *collinosas*, de los bordes de las fosas; 14. Llanuras inclinadas, onduladas, del fondo; 15. Llanuras abisales del fondo, planas; **COMPLEJO DE FORMAS:** 16. Borde del escálon de la plataforma insular; 17. Borde de escaciones en el talud insular; 18. Pie del escálon del talud insular; 19. Pie de las pendientes de las depresiones profundas; 20. Pie de sistemas montañosos y alturas; 21. Fallas expresadas en el relieve, según datos geólogo-geofísicos; 22. Fallas, según evidencias geomorfológicas; 23. Ejes de cadenas montañosas y alturas; 24. Cañones submarinos; 26. Cañones submarinos de segundo orden, intracañones; 27. Valles submarinos.



LEYENDA

- Alineación estructuro-disyuntiva de grupos insulares y rasgos morfoescolturales internos.
- Alineación paralela y quebrada del litoral septentrional.
- Alineación de cordones de afloramientos pétreos abrasivos.
- ▒ Sectores litorales acumulativos, asociados a depresiones de graben, dentro del sistema alterno de horst y graben (condicionantes de la alternancia de costas abrasivas y acumulativas).
- Tómbolos por fallamiento paralelo a la costa y ascenso de pequeños bloques insulares contiguos.
- Microbahías y microencadenadas condicionadas por alta densidad de fallamiento y agrietamiento transversal paralelo.
- Costas concavas en forma de conchas, de carácter acumulativo biogénico, entre salientes abrasivos discretos.

Figura 2. Influencia de la tectogénesis en el relieve submarino y litoral de Puerto Rico e islas adyacentes.

En la isla de Culebra (Figura 3), el fraccionamiento paralelo de este diseño tectónico ha determinado, tanto en el litoral septentrional como en el meridional, la alternancia por pares extremos de promontorios y de playas, y ensenadas entre ellos, precisamente donde la debilidad del agrietamiento y del fallamiento facilitaron la acción marina abrasiva para la formación cóncava del litoral (Figura 4). Esta alternancia simétrica se evidencia, de oeste a este, de la manera como se muestra en la Tabla 1.

Al sur de la isla de Puerto Rico, la isla Caja de Muerto está configurada por alineamientos tectónicos de dirección SW-NE.

♦ Alineación paralela y quebrada del litoral.

El carácter generalizado del sistema de fracturamiento tectónico de dirección SE-NW regula la configuración rectilínea y orientación preponderante de la línea costera, con el comportamiento siguiente (de oeste a

este; Tabla 2).

En este contexto, las formaciones y cuencas lacustres de la laguna Tortuguero, la laguna San José, así como la cuenca de la bahía de San Juan obedecen a semejante control estructural.

♦ Aparición y alineación de cordones y afloramientos pétreos abrasivos.

Obedeciendo también al control del fracturamiento NW-SE, presente en todo el litoral septentrional de la isla, se distribuyen formaciones rocosas rectilíneas, de carácter abrasivo, a manera de "espigones" naturales discontinuos en su parte central, en Punta Morrillos, Punta Caracoles, Punta Las Tunas, Punta Palmas Altas, Punta Manatí, Punta Puerto Nuevo y Punta Cerro Gordo. Este accidente morfológico litoral, pero con otros rasgos fisiográficos y dimensión espacial, se aprecia en las relaciones estructurales del tramo costero Punta Escombrón-Punta del Morro con la isla de Cabras.

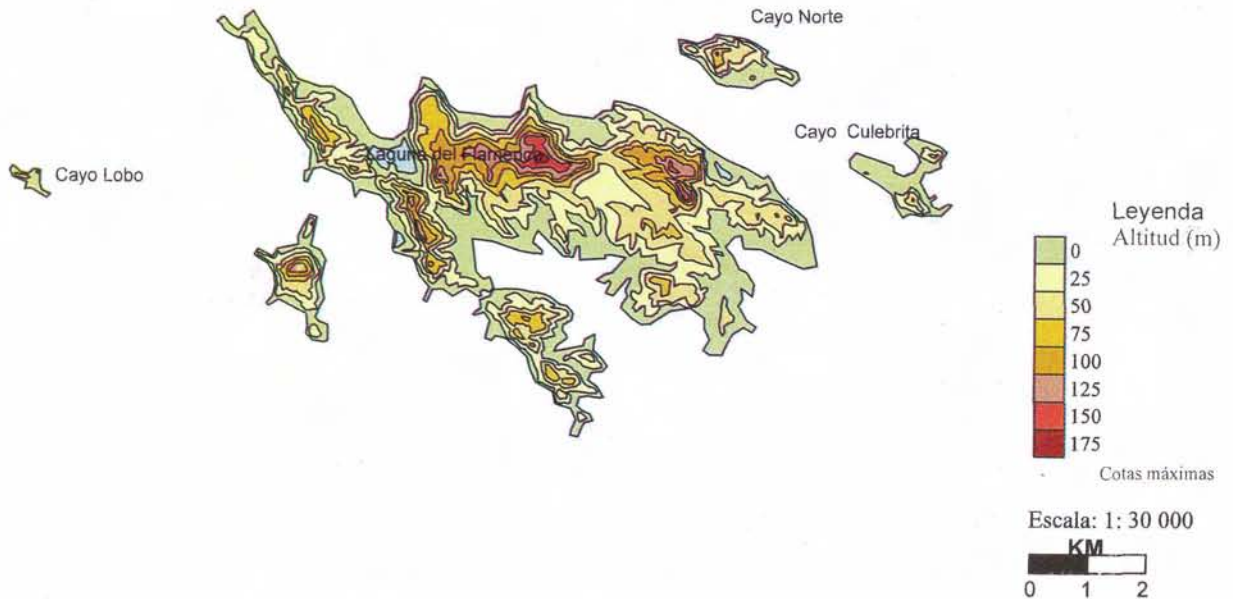


Figura 3. Mapa hipsométrico de la isla Culebra y cayos adyacentes.

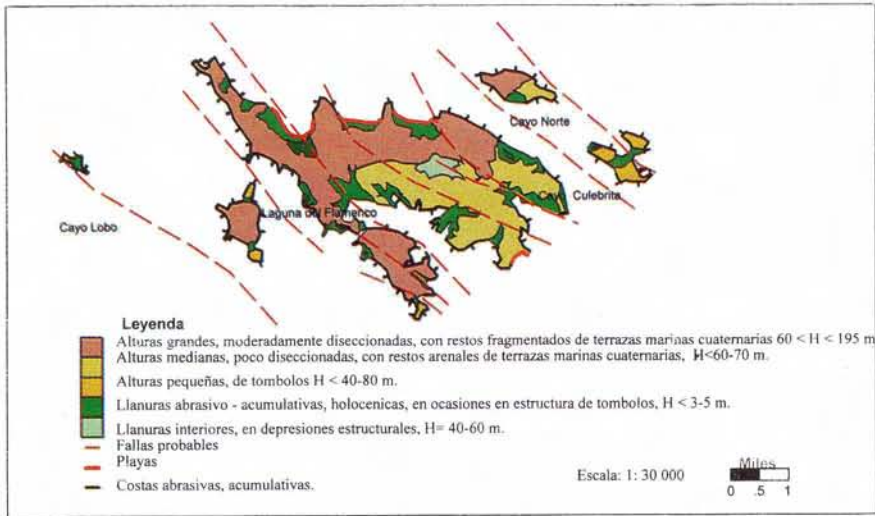


Figura 4. Rasgos geomorfológicos de la isla Culebra y cayos adyacentes.

Tabla 1. Conjunción asimétrica de promontorios (sectores convexos) y de playas (sectores cóncavos) del litoral de la Isla Culebra, debido al control tectónico

Accidente morfológico litoral	Litoral norte	Litoral sur
Promontorios	Punta de Molinos	Poblado Culebra
Playas	Playa Flamenco	Ensenada Honda
Promontorios	Punta Flamenco	Promontorio anónimo
Playas	Playa Resaca	Playa Larga
Promontorios	Punta Resaca	Promontorio anónimo
Playas	Playa Brava	Puerto del Manglar
Promontorios	Promontorio anónimo	Promontorio anónimo
	Canal de Cayo Norte	

Tabla 2. Control tectónico de la línea costera de la Isla de Puerto Rico, determinando sectores paralelos y rectilíneos en su costa septentrional

Sectores de orientación NW	Sectores intermedios transicionales
	Punta Agujereada - Punta Jacinto
Quebradillas - Punta Sardina	
	Punta Peñón - Punta Maracayo
Arecibo - Punta Maracayo	
	Arecibo - Punta Las Tunas
Punta Las Tunas - Tortuguero	
	Tortuguero - Punta Puerto Nuevo
Punta Puerto Nuevo - Punta Boca Juana	
	Punta Boca Juana - Bahía de San Juan
Isla de Cabras - Isla Verde	
	Isla Verde - Punta Maldonado
Punta Maldonado - Colonia Margarita	
	Colonia Margarita - Cabezas de San Juan

- ◆ Presencia de sistema pseudopericlinial alterno de *horst* y graben, como factor condicionante de la alternancia de costas abrasivas (puntas, cabos y promontorios) y acumulativas (playas, pantanos, manglares) o ensenadas y bahías.

La dorsal de la isla de Puerto Rico y de la plataforma de las islas Vírgenes se prolonga, por el fondo marino, a través de la cresta La Cadena (Isla Desecheo) y las mesetas escalonadas planas en el extremo occidental.

Aplicando la imaginación con un sentido geográfico, el litoral occidental de la Isla y las cadenas montañosas terminales, se asemejan a la estructura de una mano, alternando en sectores convexos y cóncavos, debido al

desarrollo de una comunidad de bloques con un estilo tridimensional de *horst* y graben alternos. Esta singular distribución cortical se refleja, de norte a sur, en los accidentes geográficos mostrados en la Tabla 3.

- ◆ Control tectónico de la configuración de la línea costera y de sus accidentes por diseño ortogonal de los sistemas disyuntivos diagonales NW-SE y NE-SW.

Esta estructura morfológica se concentra en la costa centro-suroccidental y oriental de Puerto Rico, reflejándose en accidentes cóncavos y convexos, respetando el carácter rectilíneo de sus contornos. Por el sur, y de oeste a este, se tiene señalado en la Tabla 4. En el litoral oriental, y de sur a norte la estructura morfológica se detalla en la Tabla 5.

Tabla 3. Influencia del sistema de horst y graben en la morfología litoral de la costa occidental de la Isla de Puerto Rico

En el litoral	En la tierra emergida
Punta Agujereada, Punta Borinquen	Cordillera Jicoa - Aguadilla
Ensenada Aguadilla	Gaben del valle del río Culebrinas
Punta Higuero - Punta Ensenada - Punta Cadena	Cadena San Francisco - Aguada
Ensenada anónima	Gaben del valle del río Cañas
Punta Algarrobo	Montañas de Uroyán
Bahía de Mayagüez	Valle de falla del río Yagüez
Punta Ostiones - Punta La Mela - Punta Guaniquilla	Montañas de Peñones - Cabo Rojo
Bahía de Boquerón	Gaben del valle de Lajas
Punta Melones - Punta Aguila - Punta Jagüey	Peñones de Melones - Sierra Bermeja

Tabla 4. Sistema ortogonal disyuntivo y su control en la morfología litoral meridional de la Isla de Puerto Rico

Sector cóncavo	Sector convexo
Bahía de Guayanilla - Bahía de Tallaboa	Punta Cuchara - Cayo Ratones
Boca Chica - Playa Santa Isabel	Punta Petrona
Bahía de Rincón	Mar Negro
Bahía de Jobos	Punta Ola Grande
Puerto Arroyo	Punta Guillarte
Puerto Patillas	Cabo Mala Pascua

Tabla 5. Sistema ortogonal disyuntivo y su control en la morfología litoral oriental de la Isla de Puerto Rico

Sector cóncavo	Sector convexo
	Punta Quebrada Honda
Puerto Yabucoa	Punta Guayanés
Puerto de Humacao - Playa de Naguabo	Punta Lima
Bahía Algodones	Punta Algodones
Ensenada Honda	Punta Puerca
Puerto Medio Mundo - Bahía Demajagua	Punta Mata Redonda - Punta de Fajardo
Playa de Fajardo - Punta Batería	Punta Gorda - Cabezas de San Juan

- ◆ Desarrollo de tómbolos por fallamiento paralelo a la costa y ascenso de pequeños bloques insulares contiguos.

Son muy frecuentes en el litoral meridional, como en Cabo Rojo, y en la isla de Vieques, donde se distribuyen, de manera continua, los tómbolos de Punta Negra y Cayo de Tierra, así como otras formaciones anónimas de estas características morfodinámicas. Durante la etapa cuaternaria del desarrollo del relieve de la isla Culebra, se aprecia la consolidación de varias de estas formaciones litorales (Figura 4).

- ◆ Distribución amplia de microbahías y microensenas, condicionadas por alta densidad de fallamiento y agrietamiento transversal paralelo.

Apreciable en el litoral meridional de la isla de Vieques, debido a los diseños disyuntivos de dirección NW-SE y NNE-SSW, desde Cayo Real hasta Punta Este; se detallan, de oeste a este (Tabla 6).

- ◆ Difusión de costas cóncavas en forma de concha, de carácter acumulativo biogénico, entre salientes abrasivos discretos.

Al este de los Llanos Costaneros Aluviales del Norte y, en especial, en la región estuarina de San Juan, se destaca este accidente, muy similar al descrito anteriormente, pero con un control tectónico-petrogénico más dé-

bil. Se desarrollan desde Punta Maldonado, donde se agrupan la Ensenada de Boca Vieja, Cataño (en la margen suroccidental de la Bahía de San Juan), los sectores contiguos entre Punta Las María y Punta Maldonado.

Más al este, pero con mayor influencia estructural, se presentan la desembocadura del río Espíritu Santo, otros sectores cóncavos entre Punta Picua y Punta La Bandera, y, finalmente, entre ésta y Cabezas de San Juan, están situados otros dos notables entrantes, carentes de toponimia.

En el caso de la isla Culebra (Figuras 3 y 4), la alineación paralela con dirección NE, de los principales bloques axiales, tanto de *horst* emergidos como los de graben-falla submarinos, que la integran, de oeste a este: Península Flamenco-Punta del Soldado (+), Bahía Flamenco-Ensenada Honda (-), Punta Flamenco-Cayo Verde (+), Monte Resca-Fraile (+), Playa Brava - Puerto del Manglar (-), San Isidro-Balcón-Cabeza de Perro (+), Canal de Cayo Norte-Canal de Culebrita (-), han determinado una composición paralela y alterna de promontorios abrasivos y ensenadas-playas, conjugada y en correspondencia genética entre sus costas septentrional y meridional.

Un análisis del plano morfoestructural, de la génesis morfoescultural litoral y del régimen morfodinámico de la costa actual, refleja un proceso de ascenso neotectónico sostenido de este sistema conjugado de bloques de

horst-graben y *horst-depresiones* de fallas, fundamentalmente durante el Cuaternario, con la correspondiente consolidación y fusión bajo la influencia de los procesos acumulativos marinos y del aporte terrígeno de las alturas (125-175 m) internas y periféricas de la isla Culebra.

Semejante evolución se corresponde con la alternancia, según el vector endógeno, de diferentes tipos genéticos de costas, a saber: abrasivas y acantiladas; acumulativas y de playas; y acumulativas biogénicas y cenogénicas (Figura 4).

Al oeste de la isla, están alineados con idéntica dirección, un conjunto de cayos, entre los que se destacan Cayo de Luis Peña, Cayo Lobo, Cayo Lobito, Cayo del Agua, Cayo Ratón, Cayo Yerba y el cayuelo El Mono, donde se evidencia la consolidación y fusión

descrita anteriormente. En el caso del Cayo de Luis Peña, se aprecia el desarrollo de dos tómbolos, tanto al norte como al sur, por la unión del núcleo insular principal con dos pequeños cayos periféricos, mientras que el Cayo Lobo debe su formación a la integración de tres cayos contiguos bajo la influencia morfodinámica de sus costas.

CONCLUSIONES

El desarrollo endogenético (tectogenético) en el Caribe septentrional determinó, paralelamente a la formación del relieve emergido, una contrastante diferenciación de los rasgos morfoestructurales del relieve submarino, durante dos etapas fundamentales: colisión convergente interplacas Norteamericana-Suramericana, durante el Mesozoico, y colisión tangencial interplacas Norteamericana-Caribe, durante el Neógeno-Cuaternario.

Tabla 6. Condicionamiento tectónico del sistema ortogonal en el desarrollo morfológico del litoral meridional de la Isla Vieques

Accidentes litorales convexos, salientes o promontorios	Accidentes litorales cóncavos, entrantes, pequeñas ensenadas
Cayo de Afuera (H = 20 m).	Puerto Real
Cayo de Tierra (casi tómbolo, H = 20 m).	Ensenada de Sombe
Punta Negra (tómbolo, H = 40 m).	Puerto Mosquito
Tómbolo anónimo, (H = 30 m).	Puerto Ferro
Cerro Playaela (H > 20 m).	Bahía Corcho
Cerro Caracas (H > 20 m).	Bahía Tapón
Punta anónima (H 0 10 m).	Bahía de la China
Punta Conejo (H = 11 m).	Ensenada Honda
Península Anónima	Bahía Fanduca, Bahía Yoye, Bahía Jalova (todas al este de la Península anónima).
Cerro de Matías (H = 20 m).	Salina del Sur
Alturas (H = 30 – 50 m) en Punta Este	

Como resultado del mecanismo de desplazamiento lateral de izquierda, se desarrolló un sistema de fracturamiento de dirección NE y NW, durante la etapa neotectónica temprana, el cual jugó un papel determinante en la consolidación morfoestructural y desarrollo morfoescultural del relieve, tanto emergido como submarino de la isla de Puerto Rico y sus islas circundantes.

El diseño de los tipos y formas del relieve del extremo noroccidental de Puerto Rico están controlados por las cizallas transverso-diagonales originadas por los esfuerzos tangenciales regionales de la zona de interacción interplacas.

La activa tectogénesis de Puerto Rico y la superposición de los diseños de sus diferentes generaciones disyuntivas constituyen, sin obviar otras consideraciones litomórficas, las condiciones básicas de su desarrollo morfoestructural insular y morfoescultural litoral.

Los diferentes estilos geotectónicos interbloques o comunidades tridimensionales de bloques morfoestructurales, así como las combinaciones, superpuestas o no, de los variados diseños estructurales determinan la rica geodiversidad de su configuración y esencia litorales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores plasman su más sincero agradecimiento a las autoridades de la Universidad de Puerto Rico y, en especial, a la

Dirección del Programa ATLANTEA, así como al Instituto de Geografía Tropical de Cuba, por su apoyo financiero al proyecto "Morfoestructuras insulares antillanas de transición marginal interplacas del Caribe septentrional: contribución geomorfológica al neomovilismo y a la reducción de desastres litosféricos", desarrollado, de manera conjunta, durante los años 1997 y 1998.

REFERENCIAS

- Briggs, R.P. y J.P. Akers (1965), "Hydrogeologic map of Puerto Rico and adjacent islands. Hydrologic investigations", *Atlas HA - 197*, Ed. U.S. Geolog. Surv.
- Departamento del Interior, Gobierno de Puerto Rico (1962), *Puerto Rico e islas limítrofes*, Ed. U.S. Geological Survey, scale 1: 240 000,
- Department of the Navy, Hydrographic Office (1948), "Culebra and adjacent islands", escala 1: 30 000, Ed. U.S. Geological Survey.
- Hernández Santana, J. R. (1987), *Geomorfología estructural y geodinámica reciente del relieve de Cuba Suroriental, en la zona de sutura entre la Microplaca Cubana y la fosa profunda de Bartlett*, tesis de Ph D, Instituto de Geografía de Rusia, Moscú.
- Seguinot Barbosa, J. (1997), *San Juan, Puerto Rico: la ciudad al margen de la bahía*, Ed. GEO, San Juan, Puerto Rico.