

Evolución costera y diversidad geomórfica en archipiélagos de punto caliente. El caso de las islas Canarias.

Coastal evolution and geomorphological diversity in hot-spot insular chains. The case of the Canary Islands.

N. Ferrer-Valero¹, L. Hernández-Calvento¹ y A.I. Hernández-Cordero¹

¹ Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente, Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOGAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC, Parque Científico-Tecnológico de Taliarte, Calle Miramar, 121, 35214 Telde, Las Palmas, España.

Resumen: Las islas Canarias conforman un archipiélago volcánico que responde a un modelo clásico de punto caliente intraplaca. El modelo sugiere el movimiento de la placa africana sobre una pluma mantélica estacionaria que genera una cadena de islas progresivamente más antiguas y menos activas en sentido O-E. En Canarias, a diferencia de lo que sucede en la mayoría de los archipiélagos que responden a este modelo, ciertas particularidades geodinámicas favorecen largos períodos de pervivencia (emersión) y actividad volcánica, superiores a 20 Ma. Estos factores convierten a estas islas en un laboratorio adecuado para estudiar la evolución de las tipologías costeras a escala espacio-temporal geológica y su relación con la diversidad geomórfica, cuestión que constituye el objetivo de este trabajo. Para su desarrollo se han considerado, a modo de muestra, tres islas en diferentes fases volcánicas: La Palma (1,8 Ma, 198 km de costa), Gran Canaria (14,5 Ma, 256 km de costa) y Fuerteventura (22 Ma, 385 km de costa). Mediante el análisis en SIG de ortofotos digitales, datos altimétricos LiDAR y trabajo de campo, se ha establecido un registro cartográfico completo de tres elementos primarios de la geomorfología costera: 1) acantilados, 2) plataformas rocosas y 3) playas. El cálculo de probabilidades asociadas a la presencia de estas geoformas primarias, y de sus combinaciones, ha permitido examinar con detalle la estructura de las costas y aplicar los índices de Shannon (H') y Simpsons (Si) al análisis de la diversidad geomórfica. Los resultados revelan nitidamente la existencia de tipos de costas dominantes, en relación al estado evolutivo de cada isla, en el marco de una tendencia general al incremento de la diversidad a lo largo del tiempo geológico.

Palabras clave: islas oceánicas, evolución costera, geodiversidad.

Abstract: The Canary Islands form a volcanic archipelago corresponding to a classic model of intraplate hot spot chain. The model suggests the displacement of the African plate on a stationary mantle plume that generates a succession of progressively older and less active islands in the O-E direction. In the Canary Islands, unlike most archipelagos of this model, certain geodynamic peculiarities enable long periods of survival (emersion) and volcanic activity, exceeding 20 Ma. These factors make these islands a suitable context for studying the evolution of the coasts and its relationship with geodiversity at a geological spatiotemporal scale, an issue that constitutes the objective of this work. For its development, three islands in different volcanic phases have been studied: La Palma (1.8 Ma, 198 km of coast), Gran Canaria (14.5 Ma, 256 km of coast) and Fuerteventura (22 Ma, 385 km of coast). According to photointerpretative procedures in GIS and field work, a complete cartography of three primary elements of coastal geomorphology has been established: 1) cliffs, 2) shore platforms and 3) beaches. The calculation of probabilities of these primary landforms and their combinations along the shore has allowed us to examine in detail the coastal structure and the geomorphological diversity, applying the Shannon (H') and Simpsons (Si) indices. The results show the existence of dominant coastal types according to the evolutionary state of each island, highlighting geological inheritance as the main control on the coastal geomorphic diversity.

Key words: oceanic islands, coastal evolution, geodiversity.

INTRODUCCIÓN Y AREA DE ESTUDIO

Las islas oceánicas de punto caliente intraplaca representan una proporción mínima del planeta, por lo que forman contextos geotectónicos muy singulares.

El modelo prototípico de punto caliente fue definido en el archipiélago de Hawái (Moore, 1987). Este modelo explica el origen y la configuración de ciertas cadenas de islas oceánicas a través del movimiento de una placa litosférica sobre una pluma mantélica estacionaria, cuya actividad magmática va

generando islas progresivamente más recientes en el sentido del movimiento de la placa. A este modelo pertenecen algunos archipiélagos del Pacífico, como Hawái, Galápagos o Marquesas; del Índico, como Maldivas o Reunión; y del Atlántico, como Cabo Verde o Canarias.

Estudios geocronológicos, sísmicos y geoquímicos, desarrollados en el archipiélago canario, sugieren la necesaria intervención de una anomalía mantélica en la formación de las islas. Sin embargo, la antigüedad, grosor y lento desplazamiento de la litosfera oceánica

sobre la que se asienta el archipiélago, así como la cercanía a un borde continental pasivo y, probablemente, la existencia de una pluma mantélica de menor productividad, habrían producido ciertas anomalías respecto al modelo hawaiano (Carracedo et al., 1998; Carracedo, 1999). Estas anomalías se traducen en 1) desviaciones en la linealidad de la relación edad-distancia de las islas; 2) singularidades en la composición, distribución y tasas de extrusión de magmas durante las distintas fases volcánicas y 3) ausencia de subsidencia tectónica, con largos períodos de pervivencia de las islas, superiores a 20 Ma (Carracedo et al, 1998). Así, la sucesión de edades y los dilatados periodos de evolución subaérea, que caracterizan las islas del archipiélago canario, las convierten en un escenario apropiado evaluar el papel de la herencia geológica y el factor temporal en la diversidad de formas costeras.

Por todo ello este estudio pretende examinar la configuración geomorfológica de las costas de tres islas volcánicas, en diferente estadio de desarrollo, a través del análisis de tres geoformas primarias: 1) acantilados, 2) plataformas rocosas y 3) playas. Asimismo, se plantea un análisis de diversidad geomórfica mediante el cálculo de probabilidades asociadas a la presencia de cada tipo de geoforma. Por un criterio de adecuación entre edad y tamaño, las islas seleccionadas para este estudio son (Fig. 1):

1. *La Palma*. Es una isla joven, con menos de 2 Ma., situada en el extremo occidental del archipiélago, a 400 km de la costa africana. Al estar situada sobre el teórico punto caliente, se encuentra en estado de crecimiento en escudo. Tiene una forma de triángulo invertido, un perímetro de 198 km, un área de 708 km² y 2.426 m de altitud en su punto más alto.
2. *Gran Canaria*. Ocupa una posición central, tiene una edad intermedia, 14,5 Ma., y se encuentra en fase posterosiva. Las reconstrucciones más recientes indican que alcanzó una altitud superior a 3.000 m en su fase de mayor crecimiento (Karátson, 2016). Tras largos periodos de erosión, actualmente alcanza una altitud máxima de 1.956 m, en un área total de 1.560 km² y un perímetro subcircular de 261 km
3. *Fuerteventura*. Se sitúa a 100 km del margen continental africano. Con 20,6 Ma. de antigüedad, también se encuentra en fase posterosiva, siendo una de las islas de punto caliente más longevas del planeta. Tiene una forma alargada NE-SO, una extensión de 1.659 km² y un perímetro de 385 km. Aunque se estima que los escudos volcánicos miocenos pudieron alcanzar los 3.000 m de altitud durante sus fases de máximo crecimiento (Stillman, 1999), el prolongado desgaste erosivo determina una altura máxima en la actualidad de 817 m en la península de Jandía,

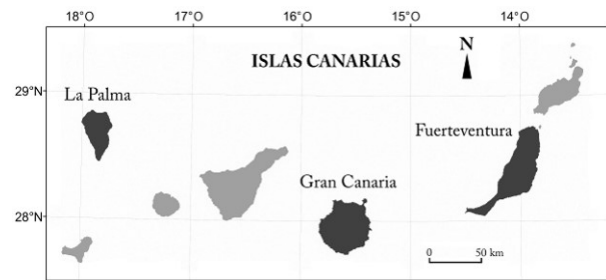


FIGURA 1. Islas utilizadas para este estudio (en color oscuro).

METODOLOGÍA Y FUENTES

La presencia de acantilados, plataformas y playas, en La Palma, Gran Canaria y Fuerteventura, ha sido sistemáticamente identificada y cartografiada en detalle gracias a la integración de fuentes fotográficas y cartográficas en sistemas de información geográfica (SIG), así como al trabajo de campo. Las fuentes integradas en SIG cubren la totalidad de las islas. Son principalmente 10 series de ortofotos digitales modernas (2002//05/07/08/09/11/12/13/14/15), con resolución comprendida entre 10 y 50 cm/pixel (GRAFCAN, S.A.-Gobierno de Canarias); nubes de puntos LiDAR con resolución de 0.5 puntos/m² (Instituto Geográfico Nacional, IGN) y Mapas Topográficos 1:1.000 y 1:5.000 (GRAFCAN, S.A.-Gobierno de Canarias). El trabajo de campo ha sido desarrollado a lo largo de dos años y ha incluido numerosas campañas fotográficas en tierra y tres campañas por mar a bordo de embarcación ligera.

En la identificación de acantilados se han considerado conjuntamente acantilados tanto activos, como inactivos y fósiles. En la categoría de plataformas rocosas se han incluido distintos tipos de plataformas costeras intermareales, así como niveles erosivos supramareales. En la categoría de playas se ha considerado indistintamente depósitos de arenas, cantos, bolos y mixtos.

Debido a las profundas transformaciones de origen antrópico en las costas, particularmente severas en Gran Canaria (Ferrer-Valero et al, 2017), ha sido necesario recurrir a fuentes históricas para reconstruir las características geomorfológicas originales de algunos tramos, mediante series de fotografía aérea y ortofotos digitales de los años 60 del siglo XX, fotografías históricas de campo (FEDAC) y planos anteriores al siglo XX de las ciudades de Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de La Palma.

Como procedimiento cartográfico-analítico se ha empleado la *proyección sobre línea de costa*, que consiste en convertir las superficies de las geoformas identificadas, en tramos de línea de costa en el mapa, por medio de ejes perpendiculares de proyección. Una vez ejecutado el procedimiento, cada geoforma queda definida por su longitud de costa (km) y relación con el perímetro total de la isla (%). La línea de costa

utilizada en las tres islas es la cota 0 del Mapa Topográfico 1:5.000 de Canarias.

Una vez obtenida la cartografía y su correspondiente base de datos espacial, se han aplicado dos enfoques de cálculo. El primero ha sido denominado *no-combinatorio*. Éste consiste en considerar cada geoforma por separado (acantilados, plataformas y playas), operando con las correspondientes abundancias totales y frecuencias relativas sobre una población total equivalente al sumatorio total de ellas. El segundo enfoque ha sido denominado *combinatorio* y consiste en la computación del conjunto de combinaciones específicas que resultan de la superposición en SIG de las tres líneas de costa replicadas (acantilados, plataformas y playas). En este enfoque, cada clase final constituye una combinación única de geoformas, cuya frecuencia relativa es calculada en relación al perímetro total de cada isla. Por lo tanto, tiene un carácter espacial, pues tiene en cuenta cómo las geoformas se combinan a lo largo de la costa.

La diversidad ha sido calculada mediante dos índices clásicos, Simpson (Si) y Shannon (H') (Magurran, 1988), adaptando sus parámetros a cada uno de los enfoques (combinatorio y no-combinatorio). El índice de Simpson (Si) mide el predominio de clases por medio de la probabilidad de que una clase se repita en un proceso aleatorio. Se relaciona negativamente con la diversidad, por lo que se expresa mediante su valor inverso:

$$1-Si = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$$

Donde 1-Si es el valor inverso del índice de Simpson; y p_i la probabilidad de ocurrencia de la clase i . El índice de Shannon (H') mide la diversidad a través de la riqueza de clases y la uniformidad de la distribución de abundancias. Se expresa como:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log p_i$$

Donde H' es el valor del índice de Shannon; y p_i es la probabilidad de ocurrencia de la clase i .

RESULTADOS

La presencia-ausencia de acantilados, plataformas y playas ha sido analizada con exhaustividad a lo largo de los 844 km de costa de las islas de La Palma (Lp), Gran Canaria (Gc) y Fuerteventura (Fv). De tales observaciones se han diferenciado un total de 4.315 tramos de costa en metodología no-combinatoria y 8.566 tramos de costa en metodología combinatoria.

Los resultados globales revelan contrastes entre islas en la distribución de los elementos analizados (Fig. 2). La distribución de abundancias revela progresiones ordenadas en las tres variables. Estas progresiones muestran una estructura en la que, tanto en acantilados como en playas y plataformas, Gran

Canaria mantiene abundancias intermedias entre La Palma y Fuerteventura (Fig. 2).

La abundancia de acantilados sigue una progresión Fv-Gc-Lp. Es máxima en La Palma, que se encuentra circundada por escarpes costeros y similares en un 98% del perímetro; disminuye al 79% en las costas de Gran Canaria (Δ -19% respecto a Lp) y hasta el 67% en las de Fuerteventura (Δ -12% respecto a Gc) (Fig. 2).

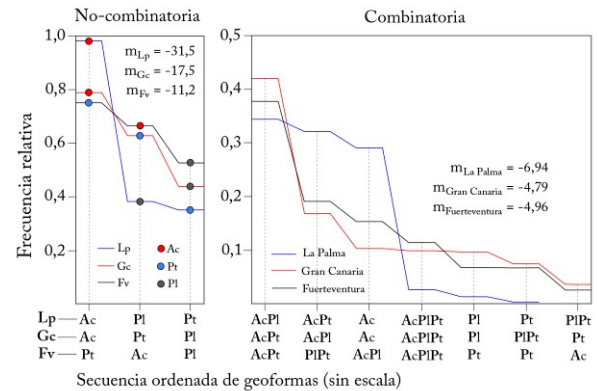


FIGURA 2. Series de abundancias ordenadas (de mayor a menor), expresadas en frecuencias relativas de cada geoforma, respecto al perímetro de cada isla y calculadas mediante dos metodologías operatorias: combinada y no-combinada. Lp, La Palma; Gc, Gran Canaria; Fv, Fuerteventura; Ac, acantilados; Pt, plataformas; Pl, playas; m , pendiente de la recta ajustada por mínimo error cuadrático a cada serie de abundancias.

La abundancia de plataformas sigue la progresión inversa: Lp-Gc-Fv. Presenta su máxima en las costas de Fuerteventura, pues aparecen en el 79% del perímetro, siendo la geoforma litoral más frecuente; disminuye en Gran Canaria, donde ocupan el 63% de la línea de costa (Δ -16% respecto a Fv); y aún más en La Palma, donde solo se encuentran en el 35% de la costa (Δ -28% respecto a Gc) (Fig. 2).

Las playas también siguen una progresión del tipo Lp-Gc-Fv. La mayor abundancia se da en Fuerteventura, donde ocupan el 52% del perímetro insular. Disminuyen al 44% en Gran Canaria (Δ -8% respecto a Fv) y hasta el 38% en La Palma (Δ -6% respecto a Gc).

La Fig. 2 representa las secuencias de geoformas ordenadas de mayor a menor a abundancia. A través de ella pueden analizarse dos importantes parámetros de diversidad: riqueza de clases y equiabundancia. A este nivel de desagregación taxonómica las islas no presentan diferencias en la riqueza de geoformas, pero sí en la equiabundancia de las distribuciones. En el cálculo no-combinatorio se aprecia con total claridad la tendencia hacia el aumento de la equiabundancia en sentido Lp-Gc-Fv. Esta tendencia ha sido aproximada numéricamente a través de la pendiente de la recta ajustada por mínimo error cuadrático a cada serie de abundancias (Fig. 2). Los valores disminuyen progresivamente desde La Palma ($m=31,5$) a Gran Canaria ($m=17,5$; Δ -44% respecto a Lp) y Fuerteventura ($m=11,2$; Δ -64% respecto a Lp),

desvelando un aumento de la equiabundancia de clases y, por lo tanto, de la diversidad. A nivel combinatorio, la diferencia es evidente entre La Palma y el resto de islas, pero no es significativo entre Gran Canaria y Fuerteventura. Así, el valor de La Palma ($m=6,94$) es significativamente superior al de Gran Canaria ($m=4,79$; Δ -30% respecto a Lp) o Fuerteventura ($m=4,96$; Δ -28% respecto a Lp).

La diversidad geomórfica ha sido calculada mediante dos índices, Simpson (Si) y Shannon (H'), a partir de las probabilidades resultantes de las abundancias y frecuencias relativas de cada geoforma (figura 3). Los resultados son coherentes con los aspectos analizados anteriormente. El índice de Simpson pondera el grado de predominio de unas clases sobre otras, por lo cual experimenta un incremento progresivo de su valor en sentido Lp-Gc-Fv, tanto en cálculo no-combinatorio como en combinatorio. A su vez, el índice de Shannon pondera la uniformidad de la distribución de clases o equiabundancia, por lo que también experimenta un aumento de su valor en sentido Lp-Gc-Fv, tanto en cálculo no-combinatorio como combinatorio (Fig. 3).

Las curvas presentan, en ambos índices y metodologías, formas aproximadamente parabólicas, donde el incremento del valor de diversidad entre La Palma y Gran Canaria, se atenúa significativamente entre Gran Canaria y Fuerteventura (Fig. 3).

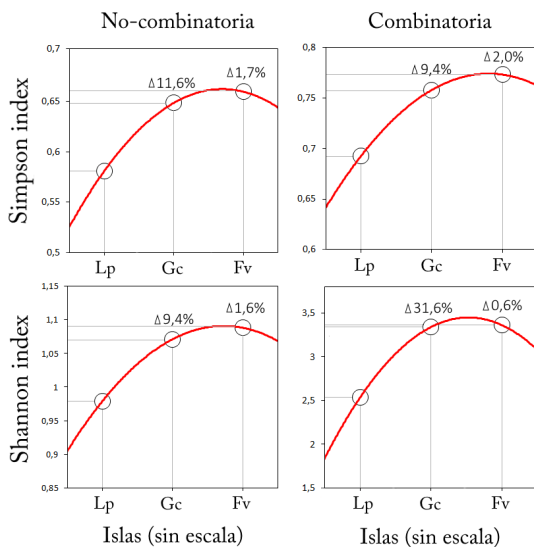


FIGURA 3. Aplicación de los índices de diversidad de Simpson y Shannon a la geomorfología costera de las islas de La Palma (Lp), Gran Canaria (Gc) y Fuerteventura (Fv), según metodologías de análisis combinatoria y no-combinatoria.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha podido observar un claro patrón de incremento de la diversidad geomórfica costera en tres islas de diferente edad de un archipiélago de punto caliente (La Palma: 1,8 Ma.; Gran Canaria; 14,5 Ma.; Fuerteventura: 20,6 Ma.). Este incremento se ha podido verificar principalmente en el parámetro de equiabundancia a través de la aplicación de los índices de Simpson y Shannon. En la base de estos cálculos

subyace un análisis exhaustivo de presencia-ausencia de tres geoformas costeras primarias: acantilados, plataformas costeras y playas. La simplicidad taxonómica del análisis no permite observar diferencias en la riqueza de geoformas costeras, por lo que los resultados de diversidad geomórfica reflejan valores parciales que podrían incrementarse significativamente con la introducción de nuevos grupos de geoformas. Los datos obtenidos, interpretados bajo supuestos evolutivos a escala temporal geológica, podrían estar revelando un patrón evolutivo de los ambientes costeros en islas de punto caliente, que apuntaría hacia el aumento de la diversidad morfológica y la complejidad estructural con la edad de la isla.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación CSO2013-43256-R y CSO2016-79673-R de Plan Estatal de I+D+i. N. Ferrer-Valero, estudiante del programa de doctorado en Oceanografía y Cambio Global (IOCAG-ULPGC), se ha beneficiado de una beca de investigación FPI otorgada por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

REFERENCIAS

- Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J.A., y Pérez Torrado, F.J. (1998): Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, 135(5), 591-604.
- Carracedo, J.C. (1999): Growth, structure, instability and collapse of Canarian volcanoes and comparisons with Hawaiian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1), 1-19.
- Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L., y Hernández-Cordero, A.I. (2017): Human impacts quantification on the coastal landforms of Gran Canaria Island (Canary Islands). *Geomorphology*, 286: 58-67.
- Magurran, A.E. (1988): *Ecological diversity and its measurement*. Chapman and Hall, London.
- Moore, J.G. (1987): Subsidence of the Hawaiian Ridge. En *Volcanism in Hawaii* (eds W. Decker, T.L. Wright y P.H. Stauffer), pp. 85-107. U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, vol. 1.
- Karátson, D., Yepes, J., Favalli, M., Rodríguez-Peces, M.J., y Fornaciai, A. (2016): Reconstructing eroded paleovolcanoes on Gran Canaria, Canary Islands, using advanced geomorphometry. *Geomorphology*, 253, 123-134.
- Stillman, C.J. (1999): Giant Miocene landslides and the evolution of Fuerteventura, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1), 89-104.