

Morfometría de las estructuras asociadas a la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), Colombia

Wveimar Samacá^{1*}; John J. Sánchez²

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018001>

Forma de citar: Samacá, W., y Sánchez, J.J. (2018). Morfometría de las estructuras asociadas a la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), 15-28. DOI: 10.18273/revbol.v40n3-2018001.

RESUMEN

La Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC) está formada por 14 centros volcánicos (nueve volcanes compuestos y cinco volcanes monogenéticos) a lo largo del Lineamiento de Coconucos. Dos volcanes más, los cuales son de tipo maar se ubican al SO de la CVLC. Para estudiar el desarrollo de estas estructuras, se evaluaron varios parámetros morfométricos, incluyendo elipticidad (e_i) e irregularidad (i_i), así como la relación alto/ ancho de la base (H/W_b) para los volcanes compuestos, y el índice H_{co}/W_{co} para los volcanes monogenéticos. Los valores de parámetros morfométricos y las relaciones dimensionales varían así: $1,27 \leq e_i \leq 3,24$; $1,12 \leq i_i \leq 1,53$; $0,04 \leq H/W_b \leq 0,24$ y $0,02 \leq H_{co}/W_{co} \leq 0,34$. Gráficos de los parámetros morfométricos ordenados de acuerdo a la posición espacial de los diferentes centros volcánicos permitieron identificar algunas tendencias parciales en la evolución en los volcanes compuestos, así como en el grado de conservación para los volcanes monogenéticos: e_i aumenta hacia el SE; i_i disminuye hacia el SE; H/W_b aumenta hacia el SE y H_{co}/W_{co} aumenta hacia el NE. En conjunto, estos valores y patrones sugieren, tanto variabilidad en aspectos endógenos y exógenos que afectan la forma de los volcanes, como posibles ciclos de actividad constructiva y afectación de la morfología y morfometría de las estructuras volcánicas.

Palabras clave: Cadena volcánica Los Coconucos - Colombia; morfometría; estructuras volcánicas; volcanes monogenéticos; volcanes compuestos.

Morphometry of volcanic features associated with Los Coconucos Volcanic Chain (CVLC), Colombia

ABSTRACT

The Coconucos Volcanic Chain (CVLC-from its acronym in Spanish) is made up by 14 volcanic centers (nine composite volcanoes and five monogenetic volcanoes) oriented along the Coconucos Lineament. Two more centers, maar-type volcanoes, are also located to the SW, in the vicinity of the CVLC. To study the development of these volcanic centers, the ellipticity (e_i) and irregularity (i_i) morphometric parameters as well as the base-to-height H/W_b for composite volcanoes and the height-of-cone to width-of-cone H_{co}/W_{co} ratios for monogenetic centers, were evaluated. The values for morphometric parameters and dimensional ratios vary as follows: $1.27 \leq e_i \leq 3.24$; $1.12 \leq i_i \leq 1.53$; $0.04 \leq H/W_b \leq 0.24$ and $0.02 \leq H_{co}/W_{co} \leq 0.34$. Graphs of morphometric parameters ordered according to the spatial position of the volcanic centers allowed identification of partial tendencies in the evolution of composite volcanoes and patterns in the state of preservation for monogenetic centers: e_i increases to the SE; i_i decreases to the SE; H/W_b increases to the SE and H_{co}/W_{co} increases to the NE. Together, these values and patterns suggest not only variability of endogenous and exogenous processes that affect the shapes of volcanoes, but also possible cycles of constructive activity and affectation of morphology and morphometry of the volcanic structures.

Keywords: Coconucos volcanic chain - Colombia; morphometry; volcanic structures; monogenetic volcanoes; composite volcanoes.

¹ Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

(*) wsamacat@unal.edu.co

² Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jjsanchezzag@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

La determinación de parámetros morfométricos aplicados a estructuras volcánicas se ha efectuado desde mediados del siglo XX, para estudiar los procesos evolutivos y los tipos específicos de estructuras volcánicas. Cabe destacar de la extensa literatura existente sobre este tema los trabajos realizados por Porter (1972) y Wood (1980) en volcanes monogenéticos individuales, y aquellos asociados a un volcán poligenético (Favalli *et al.*, 2009) o relacionados a campos de volcanes monogenéticos extensos (Settle, 1979). Para el caso de volcanes poligenéticos, se destacan los análisis realizados a volcanes individuales

(Karátson *et al.*, 2010) o a nivel regional (Grosse *et al.*, 2009; 2012), con el fin de definir clasificaciones de acuerdo a la forma de las estructuras.

En la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), ubicada aproximadamente a 20 km al SE de la ciudad de Popayán (Departamento del Cauca, Colombia) existen 14 volcanes monogenéticos y poligenéticos alineados en orientación preferencial NW-SE (FIGURA 1), siguiendo el trazo principal del Lineamiento de Coconucos (Monsalve, 2000). Los rasgos más relevantes publicados acerca de los centros volcánicos de la CVLC se resumen en la TABLA 1.

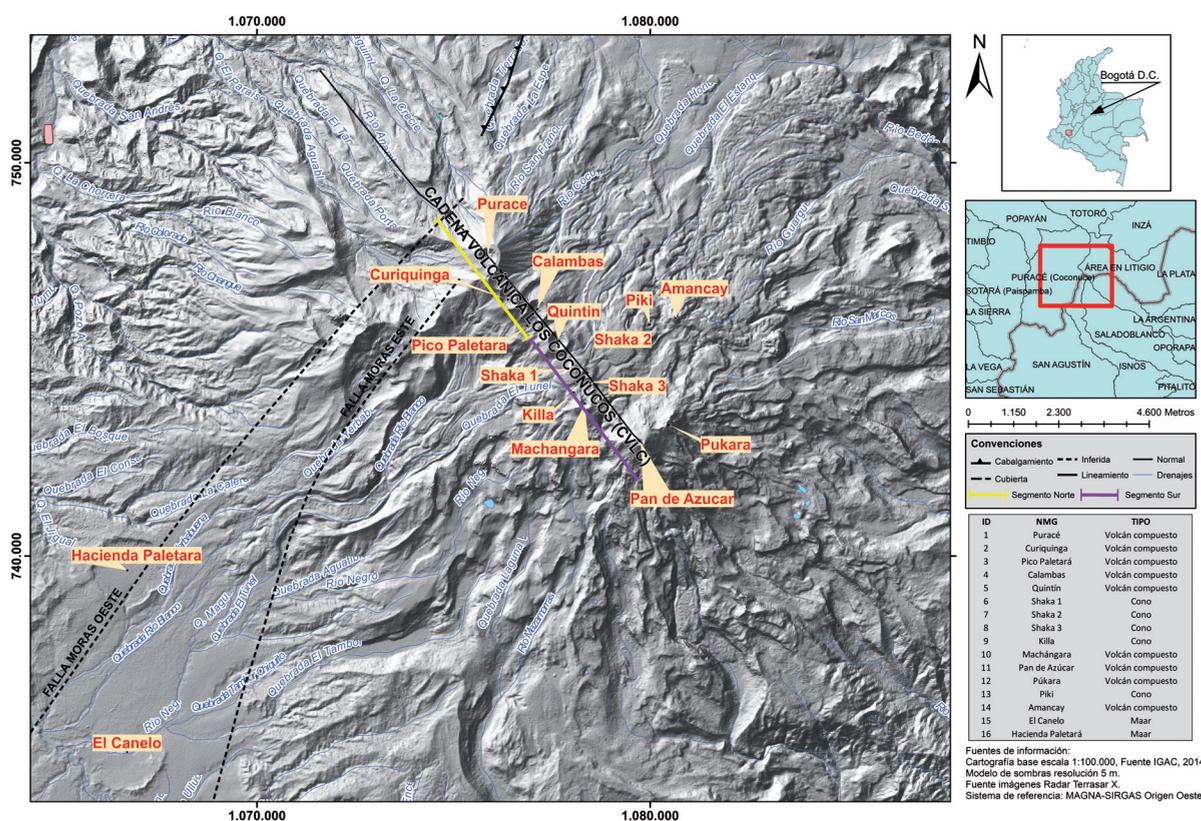


FIGURA 1. Ubicación de la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC) y estructuras volcánicas asociadas.

La CVLC es considerada evidencia de resurgencia magmática de la denominada Caldera de Paletará (Torres *et al.*, 1995; Robertson *et al.*, 2002; Samacá, 2016) y en las últimas décadas ha recibido especial atención debido a la actividad reciente de su centro volcánico más septentrional, el volcán Puracé (Monsalve *et al.*, 2014). Sin embargo, no muchos

trabajos se han enfocado en la parametrización morfométrica y la evolución de las geoformas asociadas, por lo que el objetivo central de la presente investigación es contribuir con datos precisos acerca de índices morfométricos y morfología de todos los centros volcánicos de la CVLC y algunas otras estructuras cercanas.

TABLA 1. Estructuras volcánicas asociadas a la CVLC (recopilado de Flórez, 1983; Robertson *et al.*, 2002; Flórez, 2003; INGEOMINAS, 2003).

Volcán	Latitud (°)	Longitud (°)	Tipo	Nivel de Actividad	Tipo de depósitos	Observaciones
Puracé	2,3137	76,3954	Volcán compuesto	Activo (erupciones recientes)	Flujos de lava, Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP), lahares.	Sin indicios de erosión glaciar
Curiqinga	2,3037	76,3908	Volcán compuesto	Latente	Flujos de lava en bloques y flujos piroclásticos con pómez, escoria, bombas y líticos.	-
Pico Paletará	2,2977	76,3864	Volcán compuesto	Latente	Flujos de lava provenientes de los cráteres Curiqinga y Quintín.	-
Calambas*	2,3015	76,3841	Volcán compuesto	-	Flujos de lava masivos hidrotermalizados; cono cubierto con ceniza y bombas recientes	Comparte parte de su estructura principal con Pico Paletará
Quintín	2,2942	76,3794	Volcán compuesto	Latente	Depósitos volcanoclásticos, CDP.	Los productos están cubiertos por lavas y productos de otros volcanes.
Shaka 1	2,2877	76,3748	Cono	Latente	Flujos de lava en bloque, cubiertas por depósitos de ceniza	Predominio de coladas lávicas del Holoceno; 2 estructuras asociadas
Shaka 2	2,2869	76,3727	Cono	-	Flujos de lava, cubiertas por depósitos de ceniza	Cono asociado a Shaka 1
Shaka 3	2,2845	76,3718	Cono	-	Flujos de lava, cubiertas por depósitos de ceniza	Cono asociado a Shaka 1
Killa*	2,2823	76,3759	Cono	-		Remanente de aguja; estructura columnar hacia el centro y laminar hacia los bordes
Machangara	2,2798	76,3733	Volcán compuesto	Extinto	Flujos de lava masivos con estructura cordada	-
Pan de Azúcar	2,2710	76,3605	Volcán compuesto	Latente	Flujos de lava en bloque, textura porfirítica	Presenta un cono adventicio
Pukara	2,2749	76,3541	Volcán compuesto	Extinto	Flujos de lava fracturados y alterados; fragmentos de escoria	-
Piki*	2,2980	76,3584	Cono	-	Flujos de lava de textura porfirítica, cubiertas en sectores por productos de otros volcanes	Edificio en forma abombada
Amancay	2,2994	76,3525	Volcán compuesto	-	Flujos de lava en bloque, macro cordadas	Morfología del edificio bien conservada

*Estructuras volcánicas de difícil identificación, de acuerdo a los autores mencionados en la recopilación.

MARCO TEÓRICO

Considerando factores como la historia eruptiva y la complejidad de la estructura, las estructuras volcánicas asociadas a la CVLC pueden definirse siguiendo la clasificación de De Silva y Lindsay (2015), así:

- Volcanes poligenéticos: Son estructuras que han tenido varios ciclos eruptivos a través de su historia, por lo que son considerados grandes estructuras construidas a lo largo de decenas o cientos de miles de años; dentro de este grupo se identifican los volcanes compuestos (equivalente al término “estratovolcanes”, comúnmente utilizado en geomorfología y vulcanología), los volcanes escudo y las calderas.
- Volcanes monogenéticos: Estas estructuras se han formado durante un ciclo eruptivo único; los episodios pueden ser de corta duración (semanas a meses) y pueden continuar por períodos sucesivos manifestados durante algunos años o décadas. De acuerdo a estos autores, se incluyen dentro de esta categoría los conos piroclásticos y de escoria, los maares, los anillos piroclásticos (*tuff rings*) y los domos de composición silícea.

Índices morfométricos de volcanes compuestos: Grosse *et al.* (2009) plantean algunos índices morfométricos generados a partir de las curvas de nivel. Dos de estos índices definen la similitud a dos tipos de contornos independientes: la elongación y la irregularidad, que sumados indican la forma en planta (*plan shape*) de un volcán compuesto:

- Índice de elipticidad (e_i), que cuantifica la elongación de los contornos:

$$e_i = \frac{\pi \times (L/2)^2}{A} \quad (1)$$

Donde L es la longitud del eje principal del contorno, y A es el área que encierra el contorno. Si $e_i \sim 1$, el contorno tiene forma de círculo; si $e_i \gg 1$, el contorno es elongado. El promedio de los valores e_i de los contornos es la elongación de la estructura en planta.

- Índice de irregularidad (i_i), que cuantifica la irregularidad o complejidad relacionando el perímetro y el área del contorno. De acuerdo a Grosse *et al.* (2009), primero debe calcularse para el contorno el índice de disección d_i :

$$d_i = \frac{P}{2 \times A} \times \sqrt{A/\pi} \quad (2)$$

Donde P es el perímetro del contorno y A es el área que encierra el contorno. Debido a que el índice de disección en este sentido es aproximadamente dependiente de la elipticidad del contorno, los autores introducen el índice de irregularidad (i_i):

$$i_i = d_{i(\text{contorno})} - d_{i(\text{elipse})} \quad (3)$$

Otros parámetros sugeridos por los autores, que sirven para identificar la forma en perfil (*profile shape*) de los volcanes compuestos son la pendiente (total, pendiente de los flancos y pendiente media máxima), junto con las relaciones altura del volcán/ ancho de la base (H/W_B) y ancho de la cima/ ancho de la base (W_S/W_B) (FIGURA 2A).

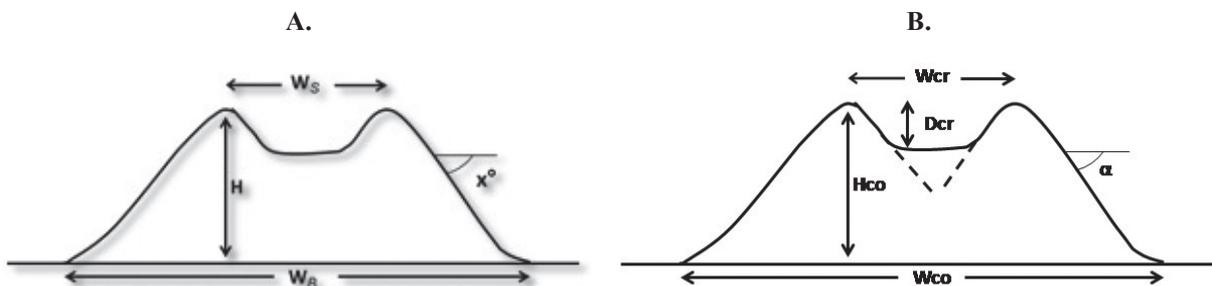


FIGURA 2. A. Parámetros morfométricos de la forma en perfil de volcanes compuestos (Grosse *et al.*, 2009). H =Altura del volcán; W_s =Ancho de la cima (*width of summit*); W_b =Ancho del volcán (*width of base*); α =Pendiente. **B.** Parámetros morfométricos (Porter, 1972) para volcanes monogenéticos. H_{co} =altura del cono; W_{cr} =ancho del cráter; D_{cr} =profundidad del cráter (*depth of crater*); W_{co} =ancho del cono; α =pendiente.

La clasificación morfométrica de volcanes compuestos de Grosse *et al.* (2009) define tres categorías:

- **Cónicos:** Los volcanes compuestos cónicos tienen una forma simple, teniendo un perfil suavemente cóncavo, con una forma en planta circular o semicircular (bajos valores de e_i) y regular (bajos valores de i_i). Algunas estructuras de este tipo estudiadas por los autores exhiben $H/W_B > 0,15$, las pendientes de los flancos oscilan entre 21 y 34°, y la pendiente máxima entre 27 y 37°.
- **Sub-cónicos:** Para los volcanes compuestos en esta categoría, $0,10 \leq H/W_B \leq 0,16$. En cuanto a los demás índices, los valores son muy variables, pero se encuentran en una posición intermedia con respecto a las demás categorías. Para los autores, es posible que los volcanes compuestos sub-cónicos sean estructuras morfométricamente transicionales.
- **Macizos:** Estas estructuras presentan valores $H/W_B < 0,10$ y pendiente media de los flancos inferior a 20°; son irregulares y usualmente tienden a ser elípticos. A diferencia de los volcanes compuestos cónicos y sub-cónicos, la mayoría de los volcanes compuestos de tipo macizo incluyen un espectro de volumen que va hasta 90 km³.

Adicionalmente Grosse *et al.* (2009) sugieren que, de acuerdo a los valores de los índices, los volcanes compuestos con formas simples pueden seguir la tendencia evolutiva cono → sub-cono → macizo.

Índices morfométricos de volcanes monogenéticos: De acuerdo a Porter (1972) los parámetros morfométricos aplicables a este tipo de volcanes son: H_{co} (altura del cono); W_{co} (ancho basal del cono); W_{cr} (ancho del cráter); D_{cr} (profundidad del cráter) y α (ángulo máximo de pendiente, usualmente en el rango 25° ± 2°). Porter (1972) y Settle (1979) proponen que uno de los principales índices es la relación H_{co}/W_{co} (FIGURA 2B), que reflejaría, en primera aproximación, el ángulo de reposo de los flancos de los conos (volcanes monogenéticos) constituidos por depósitos piroclásticos o tefras. Los factores que influyen en el comportamiento del índice H_{co}/W_{co} son principalmente: la naturaleza de piroclastos y su forma de depositación, la naturaleza de los flujos de lava, la acción de agentes exógenos (ejemplo: meteorización y erosión) y la inestabilidad de la pendiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Utilizando un Modelo Digital de Elevación (*DEM*, por sus siglas en inglés) con resolución espacial de 5 m/píxel generado a partir de imágenes de radar sensor Terrasar X (imágenes cortesía del Banco de Imágenes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC), se calcularon los índices morfométricos para cada una de las estructuras volcánicas en la CVLC y su vecindad, siguiendo los procedimientos resumidos a continuación:

- **Morfometría de volcanes compuestos:** Mediante el código IDL MORVOLC (Grosse *et al.*, 2012) se obtienen, a partir del *DEM*, los parámetros morfométricos para volcanes compuestos (e_i e i_i promediados para cada volcán compuesto). Una vez calculados, estos índices se pueden analizar individualmente para cada volcán, o en conjunto, para evaluar tendencias y realizar comparaciones y así plantear posibles factores que influyen en las características morfológicas (por ejemplo, la proximidad con otros volcanes compuestos o monogenéticos y los productos particulares de cada centro). Igualmente, con el *DEM* se midieron los parámetros que definen la forma en perfil de los volcanes.
- **Morfometría de volcanes monogenéticos:** El cálculo de índices morfométricos para los volcanes monogenéticos, se realizó así: 1) Recorte del *DEM* de acuerdo a la superficie de cada estructura y 2) Cálculo de la relación H_{co}/W_{co} para cada estructura a partir de los valores del *DEM*. Se utilizó el software ArcGIS y por completitud, se realizaron también los cálculos de la relación H_{co}/W_{co} en forma manual.

Para facilitar el análisis de los datos e identificar tendencias se grafican los valores de los diferentes parámetros ordenados de acuerdo a la posición espacial del centro volcánico: Si se indica que el ordenamiento es en sentido N-S esto implica que los valores del parámetro bajo análisis se grafican de acuerdo a la coordenada de latitud del volcán correspondiente, empezando por los más septentrionales (parte izquierda del eje horizontal del gráfico) y terminando por los más meridionales (parte derecha del eje horizontal del gráfico). Por otra parte, si se indica que el ordenamiento es en sentido E-W esto implica que los valores del parámetro bajo análisis se grafican de acuerdo a la coordenada de longitud del volcán,

empezando por los volcanes que están ubicados más al oriente (parte izquierda del eje horizontal del gráfico) y terminando por los que están ubicados más al occidente (parte derecha del eje horizontal del gráfico). Esta metodología ha sido aplicada exitosamente en otras investigaciones, principalmente acerca de sismos volcánicos y es sugerida aquí como una herramienta sencilla de análisis de índices.

RESULTADOS

Morfometría de volcanes compuestos: Los parámetros morfométricos para los volcanes compuestos se muestran en la TABLA 2. Los valores de e_i varían en el rango 1,269–3,236. Los volcanes Púkara, Quintín, Machángara y Calambas exhiben, en conjunto, mayor elongación e irregularidad que los volcanes Curiqinga, Pan de Azúcar, Amancay, Pico Paletará y Puracé (FIGURA 1). Este resultado está basado en la media y la mediana de e_i e i_i como medidas de tendencia

central en cada uno de estos conjuntos de volcanes. Al graficar los valores de e_i siguiendo un sentido N-S (con respecto a la coordenada de latitud de cada volcán compuesto, primero los volcanes más septentrionales y por último los más meridionales) se observa carácter oscilante con tendencia creciente incipiente de e_i de norte a sur (FIGURA 3A). De modo similar, si se ordenan los valores de e_i siguiendo un sentido E-W (con respecto a la coordenada de longitud de cada volcán, primero los volcanes más orientales y por último los más occidentales), se observa oscilación con tendencia creciente incipiente en sentido W-E, (FIGURA 3C). Así, de modo general, la elipticidad aumenta hacia el sector SE de la CVLC. Los valores de i_i varían en el rango 1,115-1,530 y exhiben más estabilidad y tendencia decreciente incipiente hacia el sur (FIGURA 3B). Al graficar los valores de i_i siguiendo un sentido E-W, se observa tendencia parcial decreciente hacia el E (FIGURA 3D). La irregularidad de los volcanes de la CVLC decrece de manera aproximada hacia el SE.

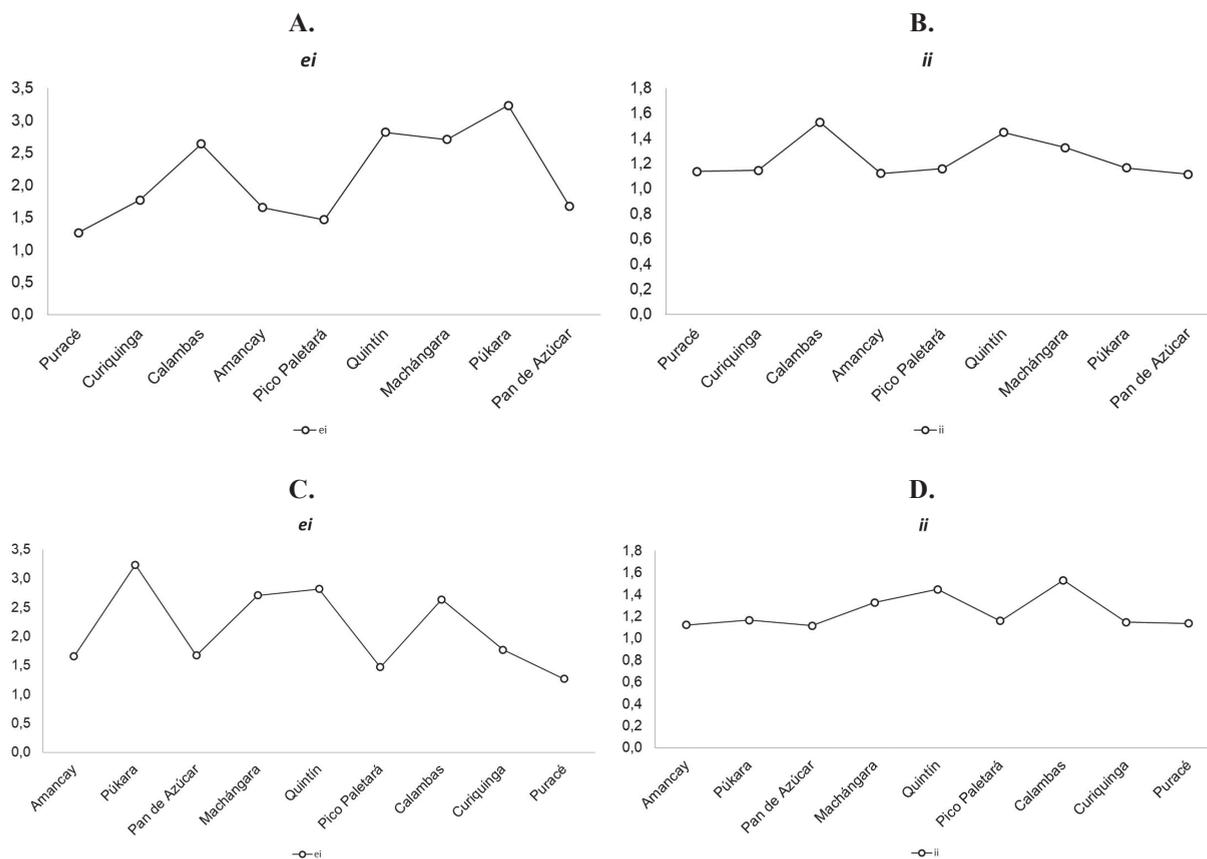


FIGURA 3. Gráficos de los valores de e_i e i_i para volcanes compuestos de la CVLC. A y B. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de latitud (los más septentrionales a la izquierda y los más meridionales a la derecha). C y D. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de longitud (los más orientales a la izquierda y los más occidentales a la derecha).

TABLA 2. Parámetros morfométricos de los volcanes compuestos de la CVLC.

Volcán	Tipo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura Cráter (m.s.n.m.)	Altura Base (m.s.n.m.)	Δ (m)	Diámetro Cráter (m)	Volumen (km ³)	R_i	σR_i	$c =$ $1 - (\sigma R_i / R_i)$	e_i	(i)	H/W_B	W_s/W_B	Pendiente media máxima (°)	Pendiente media (°)
Puracé	Volcán Compuesto	2,3137	76,3954	4650	4385	265	1421	0,1694	496,209	220,909	0,555	1,269	1,138	0,146	0,019	26,092	21,196
Curiquinga	Volcán Compuesto	2,3037	76,3908	4555	4385	170	1496	0,0622	411,983	213,324	0,482	1,771	1,148	0,142	0,006	24,485	20,432
Pico Paletará	Volcán Compuesto	2,2977	76,3864	4450	4340	110	1736	0,0284	399,814	194,598	0,513	1,471	1,161	0,066	0,008	17,314	18,965
Calambas	Volcán Compuesto	2,3015	76,3841	4465	4375	90	1670	0,0255	294,682	138,575	0,530	2,640	1,530	0,044	0,599	24,240	32,758
Quintín	Volcán Compuesto	2,2942	76,3794	4480	4365	115	1589	0,0352	317,154	141,109	0,555	2,820	1,449	0,115	0,923	24,031	20,629
Machangara	Volcán Compuesto	2,2798	76,3733	4500	4385	115	920	0,0247	276,586	120,690	0,564	2,710	1,329	0,162	0,041	24,099	27,867
Pan de Azúcar	Volcán Compuesto	2,2710	76,3605	4630	4360	270	572	0,1118	406,972	163,991	0,597	1,673	1,115	0,235	0,032	28,704	31,448
Púkara	Volcán Compuesto	2,2749	76,3541	4490	4360	130	147	0,0205	253,763	124,006	0,511	3,236	1,166	0,208	0,012	28,158	33,347
Amancaes	Volcán Compuesto	2,2994	76,3525	4090	4025	65	321	0,0031	174,051	85,773	0,507	1,657	1,123	0,157	0,030	20,501	29,374

R_i = Radio medio calculado usando el perímetro de todos los contornos de la geoforma. c = índice de circularidad media. De acuerdo a Grosse *et al.* (2009). Para detalles de estos parámetros aplicados a los volcanes de la CVLC, el lector es referido a Samacá (2016).

En lo referente a la forma en perfil, al ordenar los valores de H/W_B en sentido N-S, hay oscilación y tendencia creciente de este valor hacia el sur (FIGURA 4A). La gráfica de H/W_B con los valores ordenados

de acuerdo a la longitud, revela que hay un patrón oscilante, con marcada tendencia a aumentar hacia el E (FIGURA 4B). De modo general, la relación H/W_B crece hacia el SE de la CVLC.

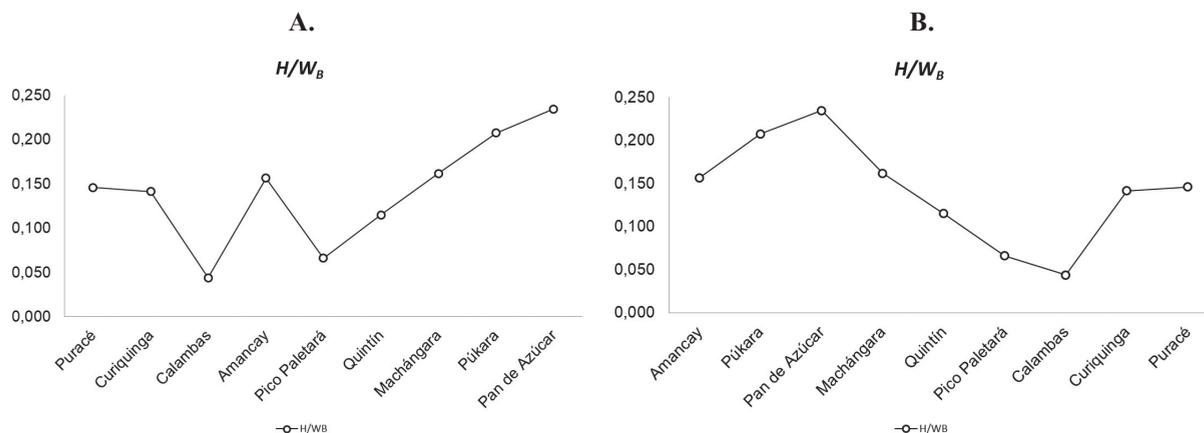


FIGURA 4. Gráficos de los valores de H/W_B para volcanes compuestos de la CVLC. A. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de latitud. B. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de longitud. Convenciones de orden como en la FIGURA 3.

Morfometría de volcanes monogenéticos: Los valores de parámetros morfométricos para este grupo, que incluye los conos Shaka 1, Shaka 2, Shaka 3, Killa y Piki y los maares Hacienda Paletará y El Canelo, se muestran en la TABLA 3. La relación H_{co}/W_{co} varía en el rango 0,017-0,340. El gráfico de la relación H_{co}/W_{co} de acuerdo a la latitud del volcán muestra que, con excepción de los conos Shaka 2 y Shaka 3,

hay un decremento aproximadamente gradual de la relación hacia el sur. Al ordenar los valores de H_{co}/W_{co} de acuerdo a la coordenada de longitud, se revela una progresión a valores mínimos hacia el W. De modo general, para los volcanes monogenéticos de la CVLC y sus vecindades, el valor de H_{co}/W_{co} disminuye hacia el SW (FIGURA 5).

TABLA 3. Parámetros morfométricos calculados para volcanes monogenéticos de la CVLC y cercanos a ésta.

Volcán	Tipo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura Basal (m.s.n.m.)	Altura Cráter (m.s.n.m.)	Altura Cono, H_{co} (A_{co})	Diámetro Basal, W_{co} (D_{co})	Diámetro de Cráter, W_{cr} (D_{cr})	Profundidad de Cráter (m), D_{cr} (P_{cr})	Radio Basal (m)	Radio Cráter (m)	Volumen Estimado (km ³)	H_{co}/W_{co}	Pendiente Máxima (°)
Shaka 1	Cono	2,2877	76,3748	4380	4450	70	761,8	226,6	20	380,90	113,30	0,0147	0,092	39,7
Shaka 2	Cono	2,2869	76,3727	4350	4410	60	439,1	235,7	5	219,57	117,83	0,0055	0,137	39,4
Shaka 3	Cono	2,2845	76,3718	4355	4395	40	210,8	100,3	10	105,41	50,14	0,0008	0,190	46,4
Killa	Cono	2,2823	76,3759	4370	4390	20	377,7	23,0	20	188,86	11,52	0,0008	0,053	63,8
Piki	Cono	2,2980	76,3584	4010	4100	90	264,9	99,6	15	132,44	49,80	0,0025	0,340	44,3
Hacienda Paletará	Maar	2,2415	76,4779	3000	3040	40	2322,3	1812,9	20	1161,14	906,43	0,1350	0,017	24
El Canelo (1)	Maar	2,1998	76,4779	3050	3135	85	2378,4	1941,1	50	1189,22	970,56	0,3125	0,036	33

(1) Valores aproximados por el estado de degradación. De acuerdo a Porter (1972). Para detalles de estos parámetros aplicados a los volcanes monogenéticos de la CVLC, el lector es referido a Samacá (2016).

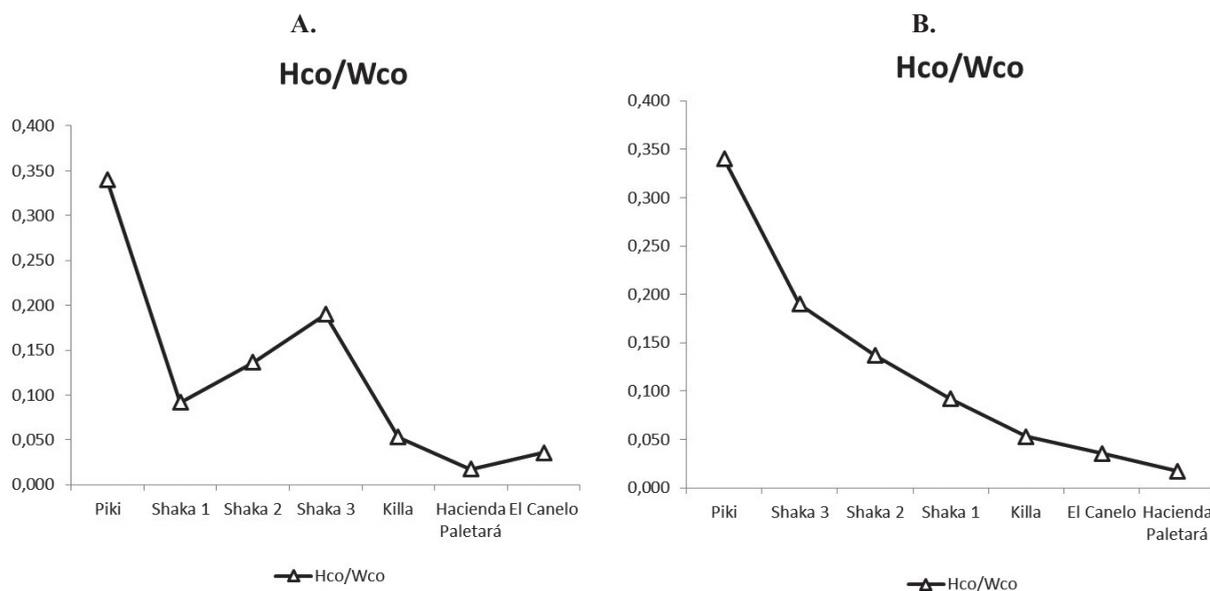


FIGURA 5. Gráficos de los valores de H_{co}/W_{co} para volcanes monogenéticos de la CVLC. A. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de latitud. B. Valores ordenados de acuerdo a la coordenada de longitud. Convenciones de orden como en la FIGURA 3.

DISCUSIÓN

Los índices de elipticidad (e_i) e irregularidad (i_i) y la relación H/W_B , determinados para los volcanes compuestos de la CVLC (FIGURA 1, TABLA 2) han sido analizados ordenando los valores calculados de acuerdo a la latitud y longitud (FIGURA 3). Esto permitió revelar que la forma en planta de los volcanes se hace más elíptica y menos irregular hacia el sector SE de la CVLC, lo cual sugiere en primera aproximación diferencias en la complejidad de las estructuras y posiblemente diferencias en los sistemas de conductos subvolcánicos. Del mismo modo, la forma en perfil (cuantificada por la relación H/W_B , FIGURA 4) varía más o menos de modo oscilante, pero en general los volcanes son más cónicos hacia el sector SE de la CVLC.

En particular, los volcanes compuestos del sur de la CVLC (Machángara, Pan de Azúcar) tienden a presentar forma cónica con morfologías conservadas y las estructuras más desarrolladas. Considerando sus alturas y volúmenes, los volcanes Puracé y Pan de Azúcar, ubicados en los extremos NW y SE de la CVLC, respectivamente, exhiben formas bien preservadas. También hay volcanes compuestos menos desarrollados (Amancay) o que han sido afectados morfológicamente por procesos erosivos (Calambas y el volcán compuesto tipo macizo Púkara). Lo anterior denota que, a pesar que los parámetros morfométricos pueden aproximar el desarrollo o la tendencia evolutiva de un grupo de

volcanes compuestos, hay comportamientos y procesos geomorfológicos particulares para cada volcán. Los índices morfométricos son entonces complementarios a la caracterización geomorfológica que está a su vez relacionada a la morfogénesis y a la morfodinámica.

Las diferencias en morfología estarían relacionadas a variaciones en aspectos endógenos y exógenos que modulan la evolución de los centros volcánicos (para volcanes compuestos, se sugiere a Karátson *et al.*, 2010; en Porter, 1972 y Wood, 1980 se tratan algunos casos de volcanes monogenéticos). Dentro de los aspectos endógenos se puede concebir que existan variaciones temporales en la actividad magmática o complejidades espaciales en el sistema superficial de conductos, que pueden llevar a diferentes regímenes y formas de salida y emplazamiento de los productos volcánicos, que se hacen más complejas con el tiempo a medida que el magma busca nuevos caminos para llegar a la superficie. Esto es interesante porque, aunque el Lineamiento de los Coconucos es la estructura mayor a lo largo de la cual muchos de los volcanes en la CVLC han llevado sus productos a superficie, las particularidades morfológicas quizá se relacionan a detalles de cada centro eruptivo.

Dentro de los aspectos exógenos es razonable suponer que variaciones espaciales y temporales en patrones de estado del tiempo y clima influyen la meteorización y erosión diferencial de los volcanes

ubicados en diferentes áreas (Wood, 1980). El tipo de vulcanismo y la naturaleza de los productos también son factores que influyen en la forma y la preservación de un edificio volcánico. Los volcanes compuestos del sur de la CVLC tienen morfologías conservadas y de constitución reciente y exhiben características similares en sus productos (TABLA 1).

Estudios previos han caracterizado los centros volcánicos de la CVLC y vecindades en las categorías de volcanes compuestos y conos (TABLA 1), sin embargo, la caracterización de la morfología mediante la cuantificación morfométrica aquí presentada posibilita una clasificación más elaborada. Aplicando

la metodología de Grosse *et al.* (2012), se encuentra que la CVLC incluye volcanes compuestos y monogenéticos agrupables en subconos, conos y un macizo (FIGURA 6). Púkara es el único volcán compuesto cuya morfología se acerca a la categoría de macizo y presenta rasgos que indican algo de degradación en su estructura; Calambas y Amancay tienen poca altitud y bajo volumen, por lo que pueden catalogarse como estructuras poco evolucionadas, aunque las características morfológicas de Calambas indican también un volcán que presenta rasgos de degradación (cráter con apertura muy amplia y estructura parcialmente influenciada por la actividad de Pico Paletará).

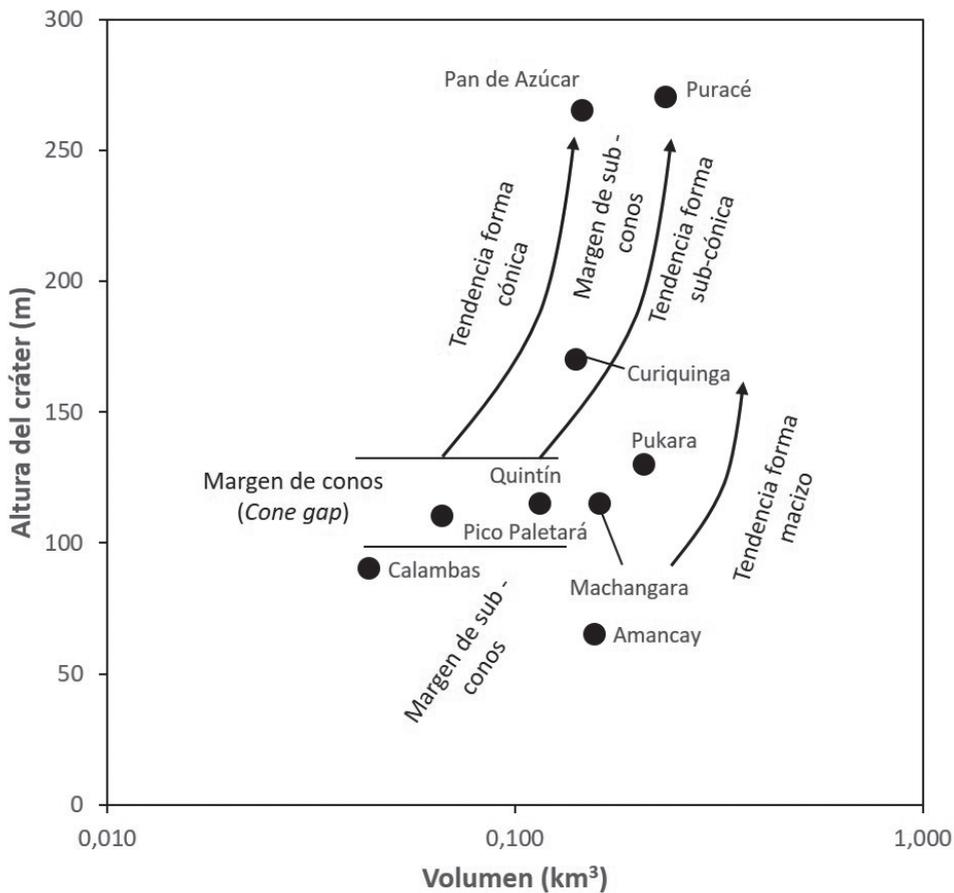


FIGURA 6. Diagrama de altura de cráter vs. volumen para clasificar los tipos de volcanes compuestos identificados en la CVLC. Adaptado de Grosse *et al.* (2009).

Los volcanes Pan de Azúcar y Puracé, con posiciones espaciales contrastantes en la CVLC, llaman la atención porque sus productos (TABLA 1) y sus características morfológicas (escasa disección por

escorrentía laminar, casi nula afectación por acción de procesos glaciares) sugieren una construcción reciente en ambos casos (FIGURA 7), aunque el Puracé es el único volcán activo.

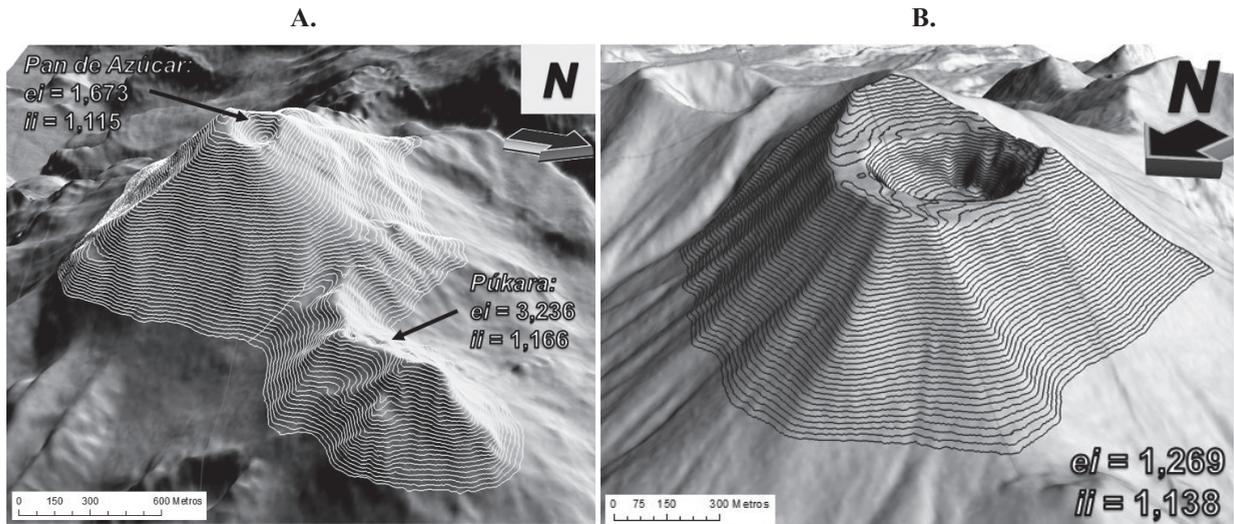


FIGURA 7. A. Vista del modelo de sombras en perspectiva oblicua de los volcanes compuestos Púkara y Pan de Azúcar con sus respectivos valores de e_i e i_i . B. Vista del volcán compuesto Puracé. Los contornos topográficos mostrados en ambos casos son los utilizados en la parametrización morfométrica.

Otras estructuras ubicadas en la zona central de la CVLC (como Quintín y Machángara) muestran morfologías

conservadas, a pesar de que no han presentado procesos de actividad reciente (FIGURA 8).

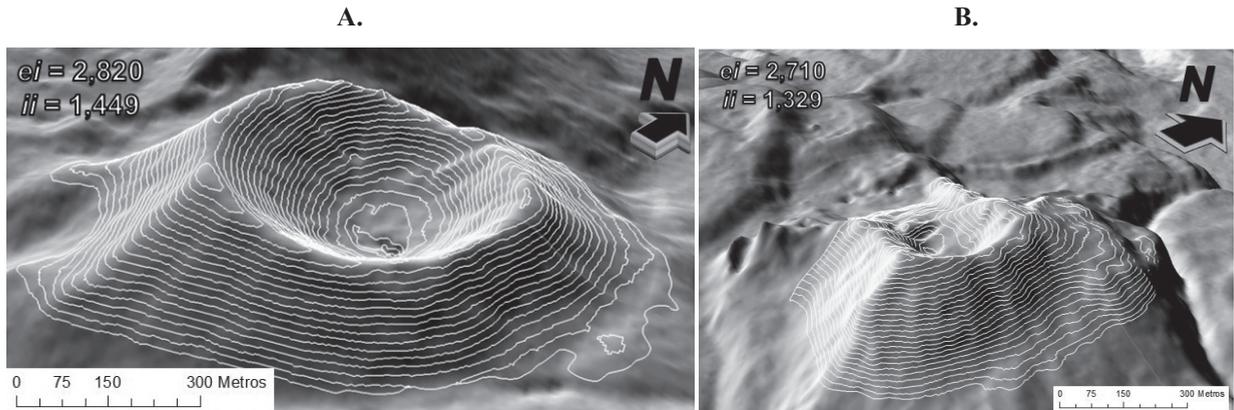


FIGURA 8. Vistas del modelo de sombras en perspectiva oblicua de los volcanes compuestos Quintín A y Machángara B. Convenciones como en la FIGURA 7.

Para los volcanes monogenéticos de la CVLC, que han sido tradicionalmente considerados como conos (TABLA 1), existe variabilidad en el valor de H_{co}/W_{co} que puede indicar diferencias en sus procesos de desarrollo o en sus tiempos de evolución y crecimiento. Se identifica de manera clara un patrón en los valores de la relación H_{co}/W_{co} , especialmente evidente al ordenar los datos de acuerdo a la coordenada de longitud del cono (FIGURA 5) el valor de H_{co}/W_{co} , con valores en el rango 0,017 (maar Hacienda Paletará, el más occidental) – 0,340 (Cono Piki, el más oriental) crece de manera regular de W a E. Este resultado,

aunque intuitivo para volcanes relativamente aislados y de forma suavizada como El Canelo y Hacienda Paletará (FIGURA 1), si sorprende para volcanes como Piki, Shaka 1, 2 y 3, y Killa que están relativamente agrupados y presentarían influencias mutuas en sus morfologías, especialmente en el caso del grupo Shaka 1, 2 y 3 y Killa. Estos conos aglomerados presentarían depósitos de piroclastos y emplazamientos de lavas superpuestos que enmascararían sus características morfológicas mutuas. Por otra parte, es posible que la proximidad espacial de algunos volcanes y la actividad cercana en el tiempo representen ciclos de actividad

común como sería el caso de los conos Shaka 1, 2 y 3, volcanes monogenéticos que tienen productos similares

y más recientes en comparación con sus similares de la CVLC (INGEOMINAS, 2003) (FIGURA 9).

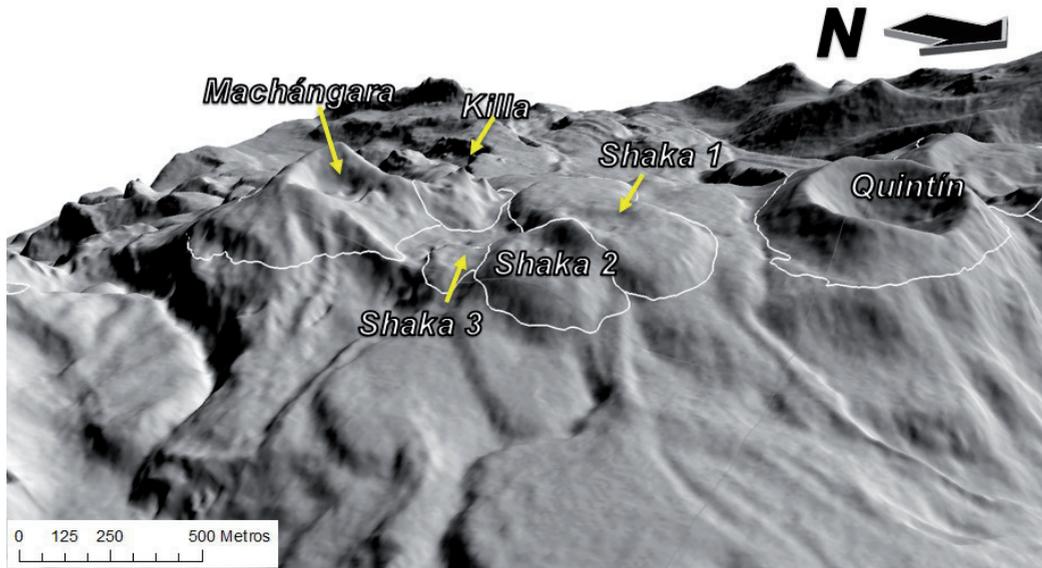


FIGURA 9. Vista del modelo de sombras en perspectiva con la agrupación de conos de escoria Shaka 1, 2 y 3, el volcán Killa y los volcanes compuestos Quintín y Machángara. Los contornos reflejan la delimitación de la base de cada estructura.

El índice H_{co}/W_{co} define valores de estabilidad morfológica y los procesos geomorfológicos son inherentes a cada una de las estructuras (Settle, 1979), por lo que es difícil aproximar un mismo estilo y edad relativa de proceso eruptivo para los volcanes monogenéticos. De cualquier modo, es evidente que hay una progresión espacial suave de los valores de H_{co}/W_{co} entre estos volcanes, lo cual demuestra la ventaja del método de análisis presentado aquí, en el sentido de revelar detalles y patrones que escaparían a una simple inspección visual o incluso a análisis espaciales computarizados.

Finalmente se sugiere que la variabilidad de morfologías de los centros volcánicos de la CVLC y vecindades representa historias muy diversas de formación y evolución de los volcanes compuestos y conos, hecho que es particularmente llamativo para centros volcánicos aglomerados y relacionados a una estructura fisural (¿?) como el Lineamiento de Los Coconucos. Una estructura mayor denominada la Caldera de Paletará (Torres *et al.*, 1995; Samacá, 2016), rodea la CVLC, y los aspectos presentados en este trabajo indican que la resurgencia magmática es definitivamente un conjunto de procesos complejo que merece futuras investigaciones tanto regionales como detalladas.

CONCLUSIONES

Se realizó el cálculo y análisis de parámetros morfométricos para 16 centros volcánicos de la CVLC y vecindades. Nueve centros volcánicos son morfológicamente clasificables como volcanes compuestos: Puracé, Curiquina, Calambas, Amancay, Pico Paletará, Quintín, Machángara, Púkara y Pan de Azúcar. Cinco estructuras son clasificables como volcanes monogenéticos: Piki, Shaka 1, Shaka 2, Shaka 3 y Killa. Dos volcanes localizados al SW de la CVLC son clasificables como maeres: El Canelo y Hacienda Paletará.

Los índices de elipticidad (e_i) e irregularidad (i_i) y la relación H/W_B para volcanes compuestos varían así: 1,269 (Puracé) $\leq e_i \leq$ 3,236 (Púkara); 1,115 (Pan de Azúcar) $\leq i_i \leq$ 1,530 (Calambas); 0,044 (Calambas) $\leq H/W_B \leq$ 0,235 (Pan de Azúcar). La relación H_{co}/W_{co} para volcanes monogenéticos y maeres varía en el rango 0,017 (maar Hacienda Paletará) $\leq H_{co}/W_{co} \leq$ 0,340 (cono Piki).

Aunque los valores de e_i e i_i exhiben carácter oscilante en gráficos de acuerdo a las coordenadas de latitud y longitud, hay patrones incipientes de crecimiento o disminución en estos parámetros. Los volcanes

compuestos de la CVLC se hacen más elongados y menos irregulares hacia el SE. De modo similar, la relación espacialmente variable H/W_B presenta aumento general hacia el SE. El patrón de variación espacial del parámetro morfométrico H_{co}/W_{co} para volcanes monogenéticos es muy marcado, especialmente al ordenar los valores de acuerdo a la coordenada de longitud. Este parámetro aumenta de manera gradual hacia el NE.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Subdirección de Geografía y Cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) por facilitar las imágenes de radar necesarias para el desarrollo de este trabajo. Las revisiones de la Dra. Elmilce Bustos (INENCO-Argentina) y el Dr. Hugo Murcia (IIES-Universidad de Caldas, Colombia) ayudaron a mejorar la calidad de este artículo.

REFERENCIAS

- De Silva, S., and Lindsay, J.M. (2015). Primary Volcanic Landforms. In: H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, and J. Stix (Ed.). *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 273-297). 2nd Edition. Academic Press.
- Favalli, M., Karátson, D., Mazzarini, F., Pareschi, M.T., and Boschi, E. (2009). Morphometry of scoria cones located on a volcano flank: A case study from Mt. Etna (Italy) based on high-resolution LiDAR data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(3-4), 320-330. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.07.011.
- Flórez, A. (1983). Cadena volcánica de los Coconucos, Cordillera Central, Colombia. *Revista Colombia Geográfica*, X, 33-53.
- Flórez, A. (2003). *Colombia, evolución de sus relieves y modelados*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, UNIBIBLOS.
- Karátson, D., Favalli, M., Tarquini, S., Fornaciai, A., and Wörner, G. (2010). The regular shape of stratovolcanoes: A DEM-based morphometrical approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193(3-4), 171-181. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.03.012.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A. and Alvarado, G.E. (2009). Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology*, 37(7), 651-654. doi: 10.1130/G25734A.1.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P.A., Kervyn, M., and Petrinovic, I.A. (2012). Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology*, 136(1), 114-131. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.06.001.
- INGEOMINAS. (2003). Geología de la Plancha 365 - Coconuco. Mapa Geológico escala 1:100.000 y Memoria Explicativa.
- Monsalve, M.L. (2000). Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia, Formación Coconucos. INGEOMINAS, 31 p.
- Monsalve, M.L., Galarza, J.J., Zuluaga, I., y Laverde, C.A. (2014). Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé actual (Cauca-Colombia) segunda versión. Servicio Geológico Colombiano, 49 p.
- Porter, S. (1972). Distribution, morphology and size of cinder cones on Mauna Kea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 83(12), 3607-3612. doi: 10.1130/0016-7606(1972)83[3607:DMASFO]2.0.CO;2.
- Robertson, K., Flórez, A., y Ceballos, J.L. (2002). Geomorfología volcánica, actividad reciente y clasificación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 11, 37-76.
- Settle, M. (1979). The structure and emplacement of cinder cones fields. *American Journal of Science*, 279(10), 1089-1107. doi: 10.2475/ajs.279.10.1089.
- Samacá, W. (2016). Análisis morfométrico y geomorfológico de la Caldera de Paletará (Cauca), Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Torres, M.P., Monsalve, M.L., Pulgarín, B., y Cepeda, H. (1995). Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). INGEOMINAS, informe interno, 20 p.

Wood, C.A. (1980). Morphometric analysis of cinder cone degradation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2-4), 137-160. doi: 10.1016/0377-0273(80)90101-8.

Wveimar Samacá
ORCID: 0000-0003-4032-8548

John J. Sánchez
ORCID: 0000-0002-9024-7554

Trabajo recibido: noviembre 16 de 2017
Trabajo aceptado: mayo 17 de 2018