

# ***Estudio morfométrico de los conos volcánicos monogénicos de Cumbre Vieja (La Palma, Islas Canarias)***

**Melanie Henley Trujillo**

**Universidad Complutense de Madrid**

**Máster en Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)**



**Dirigido por:**

**Prof<sup>a</sup>. Nuria de Andrés de Pablo**

**Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física  
Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña (GFAM)**

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1	<i>Estudios previos</i> .....	3
1.2	<i>Marco geográfico</i> .....	5
1.3	<i>Historia geológica</i> .....	7
1.3.1	<i>Marco geológico general</i> .....	7
1.3.2	<i>Marco geológico de Cumbre Vieja</i> .....	8
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>10</b>
3.1	<i>Esquema geomorfológico</i> .....	10
3.2	<i>Delimitación de los conos volcánicos</i> .....	12
3.3	<i>Cálculo de los parámetros morfométricos</i> .....	13
3.4	<i>Cálculo de las ratios morfométricas</i> .....	16
3.5	<i>Estimación de la edad geológica de los conos</i> .....	17
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>18</b>
4.1	<i>Esquema geomorfológico</i> .....	18
4.2	<i>Delimitación de los conos volcánicos</i> .....	18
4.3	<i>Cálculo de los parámetros y las ratios morfométricas</i> .....	21
4.4	<i>Relaciones morfométricas</i> .....	23
4.5	<i>Relaciones volumétricas</i> .....	26
4.6	<i>Relaciones entre la morfometría de los conos y su edad geológica</i> .....	29
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>33</b>
5.1	<i>Relaciones entre los parámetros y las ratios morfométricas</i> .....	33
5.2	<i>Relaciones entre la morfometría de los conos y su edad geológica</i> .....	38
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>41</b>
	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la morfometría de los volcanes está adquiriendo un gran interés en el mundo de la vulcanología. En España, sobre todo en los últimos años, se han aplicado análisis morfométricos para el estudio de diversos campos volcánicos tales como los de Calatrava en Ciudad Real (Becerra, 2007) y los de varias islas del Archipiélago Canario; Tenerife (Dóniz, 2004), Gran Canaria (Rodríguez-González, 2011) y Lanzarote (Kervyn et al., 2011).

Mediante la aplicación de técnicas morfométricas, se puede estudiar tanto la evolución de un paisaje volcánico, como la morfología o estructura de sus conos. Las relaciones entre algunos de los parámetros que definen un determinado cono volcánico, ya sea la altura media del cono, el diámetro medio de su base, su volumen o ángulo medio de sus laderas, permiten establecer clasificaciones de diferente tipo y lograr caracterizar campos de conos volcánicos en diversas áreas del mundo.

En el caso de las Islas Canarias, autores como Kervyn et al. (2011) han aplicado las técnicas de análisis morfométrico para caracterizar campos de volcanes basálticos monogénicos. Este tipo de volcanes se caracterizan por haberse elaborado durante una sola fase eruptiva, involucrar un tipo de magma, poseer un sistema de conductos simple, que es el empleado durante esa única fase, que puede durar desde varios días a varios años, y por estar asociados a ambientes tectónicos extensionales (Dóniz, 2011). Atendiendo a este tipo de volcanes, una de las clasificaciones más comunes hace referencia a la morfología de los mismos. Se puede distinguir entre volcanes con conos anulares cerrados y volcanes con conos abiertos o en herradura (Dóniz, 2011; Kervyn et al., 2011). En la mayoría de los casos, los conos en herradura corresponden a erupciones volcánicas que han sido perturbadas por algún factor determinado, que puede ser ajeno al proceso estrictamente volcánico. De este modo, se puede relacionar la morfología de los conos con el tipo de erupción que ha dado lugar al mismo.

En este estudio se comparan los resultados de un análisis morfométrico de 23 conos volcánicos con una morfología relativamente simple, es decir, conos que poseen una única chimenea volcánica y una base del cono bien definida, así como también un contorno del cráter nítido.

### 1.1 Estudios previos

Existen diversas razones por las que se han llevado a cabo estudios morfológicos de conos volcánicos monogénicos. En el pasado, diversos autores han planteado objetivos muy distintos a la hora de realizar estos estudios. Kervyn et al. (2011) destacan, entre otros, dos objetivos fundamentales en estos estudios: para definir la morfología de tipos contrastados de conos volcánicos monogénicos (Porter, 1972; Wood 1980a); y para establecer correlaciones entre morfometría de los conos y génesis de los mismos (Wood, 1980a). Aun así, también se han planteado otros objetivos importantes como pueden ser: para estudiar la evolución de un determinado paisaje volcánico (Inbar et al., 2010); o para analizar la estructura y emplazamiento de campos de conos volcánicos contrastados (Settle, 1979).

Aunque persigan diferentes objetivos, autores como Porter (1972), Settle (1979), Wood (1980a), Riedel et al. (2003), Becerra (2012) y Kervyn et al. (2011), han realizado clasificaciones morfológicas en diversos campos volcánicos atendiendo siempre a tres parámetros morfométricos principales: diámetro medio de la base del cono ( $W_{co}$ ), altura media del cono ( $H_{co}$ ) y diámetro medio del cráter ( $W_{cr}$ ) (figura 1). Además de estos parámetros Porter (1972) también calculó la profundidad de los cráteres así como el ángulo medio de las vertientes de los conos recientes localizados en las laderas del volcán de Mauna Kea.

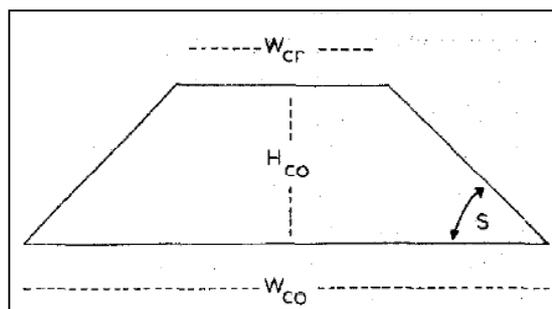


Fig.1. Diagrama esquemático de un cono volcánico y los parámetros morfométricos principales.  $W_{co}$ : diámetro medio de la base del cono;  $W_{cr}$ : diámetro medio del cráter;  $H_{co}$ : altura media del cono;  $S$ : vertiente media del cono. (Wood, 1980).

El estudio de estos parámetros permite también contrastar la morfología de conos volcánicos en diferentes ambientes geológicos. Por un lado, Settle (1979) analiza este contraste entre campos de conos en volcanes y campos de conos en plataformas. Wood (1980a) lo hace entre conos de escoria y conos de salpicadura; Inbar et al. (2010) se centran en las diferencias según la edad relativa de los conos; Becerra et al. (2012) separan el conjunto de conos volcánicos en monogénicos y poligénicos; mientras Kervyn et al. (2012) estudian el contraste en cuanto a morfometría entre conos abiertos y cerrados.

Todos ellos cuantifican las formas de los conos volcánicos recientes que tienen una morfología relativamente simple utilizando dos ratios morfométricos principales: diámetro del cráter/diámetro basal ( $W_{cr}/W_{co}$ ) y altura del edificio/diámetro del cono ( $H_{co}/W_{co}$ ). Wood (1980a) y Porter (1972) sugirieron valores medios para las ratios  $W_{cr}/W_{co}$  y  $H_{co}/W_{co}$  de 0,40 y 0,18 respectivamente, tras analizar los conos volcánicos en diversas áreas. En cambio, Bloomfield (1975), tras examinar la morfometría de 41 conos de escoria en un sector del Eje Volcánico Mexicano al este de Parícutin, señaló una ratio media  $H_{co}/W_{co}$  para conos Holocenos de 0,21 y de 0,19 para conos Pleistocenos relativamente jóvenes y bien formados. Más tarde, junto a estos datos y sus propios análisis, Settle (1979) reconoció una amplia dispersión en los datos y sugirió que  $H_{co}/W_{co} = 0,2$  podría representar la forma primaria de los conos de escoria, antes de su degradación post-emplazamiento. De esta forma, en un gráfico de doble entrada donde se relaciona la altura del cono y el diámetro de su base ( $H_{co}/W_{co}$ ) de un determinado campo de conos volcánicos, la distribución de los datos en relación a la línea de referencia  $H_{co} = 0,2 W_{co}$  podría reflejar, de forma aproximada, la antigüedad de los conos y el estado de degradación de los mismos.

Los valores de estas ratios son, en su mayoría, constantes en conos de erupción reciente y que no han sufrido procesos de meteorización importantes (Porter, 1972; Wood, 1980). Los valores establecidos por Porter y Wood se han confirmado también en el campo volcánico de Lamongan en Indonesia (Carn, 2000) y en el campo de Michoacán-Guajuanato en México (Hasenaka and Carmichael, 1985). También se repiten en el campo volcánico de Tolbachik en Kamchatka. En este caso, Inbar et al. (2011) estudiaron el desarrollo morfométrico y morfológico de los conos de escoria Holocenos incorporando datos de volumen y pendiente de los conos e investigando nuevas relaciones entre los diferentes parámetros. Los nueve conos objeto de estudio fueron divididos en dos grupos según la edad de la erupción. Los resultados mostraron que existe una clara relación entre la pendiente del cono y el ratio  $H_{co}/W_{co}$ , tal y como predijo Woods (1980b), y que los valores morfológicos y morfométricos obtenidos pueden ser utilizados para validar la edad y procesos de erosión que afectan a un determinado cono volcánico.

## 1.2 Marco geográfico

La isla de La Palma forma parte del archipiélago de Canarias y ha sido, junto con El Hierro y La Gomera, la isla menos estudiada dentro del campo de la vulcanología. Con una superficie de 706 km<sup>2</sup> y una altitud de 2.423 m (Roque de Los Muchachos), es la quinta en extensión y segunda en altitud. Se encuentra en la etapa más juvenil de desarrollo y está situada directamente sobre el punto caliente que ha generado todo el Archipiélago. Junto con la isla de El Hierro, es la que mayor probabilidad de erupciones tiene (Carracedo, 2006).

Una de las particularidades de su geografía es la diferencia de cotas en relación a su extensión, sobrepasando los 2.000 m de altitud en el edificio norte de la isla y los 4.000 m de profundidad en las inmediaciones de sus fondos oceánicos (Vegas et al., 1999). Esto da lugar a una isla muy accidentada desde el punto de vista geográfico, con importantes pendientes y barrancos altamente encajados, sobre todo en el Norte de la misma.

La Caldera de Taburiente se considera el accidente geográfico de mayor relevancia de la isla. Tiene una forma circular y constituye una depresión abierta hacia el Suroeste por el barranco de Las Angustias, con casi 1.500 m de desnivel y 8 km de diámetro. El perímetro de la caldera está compuesto por una alineación de roques y picos que sobrepasan los 2.000 m de altitud. Esta crestería continúa hacia el sur por Cumbre Nueva que es el resto de otra paleocaldera con forma de arco abierto hacia el Oeste. Finalmente, y continuando la alineación orográfica anterior, se encuentra la reciente Cumbre Vieja. Ésta se prolonga hacia el Sur de la isla conformando una dorsal con numerosos conos volcánicos de edades relativamente recientes, siendo el último el de Teneguía, de 1971.

Nuestro estudio se centra en esta última y más reciente parte de la isla. El interés en el estudio de Cumbre Vieja se basa en el hecho de que es la última manifestación volcánica tras una sucesión de crecientes centros volcánicos que se han solapado a lo largo del tiempo en la isla. Es la construcción más reciente de la isla y el único sistema volcánico que permanece con actividad en ella. Se trata de una activa dorsal volcánica con una dirección Norte-Sur aproximadamente que se prolonga mar adentro. Se han descubierto varios centros de emisión submarinos al sur de la isla donde también existe un volumen desconocido de roca. Esto permite suponer que La Palma seguirá creciendo hacia el sur (Recio et al., 2005). Sus laderas de elevada pendiente alcanzan casi los 2 km sobre el nivel del mar en tan sólo una superficie aérea de 220 km<sup>2</sup> y un volumen subaéreo de 125 km<sup>3</sup>. Sus acantilados son más bajos que los del Norte de la isla y presentan una menor verticalidad ya que han sido suavizados por las coladas emitidas en las erupciones más recientes. También, las plataformas costeras contribuyen a fosilizar los acantilados y retrasar la progresión de la erosión costera (Carracedo et al., 2001).

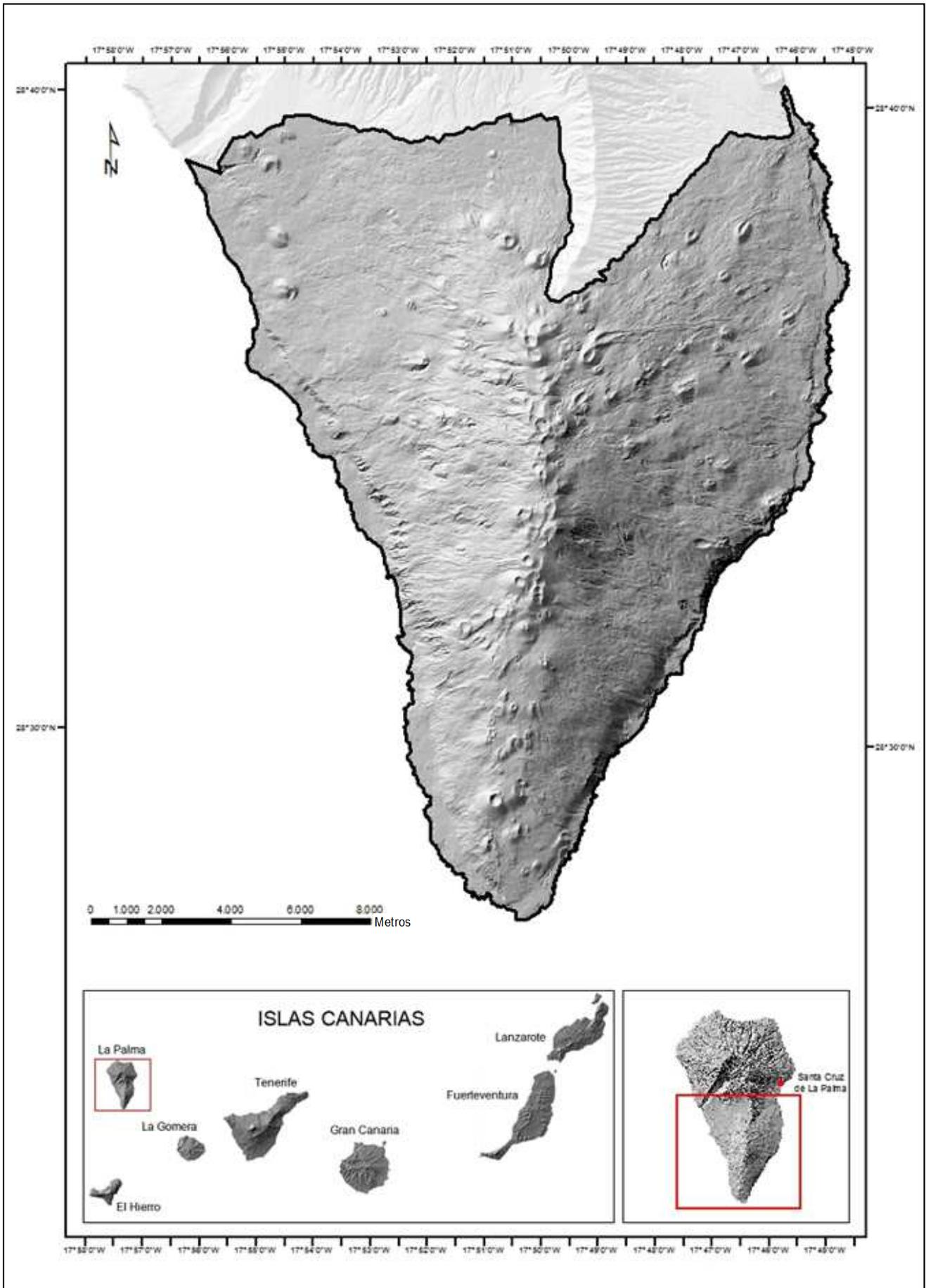


Fig. 2. Localización geográfica de Cumbre Vieja

### 1.3 Historia geológica

La Palma es una de las islas más jóvenes del archipiélago. Se estima que su formación corresponde al Mioceno superior o incluso a un período anterior, pero no existen pruebas que lo confirmen. Durante esta etapa, se levantó un edificio submarino hasta cotas de 1.500 y basculamiento de 45-50° al SO, seguido de un período de rápida erosión del mismo (Carracedo et al., 2001). Esto dejó al descubierto su cámara magmática. Este período destructivo duró en torno a los 1,7 M.a. y, tras él, se reactivó la actividad volcánica subaérea, la cual se mantuvo hasta al menos 0,41 M.a. Durante esta etapa, se configuró el Escudo Volcánico Norte, formado por la superposición de varios edificios volcánicos superpuestos y aproximadamente concéntricos entre sí y con el apoyo submarino (Carracedo et al., 2001).

El edificio volcánico de Garafía comenzó a elevarse rápidamente desde 1,7 a 1,2 M.a. alcanzando casi los 3.000 metros de altura y con flancos de acusadas pendientes. Pero su elevada inestabilidad produjo un deslizamiento gravitatorio del flanco meridional del edificio. Sin cesar el ritmo, la actividad volcánica continuó en la recién formada depresión, levantando así el edificio volcánico Taburiente. Se siguió rellenando la misma por las lavas de este nuevo edificio hasta hace unos 0,89 M.a.

Progresivamente, se produjo una reorganización del edificio volcánico Taburiente y los centros de emisión se concentraron en tres dorsales (NO, NE y N-S) cada vez más definidas. Debido a las intensas emisiones de estos nuevos centros, las formaciones anteriores quedaron recubiertas, excepto parte de las alineaciones de conos de las dorsales (Carracedo et al., 2001). De estas tres dorsales, la meridional sufrió un mayor desarrollo llegando a alcanzar 2.500 metros de altura y con el eje mayor en dirección N-S, lo que se conoce ahora como Cumbre Nueva. La actividad volcánica se centró en esta dorsal y debido a un crecimiento excesivo, se produjo un deslizamiento gravitatorio del flanco occidental formando una enorme depresión (el Valle de Aridane), y el inicio de la formación de la Caldera de Taburiente debido al protagonismo de la erosión (Carracedo et al., 2001).

Finalmente, hacia unos 0,4 M.a., la actividad eruptiva terminó en el escudo volcánico y se trasladó hacia un nuevo edificio: Cumbre Vieja. Esta última etapa de actividad volcánica en la isla, ha creado una dorsal que actúa como eje estructural en dirección N-S, y donde se aprecian aún los volcanes históricos y sus correspondientes coladas. Esta actividad sigue hasta el día de hoy con la presencia de centros eruptivos submarinos que prolongan la isla hacia el sur.

#### 1.3.1 Marco geológico general

El desarrollo geológico y estructural de La Palma es muy complejo. Como se ha explicado en el apartado anterior, la misma está constituida por dos grandes unidades geológicas, el Complejo Basal y los Edificios Volcánicos Subaéreos, en los que se distinguen: Volcán Taburiente, Volcán Cumbre Nueva, Volcán Bejenado y Dorsal Cumbre Vieja (Coello, 1999). Estos edificios volcánicos se encuentran alineados de Norte a Sur. El más septentrional, Taburiente, con edades radiométricas comprendidas entre 2,0 y 0,77 M.a. se solapa con el central, Cumbre Nueva, de edades entre 0,81 y 0,69 M.a., que a su vez está cubierto en su extremo sur por el edificio más reciente, Cumbre Vieja, con edades que oscilan entre 0,62 M.a. hasta la actualidad (Vegas et al., 1999).

### 1.3.2 Marco geológico de Cumbre Vieja

Las laderas de la isla tienen, en su mayoría, una pendiente muy elevada. En el Norte se caracterizan por estar profundamente incididas debido a la intensa erosión, pero las laderas de la dorsal de Cumbre Vieja presentan pendientes muy escarpadas (16-20°) y poco erosionadas, en las que se acumulan numerosos conos basálticos estrombolianos, freáticos y freatomagmáticos, además de algunos domos monolíticos.

Durante el Holoceno (últimos 10.000 años) se produjeron al menos una docena de erupciones en este sector de la isla, de las cuales aproximadamente la mitad corresponden a los últimos 500 años (Recio et al., 2005). Tales erupciones tuvieron sus centros de emisión a lo largo del eje estructural de la Dorsal y las fisuras eruptivas presentaban una dirección paralela al eje estructural (N-S). Aún así, algunas erupciones significativas han tenido lugar en la ladera Oeste del volcán.

Estos conos volcánicos corresponden a erupciones prehistóricas, así como a la última del Volcán Teneguía en 1971. La mayoría de las erupciones de la Dorsal de Cumbre Vieja son de quimismo básico (basaltos, basanitas y tefritas). Estas erupciones son poco o moderadamente explosivas, en las que se forman conos de aglutinados o escorias, y coladas de lava de tipo "pahoe-hoe" o "aa", aunque también aparecen domos y coladas de rocas sálicas (fonolitas) dispersos por todo el edificio (Coello, 1999).

La Dorsal de Cumbre Vieja ha sido una de las regiones volcánicamente más activas de Canarias en tiempos históricos. Las siete erupciones principales desde el siglo XV hasta la actualidad son las siguientes: Volcán de Tacande (1470-1492); Volcán de Jedey o Tahuya (1585); Volcán de Tigalate o Martín (1646); Volcán de San Antonio o Fuencaliente (1677-1678); Volcán de El Charco o Montaña Negra (1712); Volcán de San Juan o El Duraznero-Volcán de Llano del Banco o Las Manchas-Volcán de Hoyo Negro (1949); y Volcán de Teneguía (1971), la última erupción registrada en el archipiélago (Coello, 1999).

Siete (1470-1492, 1585, 1646, 1677, 1712, 1949 y 1971) de las doce erupciones registradas en Canarias tuvieron lugar en el Edificio Volcánico de Cumbre Vieja (Carracedo et al., 1996), y llegaron a recubrir el 15% de su área total con materiales que tienen una potencia media de 2 a 5 metros (Hernández-Pacheco y Valls, 1982). También, cabe señalar la ausencia absoluta de erupciones históricas en la zona NE de la dorsal después de su reactivación.

En cuanto a la presencia de los grandes acantilados y plataformas costeras en el flanco occidental, estos aluden a la gran importancia que tuvo la erosión marina tras el cese temporal de la actividad volcánica (0,08 M.a. – 0,02 M.a.). Pero después de su reactivación, estos acantilados fueron cubiertos por las nuevas coladas lávicas formando plataformas costeras que ganaron terreno al mar (0,02 M.a. – 0,015 M.a.) (Carracedo et al., 2001).

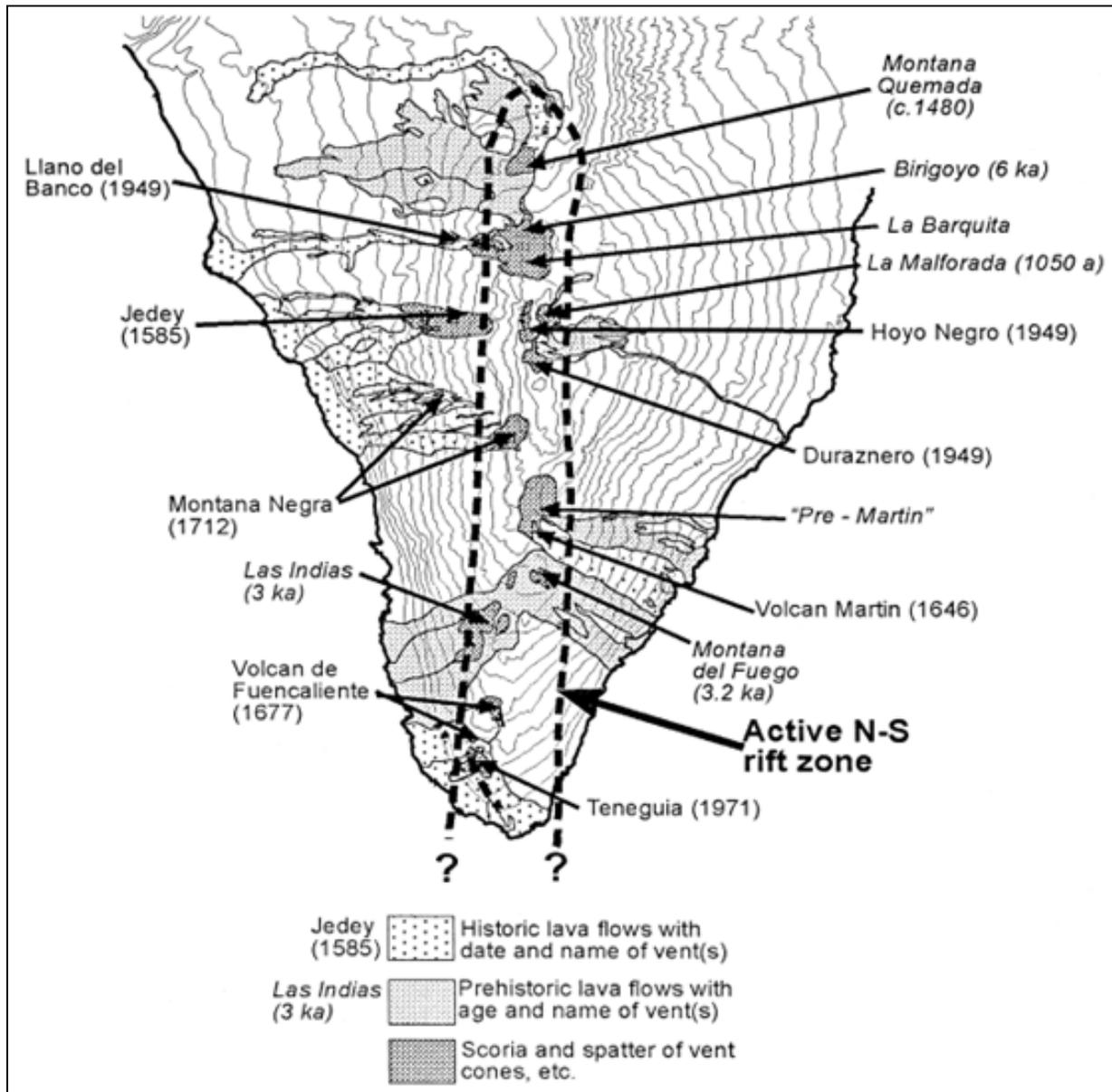


Fig. 3. Distribución de chimeneas volcánicas históricas y sub-históricas, obtenido de Day et al., (1999)

## 2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es realizar un estudio morfométrico para establecer cuantitativamente la variabilidad de los conos volcánicos monogénicos que tienen una morfología relativamente simple en el área de Cumbre Vieja. Se trata de aplicar técnicas de análisis morfométrico para caracterizar los conos de este sector de la isla.

El procedimiento consiste en analizar determinados parámetros morfométricos, establecer relaciones entre ellos e ilustrar cuantitativamente el grado de variabilidad que existe en este campo de conos volcánicos en el sur de La Palma.

Además de este objetivo general, se pretenden lograr unos objetivos específicos que se señalan a continuación:

- Definir la morfología de tipos contrastados de conos volcánicos monogénicos atendiendo a una serie de parámetros morfométricos y las relaciones entre ellos.

- Estudiar las relaciones existentes entre la morfometría del cono y su edad geológica para así poder aprender sobre la evolución de campos volcánicos.
- Determinar diferencias morfométricas entre conos con distinta morfología (ej. conos con cráteres abiertos o cerrados).

### 3 METODOLOGÍA

En este apartado se presenta la metodología que se ha empleado para realizar el estudio de la morfometría de 23 conos volcánicos monogénicos que muestran una morfología relativamente simple (i.e. conos que poseen una única chimenea volcánica y una base del cono bien definida, así como también el cráter) en el edificio volcánico de Cumbre Vieja (Isla de La Palma, Canarias). Con el empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante el programa ArcGIS 10 en su entorno ArcMap, se ha podido llevar a cabo este estudio e intentar conseguir sus principales objetivos.

#### 3.1 Esquema geomorfológico

Se ha partido de la elaboración de un esquema geomorfológico a partir de esquemas geológicos y geomorfológicos realizados anteriormente por algunos autores (Carracedo et al., 1999 y Romero, 1986) y mediante la ayuda de los servicios WMS (Web Map Service) prestados por el Instituto Geológico Minero de España, del cual se pudo obtener el mapa litológico de la isla de La Palma a escala 1:100.000.

La geomorfología del área de estudio permite localizar los conos volcánicos y los flujos de lava correspondientes a las erupciones históricas más relevantes, así como las principales unidades de relieve. La distribución de los conos en el terreno puede aportar datos importantes en la explicación de su propia morfología y morfometría.

También se debe señalar que esta primera aproximación al área de estudio ha permitido identificar los conos volcánicos de interés para su análisis, es decir, los que muestran una morfología relativamente simple a primera vista, sobre todo los conos cerrados y aislados. En el caso de los conos abiertos, se ha prestado atención a aquellos con un borde de cráter bien conservado.

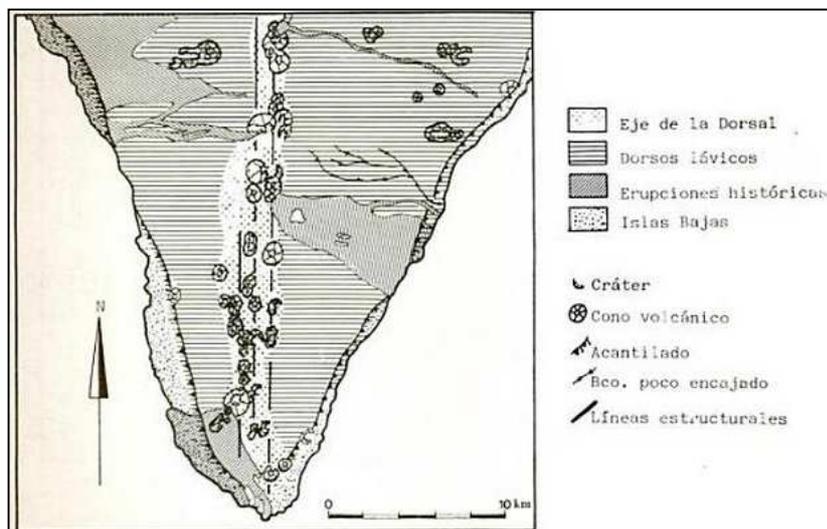
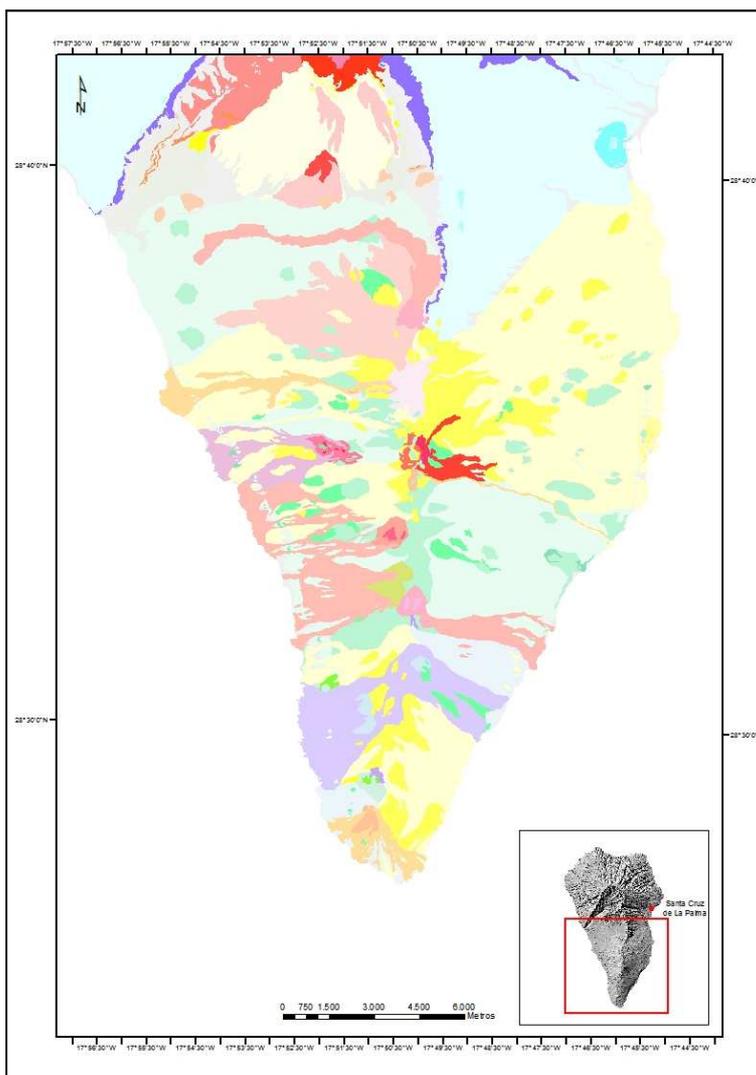


Fig.4. Mapa geomorfológico de la Dorsal de La Cumbre Vieja (La Palma). Obtenido de Romero (1986).



Leyenda	
Litología	
■ Aglomerados y depósitos de deslizamiento (Dd)	■ Gabros
■ Piroclastos basálticos	■ Fonolitas juveniles intrusivas
■ Depósitos freatomagmáticos	■ Conos de piroclastos basálticos, basaníticos y tefríticos
■ Coladas basálticas	■ Depósitos freatomagmáticos
■ Depósitos freatomagmáticos	■ Conos de piroclastos basálticos
■ Domos y coladas de tefritas y fonolitas	■ Conos de piroclastos basálticos
■ Domos o domos colada traquíticos o fonolíticos metasomatizados.	■ Sedimentos, aglomerados y brechas (bd. Brechas de deslizamiento)
■ Conos de piroclastos basálticos	■ Conos de piroclastos basálticos
■ Coladas basálticas	■ Coladas basálticas
■ Conos y Depósitos freatomagmáticos	■ Coladas tefríticas y fonolíticas
■ Conos de piroclastos basálticos	■ Depósitos freatomagmáticos
■ Piroclastos basálticos	■ Coladas basálticas
■ Coladas basálticas	■ Lavas y piroclastos basálticos con gran densidad de diques basálticos
■ Apófisis de gabros, gabrosolivínicos y gabros alcalinos	■ Conos de piroclastos basálticos, basaníticos y tefríticos
■ Depósitos freatomagmáticos	■ Coladas de basanitas tefritas y fonolitas
■ Lavas terminales diferenciadas (tefritas y fonolitas)	■ Coladas basálticas
■ Conos de piroclastos basálticos	■ Coladas basálticas
■ Coladas basálticas	■ Conos de piroclastos basálticos
■ Coladas basálticas (predominantes)	■ Conos de piroclastos basálticos
	■ Coladas basálticas
	■ Coladas basálticas
	■ Coladas basálticas

Fig.5. Mapa litológico de Cumbre Vieja (La Palma)  
Fuente: Insituto Geológico y Minero de España, agosto 2010

### 3.2 Delimitación de los conos volcánicos

La delimitación de los conos volcánicos y sus correspondientes cráteres es un procedimiento fundamental para obtener valores medios de altitud de los diferentes parámetros que interesan en este estudio. Para ello, se ha hecho uso de Modelos Digitales del Terreno (MDTs) extraídos a una resolución espacial de 10 metros del servicio online de información geográfica y territorial de Canarias del Gobierno de Canarias, conocido como IDECan (Infraestructuras de Datos Espaciales de Canarias). A partir del MDT se ha creado un mapa de sombras y uno de curvas de nivel con intervalos de contorno de 1 metro.

La morfometría de cada cono fue cuantificada en un SIG mediante la delineación manual del borde de la base de los conos así como de sus cráteres. Los cambios de pendiente han sido el criterio principal a la hora de realizar esta tarea, junto con la constante observación del mapa de sombras e imágenes proporcionadas por Google Earth.

Los conos más adecuados para el estudio y análisis de su morfometría son aquellos caracterizados por una morfología aparentemente simple. Son conos recientes, generalmente distinguidos por una poca presencia de vegetación, con bordes circulares relativamente bien definidos, y frecuentemente con cambios de pendiente abruptos cuando el cono llega a la superficie de terreno circundante (Wood, 1980).

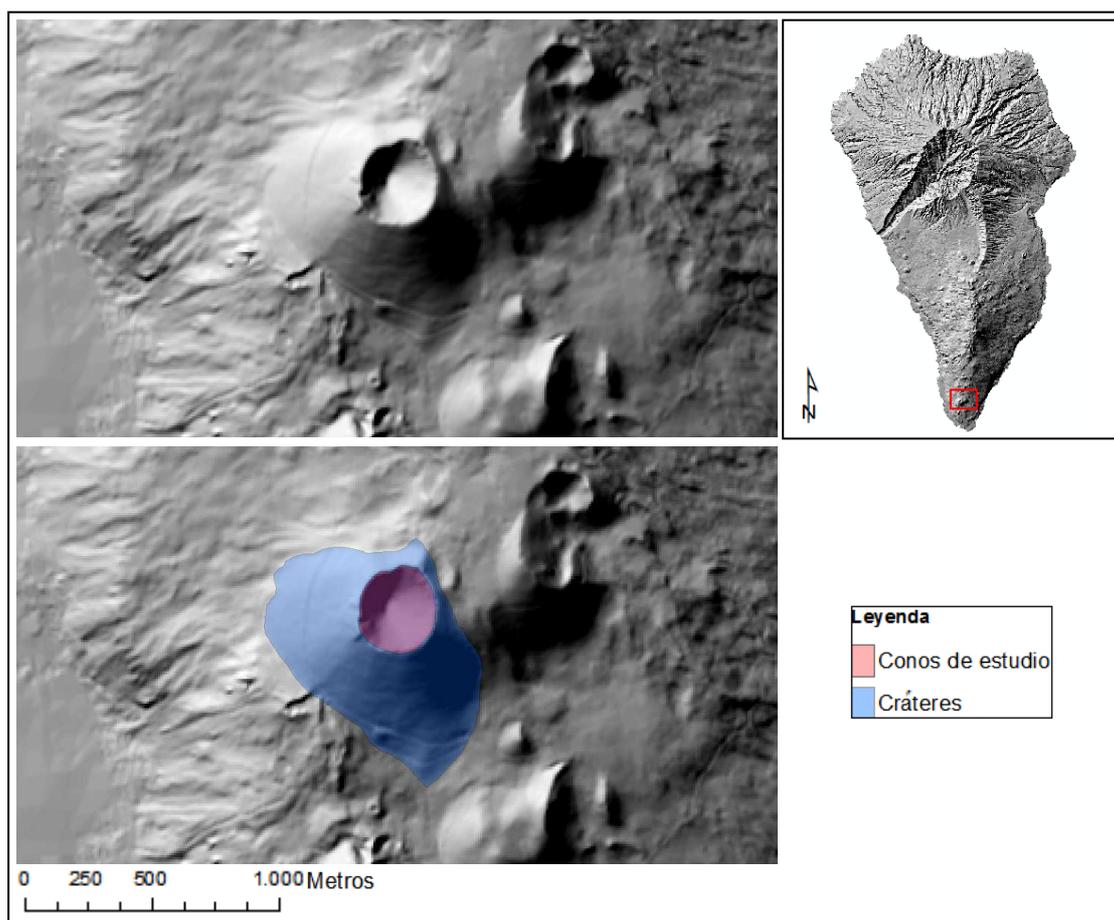


Fig.6. Delimitación del cono del volcán de San Antonio y su correspondiente cráter

### 3.3 Cálculo de los parámetros morfométricos

Este estudio se ha centrado en tres parámetros fundamentales y sus correspondientes ratios morfométricas: diámetro medio de la base del cono ( $W_{co}$ ), altura media del cono ( $H_{co}$ ) y diámetro medio del cráter ( $W_{cr}$ ). Para calcular la altura media del cono, ha sido necesario determinar las elevaciones medias de la base del cono y del borde del cráter, por lo que se ha procedido al cálculo de la media aritmética para la elevación de todos los píxeles del MDT localizados en el borde del cono o del cráter, respectivamente (Kervyn et al., 2011).

El mapa de curvas de nivel con intervalos de contorno de 1 metro ha permitido llevar a cabo esta operación. Mediante la limitación de las curvas de nivel al área ocupada por el cono/cráter, y posterior creación de una capa de puntos generados a partir de los vértices de cada curva, se ha logrado obtener la altitud de cada vértice localizado en el borde del cono/cráter. Las figuras 7 y 8 ayudan a entender mejor este procedimiento.

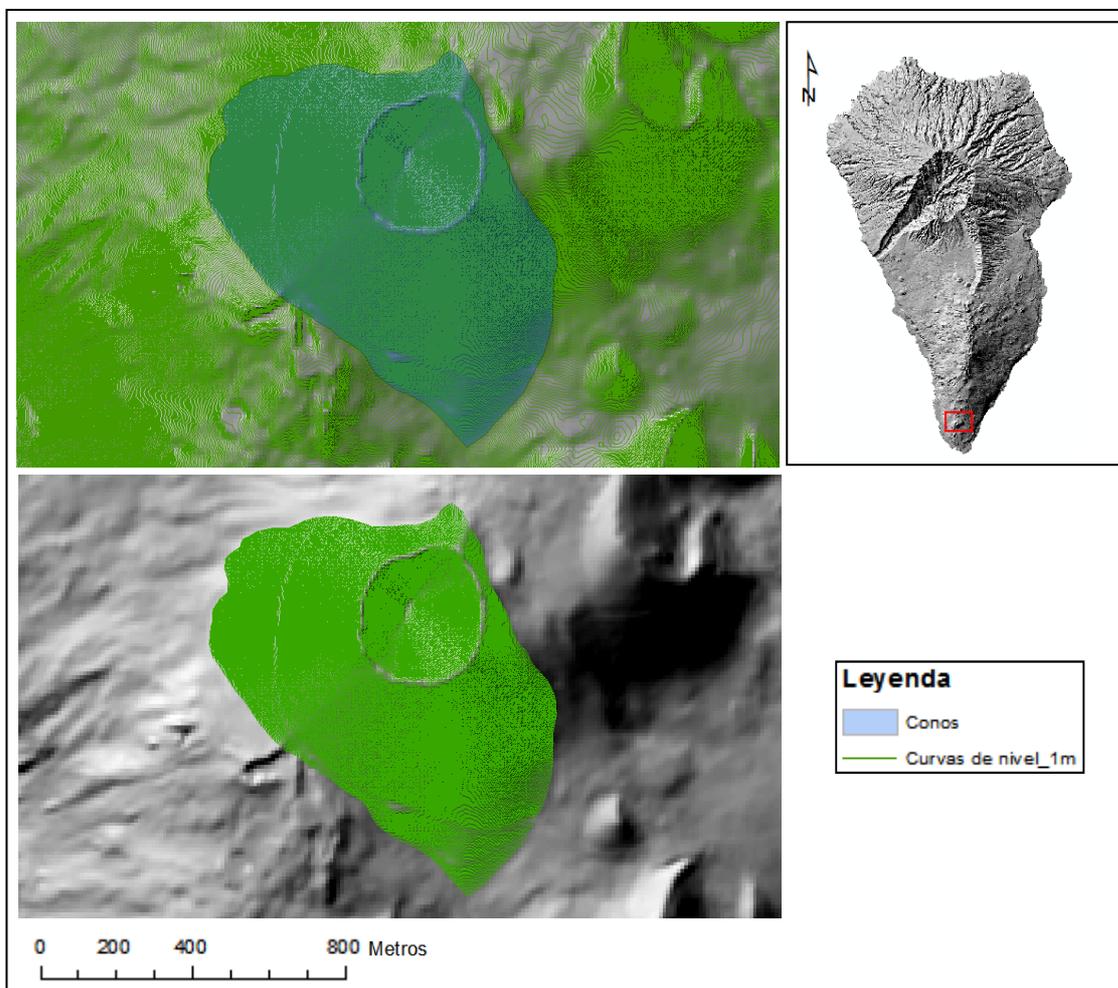


Fig.7. Limitación de las curvas de nivel al área ocupada por el cono del volcán de San Antonio.

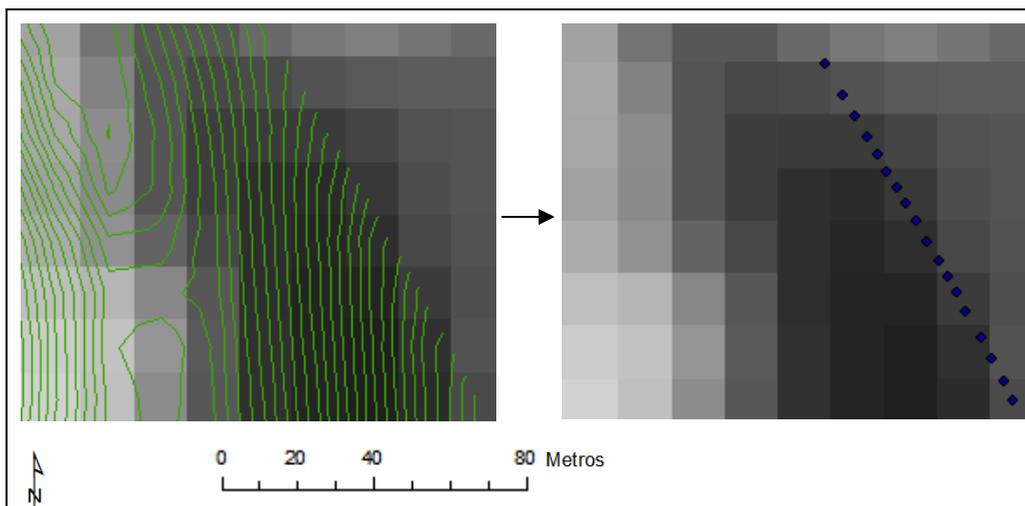


Fig.8. Creación de una capa de puntos generados a partir de los vértices de cada curva de nivel del cono del volcán de San Antonio.

Los valores de altitud para cada punto se han recogido en la tabla de atributos correspondiente a cada uno de los conos y cráteres, lo que ha permitido calcular la altitud media en cada uno de los casos mediante las estadísticas del campo denominado “CONTOUR” de la tabla (figura 9). Mediante la obtención de estos valores, ha sido posible proceder al cálculo de la altura media de los conos ( $H_{co}$  = altura media del cráter – altura media de la base del cono).

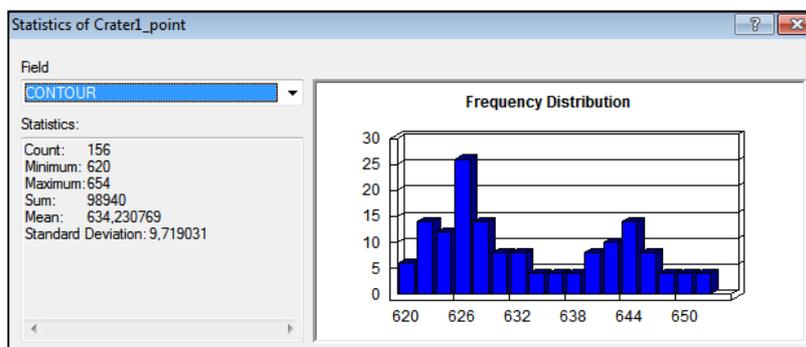


Fig.9. Estadísticas del campo “CONTOUR” de la tabla de atributos de la capa de puntos del cono del volcán de San Antonio.

Los 23 conos y cráteres objeto de este estudio no tienen una forma circular perfecta, por lo que el diámetro de los mismos se ha estimado como el diámetro de un círculo de área equivalente al de cada cono o cráter (Kervyn et al., 2011). De tal forma que, tras calcular el área, se empleó la fórmula indicada a continuación para obtener los diámetros estimados de los conos y cráteres.

$$D = 2 \sqrt{\frac{\text{Área}}{\pi}}$$

Tras haber calculado los tres parámetros principales, se ha procedido también al cálculo del ángulo medio de las laderas de los conos (figura 10), así como del volumen de los mismos.

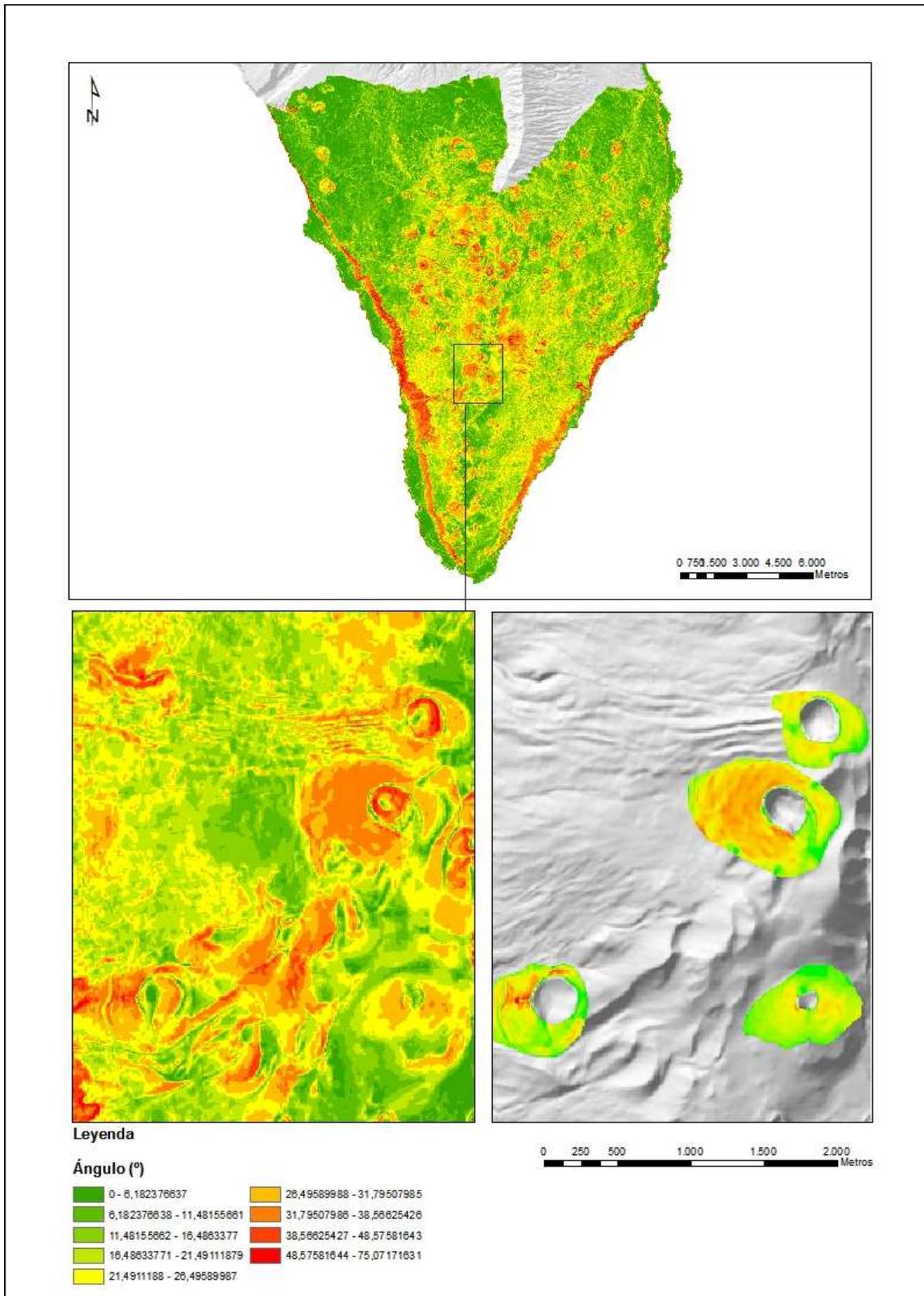


Fig.10. Elaboración de un mapa de pendientes para los conos volcánicos de estudio

El ángulo medio de cada cono ( $\alpha$ ) se ha estimado mediante el recorte del mapa de pendientes de Cumbre Vieja para obtener un mapa únicamente con las pendientes de las laderas de los conos de estudio. Posteriormente, las propiedades de este mapa resultante ofrecen un histograma con los datos estadísticos que puedan interesar para el estudio; en este caso, la media (figura 11).

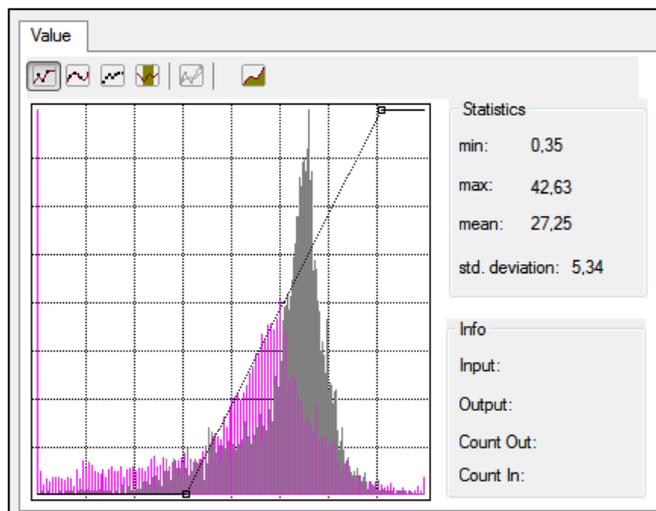


Fig.11. Histograma del mapa de pendientes del volcán de San Antonio.

Para finalizar el cálculo de los parámetros morfométricos, se ha considerado el volumen de los conos para su posterior relación con los demás parámetros analizados. La herramienta *Surface Volume* ha permitido realizar esta operación, ya que calcula el área y el volumen de un *Raster* por encima o por debajo de un determinado plano de referencia, en este caso ha interesado el volumen por encima del valor mínimo de altitud para cada cono. Los resultados se muestran de la siguiente forma para el volcán de San Antonio:

Dataset	Plane_Height	Reference	Z_Factor	Area_2D	Area_3D	Volume
..rateres\Volume_conos\cono1_mdt	371,13	ABOVE	1,000000	645400	738717,53044741	100307815,9935

En este caso, el área ocupada por la base del volcán de San Antonio es de 738.717,53044741 m<sup>2</sup>, mientras que el volumen es de 100.307.815,9935 m<sup>3</sup>.

### 3.4 Cálculo de las ratios morfométricas

Una vez estimados los diámetros de los conos ( $W_{co}$ ) y cráteres ( $W_{cr}$ ), se han empleado las ratios morfométricas que permitirán caracterizar y clasificar los conos volcánicos de Cumbre Vieja, y observar si existen relaciones significativas entre los resultados de las ratios y la morfología o edad geológica de cada cono volcánico.

*Ratios morfométricas:*

$$\frac{H_{co}}{W_{co}} \quad \frac{W_{cr}}{W_{co}}$$

### 3.5 Estimación de la edad geológica de los conos

Por último, otro aspecto que se ha tenido en cuenta para estudiar la evolución de los conos de Cumbre Vieja, ha sido la edad geológica de los mismos. Mediante la ayuda del mapa geológico de La Palma proporcionado por el Visor online del IDECan (figura 12), se les ha podido asignar una época geológica a cada uno de los conos. Para aquellos que corresponden a una erupción histórica, existen datos que señalan el año aproximado de su formación, de tal forma que se incluyen en un período “reciente” partiendo del siglo XVI.

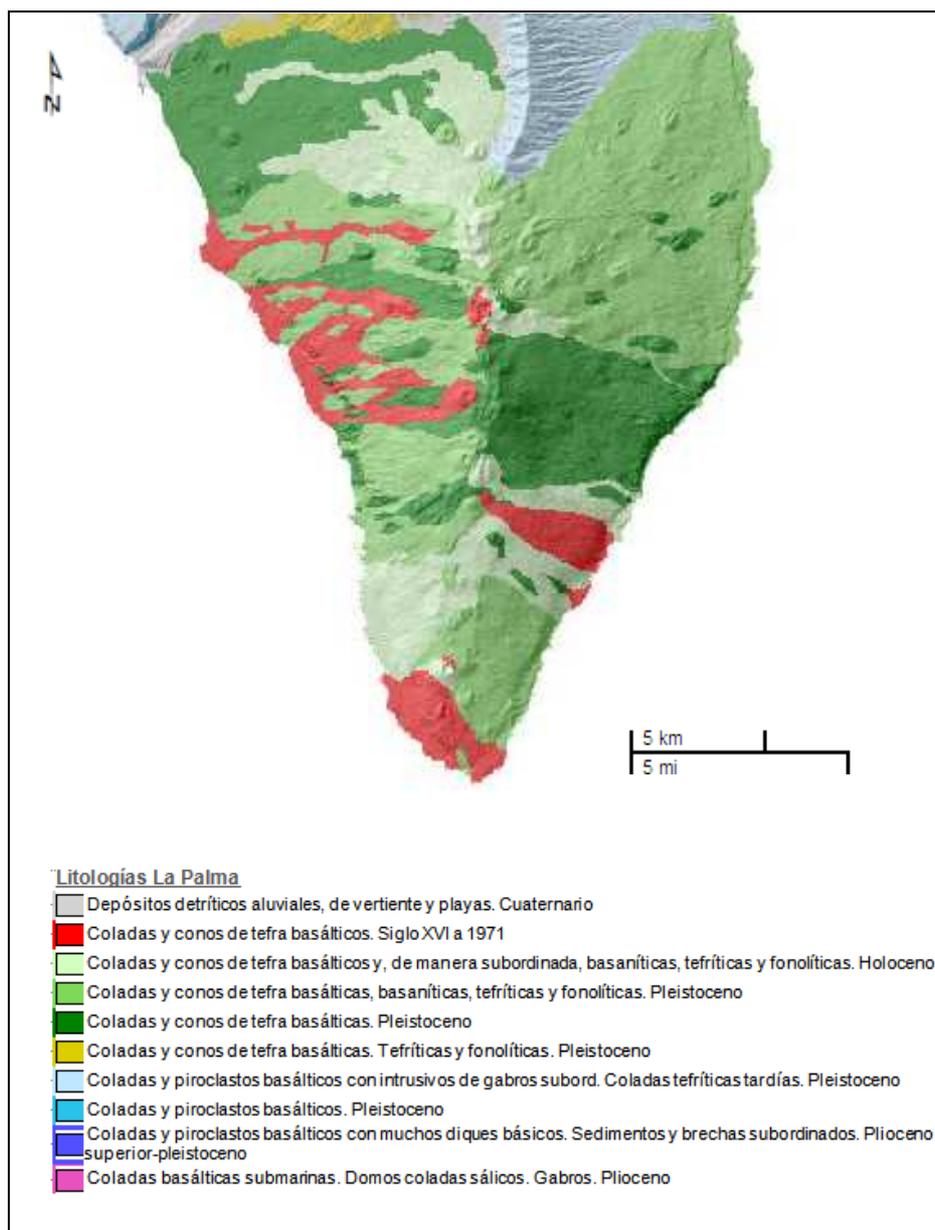


Fig.12. Mapa geológico del servicio online de información geográfica y territorial de Canarias del Gobierno de Canarias, conocido como IDECan (Infraestructuras de Datos Espaciales de Canarias)

## **4 RESULTADOS**

Los resultados de este estudio se han dividido en 6 sub-apartados siguiendo los pasos planteados en la metodología.

### **4.1 Esquema geomorfológico**

El esquema geomorfológico que se ha realizado (figura 13), permite localizar a grandes rasgos las principales unidades de relieve que se presentan en el área del edificio volcánico de Cumbre Vieja. Esta primera aproximación al estudio, ha facilitado la identificación de los conos volcánicos de especial interés para su posterior análisis morfométrico (figura 14). El mapa también refleja el eje estructural de la dorsal así como las principales coladas históricas, plataformas costeras y acantilados.

### **4.2 Delimitación de los conos volcánicos**

Los 23 conos volcánicos, y sus correspondientes cráteres, que han sido seleccionados para su análisis se señalan en la figura 14. De los aproximadamente 80 conos que se localizan en el edificio de Cumbre Vieja, se escogieron prácticamente una quinta parte de ellos para su estudio, ya que destacan por su morfología simple. Muchos han sido despreciados, debido a que poseen estructuras y morfologías complejas y no tienen bases o cráteres bien definidos.

De los 23 conos, 7 presentan cráteres cerrados, mientras que el resto poseen algún tipo de apertura (figura 14).

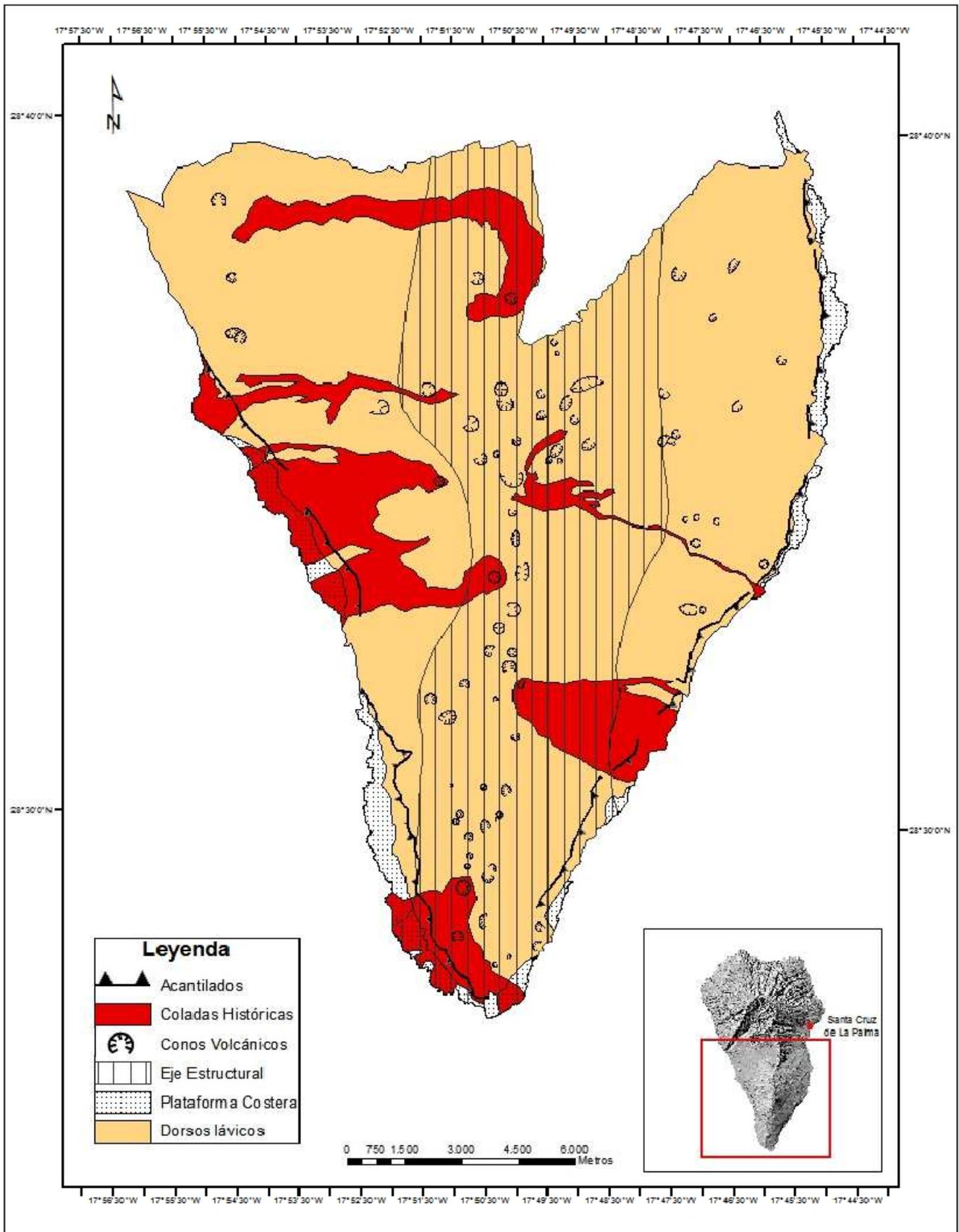
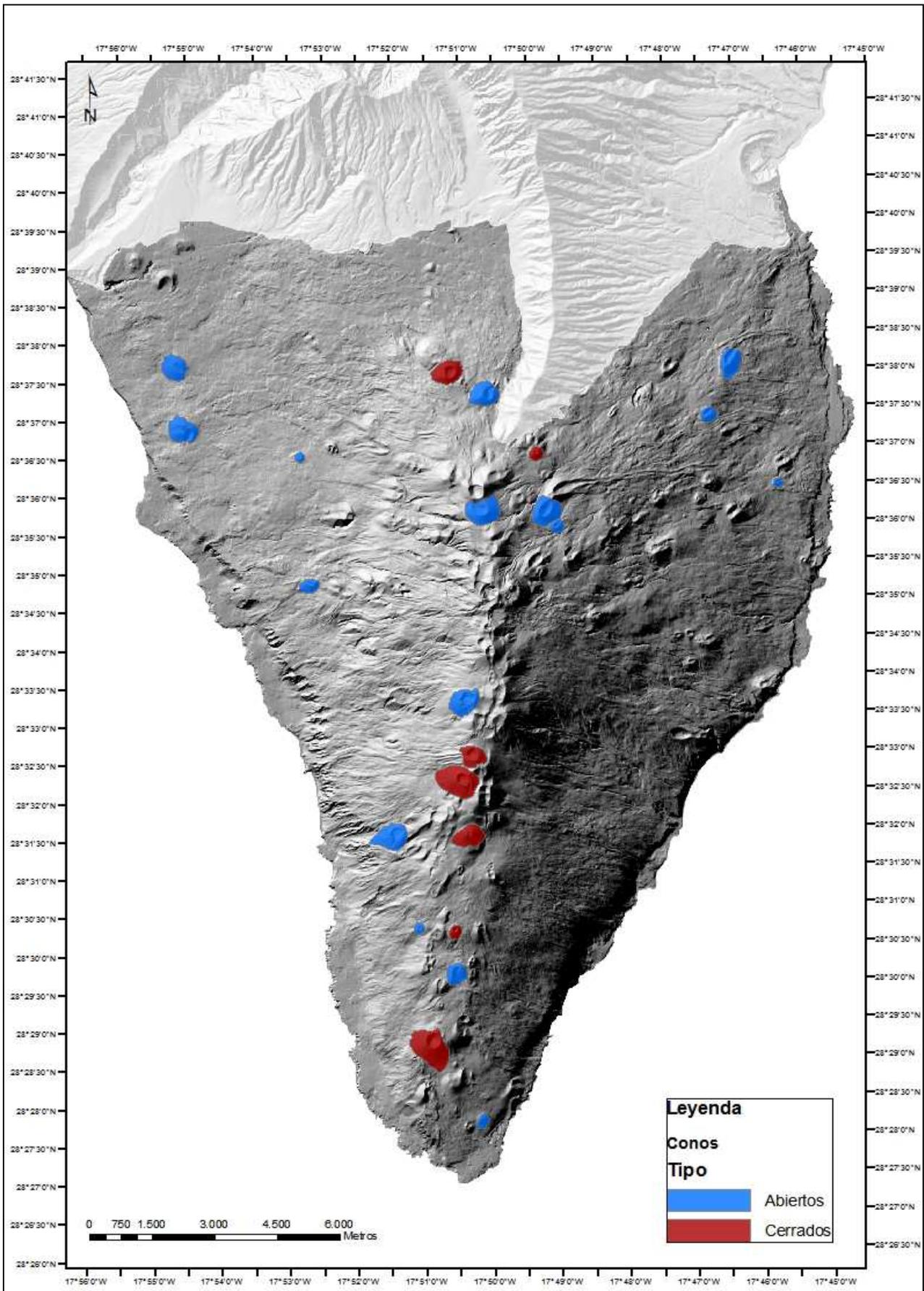


Fig.13. Esquema geomorfológico de Cumbre Vieja (La Palma). Adaptado de Romero (1986) y Day et al. (1999).



### 4.3 Cálculo de los parámetros y las ratios morfométricas

De los aproximadamente 80 conos volcánicos localizados en el área de Cumbre Vieja, se han seleccionado 23 para su análisis morfométrico (figura 14). Para cada uno de estos conos, se han podido calcular los valores de Hco, Wco, Wcr,  $\alpha$  y volumen, y posteriormente las dos ratios morfométricas principales que permitirán comparar los resultados con aquellos obtenidos por otros autores en el pasado.

Los parámetros y las ratios morfométricas calculados para cada uno de los conos son los siguientes:

Nº de cono	Parámetros morfométricos					Ratios morfométricas	
	Hco	Wco	Wcr	$\alpha$	Volumen (hm <sup>3</sup> )	Hco/Wco	Wcr/Wco
1	152,2	921,0	363,3	27,25	100,31	0,17	0,39
2	56,3	327,7	144,7	28,91	4,76	0,17	0,44
3	158,4	716,4	319,1	30,39	88,24	0,22	0,45
4	77,0	572,6	296,2	29,21	27,86	0,13	0,52
5	119,7	639,1	134,0	27,09	31,20	0,19	0,21
6	170,0	880,9	300,4	33,81	139,34	0,19	0,34
7	54,0	347,1	105,9	31,79	3,91	0,16	0,31
8	85,5	651,1	279,5	35,18	30,48	0,13	0,43
9	86,7	653,5	298,3	34,01	31,04	0,13	0,46
10	25,0	241,5	108,4	32,72	1,19	0,10	0,45
11	42,2	383,3	209,6	37,17	8,40	0,11	0,55
12	63,4	603,6	297,7	38,33	23,75	0,11	0,49
13	40,6	226,7	76,9	38,76	1,55	0,18	0,34
14	94,5	620,2	197,3	38,37	29,10	0,15	0,32
15	44,4	514,2	296,0	38,70	15,13	0,09	0,58
16	30,1	266,7	96,6	39,61	2,68	0,11	0,36
17	28,7	339,4	156,0	42,44	4,88	0,08	0,46
18	76,6	416,9	140,1	45,47	12,71	0,18	0,34
19	69,2	666,2	338,4	44,31	30,38	0,10	0,51
20	71,3	738,2	358,7	43,60	34,03	0,10	0,49
21	89,2	699,0	349,4	45,65	45,68	0,13	0,50
22	59,2	317,1	75,9	44,95	4,10	0,19	0,24
23	117,7	678,1	329,8	51,55	62,74	0,17	0,49
<b>MEDIA</b>	78,8	540,0	229,2	37,36	31,89	0,14	0,42
<b>MEDIANA</b>	69,2	572,6	209,6	35,18	27,86	0,13	0,44

Tabla 1. Parámetros y ratios morfométricas para los conos seleccionados, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter y  $\alpha$  = ángulo medio de la vertiente del cono.

Los 23 conos seleccionados de Cumbre Vieja tienen bases con diámetros que oscilan entre los 226 y 921 metros, con un valor medio de 540 metros y una mediana de 572 metros, y alturas que van desde los 25 hasta los 170 metros aproximadamente, siendo la media de 78 metros y

la mediana de 69 metros. El ángulo medio de las laderas de los conos es de  $37^\circ$ , aunque los valores oscilan entre los  $27^\circ$  y  $55^\circ$  aproximadamente.

Atendiendo al volumen de los diferentes conos, se pueden observar valores muy diversos. Los más bajos giran en torno a los  $1,20 \text{ hm}^3$ , mientras que los más elevados superan los  $100,00 \text{ hm}^3$ . La media se sitúa en torno a los  $32,00 \text{ hm}^3$ .

En cuanto a las ratios morfométricas, se ha obtenido una media para Hco/Wco de 0,14 y para Wcr/Wco de 0,42 para el conjunto de conos. Pero los valores de Hco/Wco oscilan entre los 0,08 y 0,22, y en el caso de Wcr/Wco, entre los 0,21 y 0,58. Por este motivo, es conveniente obtener resultados separados para conos abiertos y conos cerrados.

Parámetros morfométricos						Ratios morfométricas	
Conos cerrados	Hco	Wco	Wcr	$\alpha$	Volumen ( $\text{hm}^3$ )	Hco/Wco	Wcr/Wco
<b>Nº de cono</b>							
1	152,2	921	363,3	27,25	100,31	0,17	0,39
2	56,3	327,7	144,7	28,91	4,76	0,17	0,44
4	77,0	572,6	296,2	29,21	27,86	0,13	0,52
5	119,7	639,1	134,0	27,09	31,20	0,19	0,21
6	170,0	880,9	300,4	33,81	139,34	0,19	0,34
7	54,0	347,1	105,9	31,79	3,91	0,16	0,31
9	86,7	653,5	298,3	34,01	31,04	0,13	0,46
<b>MEDIA</b>	102,3	620,3	234,7	30,30	48,34	0,16	0,38
<b>MEDIANA</b>	86,7	639,1	296,2	29,21	31,04	0,17	0,39
Conos abiertos	Hco	Wco	Wcr	$\alpha$	Volumen ( $\text{hm}^3$ )	Hco/Wco	Wcr/Wco
<b>Nº de cono</b>							
3	158,4	716,4	319,1	30,39	88,24	0,22	0,45
8	85,5	651,1	279,5	35,18	30,48	0,13	0,43
10	25,0	241,5	108,4	32,72	1,19	0,10	0,45
11	42,2	383,3	209,6	37,17	8,40	0,11	0,55
12	63,4	603,6	297,7	38,33	23,75	0,11	0,49
13	40,6	226,7	76,9	38,76	1,55	0,18	0,34
14	94,5	620,2	197,3	38,37	29,10	0,15	0,32
15	44,4	514,2	296,0	38,70	15,13	0,09	0,58
16	30,1	266,7	96,6	39,61	2,68	0,11	0,36
17	28,7	339,4	156,0	42,44	4,88	0,08	0,46
18	76,6	416,9	140,1	45,47	12,71	0,18	0,34
19	69,2	666,2	338,4	44,31	30,38	0,10	0,51
20	71,3	738,2	358,7	43,60	34,03	0,10	0,49
21	89,2	699,0	349,4	45,65	45,68	0,13	0,50
22	59,2	317,1	75,9	44,95	4,10	0,19	0,24
23	117,7	678,1	329,8	51,55	62,74	0,17	0,49
<b>MEDIA</b>	68,5	504,9	226,8	40,45	24,69	0,13	0,44
<b>MEDIANA</b>	66,3	558,9	244,6	39,19	19,44	0,12	0,45

Tabla 2. Parámetros y ratios morfométricas para conos seleccionados cerrados y abiertos.

Las ratios morfométricas para ambos tipos de conos varían notablemente. Los conos cerrados, tienen un valor medio de  $Hco/Wco$  de 0,16 y de 0,38 para  $Wcr/Wco$ , mientras que para los abiertos estos valores son de 0,13 y 0,44. Por otro lado, la altura media de los conos cerrados difiere significativamente de la de los conos abiertos, siendo de 102 metros en el primer caso y de 68 metros en el segundo. También varía el diámetro medio de la base de los conos. Para aquellos conos cerrados el valor es de 620 metros, y para los abiertos, disminuye hasta los 505 metros.

Cabe señalar también la diferencia existente entre el ángulo medio de las laderas de ambos tipos de conos. En el caso de los conos cerrados, los valores van desde los  $27^\circ$  hasta los  $34^\circ$ , y el valor medio es de  $30^\circ$ . En cambio, las laderas de los conos abiertos sobrepasan siempre los  $30^\circ$ , y en el 80% de los casos, el ángulo medio supera los  $37^\circ$ , alcanzando un valor de  $51^\circ$  para uno de los conos. El valor medio para este tipo de conos es de  $40^\circ$ .

Por último, los volúmenes también presentan notables diferencias. La media es de  $48,34 \text{ hm}^3$  para los conos cerrados y de  $24,69 \text{ hm}^3$  para los abiertos. En el primer caso, cabe destacar el mayor volumen de dos de los conos de más de  $100 \text{ hm}^3$  en ambos casos. En el conjunto de los conos abiertos, todos presentan valores inferiores a  $90 \text{ hm}^3$ .

#### **4.4 Relaciones morfométricas**

La altura media del cono, así como el diámetro medio de su base y de su cráter, son los tres parámetros fundamentales para caracterizar morfométricamente los diferentes conos de estudio y ayudar a entender la evolución de los mismos.

En los gráficos siguientes, se determina el grado de correlación que existe entre los diferentes parámetros atendiendo a los conos de estudio de forma conjunta. Más adelante, se vuelven a relacionar en función del tipo de conos, en este caso, se diferencia entre conos con cráteres cerrados y conos con cráteres abiertos.

La línea de tendencia en los gráficos refleja la correlación entre los diferentes parámetros. En el primero de los casos (figura 15a), existe una clara relación entre  $Hco$  y  $Wco$  para el conjunto de los conos ( $R^2 = 0,70$ ). La línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$  refleja la sugerencia de Settle (1979) que es esta misma ecuación la que mejor puede describir la forma inicial de los conos de escoria antes de su degradación erosiva.

En segundo lugar, la relación entre  $Wcr$  y  $Wco$  marca también una clara correlación positiva ( $R^2 = 0,74$ ) y, en este caso, se añade como referencia la línea  $Wcr = 0,4 Wco$  sugerida por Wood (1980a) y Porter (1972) que señala un valor medio para esta ratio que se repite en campos de conos volcánicos en diversas zonas del mundo (figura 15b).

Por último, en la figura 15c se relacionan las dos ratios morfométricas,  $Hco/Wco$  y  $Wcr/Wco$ , para determinar el grado de correlación entre los tres parámetros. Se observa una mayor dispersión en los resultados, con un valor de  $R^2$  de 0,39.

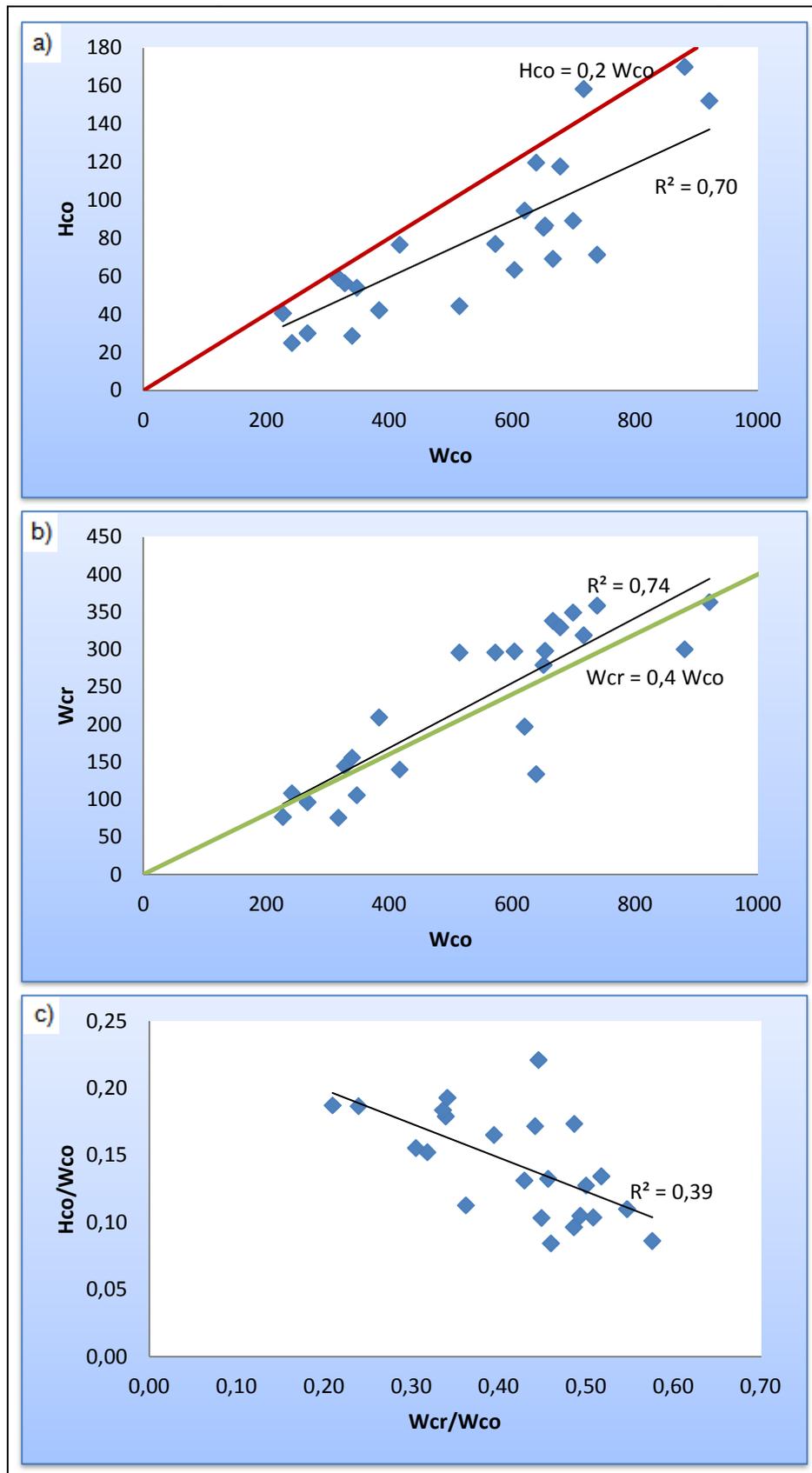


Fig.15. Relaciones morfométricas para el campo volcánico de Cumbre Vieja, donde  $H_{co}$  = altura media del cono,  $W_{co}$  = diámetro medio de la base del cono,  $W_{cr}$  = diámetro medio del cráter

Para obtener resultados más precisos, se ha procedido al análisis por separado de los conos abiertos y cerrados (figuras 16 y 17). De esta forma, es posible detectar la existencia de algunas diferencias entre los datos.

Se han localizado 7 conos con cráteres cerrados y 16 con cráteres abiertos, pero siempre con una morfología simple. En los gráficos siguientes se muestra la distribución de los datos y el grado de correlación en cada uno de los casos. Para los conos cerrados (figura 16a), la relación  $H_{co}/W_{co}$  presenta un grado de correlación bastante más significativo que para los conos abiertos, como se muestra en la figura 17a ( $R^2 = 0,89$  y  $R^2 = 0,58$  respectivamente), mientras que en la relación  $W_{cr}/W_{co}$  (figuras 16b y 17b), ocurre lo contrario ( $R^2 = 0,64$  y  $R^2 = 0,87$ ). En ambos tipos de conos, sigue habiendo una aparente correlación entre los ratios  $H_{co}/W_{co}$  y  $W_{cr}/W_{co}$  (figuras 16c y 17c), aunque en el caso de los conos con cráteres cerrados, esta correlación cobra una mayor importancia ( $R^2 = 0,50$  y  $R^2 = 0,35$  respectivamente).

### a) CONOS CERRADOS

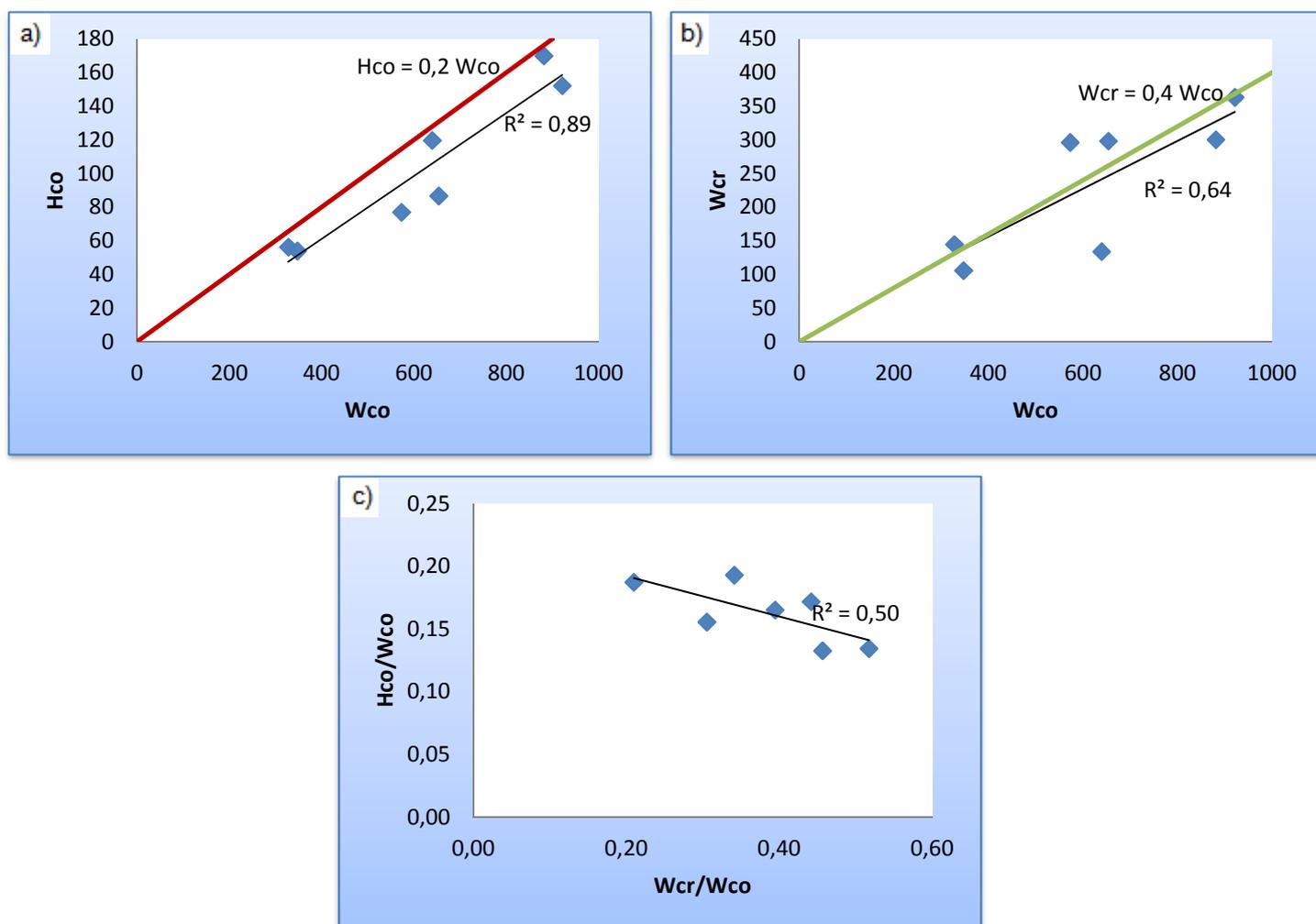


Fig.16. Relaciones volumétricas los conos con cráteres cerrados de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter

**b) CONOS ABIERTOS**

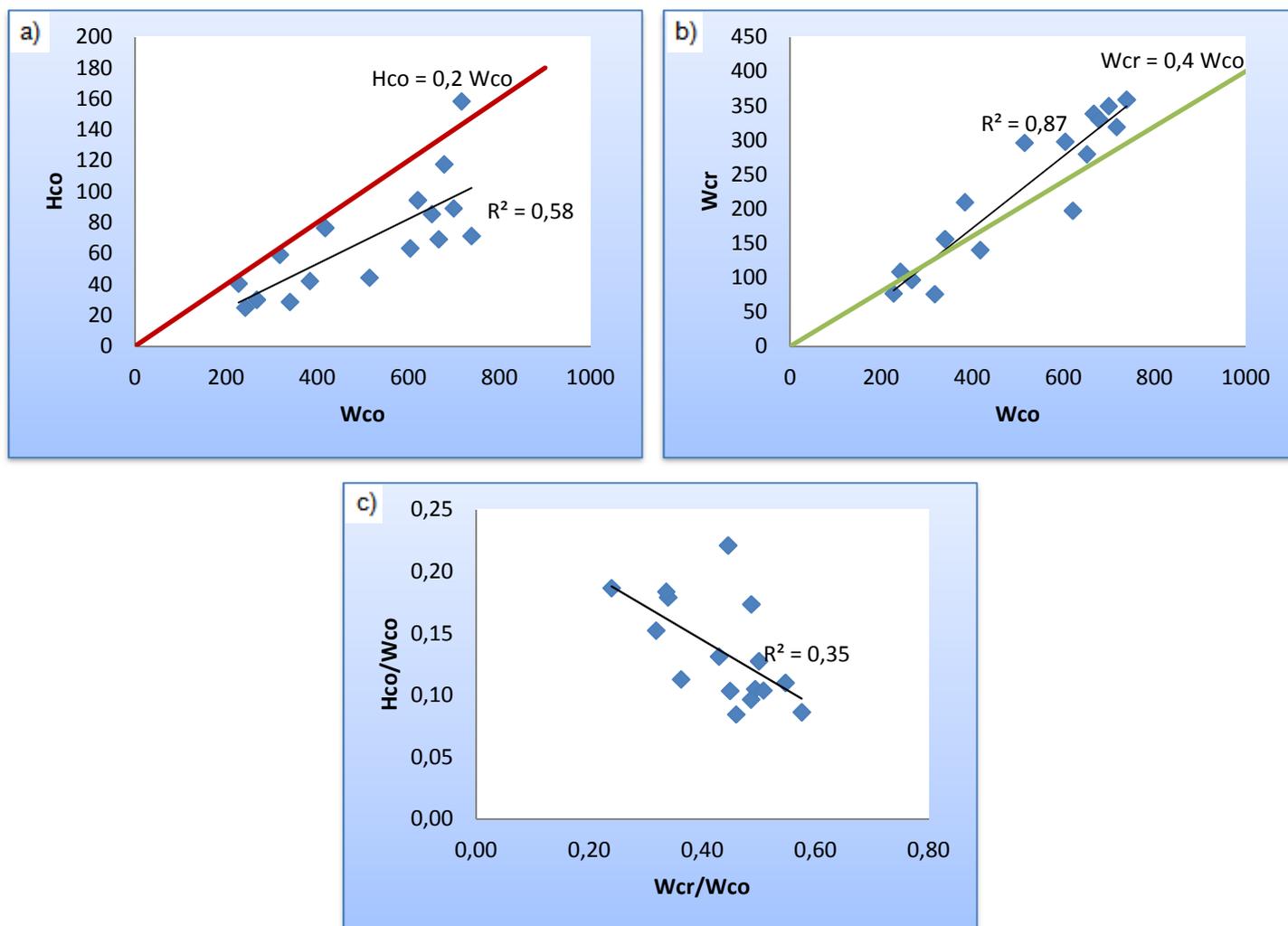


Fig.17. Relaciones volumétricas los conos con cráteres abiertos de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter

**4.5 Relaciones volumétricas**

En cuanto a la relación que existe entre el volumen de cada uno de los conos volcánicos y sus correspondientes parámetros morfométricos (Hco, Wco y Wcr), se ha observado en la figura 18, que para el conjunto de conos existe una clara relación del volumen con los dos primeros (Hco y Wco).

En el primer caso, donde se relaciona el volumen del cono con su altura media (figura 18a), la correlación positiva es evidente y significativa ( $R^2 = 0,85$ ). También lo es cuando se relaciona con el diámetro medio de la base del cono (figura 18b), aunque en este caso el índice de correlación es algo inferior ( $R^2 = 0,71$ ). Sin embargo, con respecto a su relación con el diámetro medio del cráter (figura 18c), existe una ligera tendencia a aumentar el tamaño del cráter a medida que aumenta el volumen. Aun así, es poco significativa ( $R^2 = 0,41$ ) y no posee el carácter progresivo que manifiestan las anteriores relaciones.

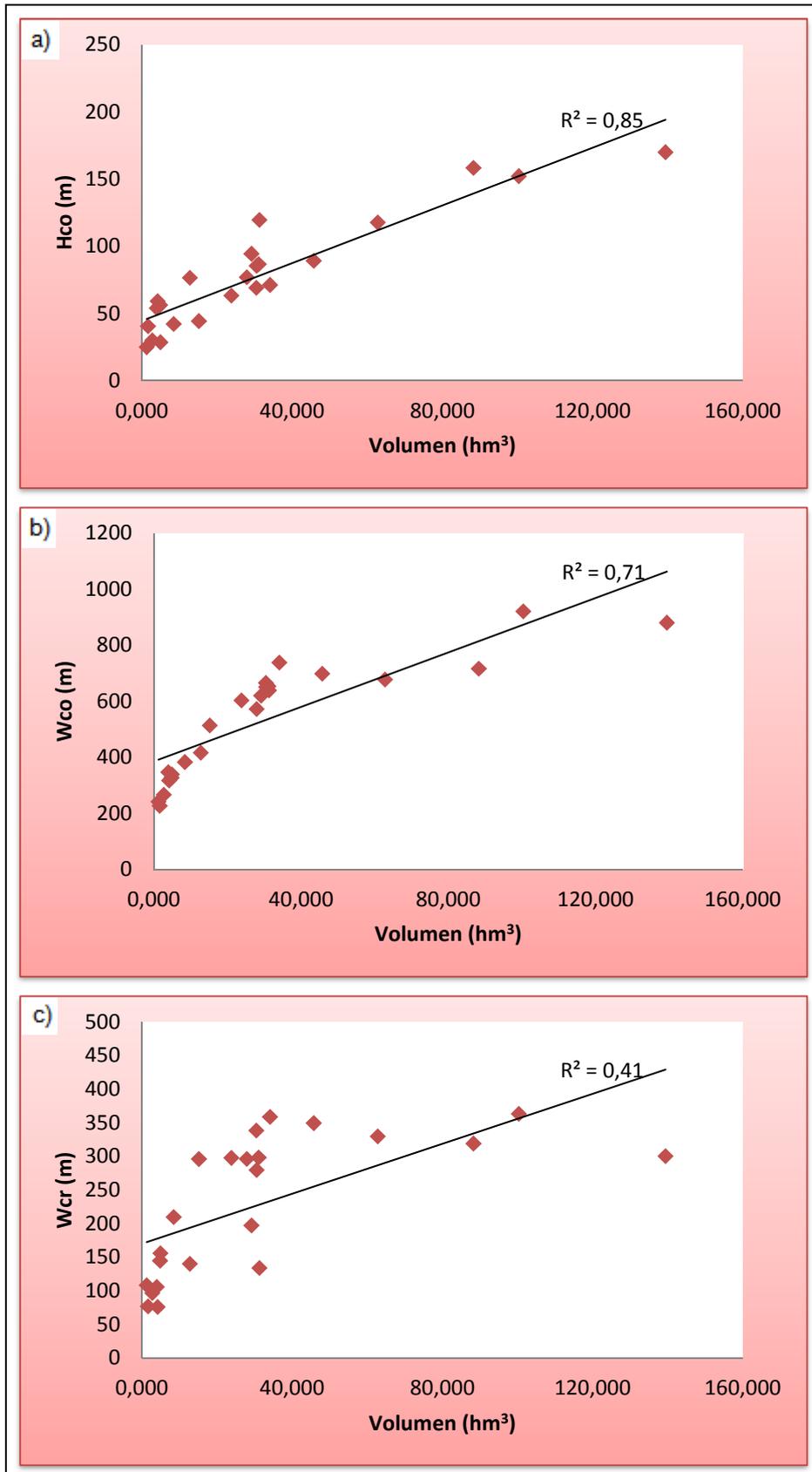


Fig.18. Relaciones volumétricas para el campo volcánico de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter

Una vez más, se ha optado por el análisis de las diferentes relaciones según el tipo de cono, ya sean con cráteres abiertos o cerrados (figuras 19 y 20).

La relación entre el volumen y la altura media del cono que aparece en las figuras 19a y 20a, es la misma en ambos casos e igualmente significativa ( $R^2 = 0,89$ ). Se ha observado también ese carácter progresivo de los datos en ambos gráficos.

En cuanto a su relación con el diámetro medio de la base del cono, la correlación es notablemente mayor en los conos con cráteres cerrados con un  $R^2 = 0,81$  (figura 19b). Cabe destacar, que la correlación en conos cerrados (figura 20b) es también más significativa que en el conjunto de conos ( $R^2 = 0,71$ ).

Por último, la relación entre el volumen y el diámetro medio del cráter vuelve a ser poco significativa en ambos casos (figuras 19c y 20c), aunque ligeramente mayor en los conos abiertos ( $R^2 = 0,55$ ).

### a) CONOS CERRADOS

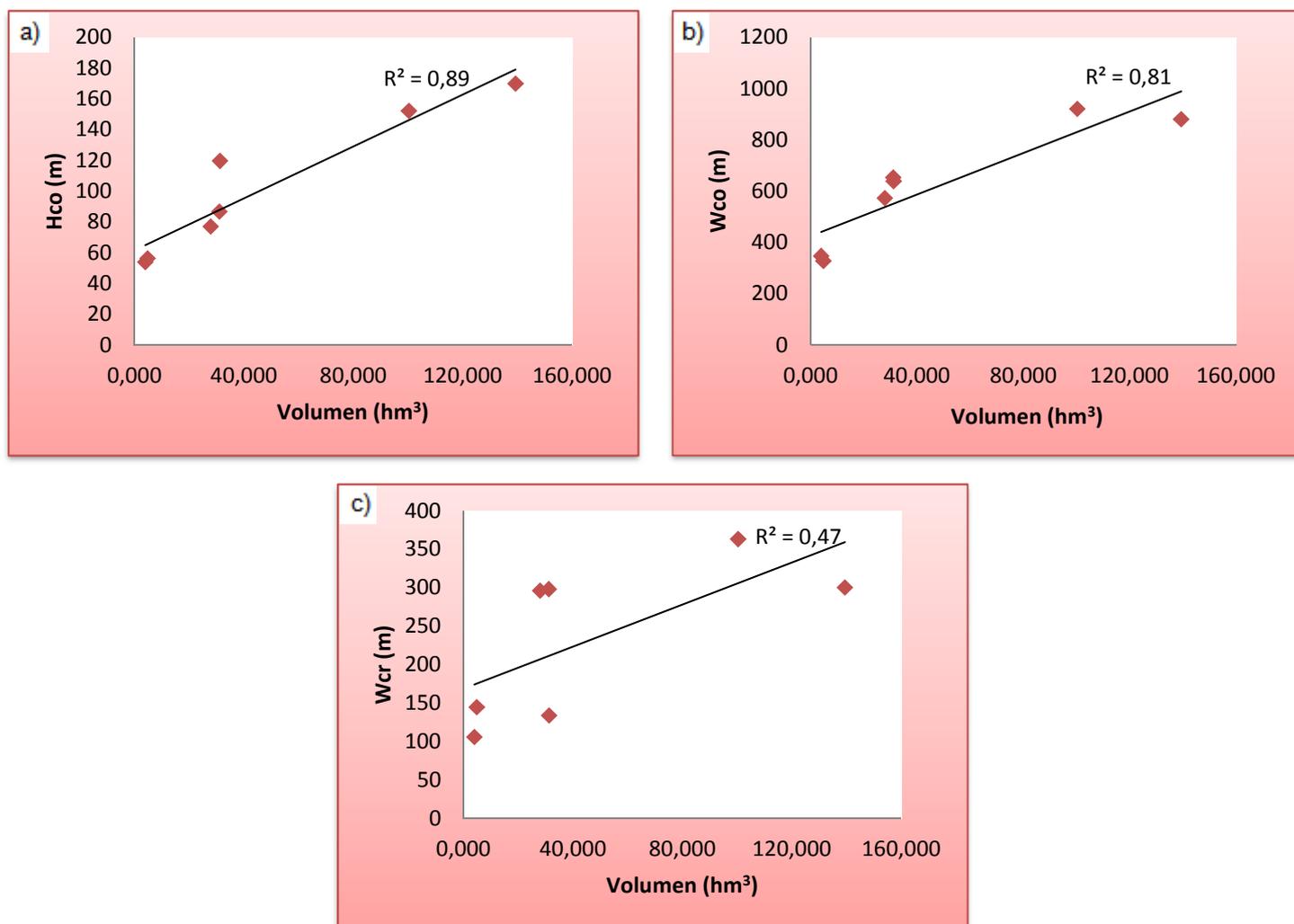


Fig.19. Relaciones volumétricas para los conos cerrados de Cumbre Vieja, donde  $H_{co}$  = altura media del cono,  $W_{co}$  = diámetro medio de la base del cono,  $W_{cr}$  = diámetro medio del cráteres

a) **CONOS ABIERTOS**

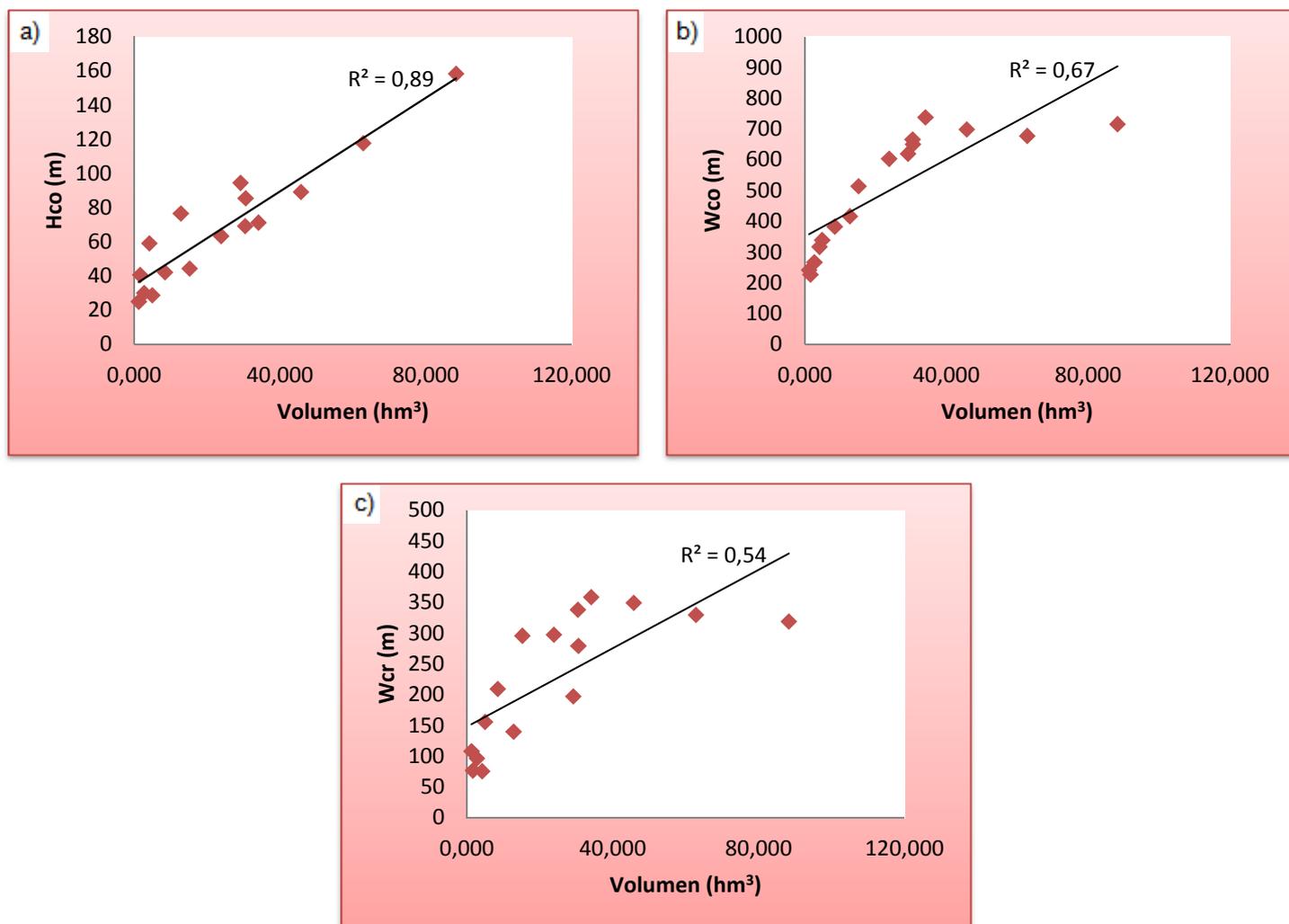


Fig.20. Relaciones volumétricas para los conos abiertos de Cumbre Vieja, donde  $H_{co}$  = altura media del cono,  $W_{co}$  = diámetro medio de la base del cono,  $W_{cr}$  = diámetro medio del cráter

**4.6 Relaciones entre la morfometría de los conos y su edad geológica**

La edad geológica de los conos volcánicos puede también determinar la morfología de los mismos y su posterior clasificación según su relación con otros parámetros morfométricos. Por tanto, puede ofrecer la oportunidad de aprender sobre la evolución de un determinado relieve volcánico, ya que la evolución de un cono volcánico implica un aumento en cuanto a su estado de degradación, debido a una mayor exposición del cono a procesos de meteorización.

A partir del mapa geológico del visor del servicio de IDECan (Infraestructuras de Datos Espaciales de Canarias), se ha podido dividir los conos estudiados en tres grandes grupos según su edad geológica. En primer lugar se encuentran aquellos formados entre el siglo XVI y 1971, seguidos por los que pertenecen al Holoceno y, por último, por aquellos formados durante el Pleistoceno (tabla 3).

Sus correspondientes localizaciones en el área de estudio (figura 21) muestran como existe una ligera tendencia a la localización de los conos más recientes en torno al eje estructural. Aun así, se necesitaría de una mayor precisión en la determinación de la edad de los volcanes y un mayor número de conos de estudio para corroborar esta teoría.

<b>Nº del cono</b>	<b>Edad geológica</b>
1	Siglo XVI - 1971
18	Siglo XVI - 1971
23	Siglo XVI - 1971
2	Holoceno
4	Holoceno
6	Holoceno
8	Holoceno
16	Holoceno
20	Holoceno
3	Pleistoceno
5	Pleistoceno
7	Pleistoceno
9	Pleistoceno
10	Pleistoceno
11	Pleistoceno
12	Pleistoceno
13	Pleistoceno
14	Pleistoceno
15	Pleistoceno
17	Pleistoceno
19	Pleistoceno
21	Pleistoceno
22	Pleistoceno

Tabla 3. Edad geológica de los conos volcánicos de estudio

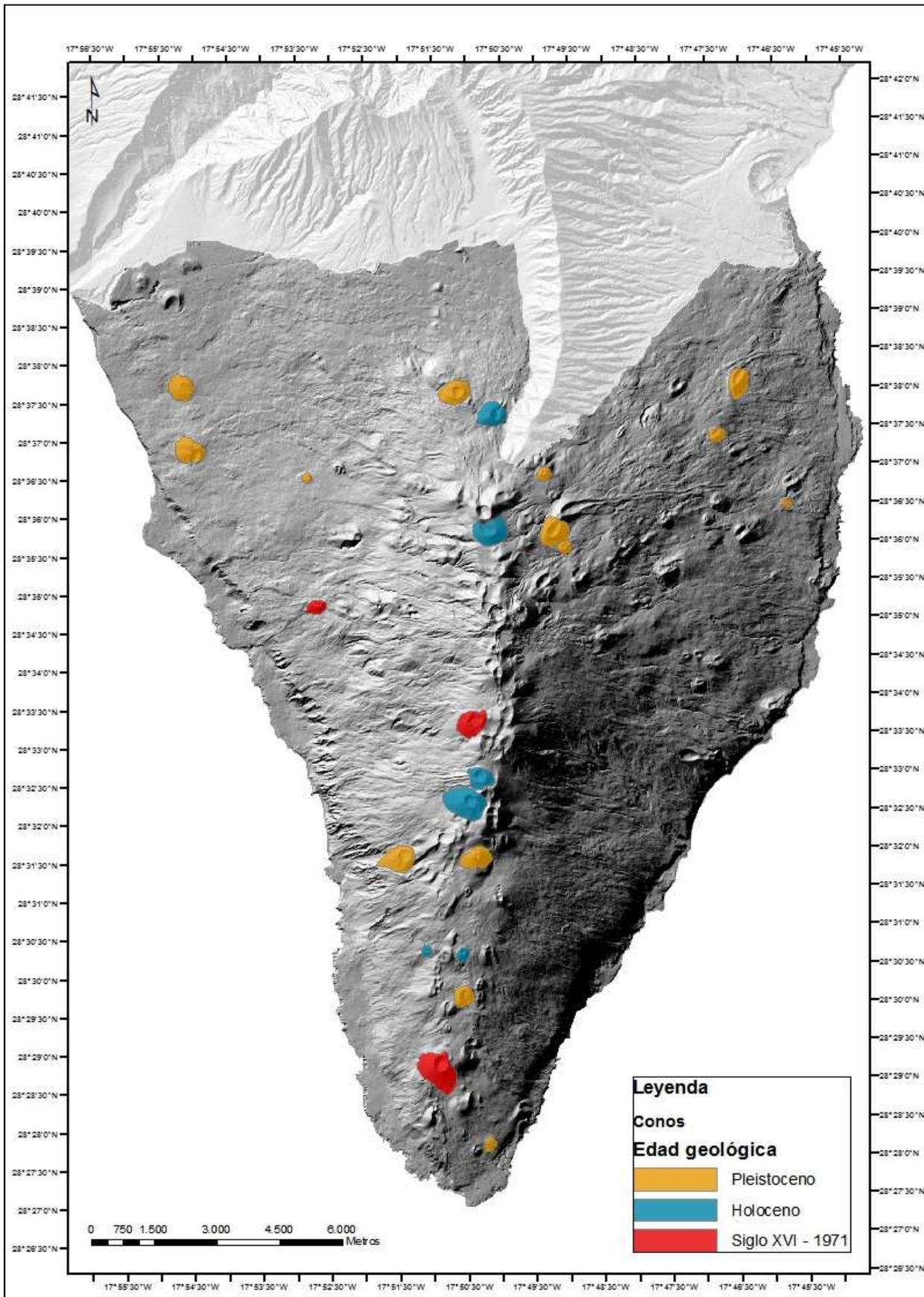


Fig.21. Distribución de los conos volcánicos de estudio según su edad geológica

Con respecto a la relación de la edad geológica de cada cono con su morfometría, se ha optado por calcular los valores medios y medianos de los parámetros para cada época geológica (tablas 4 y 5).

	<b>Media</b>				
	<b>Hco</b>	<b>Wco</b>	<b>Wcr</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Volumen (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Pleistoceno</b>	75,7	549,7	240,7	40,79	19,438
<b>Holoceno</b>	81,0	496,8	195,9	32,26	29,174
<b>Siglo XVI - 1971</b>	115,5	672,0	277,7	41,42	62,739

	<b>Mediana</b>				
	<b>Hco</b>	<b>Wco</b>	<b>Wcr</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Volumen (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Pleistoceno</b>	61,3	558,9	203,5	38,35	29,690
<b>Holoceno</b>	74,2	611,9	287,9	34,50	27,328
<b>Siglo XVI - 1971</b>	117,7	678,1	329,8	45,47	58,585

Tablas 4 y 5. Valores medios y medianos de cada parámetro para tres épocas geológicas diferentes.

Los resultados muestran, en general, poca relación entre los diferentes parámetros y la época geológica a la que pertenece cada cono volcánico. Por un lado, para Hco, tanto la media como la mediana aumentan a medida que disminuye la edad geológica del cono, pero se debe tener en cuenta que para el período entre comienzos del siglo XVI y 1971, sólo se han podido analizar tres conos.

En cuanto a los datos de Wco y Wcr, los valores medianos muestran un aumento a medida que disminuye la edad geológica, pero las medias no reflejan ningún tipo de relación.

Por último, los valores medios y medianos del ángulo medio de las laderas y de volumen tampoco mantienen relación con la edad geológica de los conos.

Aun así, es importante tener en cuenta que se han considerado tres conos pertenecientes a la época entre comienzos del siglo XVI y 1971, seis conos del Holoceno y catorce del Pleistoceno, por lo que los resultados de este último apartado no son del todo fiables.

## 5 DISCUSIÓN

El estudio morfométrico de los conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja, ha permitido observar la variabilidad entre cada uno de los conos atendiendo a unos determinados parámetros y las relaciones entre ellos. La observación clave en este conjunto de datos es la variación que existe en las ratios morfométricas, tanto para conos con cráteres cerrados como abiertos, con una morfología simple y bien conservados (Kervyn et al., 2011). Se trata de una caracterización del conjunto de conos en esta área que puede ofrecer la oportunidad de aprender sobre el desarrollo de este campo volcánico, un tema fundamental en estudios geomorfológicos (Inbar et al., 2010).

### 5.1 *Relaciones entre los parámetros y las ratios morfométricas*

De los más de 80 conos volcánicos identificados en el edificio de Cumbre Vieja, se han podido documentar valores de  $H_{co}$ ,  $W_{co}$ ,  $W_{cr}$ ,  $\alpha$  y volumen para 23 de los mismos. Estos conos tienen bases con diámetros que oscilan entre los 226 y 921 metros y alturas que van desde los 25 hasta los 170 metros aproximadamente. De forma parecida, para los conos de Mauna Kea, Kervyn et al. (2011) obtuvieron diámetros medios de la base de los conos de 100 hasta 1.450 metros y alturas medias de entre 10 y 200 metros.

Los valores medios de  $H_{co}$  y  $W_{co}$  de los conos de Cumbre Vieja también se asemejan a valores observados en campos de conos localizados en las laderas de edificios volcánicos en otras partes del mundo. Por ejemplo, el diámetro medio de la base de los conos de Cumbre Vieja es de 540 metros con un valor mediano de 572 metros, y la altura media de los mismos tiene un valor medio de 78 metros y una mediana de 69 metros. Para los conos en las laderas de Mauna Kea, el valor medio del diámetro de la base es de 452 metros y el mediano de 407 metros, y la altura media de los conos es de 53 metros con un valor mediano de 45 metros (Kervyn et al., 2011). En el caso de Etna y Kilimanjaro, el diámetro medio de la base de los conos oscila entre los 300 y 400 metros (Settle, 1979). Por lo tanto, se puede decir que los conos seleccionados de Cumbre Vieja con una morfología simple tienen un tamaño mayor a la media establecida por estos autores.

Para el conjunto de conos, las ratios  $H_{co}/W_{co}$  y  $W_{cr}/W_{co}$  presentan valores medios de 0,14 y 0,42 respectivamente. Aún así, para la primera los valores oscilan entre 0,08 y 0,22 y para la segunda, entre 0,21 y 0,58. Por este motivo, y para comparar los valores con aquellos obtenidos por otros autores, se han considerado por separado los resultados para conos simples con cráteres cerrados y conos abiertos.

Los conos cerrados tienen un valor medio de  $H_{co}/W_{co}$  de 0,16 y de 0,38 para  $W_{cr}/W_{co}$ , y, por lo tanto, se aproximan a los resultados de Porter (1972) y Wood (1980) donde  $H_{co} = 0,18 W_{co}$  y  $W_{cr} = 0,40 W_{co}$  para conos simples en diferentes partes del mundo, aunque ambos valores siguen siendo algo inferiores.

En cuanto a los conos abiertos, el valor medio de 0,13 para  $H_{co}/W_{co}$  es igual al obtenido por Kervyn et al. (2011) para conos recientes con una morfología simple en las laderas de Mauna Kea, pero notablemente inferior al valor medio obtenido por Porter (1972) y Wood (1980) en otras partes del mundo ( $H_{co}/W_{co} = 0,18$ ). Por otro lado, la media de 0,44 para  $W_{cr}/W_{co}$  es algo mayor que el valor obtenido por Porter (1972) y Wood (1980) ( $W_{cr}/W_{co} = 0,40$ ), aunque la línea de tendencia para los valores de  $W_{cr}$  y  $W_{co}$  de los conos simples de Cumbre Vieja en la figura 22 se acerca considerablemente a la línea de referencia  $W_{cr} = 0,4 W_{co}$  propuesta por Porter (1972), que refleja el valor medio de  $W_{cr}/W_{co}$ . La media de  $W_{cr}/W_{co}$  para los conos de Cumbre Vieja es significativamente mayor a la que obtuvieron Kervyn et al. (2011) para los conos simples cerrados de Mauna Kea ( $W_{cr}/W_{co} = 0,34$ ) como se observa en la figura 23.

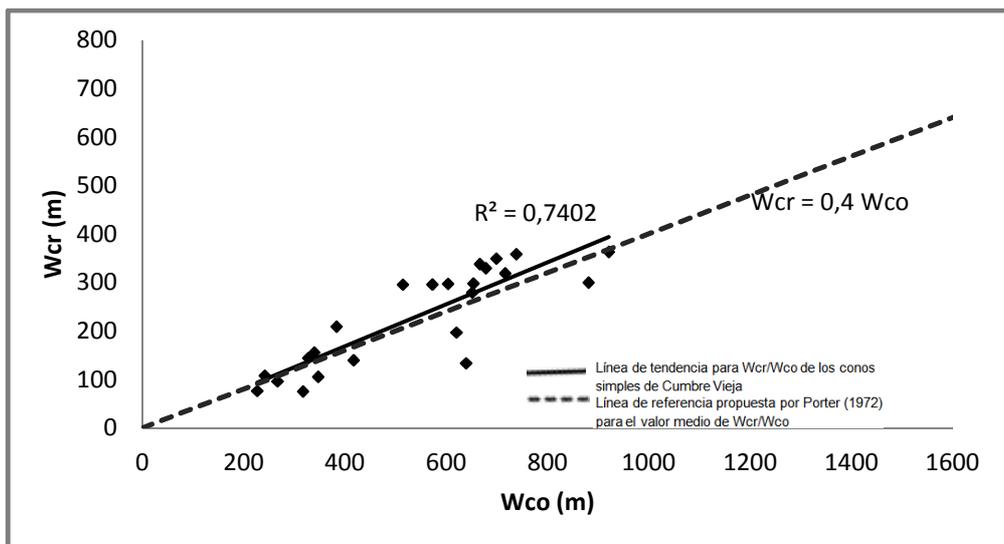


Fig. 22. Relaciones morfométricas para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja, donde **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter

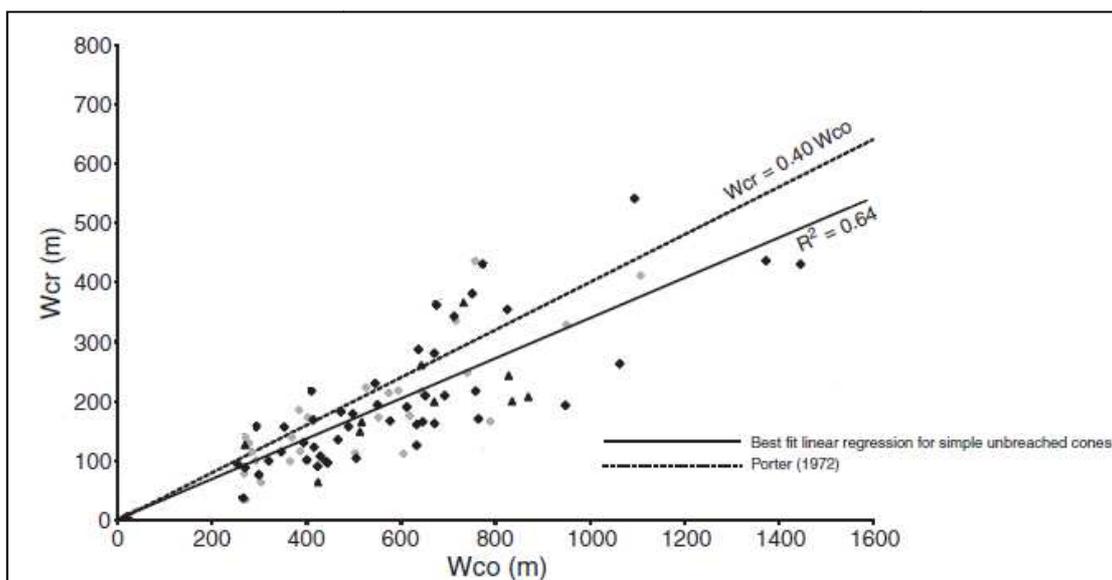


Fig. 23. Relaciones morfométricas para los conos cerrados en el campo volcánico de Mauna Kea, donde **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter. Extraído de Kervyn et al. (2011).

Para el conjunto de conos, ya sean con cráteres abiertos o cerrados, los resultados de  $Hco/Wco$  coinciden con la sugerencia de Settle (1979) de que  $Hco/Wco$  tiene un valor máximo de 0,2 para conos recientes con una morfología simple. El único cono que no cumple esta norma es el de Hoyo Frío (número 3), que muestra un valor de 0,22 para esta misma ratio (tabla 1). Esto significa que a su elevada altura (158 metros) le correspondería un diámetro medio de la base mayor que 716 metros, algo que puede ser consecuencia del tipo de erupción, la naturaleza de los materiales emitidos, la poca efectividad de los procesos de meteorización, etc.

En su estudio, Settle (1979) hace referencia a los resultados de Hco/Wco obtenidos por Bloomfield (1975) para 41 conos en una sección del Cinturón Volcánico Mexicano al este de Parícutin. Para conos Holocenos, obtiene un valor medio de Hco/Wco de 0,21, y de 0,19 para conos Pleistocenos relativamente jóvenes y bien formados. Por lo tanto, la línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$  mostrada en las figuras 24 y 25, puede caracterizar la forma inicial de conos de escoria antes de la degradación erosiva (Settle, 1979).

Para el caso de Cumbre Vieja, todos los conos salvo uno se sitúan bajo la línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$  (figura 24), lo que puede ser consecuencia de la actuación de procesos erosivos que tienden a reducir la altura media del cono y aumentar el diámetro medio de su base, tal y como sugiere Settle (1979). Este autor examina la morfometría de los conos en Mauna Kea, Mt. Etna, el campo volcánico de San Francisco y el de la isla de Nunivak y compara los valores de Hco/Wco. Señala que la mayoría de los conos de Mauna Kea se sitúan bajo la línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$  (figura 25), y que un 65% de ellos tienen valores medios de Hco/Wco de 0,2 a 0,1. Algo parecido ocurre con los conos de Mt. Etna, aun así, en ambos casos, un número considerable de conos presentan valores de Hco/Wco superiores a 0,2 (12% de los conos de Mauna Kea y 18% de los conos de Mt. Etna pertenecen a esta categoría) (Settle, 1979).

Por el contrario, para los campos volcánicos de San Francisco y la isla de Nunivak, la línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$  se sitúa considerablemente por encima de las distribuciones de Hco/Wco de los conos. En el primer caso, la mitad de los conos presentan valores de Hco/Wco de menos de 0,1, mientras que todos los conos de Nunivak tienen valores para esta ratio inferiores a 0,15. En Mauna Kea, sólo el 23% de los conos poseen valores de Hco/Wco inferiores a 0,1 (Settle, 1979).

Las relaciones de Hco/Wco de los conos de Cumbre Vieja se asemejan a los de Mauna Kea, pero en este caso, un 87% de los conos tienen valores de 0,2 a 0,1 y tan sólo un cono se sitúa sobre la línea de referencia  $Hco = 0,2 Wco$ . En cuanto a los conos con valores de esta ratio inferiores a 0,1, se incluyen sólo un 9%.

El edificio volcánico de Cumbre Vieja se ha construido a lo largo de los últimos 0,4 M.a., aproximadamente durante el mismo tiempo que el campo de Mauna Kea (0,3 M.a.), lo que explica sus valores de Hco/Wco similares. Sin embargo, el campo volcánico de San Francisco se originó durante el último millón de años del Cuaternario, y esto se refleja en los datos de la figura 23, que indican un mayor grado de degradación de los mismos frente a los conos de Mauna Kea, Mt. Etna y Cumbre Vieja, que han estado expuestos a los procesos de erosión durante menos tiempo.

El campo volcánico de la isla de Nunivak se formó también a la vez que el de Mauna Kea y Cumbre Vieja, y aun así presenta unos valores de Hco/Wco bastante inferiores. La distribución de sus datos en la figura 25 también se diferencia notablemente de los demás, por lo que estas diferencias morfométricas no se deben al tiempo de exposición de los conos a los procesos de erosión, sino a las diferentes condiciones climáticas de los mismos (Settle, 1979). Existe permafrost en gran parte de la isla y los procesos de crioclastia pueden acelerar el movimiento del material por las laderas de los conos (Settle, 1979).

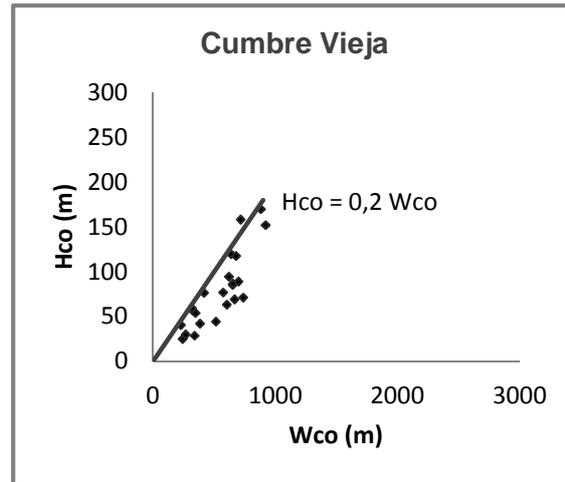


Fig. 24. Relación entre la altura media del cono (**Hco**) y diámetro medio de la base del cono (**Wco**) para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja. La recta representa la relación  $Hco = 0,2 Wco$  que puede describir la morfología inicial de los conos simples antes de su degradación erosiva (Settle, 1979).

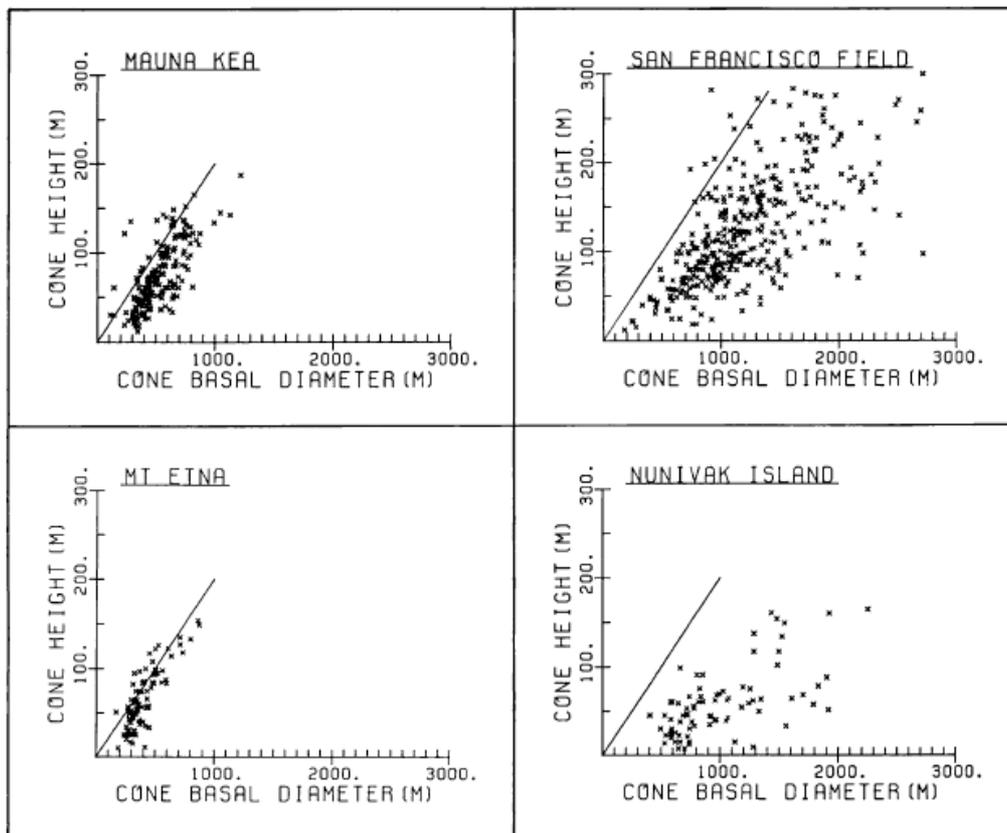


Fig. 25. Comparación de la morfometría de los conos de escoria en cuatro campos de conos. Se relaciona la altura media del cono y diámetro medio de la base del cono. La recta representa la relación  $Hco = 0,2 Wco$  que puede describir la morfología inicial de los conos simples antes de su degradación erosiva. Tomado de Settle (1979).

Con respecto a la variación relativa de las dos ratios morfométricas,  $H_{co}/W_{co}$  y  $W_{cr}/W_{co}$ , se han observado correlaciones entre ambas para el conjunto de conos estudiados ( $R^2 = 0,39$ ) (figura 26). En el caso de los conos cerrados el grado de correlación ha sido algo más significativo que en el de los abiertos ( $R^2 = 0,50$  y  $R^2 = 0,35$  respectivamente). Kervyn et al. (2011) estudiaron la misma relación en su análisis de los conos del campo volcánico de Mauna Kea, y sugirieron, con un grado de correlación parecido para ambos tipos de conos ( $R^2 = 0,43$  para conos cerrados y  $R^2 = 0,37$  para conos abiertos), que para conos de similar  $W_{co}$ , aquellos con un cráter ancho suelen ser más bajos que aquellos con un cráter estrecho (figura 27).

Por lo que han indicado los datos en este apartado, se puede concluir que los conos simples de Cumbre Vieja se asemejan considerablemente a los de Mauna Kea en cuanto a morfometría y evolución se refiere.

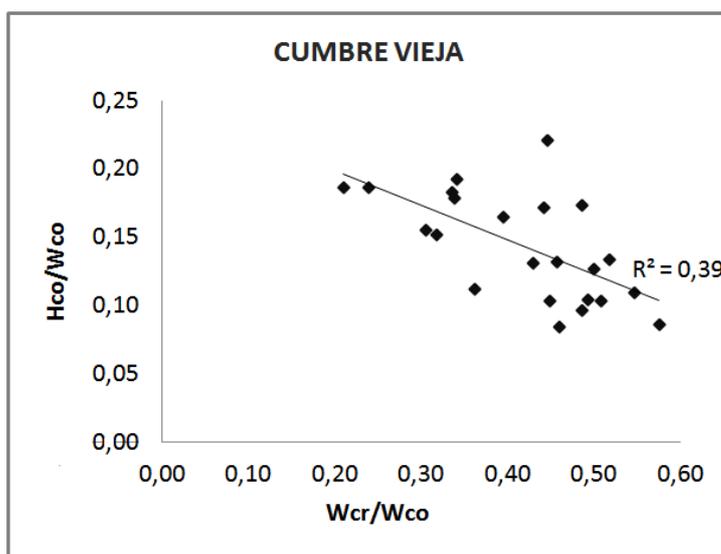


Fig. 26. Relación entre  $H_{co}/W_{co}$  y  $W_{cr}/W_{co}$  para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja.

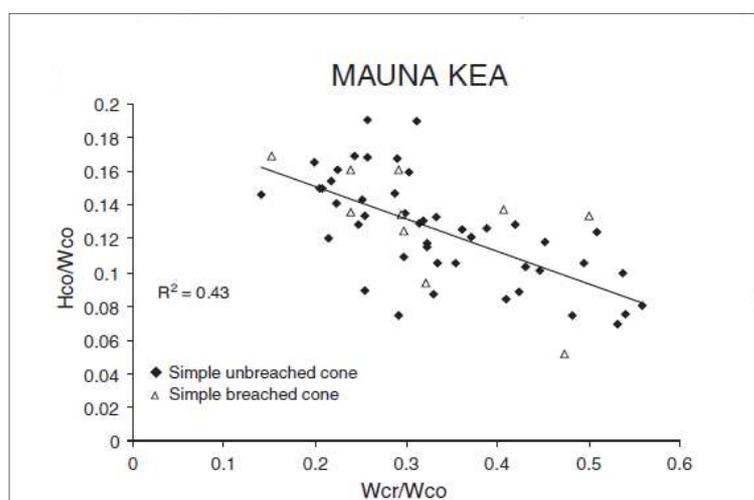


Fig. 27. Relación entre  $H_{co}/W_{co}$  y  $W_{cr}/W_{co}$  para los conos con una morfología simple del campo volcánico de Mauna Kea. Extraído de Kervyn et al. (2011).

## **5.2 Relaciones entre la morfometría de los conos y su edad geológica**

El estudio de ciertos parámetros de un cono volcánico ofrece la oportunidad de aprender sobre el desarrollo de un determinado campo volcánico. La edad geológica de estos conos y su grado de relación con Hco, Wco, Wcr,  $\alpha$  o volumen, puede ayudar a determinar el ritmo de erosión de los mismos y entender la evolución de su morfología. En teoría, una mayor exposición de los conos a procesos de meteorización implicaría un aumento de su estado de degradación, y, por lo tanto, una variación significativa de los valores medios de sus parámetros morfométricos.

Para el caso de Cumbre Vieja, no se han podido averiguar las fechas exactas de cada erupción, por lo que se les ha asignado una determinada época geológica a cada uno de los conos. Esto puede conducir a resultados poco fiables, sobre todo porque se han podido analizar 14 conos del Pleistoceno, 6 del Holoceno, y tan sólo 3 correspondientes al período entre principios del siglo XVI y 1971, por lo que el número de conos pertenecientes a cada época no está compensado ni es significativo.

Teniendo en cuenta lo anterior, los valores medios de Wco, Wcr,  $\alpha$  y volumen de los conos para cada época geológica no presentan algún tipo de relación destacable. Por el contrario, tanto los valores medios como los medianos de Hco aumentan a medida que disminuye la edad de los conos. Los valores medianos de Wco y Wcr también presentan un aumento con el tiempo, pero las medias reflejan una disminución en el Holoceno para ambos casos.

Por consiguiente, la escasa relación de los parámetros morfométricos con la edad geológica de los conos conduce a creer que deben ser otros los factores que están influyendo en la distribución y evolución de estos parámetros y que no se han tenido en cuenta en este estudio, como por ejemplo la composición litológica, el índice de incisión de las laderas, el tipo de erupción o la dirección del viento u otras condiciones climáticas en el momento de la erupción.

En este trabajo se ha aplicado un análisis topográfico digital sin tener acceso físico al área de estudio, por lo que muchos de estos otros factores no se han podido considerar en la investigación. Es importante tener en cuenta que el trabajo de campo permite una mejor observación del relieve y de elementos no tan apreciables en las fotografías aéreas o en los Modelos Digitales del Terreno, como pueden ser los cambios de pendiente o el tipo de material que compone el volcán. Estos aspectos se pueden mejorar en futuros estudios y abrir nuevas líneas de investigación en el campo de la vulcanología.

## 6 CONCLUSIONES

Para observar e interpretar la evolución de un determinado paisaje volcánico se pueden analizar los diferentes parámetros morfométricos de sus conos y establecer ciertas relaciones entre ellos. De esta forma, se ha intentado lograr el principal objetivo de este estudio, que ha sido establecer cuantitativamente la variabilidad de los conos monogénicos simples de Cumbre Vieja mediante la aplicación de técnicas de análisis morfométrico.

El tipo e intensidad de los procesos de meteorización, así como el tiempo de exposición de los conos a los mismos, determinan las variaciones en la altura media de los conos, el diámetro medio de su base y de su cráter ( $H_{co}$ ,  $W_{co}$  y  $W_{cr}$ ), pero existen otros factores que pueden desempeñar un papel más importante a la hora de entender el desarrollo de la forma y estructura de estos conos, sobre todo con respecto a la variación del ángulo medio de sus laderas y de su volumen.

Con la metodología empleada en este estudio se han llegado a las siguientes conclusiones específicas:

- 1) Las ratios morfométricas de los conos monogénicos poseen una amplia dispersión en cuanto a sus valores. En el caso de los conos con cráteres abiertos, los valores medios y medianos de las ratios se alejan significativamente de los valores propuestos anteriormente por otros autores en diferentes campos volcánicos.
- 2) Los conos monogénicos simples con cráteres cerrados de Cumbre Vieja afirman los resultados de Porter (1972) y Wood (1980), donde  $H_{co} = 0,18 W_{co}$  y  $W_{cr} = 0,40 W_{co}$  para conos simples en diferentes partes del mundo.
- 3) El 96% de los conos monogénicos simples de Cumbre Vieja coinciden con la sugerencia de Settle (1979) de que  $H_{co}/W_{co}$  tiene un valor máximo de 0,2 para conos recientes con una morfología simple, y que la línea de referencia  $H_{co} = 0,2 W_{co}$  mostrada en las figuras 24 y 25, puede caracterizar la forma inicial de conos de escoria antes de la degradación erosiva.
- 4) La distribución de los valores de  $H_{co}/W_{co}$  de los conos analizados de Cumbre Vieja se asemeja considerablemente a la de los conos de Mauna Kea. En ambos casos, los valores se sitúan bajo la línea de referencia  $H_{co} = 0,2 W_{co}$  y relativamente próximos a ella, lo que señala que son dos campos volcánicos de edades geológicas semejantes ya que se deduce que en los dos campos, los conos han sufrido un grado de degradación similar.
- 5) La morfometría de los conos monogénicos simples es el resultado de un conjunto de factores complejos, muchos de los cuales no se han considerado en este trabajo y pueden estar influyendo en la evolución de los mismos.
- 6) En este estudio se ha utilizado únicamente un criterio topográfico digital, lo que ha limitado la fiabilidad de las medidas de los parámetros morfométricos. No ha habido un acceso físico al área de estudio donde se pueda analizar detenidamente el relieve y otros factores que puedan estar influyendo en los resultados de los distintos parámetros. Por lo tanto, este es un aspecto mejorable que se puede solucionar en futuros trabajos y abrir nuevas líneas de investigación.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Becerra, R., Dóniz, J. y González, E. (2008). Aplicación del análisis morfométrico a los volcanes del extremo sur-oriental de la Región Volcánica del Campo de Calatrava (Ciudad Real, España). *Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008*: 21-24.

Bloomfield, K. (1975). A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, 64: 476-497.

Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H. y Rodríguez-Badiola, E. (1996). The 1677 eruption of La Palma, Canary Islands. *Estudios Geográficos*, 52: 103-114.

Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J. y Pérez-Torrado, F.J. (2001). Geology and Volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geográficos*, 57 (5-6): 175-273.

Carracedo, J.C. (2006). La predicción de las erupciones volcánicas. Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. *Riesgos Geológicos*, nº10, Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación: 265-277.

Carn, S.A. (2000). The Lamongan volcanic field, East Java, Indonesia: physical volcanology, historic activity and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95 (1-4): 81-108.

Coello, J.J. (1999). Geología y geomorfología. En: Pérez de Paz, P.L. (Dir.). *Memoria Ambiental. Revisión P.G.O.U. Ayuntamiento de Fuencaliente - La Palma*: 19-29.

Day, S., Carracedo, J.C., Guillou, H. y Gravestock, P. (1999). Recent structural evolution of the Cumbre Vieja Volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcanic flank instability? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94: 135-167.

Dóniz, J. (2011). Relaciones entre topografía del terreno y morfología de los edificios volcánicos basálticos monogénicos de Tenerife (Islas Canarias, España). *Estudios Geográficos*, 72 (270): 59-75.

Hasenaka, T., Carmichael, I.S. (1985). The cinder cones of Michoacan-Guanajuato, Central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25: 105-124.

Hernandez-Pacheco, A. y Valls, M.C. (1982). The historic eruptions of La Palma Island (Canaries). *Arquipelago, Rev. Univ. Azores. Ser. e. Nat.*, 3: 83-94.

IDECan, 2010. Infraestructuras de Datos Espaciales de Canarias. Gobierno de Canarias. <http://www.idecan.grafcan.es/idecan/>.

IGME, 2010. Instituto Geológico Minero de España. Gobierno de España. Ministerio de Economía y Competitividad. <http://mapas.igme.es/Servicios/>.

Inbar, M., Gilichinsky, M., Melekestsev, I., Melnikov, D. y Zaretskaya, N. (2010). Morphometric and morphological development of Holocene cinder cones: A field and remote sensing study in the Tolbachik volcanic field, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201: 301-311.

Kervyn, M., Ernst, G.G.J., Carracedo, J.-C. y Jacobs., P (2011). Geomorphometric variability of “monogenetic” volcanic cones: Evidence from Mauna Kea, Lanzarote and experimental cones. *Geomorphology*, 136: 59-75.

Porter, S.C. (1972). Distribution, morphology and size frequency of cinder cones on Mauna Kea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 3607-3612.

Recio, C., Cabrera, M.C., Calvet, F., Pérez-Torrado, F.J. y Travé, A. (2005). Origen de los “beachrocks” de la isla de La Palma, Islas Canarias. *Vector plus: miscelánea científico – cultural*, 25: 73-84.

Riedel, C., Ernst, G.G.J., Riley, M. (2003). Controls on the growth and geometry of pyroclastic constructs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127: 121-152.

Rodriguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J.L., Perez-Torrado, F.J., Aulinas, M., Carracedo, J.C., Gimeno, D., Guillou, H. y Paris, R. (2011). GIS methods applied to the degradation of monogenetic volcanic fields: A case study of the Holocene volcanism of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 134: 249-259.

Romero, C. (1986). Aproximación a la sistemática de las estructuras volcánicas complejas de las Islas Canarias. *Eria Revista de Geografía*, 11: 211-223.

Settle, M. (1979). The structure and emplacement of cinder cone fields. *American Journal of Science*, 279: 1089-1107.

Vegas, J., Hernández-Pacheco, A. y Marfil Pérez, R. (1999). Los depósitos volcanoclásticos de la isla de La Palma (Canarias). Su relación con la evolución de las calderas de Taburiente y Cumbre Nueva. *Boletín Geo!ógico y Minero de España*, 110 (2): 135-158.

Wood, C.A. (1980a). Morphometric evolution of cinder cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7: 387-413.

Wood, C.A. (1980b). Morphometric analysis of cinder cone degradation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8: 137-160.

## 8 ANEXOS

### *Listado de figuras*

**Figura 1:** Diagrama esquemático de un cono volcánico y los parámetros morfométricos principales. Wco: diámetro medio de la base del cono; Wcr: diámetro medio del cráter; Hco: altura media del cono; S: vertiente media del cono. (Wood, 1980).

**Figura 2:** Localización geográfica de Cumbre Vieja.

**Figura 3:** Distribución de chimeneas volcánicas históricas y sub-históricas, tomado de Day et al., (1999).

**Figura 4:** Mapa geomorfológico de la Dorsal de La Cumbre Vieja (La Palma). Obtenido de Romero (1986).

**Figura 5:** Mapa litológico de Cumbre Vieja (La Palma) y su correspondiente leyenda. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España, agosto 2010.

**Figura 6:** Delimitación del cono del volcán de San Antonio y su correspondiente cráter.

**Figura 7:** Limitación de las curvas de nivel al área ocupada por el cono del volcán de San Antonio.

**Figura 8:** Creación de una capa de puntos generados a partir de los vértices de cada curva de nivel del cono del volcán de San Antonio.

**Figura 9:** Estadísticas del campo "CONTOUR" de la tabla de atributos de la capa de puntos del cono del volcán de San Antonio.

**Figura 10:** Elaboración de un mapa de pendientes para los conos volcánicos de estudio.

**Figura 11:** Histograma del mapa de pendientes del volcán de San Antonio.

**Figura 12:** Mapa geológico del servicio online de información geográfica y territorial de Canarias del Gobierno de Canarias, conocido como IDECan (Infraestructuras de Datos Espaciales de Canarias).

**Figura 13:** Esquema geomorfológico de Cumbre Vieja (La Palma). Adaptado de Romero (1986) y Day et al. (1999).

**Figura 14:** Distribución de los conos volcánicos de interés según su tipología. Cumbre Vieja (La Palma).

**Figura 15:** Relaciones morfométricas para el campo volcánico de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 16:** Relaciones volumétricas los conos con cráteres cerrados de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 17:** Relaciones volumétricas los conos con cráteres abiertos de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 18:** Relaciones volumétricas para el campo volcánico de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 19:** Relaciones volumétricas para los conos cerrados de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráteres.

**Figura 20:** Relaciones volumétricas para los conos abiertos de Cumbre Vieja, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 21:** Distribución de los conos volcánicos de estudio según su edad geológica.

**Figura 22:** Relaciones morfométricas para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja, donde **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter.

**Figura 23:** Relaciones morfométricas para los conos cerrados en el campo volcánico de Mauna Kea, donde **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter. Extraído de Kervyn et al. (2011).

**Figura 24:** Relación entre la altura media del cono (**Hco**) y diámetro medio de la base del cono (**Wco**) para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja. La recta representa la relación  $Hco = 0,2 Wco$  que puede describir la morfología inicial de los conos simples antes de su degradación erosiva (Settle, 1979).

**Figura 25:** Comparación de la morfometría de los conos de escoria en cuatro campos de conos. Se relaciona la altura media del cono y diámetro medio de la base del cono. La recta representa la relación  $Hco = 0,2 Wco$  que puede describir la morfología inicial de los conos simples antes de su degradación erosiva. Tomado de Settle (1979).

**Figura 26:** Relación entre  $Hco/Wco$  y  $Wcr/Wco$  para 23 conos volcánicos monogénicos simples de Cumbre Vieja.

**Figura 27:** Relación entre  $Hco/Wco$  y  $Wcr/Wco$  para los conos con una morfología simple del campo volcánico de Mauna Kea. Extraído de Kervyn et al. (2011).

### Listado de tablas

**Tabla 1:** Parámetros y ratios morfométricas para los conos seleccionados, donde **Hco** = altura media del cono, **Wco** = diámetro medio de la base del cono, **Wcr** = diámetro medio del cráter y  $\alpha$  = ángulo medio de la vertiente del cono.

**Tabla 2:** Parámetros y ratios morfométricas para conos seleccionados cerrados y abiertos.

**Tabla 3:** Edad geológica de los conos volcánicos de estudio.

**Tablas 4 y 5:** Valores medios y medianos de cada parámetro para tres épocas geológicas diferentes.

### **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría dar las gracias a mi profesora y tutora Nuria de Andrés por sugerirme este proyecto y prestarme su ayuda en todo momento. También quisiera agradecer a Israel García Cruz por facilitarme la cartografía necesaria para la elaboración de este trabajo, y por supuesto a mi familia por el apoyo incondicional, sobre todo este último año.