

EL SISTEMA DE DIQUES CONICOS DE GRAN CANARIA Y LA ESTIMACION ESTADISTICA DE SUS CARACTERISTICAS

F. Hernán (*) y R. Vélez (**)

RESUMEN

El episodio intrusivo más importante dentro del complejo traquítico-sienítico de Gran Canaria es un sistema de diques cónicos de composición traquítica y fonolítica de amplio desarrollo. Se ha calculado la profundidad del foco de los diques cónicos, dando tratamiento estadístico a los datos de campo. En el modelo matemático utilizado se ha considerado a cada dique como un plano representado por un vector generatriz definido por su situación, dirección y buzamiento. Se consideró como profundidad del foco más apropiada la del plano horizontal donde los puntos de corte de las generatrices presentan dispersión mínima. El radio de la intersección del cono con la superficie del terreno es de unos 6 kilómetros, por lo que el volumen de la zona de influencia de la estructura es superior a los 100 km³. Se trata, pues, de un sistema de *cone-sheets* comparable a los de mayor importancia descritos, como los de Ardnamurchan y Mull en el distrito volcánico terciario de Escocia.

ABSTRACT

The most relevant intrusive episode in the syenite-trachyte complex of Gran Canaria (Canary Islands) is a well developed cone-sheet swarm of trachytic and phonolitic composition. The depth of the cone-sheet focus has been estimated by statistical treatment of field data. In the mathematical model here used, each dyke has been regarded as a plane represented by a vector. The vector is defined by location dip and strike. The most accurate depth was considered to be that of the horizontal plane in which the intersecting vectors show minimum dispersion. The height of the cone-shaped structure estimated on that basis, is of about 4 kms. Since the radius of the cone-base intersected on the ground surface is about 6 kms long, the total volume of the cone is over 100 kms³. The cone-sheet complex can therefore be compared to the most important and best known, like those of Ardnamurchan and Mull in the Tertiary volcanic district of Scotland.

Introducción

Una de las formaciones volcánicas más interesantes en Gran Canaria por su complejidad y gran desarrollo es el denominado complejo traquítico-sienítico (Fúster *et al.*, 1968), emplazado en los sectores central y suroeste de la isla (fig. 1), y formado por un conjunto de variados materiales sálicos de gran volumen.

La mayor parte del complejo traquítico-sienítico está representado por una sucesión tabular de materiales efusivos —mantos de tobas, cineritas e ignimbritas de composición riolítica a traquítica y lavas de composición fonolítica— que completan un espesor de varios centenares de metros en el sector suroeste y en la zona periférica del sector central. Sin embargo, la zona de núcleo del sector central se encuentra profundamente modificada por distintas intrusiones sucesivas: 1) masas sieníticas discontinuas; 2) un sistema

de diques cónicos (*cone-sheet complex*) traquíticos y fonolíticos, y 3) un último episodio representado por intrusiones de tipo domático y de composición también fonolítica (figura 2).

El estudio de todo el conjunto y las relaciones estructurales, geoquímicas y cronológicas existentes entre los distintos episodios intrusivos y efusivos se han discutido ya en trabajos anteriores (Schmincke, 1967, 68; Fúster *et al.*, 1968; Hernán, 1976).

Es el segundo episodio intrusivo (2) el de mayor desarrollo e importancia y al que se dedica atención en este trabajo. Dado el gran volumen del sistema cónico resulta de gran interés la estimación aproximada de algunas de las dimensiones de esta estructura no directamente observables sobre el terreno, como es la profundidad del foco hipotético del conjunto de diques cónicos. Para ello se han tratado estadísticamente diversos datos medidos en el campo, según el método de cálculo que se expone más adelante.

(*) Departamento de Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, Madrid-3.

(**) Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense, Madrid-3.

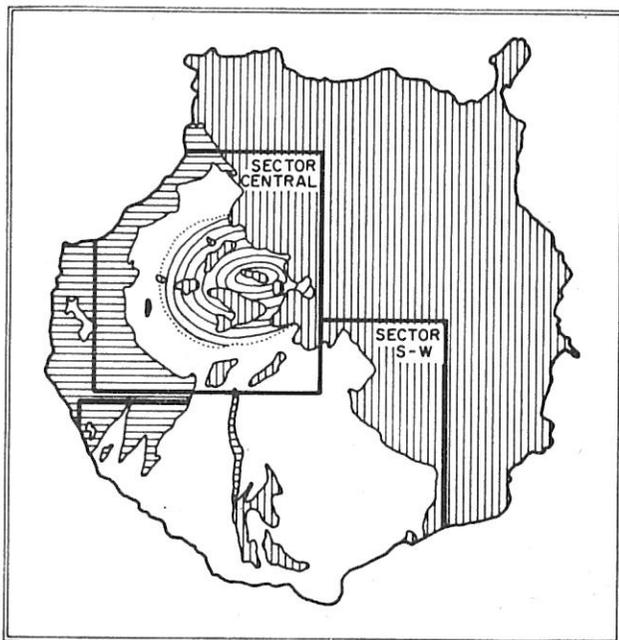


Fig. 1.—Mapa general de Gran Canaria. Rayado horizontal: rocas basálticas anteriores al complejo traquítico-sienítico. Rayado vertical: zona ocupada fundamentalmente por rocas basálticas posteriores. Zona en blanco: complejo traquítico-sienítico, la zona con círculos concéntricos representa el área de influencia del sistema de diques cónicos, y la línea de puntos, el límite externo de ésta.

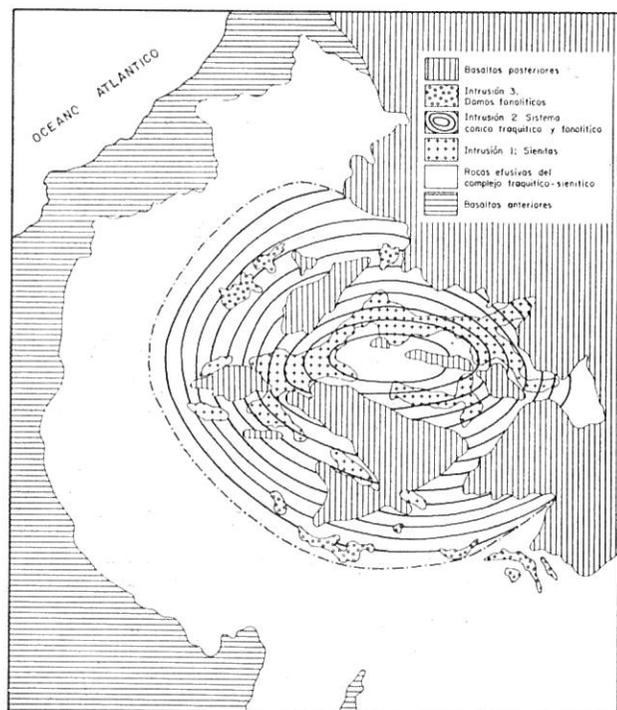


Fig. 2.—Sector central del complejo traquítico-sienítico. Se han representado los diferentes episodios intrusivos que afectan a las rocas efusivas del complejo en la zona del núcleo. La línea discontinua representa el límite externo del área de influencia del sistema de diques cónicos.

Descripción del sistema

Los diques que constituyen el sistema cónico intruyen en los tramos inferiores de la serie efusiva que ocupa el sector central (Hernán, 1976), los cuales están formados por niveles tobáceos cineríticos e ignimbríticos de composición traquítica. Como roca de caja de los diques encontramos también sienitas correspondientes a la intrusión precedente.

No es posible dar un número, ni siquiera aproximado, de diques que forman el complejo. Los bordes enfriados se suceden con tanta frecuencia que quedan, en general, muy próximos unos a otros, observándose que los propios diques hacen de roca de caja de otros más tardíos dentro del sistema. Sobre el carácter indiscutible de diques de estas rocas, en contraposición a las antiguas ideas de Hausen (1962), que los suponía lavas basculadas, pueden consultarse los trabajos de Schmincke (1967), Fúster *et al.* (1968) y Hernán (1976). El buzamiento de los diques hacia un centro común pone claramente de manifiesto una estructura en cono invertido. Dicho buzamiento es, en general, bastante uniforme (próximo a los 40°), si bien en el centro de la estructura existen diques verticales y subverticales, mientras que en la periferia se encuentran algunos sills. Estos últimos están frecuentemente atravesados por diques con la inclinación general, por lo que pueden interpretarse como prolongaciones laterales de diques relativamente jóvenes en el sistema. Los diques verticales en la zona más central son, por el contrario, relativamente tardíos, pues más frecuentemente cortan a diques inclinados, y en menos ocasiones se ven cortados por ellos. Unos y otros (sills periféricos y diques verticales del núcleo) representan una proporción pequeña del conjunto, y son, por otra parte, fenómenos comunes de los sistemas de tipo *cone-sheet*. El espesor de cada dique individual es ligeramente variable, en general entre 1 y 3 metros; no obstante, existen algunos muy escasos de dimensiones algo inferiores y superiores a éstas.

Dentro de todo el sistema cónico, puede distinguirse un conjunto de diques fonolíticos más reciente que el conjunto de diques traquíticos. Los diques fonolíticos, que representan tan sólo el 20 % del total, destacan por su color verdoso y presentan siempre bordes enfriados, en el conjunto de diques traquíticos de colores beige y grisáceos, que representan el 80 % restante. Sin embargo, ambos conjuntos deben considerarse como dos etapas de un mismo episodio, ya que las características de emplazamiento son idénticas, y el paralelismo a todas las escalas entre diques fonolíticos y traquíticos es la característica dominante. No existe, pues, evidencia alguna que haga pensar en la existencia de dos modelos genéticos de características geométricas distintas, ni en la existencia de una interrupción larga en el tiempo entre la inyección de material de composición traquítica y la de composición fonolítica. Lo que sí se observa es una distribución no homogénea de los diques fonolíticos, los cuales se hacen más frecuentes hacia el norte y hacia el oeste, de modo que la mayor abundancia de ellos se encuentra en el noroeste del área de influencia filoniana. Esta no existencia de interrupción se ve corroborada por las relaciones que presentan los materiales efusivos traquíticos y fonolíticos, tanto en la periferia del sector central como en el sector suroeste, los cuales forman una serie tabular ininterrumpida.

La densidad de diques en el complejo es extraordinariamente grande, de modo que en una gran parte de la zona afectada por la intrusión cónica, los diques representan el 90 % o más del volumen. Este hecho da idea de la fuerte elevación que debieron experimentar las rocas de caja primitivas (tobas, cineritas e ignimbritas traquíticas e incluso las sienitas de la intrusión anterior), al ser intensamente atravesadas por los diques cónicos. La elevación, lógicamente más importante en la zona más central, es, sin embargo, observable en las zonas de borde donde la proporción de diques es algo menor y, por tanto, más visible la roca de caja.

La desaparición de la intrusión filoniana hacia los bordes es más o menos brusca en unos puntos y más gradual en otros, por lo que el trazado del límite resulta en muchos casos subjetivo. En lo que representa algo menos de la mitad oriental, el borde de la estructura cónica no es observable (si es que la estructura en realmente completa y cerrada) por estar cubierto por materiales más recientes.

Finalmente, existen algunos diques muy escasos totalmente aberrantes en su orientación, que cortan bruscamente el patrón general y que son claramente posteriores al resto del conjunto. Algunos son diques fonolíticos, correspondientes a momentos muy tardíos de inyección residual dentro del período de inyección y emisión de materiales de esta composición. Otros son de composición basáltica, de espesor en general próximo a 1 metro, muy posteriores al sistema

cónico e incluso al conjunto del complejo traquítico-sienítico. Estos últimos representan caminos de salida de los materiales basálticos posteriores que existen en la isla.

Debe añadirse que el área ocupada por los diques está surcada por profundos barrancos, que, partiendo de zonas próximas al núcleo del complejo (no muy alejado del centro geográfico de la isla), se extienden radialmente hasta la costa. Por otra parte, esta zona de núcleo a que nos referimos debió representar en algún momento posterior a la formación del complejo una especie de gran cubeta, sobre la que se asentaron materiales basálticos más recientes que hoy ocupan en algunos puntos cotas inferiores a las alcanzadas por los mismos diques traquíticos y fonolíticos de alrededor. Es fácil entender que una erosión intensa se localizara en esta zona ocupada por materiales fuertemente

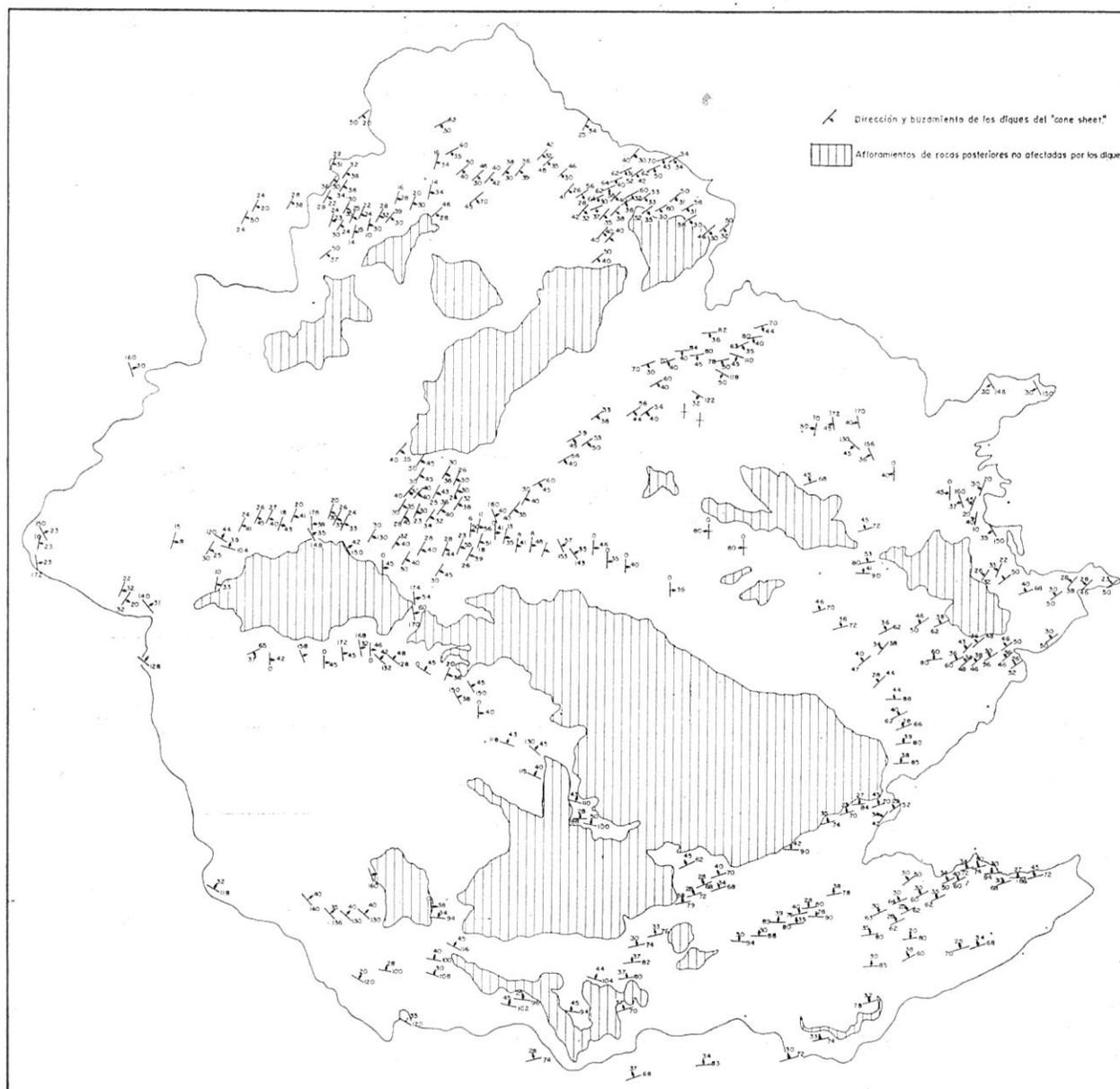


Fig. 3.—Área de influencia del sistema de diques cónicos, donde se han representado las medidas de dirección y buzamiento de los diques.

intruidos y, por tanto, dislocados lo suficiente como para facilitar la erosión a través de los planos de intrusión de los diques y de las fracturas y diaclasas de mayor y menor importancia existentes en la zona.

Estimación del vértice (foco) y dimensiones del sistema cónico

Para dar una idea más precisa de las dimensiones del sistema *cone-sheet*, se ha dado tratamiento estadístico a los datos tomados en el campo, con el objetivo principal de determinar la situación en profundidad del foco de los diques cónicos.

Fue realizada sobre el terreno una toma de numerosas medidas de dirección y buzamiento de los diques, cubriendo casi la totalidad del área afectada por la intrusión filoniana. La figura 3 muestra la situación de los puntos (aproximadamente 300) en los que se realizaron dichas medidas. Las direcciones y buzamientos expresados corresponden en muchos casos a un valor medio para los diques existentes en ese punto, y en todos los casos a la dirección y buzamiento más representativos en dicho punto. En la misma figura puede observarse la disposición circular y concéntrica de los diques, los cuales buzaban todos hacia un centro común, configurándose así, clara e inequívoca, la estructura general en cono invertido de la intrusión.

La altura real de la estructura cónica invertida formada por los diques es una dimensión observable nada más que parcialmente sobre el terreno. Su determinación sería posible si se conociese la situación en profundidad del foco, para lo cual habría que tener en cuenta los datos sobre longitud, latitud y altitud de los puntos donde se tomaron las medidas de dirección y buzamiento de los diques y los propios de dirección y buzamiento. Concretamente, el primer paso encaminado a la construcción de un modelo matemático que refleje la situación real descrita, consiste en considerar cada dique como un pequeño sector de plano definido por su situación, dirección y buzamiento. En segundo lugar, supondremos que la proyección sobre dicho plano de la vertical del lugar en que está situado habría de pasar, teóricamente, por el foco del sistema, si éste fuese puntual y no hubiese perturbaciones aleatorias que afectasen a la formación del mismo.

Dicha proyección, generatriz del cono hipotético cuyo vértice se trata de determinar, queda determinado por un punto (X_i, Y_i, Z_i) , cuyas coordenadas representan, respectivamente, la longitud, latitud y altitud del dique i -ésimo, y un vector de dirección (V_i, W_i, U_i) , el cual en función de los ángulos de orientación, θ_i , y buzamiento, β_i , del dique puede expresarse

$$\begin{aligned} V_i &= \begin{cases} \cotg \beta_i \cos \theta_i & \text{si } \theta_i < 90^\circ \\ -\cotg \beta_i \cos \theta_i & \text{si } \theta_i > 90^\circ \end{cases} \\ W_i &= \begin{cases} -\cotg \beta_i \sen \theta_i & \text{si } \theta_i < 90^\circ \\ \cotg \beta_i \sen \theta_i & \text{si } \theta_i > 90^\circ \end{cases} \\ U_i &= 1 \end{aligned} \quad (*)$$

tomando por comodidad la tercera coordenada igual a uno.

Un primer procedimiento de determinación del vértice del sistema cónico consiste en cortar el conjunto de generatrices por planos horizontales a diversas profundidades y seleccionar aquel plano en el cual los puntos de corte tengan dispersión mínima.

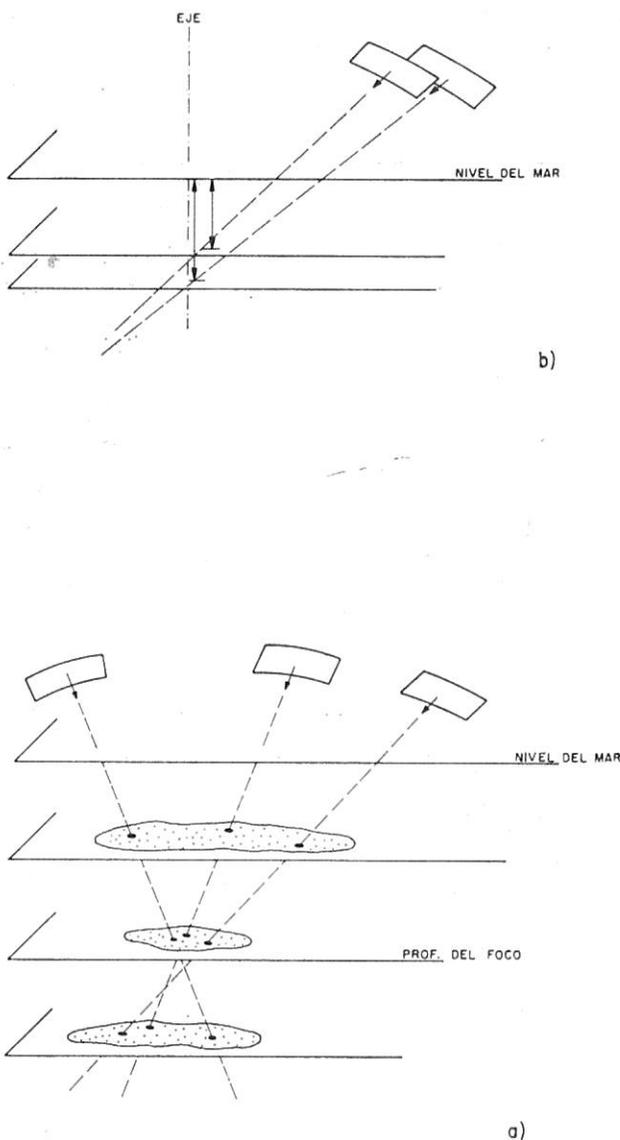


Fig. 4.—Esquemas geométricos de métodos seguidos en el cálculo.

Ello estimaría directamente la profundidad del vértice y éste coincidiría con el centro de gravedad de los puntos de corte de las generatrices con el plano seleccionado (fig. 4 a).

Para llevar a cabo el procedimiento que acabamos de describir, observamos que las ecuaciones pa-

ramétricas de la generatriz definida por el dique i-ésimo son:

$$\begin{aligned} X &= X_i + \lambda V_i \\ Y &= Y_i + \lambda W_i \\ Z &= Z_i + \lambda \end{aligned}$$

de forma que la intersección de dicha recta con el plano horizontal de profundidad P es un punto de longitud y latitud dadas por

$$X_i + (P - Z_i)V_i \text{ e } Y_i + (P - Z_i)W_i \text{ respectivamente.}$$

Consecuentemente, la longitud y latitud del centro de gravedad de los puntos de corte de las generatrices con el plano $Z = P$, serán

$$\bar{X} + P\bar{V} - \bar{Z}\bar{V} \text{ e } \bar{Y} + P\bar{W} - \bar{Z}\bar{W};$$

(haciendo a partir de ahora el convenio de representar los parámetros $\frac{\sum_i^N X_i}{N}$, $\frac{\sum_i^N Z_i V_i}{N}$, etc. ... por

\bar{X} , $\bar{Z}\bar{V}$, etc. ...).

Como es habitual, mediremos la dispersión de una distribución bidimensional de puntos, mediante la suma de las varianzas en cada una de sus dos coordenadas. De este modo, la dispersión de los puntos de corte de las generatrices de los diques con el plano $Z = P$ será:

$$(1) \quad \frac{\sum_i^N (X_i + PZ_i - Z_i V_i)^2}{N} - (\bar{X} + P\bar{V} - \bar{Z}\bar{V})^2 + \frac{\sum_i^N (Y_i + PW_i - Z_i W_i)^2}{N} - (\bar{Y} + P\bar{W} - \bar{Z}\bar{W})^2.$$

Fácilmente se obtiene entonces el valor P^* que hace mínima la dispersión y que, con el convenio adoptado, se expresa

$$(2) \quad P^* = \frac{\bar{Z}\bar{V}^2 - \bar{Z}\bar{V}\bar{V} - \bar{X}\bar{V} + \bar{X}\bar{V} + \bar{Z}\bar{W}^2 - \bar{Z}\bar{W}\bar{W} - \bar{Y}\bar{W} + \bar{Y}\bar{W}}{\bar{V}^2 - \bar{V}^2 + \bar{W}^2 - \bar{W}^2}.$$

El vértice del sistema estaría, pues, situado a una profundidad estimada P^* y su longitud y latitud estimadas serían

$$(3) \quad X^* = \bar{X} + P^*\bar{V} - \bar{Z}\bar{V} \text{ e } Y^* = \bar{Y} + P^*\bar{W} - \bar{Z}\bar{W} \text{ respectivamente.}$$

Es de señalar que el hecho de que las medidas se concentren más en un sector de la configuración que en otro, no invalida en absoluto las estimaciones anteriores; defecto que se presentaría, sin duda, estimando las coordenadas del vértice mediante \bar{X} e \bar{Y} , promedio de las longitudes y latitudes de los diques. Consideraremos, pues, el centro en superficie (\bar{X}, \bar{Y}) poco representativo y adoptaremos, pues, como eje del sistema cónico la vertical del punto de coordenadas (X^*, Y^*) .

Un procedimiento alternativo para la determinación del vértice del sistema consiste en tratar de determinar el punto del espacio cuya suma de cuadrados de distancias a las generatrices definidas por los diques sea mínima. Transformaremos para ello el vector de dirección de cada generatriz en un vector unitario (V_i, W_i, U_i) , con $V_i^2 + W_i^2 + U_i^2 = 1$, de forma que las ecuaciones paramétricas de la generatriz definida por el dique i-ésimo serán

$$\begin{aligned} X &= X_i + \lambda V_i \\ Y &= Y_i + \lambda W_i \\ Z &= Z_i + \lambda U_i \end{aligned}$$

El cuadrado de la distancia de un punto cualquiera (X, Y, Z) a la recta anterior vendrá dada por:

$$(X_i + \lambda_i V_i - X)^2 + (Y_i + \lambda_i W_i - Y)^2 + (Z_i + \lambda_i U_i - Z)^2,$$

siendo $\lambda_i = (X - X_i)V_i + (Y - Y_i)W_i + (Z - Z_i)U_i$.

La suma de cuadrados de distancias del punto (X, Y, Z) a cada generatriz,

$$D = \sum_i^N (X_i + \lambda_i V_i - X)^2 + \sum_i^N (Y_i + \lambda_i W_i - Y)^2 + \sum_i^N (Z_i + \lambda_i U_i - Z)^2$$

(*) NOTA: Los ángulos de buzamiento se consideran con valor entre 0° y 180° , correspondiendo valores menores que 90° a diques que buzan hacia el oeste y valores entre 90° y 180° a diques que buzan hacia el este.

es entonces mínima para el punto (X, Y, Z) que verifique el sistema de ecuaciones

$$\frac{\delta D}{\delta X} = 2 \sum_i^N (X_i + \lambda_i V_i - X) (V_i^2 - 1) + 2 \sum_i^N (Y_i + \lambda_i W_i - Y) W_i V_i + 2 \sum_i^N (Z_i + \lambda_i U_i - Z) U_i V_i = 0$$

$$\frac{\delta D}{\delta Y} = 2 \sum_i^N (X_i + \lambda_i V_i - X) V_i W_i + 2 \sum_i^N (Y_i + \lambda_i W_i - Y) (W_i^2 - 1) + 2 \sum_i^N (Z_i + \lambda_i U_i - Z) U_i W_i = 0$$

$$\frac{\delta D}{\delta Z} = 2 \sum_i^N (X_i + \lambda_i V_i - X) V_i U_i + 2 \sum_i^N (Y_i + \lambda_i W_i - Y) W_i U_i + 2 \sum_i^N (Z_i + \lambda_i U_i - Z) (U_i^2 - 1) = 0$$

el cual, habida cuenta de que $V_i^2 + W_i^2 + U_i^2 = 1$, se puede expresar matricialmente y con la notación introducida en la forma:

$$(4) \quad \begin{pmatrix} \overline{V^2 - 1} & \overline{VW} & \overline{VU} \\ \overline{VW} & \overline{W^2 - 1} & \overline{WU} \\ \overline{VU} & \overline{WU} & \overline{U^2 - 1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{XV^2} + \overline{YVW} + \overline{ZVU} - \overline{X} \\ \overline{XVW} + \overline{YW^2} + \overline{ZWU} - \overline{Y} \\ \overline{XVU} + \overline{YWU} + \overline{ZU^2} - \overline{Z} \end{pmatrix}$$

Si bien la solución (X^{**}, Y^{**}, Z^{**}) de la ecuación (4) constituye una segunda estimación alternativa a (2) y (3), de las coordenadas del vértice del sistema cónico, es difícil juzgar teóricamente cuál de ellas es mejor. La única consideración que indica quizás como preferible la primera solución, es que da un tratamiento preferente al problema de la estimación de la profundidad del vértice, mientras que el segundo procedimiento se comporta de manera simétrica con sus tres coordenadas.

Sobre la base de la observación anterior se prefirió aplicar en la práctica la solución inicial, diseñando un programa de ordenador que obtuviese el valor de los estimadores (1) y (2). El resultado obtenido sitúa el vértice a una longitud 403.139 y una latitud 343.542, en un punto (representado por un aspa en la figura 5) muy cerca de Los Reyes, mientras que su profundidad puede cifrarse en 1.698 metros bajo el nivel del mar.

Hay que tener en cuenta que en ambos procedimientos de estimación indicados se da un carácter puntual al foco del complejo cónico; sin embargo, este foco no es, en realidad, puntual, sino que corresponde, lógicamente, a una zona, más o menos extensa, de tres dimensiones, a partir de la cual arrancan los diques. Sería, pues, deseable contar con una indicación de las dimensiones de dicha zona.

En el caso de la longitud y latitud parece lógico obtener tal información mediante las desviaciones típicas de las coordenadas del punto de corte de las generatrices asociadas a los diques con el plano en el que hemos situado el vértice. Se trata, pues, únicamente de obtener la raíz cuadrada del valor de cada uno de los dos sumandos de (1), sustituyendo P por su valor obtenido de (2).

Los resultados obtenidos fueron una dispersión de 1.624 metros en longitud y de 1.484 metros en latitud, lo que permite situar el foco bajo una zona más o menos circular, con centro en el punto ya señalado (próximo a Los Reyes), y cuyo diámetro, a grandes rasgos, se extendería desde el caserío de La Higuera hasta el de El Chorrillo (representados en la figura 5 por dos puntos gruesos).

La obtención de una medida de dispersión en profundidad no queda directamente indicada en el desarrollo realizado hasta ahora. El procedimiento empleado ha sido localizar el origen de cada dique en el punto de su generatriz, que está situado a distancia mínima del eje del complejo cónico (fig. 4 b).

Expresada en función de los parámetros del dique i -ésimo, la profundidad de dicho punto es

$$Z_i = \frac{(X_i - X^*)V_i + (Y_i - Y^*)W_i}{V_i^2 + W_i^2}$$

El valor medio de dichas profundidades da una tercera estimación de la profundidad del vértice del sistema y su desviación típica proporciona una indicación de la dispersión en profundidad. Los resultados concretos obtenidos en este sentido dan una profundidad media de 1.896 metros bajo el nivel del mar (cifra más o menos concordante con el valor de P^* obtenido), con una desviación típica de 1.046 metros.

Debe indicarse, por último, que frecuentemente ocurre en este tipo de complejos que sus generatrices están ligeramente curvadas hacia el exterior, haciéndose su inclinación mayor a medida que aumenta la profundidad. Como consecuencia, el suponer que dichas generatrices son rectas, tendería a subestimar la profundidad del vértice; ésta podría ser, por tanto, ligeramente superior al valor obtenido.

A partir de los datos de buzamiento se ha calculado el buzamiento medio de los diques en 36° , estando la máxima frecuencia comprendida entre los 30° y 40° .

Debe añadirse que de las observaciones de campo se ha deducido que la sección horizontal de la estructura en cono invertido tiene una forma ligeramente elipsoidal. El eje mayor de dicha elipse mide de 13 a 14 kilómetros y el eje menor de 10 a 11 kilómetros, coincidiendo con la dirección este-oeste el primero y la norte-sur el segundo. No hay que olvidar que la primera de las dos medidas es solamente estimativa, por estar la estructura en la zona oeste cubierta por materiales más recientes; no obstante, lo más lógico es imaginar esta estructura como completa y cerrada, por lo que en este caso sí se alcanzarían los 13-14 kilómetros señalados (fig. 5). El

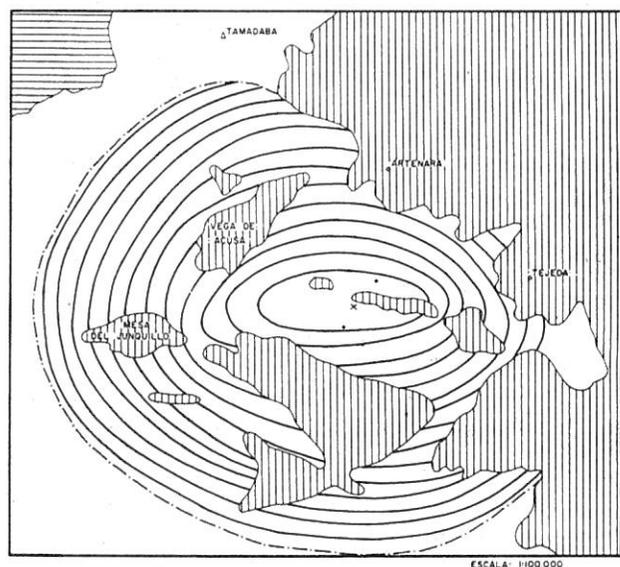


Fig. 5.—Esquema geométrico del sistema de diques cónicos. Las elipses concéntricas son simplemente un símbolo de representación que en ningún modo dan indicación del número enorme de diques que forman el sistema.

área de afloramiento ocupada por los diques sería, pues, de aproximadamente 112 kilómetros cuadrados.

Los datos ofrecidos no pueden interpretarse estrictamente, pero tienen el valor de dar una idea muy aproximada de las dimensiones de la estructura. En resumen, de lo anteriormente dicho puede concluirse que la profundidad del foco del complejo cónico está próximo a los 2 kilómetros bajo el nivel del mar. Si tenemos en cuenta además que algunos diques alcan-

zan altitudes de más de 1.200 metros por encima del nivel del mar, y que la zona afectada por esta potente intrusión ha sido en parte desmontada por la erosión (fundamentalmente en la zona del núcleo), se le puede asignar a la estructura una altura comprendida entre los 3 y 4 kilómetros, es decir, aproximadamente un tercio del diámetro medio de la sección de dicha estructura en superficie (ver fig. 5). El volumen de la intrusión sería, por tanto, muy importante, superior a los 130 kilómetros cúbicos. Tanto en la estimación del área en superficie como en la del volumen del sistema, se ha tenido en cuenta la zona de intrusión con gran densidad de diques. Existen, como ya se dijo anteriormente, diques más alejados del núcleo que agrandarían las dimensiones consideradas de ser tenidos en cuenta, pero, a pesar de pertenecer al mismo sistema, son ya muy esporádicos, por lo que se ha preferido incluir solamente en el cálculo de medidas aquellas zonas donde los diques aparecen muy próximos unos a otros, o, lo que es lo mismo, donde la proporción de roca de caja es pequeña.

Comparación con otros sistemas cónicos

Son bastante numerosos los ejemplos de sistemas de diques cónicos, y algunos de ellos, los más conocidos, están recogidos en toda la literatura sobre el tema. Los ejemplos más clásicos son los del oeste de Escocia —en las islas de Skye, Rum, Mull y en la península de Ardnamurchan—, descritos ya hace tiempo por Harker (1904), Bailey *et al.* (1924), Richey (1961), etc.

En general, los *cone-sheets*, como es el caso de los anteriormente nombrados, están íntimamente asociados a sistemas de diques circulares (*ring-dykes*) y/o diques radiales, con los que presentan relaciones variables de mayor o menor complejidad. Los diques cónicos y los radiales son generalmente posteriores a los diques circulares asociados a ellos. Por otra parte, mientras que los sistemas de diques circulares están formados por un número pequeño de diques individuales (uno-cinco es muy frecuente), los sistemas de diques cónicos y los de diques radiales suelen estar formados por un gran número de diques de poco espesor y de grano fino. Especialmente los sistemas cónicos están constituidos por decenas o centenas de ellos.

En Gran Canaria existen diques que cortan el patrón cónico y que, aunque pueden responder a una pauta radial, no conforman un auténtico sistema radial. En cuanto a la existencia de diques circulares, tal posibilidad ha sido sugerida por Hernán (1976), sin que los datos de campo puedan asegurarlo firmemente; pero existe, como se ha dicho, una intrusión sienítica (intrusión 1) anterior a los diques cónicos traquíticos y fonolíticos (intrusión 2), que muy bien podría responder a este patrón. Las sienitas son,

particularmente en la zona más central, parte muy importante de la roca de caja de los diques cónicos, y, dada la densidad muy grande de éstos, aparecen como cuerpos alargados de poca extensión y muy discontinuos, por lo que sólo se puede aventurar la forma global primitiva de la intrusión sienítica, hoy desmembrada por los diques cónicos. Sin embargo, la coincidencia espacial de las dos intrusiones (1 y 2), y aún más el hecho de que las sienitas aparezcan emplazadas en la parte más central y profunda del sistema cónico, hacen que sea factible la posibilidad de que las sienitas intruyeran a favor de una o más fracturas circulares, en cuyo caso se completaría el esquema doble más generalizado de *ring-dykes* más *cone-sheets*.

En algunos ejemplos, como ocurre en Ardnamurchan (Richey, 1961), además de la asociación de los diques cónicos con otros circulares existe multiplicidad de centros, es decir, los *cone-sheets* se emplazan alrededor de dos o más centros, por lo que puede hablarse de varios (tres en Ardnamurchan) sistemas de diques cónicos. El patrón cónico de Gran Canaria es simple, de modo que todos los diques traquíticos y fonolíticos son concéntricos con respecto a un mismo centro en superficie.

Otras veces ocurre (especialmente cuando la composición es muy variada) que todos los diques cónicos son concéntricos alrededor de un centro único, pero proceden de focos situados a distinta profundidad. Es decir, se trata de dos o más sistemas cónicos con un eje común, pero distinto vértice. Este caso tiene lugar en Alnö, Suecia (Von Eckerman, 1948), donde existen dos sectores de diques cónicos: uno de "alvikitas" (carbonitas calcíticas) y otro posterior de "beforsitas" (carbonatitas dolomíticas), cuyos focos se localizan a 2 y 7 kilómetros de profundidad, respectivamente. En el sistema canario, según ha sido establecido en este trabajo, los diques traquíticos y fonolíticos proceden de un único foco, situado a una profundidad intermedia (≈ 4 kms.) entre las del ejemplo anterior (*). En el distrito volcánico de Escocia, los focos se encuentran también a profundidad de 4-5 kilómetros bajo la superficie actual, y, por lo que a esto respecta, puede concluirse que el sistema cónico canario no presenta ninguna particularidad.

En cuanto al tamaño de la intrusión cónica, ya se ha dicho que el radio en superficie es de aproximadamente 6 kilómetros, muy similar también al de los ejemplos más importantes, como los de Ardnamurchan (≈ 6 kms.) y los de Alnö (6 y 8 kms., respectivamente). También se ha señalado que el número de diques es muy grande, por lo menos comparable al de los ejemplos más espectaculares escoceses de

(*) NOTA: Von Eckerman (1948) calculó la profundidad de los focos proyectando el buzamiento de diques, medidos en la superficie de erosión (prácticamente plana y a pocos metros sobre el nivel del mar) en un mismo plano vertical, y situando el punto de medida a la distancia real del centro en superficie, supuesto centro de un cuerpo de sóvita existente en el núcleo de los sistemas cónicos).

Ardnamurchan y Mull, en los que se habla de varios cientos. En este sentido, es de señalar que el ascenso sufrido por la roca de caja calculado en estos dos ejemplos como superior a los 1.000 pies (más de unos 278 m.), sería en Gran Canaria por lo menos de este orden. Sin embargo, esta estimación puede quedarse corta; así, Le Bas (1971) deduce un ascenso de 150 metros en las rocas de caja internas de un sistema cónico de mucha menor densidad de diques existente, en Carlingford, Irlanda, por lo que es lógico pensar en un ascenso sensiblemente mayor en Gran Canaria.

La interpretación más antigua de los diques cónicos (*cone-sheets*) es la de Anderson (1973 a, b), quien explicó su formación como debido al ascenso y ocupación por el magma de fracturas de tensión, mientras que los diques circulares (*ring-dykes*) ocupaban fracturas de compresión. Los cálculos de Robson y Barr (1964) llegan a conclusiones justamente contrarias, y en la actualidad las ideas coinciden en interpretar los diques cónicos como relleno de fracturas de compresión.

En el caso particular de Gran Canaria, los diques cónicos están en íntima relación con una emisión de materiales efusivos muy importante en volumen. La evolución magmática de todos estos materiales está muy condicionada por la existencia de una presión de volátiles muy importante (Araña *et al.*, 1973) en la cámara magmática. Por esto nos parece especialmente interesante y muy apropiada en nuestro caso, la explicación que da Phillips (1974) para los *cone-sheets*, quien sugiere que ocupan fracturas de compresión formadas como resultado de esfuerzos debidos a una expansión rápida de un magma que está sufriendo ebullición retrógrada.

Finalmente, si consideramos el sistema cónico de diques traquíticos y fonolíticos, puede decirse que no existe ninguna formación en el resto del Archipiélago Canario que sea realmente comparable con él. En un sentido más amplio, es decir, considerando el sistema de diques cónicos dentro de todo el conjunto del complejo traquítico-sienítico, aunque no existe tampoco ninguna similar, sí pueden destacarse dos en particular con las cuales se podría establecer alguna analogía. Nos referimos a los diques circulares de sienitas y traquitas en relación con otros diques y domos también traquíticos que intruyen en las rocas del complejo basal de Fuerteventura (Muñoz, 1969), y a la llamada serie traquítico-fonolítica formada por lavas, brechas, diques y domos que se apoya sobre el complejo basal de la Gomera (Cendrero, 1971), pero en ellas no se ha determinado ninguna pauta cónica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a J. M. Fúster el haber sugerido la realización de este trabajo, así como el haber puesto en contacto a los propios autores.

Bibliografía

- ANDERSON, E. M.
1937a. Cone-sheets and ring-dykes the dynamical explanation. *Bull. Volcanol.*, 2, 1, 35-40.
1937b. The dynamics of formation of cone-sheets, ring-dykes and cauldrom subsidences. *Proc. R. Soc. Edimburgh*, 56, 128-157.
- ARAÑA, V., BADIOLA, R. E. y HERNÁN, F.
1973. Peralkaline acid tendencies in Gran Canaria (Canary Islands). *Contr. Mineral. and Petrol.*, 40, 53-62.
- BAILEY, E. B. y THOMAS, H. H.
1924. The Tertiary and post-tertiary geology of Mull, Loch Aline and Oban. *Geol. Surv. Scotland, Mem.*, 445 págs.
- CENDRERO, A.
1971. Estudio geológico y petrológico del complejo basal de la isla de La Gomera (Canarias). *Estudios Geol.*, 27, 3-73.
- ECKERMAN VON, E.
1948. The alkaline district of Alnö Island. *Sverige Geol. Undersökning. Ser.*, 36, 176 págs.
- FÚSTER, J. M., HERNÁNDEZ-PACHECO, A., MUÑOZ, M., RODRÍGUEZ, E. y GARCÍA, L.
1968. *Geología y Volcanología de las Islas Canarias, Gran Canaria*. Instituto "Lucas Mallada", C. S. I. C., Madrid, 243 págs.
- HARKER, A.
1904. The Tertiary igneous rocks of Skye. *Mem. Geol. Surv. Great Britain*, 1-481 págs.
- HAUSEN, H.
1962. New contributions to the geology of Gran Canary. *Soc. Sci. Fenn. Comm. Phys math*, 27, 1-418.
- HERNÁN, F.
1976. Estudio petrológico y estructural del complejo traquítico-sienítico de Gran Canaria. *Estudios Geol.*, 32, 279-324.
- LE BAS, M. J.
1971. Cone-sheets as mechanism of uplift. *Geol. Mag.*, 108, 5, 373-376.
- MUÑOZ, M.
1969. Estudio petrológico de las formaciones alcalinas de Fuerteventura (Islas Canarias). *Estudios Geol.*, 25, 257-310.
- PHILLIPS, W. J.
1974. The dynamic emplacement of cone-sheets. *Tectonophysics*, 24, 69-84.
- RICHEY, J. E.
1961. The Tertiary volcanic districts, (3rd ed. revised by A. G. Mac Gregor and F. W. Anderson, Dept. Sci. Ind. Res., *Geol. Survey and Museum*, Edinburgh, 119 págs.
- ROBSON, G. R. y BARR, K. G.
1964. The effect of stress on faulting and minor intrusions in the vicinity of a magma body. *Bull. Volcanol.*, 27, 315-330.
- SCHMINCKE, H. U.
1967. Cone-sheet swarm, resurgence of Tejada Caldera, and the early geologic of Gran Canaria. *Bull. Volcanol.*, 31, 153-162.
1968. Faulting versus erosion and the reconstruction of the Mid-miocene shield volcano of Gran Canaria. *Geol. Mitt.*, 8, 23-50.

Recibido el 10 de enero de 1980.