

A PRELIMINARY REPORT ON THE COMENDITIC DOME AND ASH FLOW COMPLEX OF SIERRA LA PRIMAVERA, JALISCO; DISCUSSION

Alain Demant¹ y Pierre M. Vincent²

En un artículo recientemente publicado, Mahood (1977) desarrolla un estudio vulcanológico, petrográfico y geoquímico muy completo sobre las riolitas peralcalinas de la Sierra La Primavera, ubicada al suroeste de Guadalajara. Sin embargo, la interpretación que presenta de esta caldera no parece compatible con las observaciones de campo realizadas por Demant desde 1976, ni con las llevadas a cabo por los dos autores en junio de 1978. Según Mahood (1977), la sucesión de los eventos magmáticos en la Sierra La Primavera se puede resumir de la manera siguiente:

(1) — Formación de domos riolíticos, entre 100,000 y 30,000 años (dataciones K/Ar), a lo largo de fracturas que representan la primera etapa de la formación de las fallas anulares en una caldera (*incipient ring fractures*); estas fallas se desarrollan como resultado de un levantamiento regional (*intumescent stage*) (Smith y Bailey, 1968), manifestación superficial del crecimiento de una cámara magmática en profundidad. Una veintena de domos riolíticos se agrupó así sobre dos sistemas de fracturas circulares concéntricas de 12 y 14 km de diámetro respectivamente. Mahood (1977) distingue las rocas del anillo interno como porfídicas de las lavas que forman el anillo externo, que son afíricas, destacando la existencia de fenómenos de diferenciación en una cámara magmática somera. El volumen total de riolitas fue estimado en 20 km³.

(2) — Erupción de derrames de cenizas (*ash flows*) que formaron la Toba Tala. Considerando la poca erosión de este material, Mahood (1977) le asigna una edad que puede ser tan reciente como 5,000 ó 10,000 años. El volumen de material piroclástico emitido, en equivalente de roca, fue estimado en 8 km³.

Basándose en esta cronología, este autor interpreta la Sierra La Primavera como una caldera en formación, que se encuentra en la etapa de intumescencia regional; es decir, la fase I de Smith y Bailey (1968) (*regional intumescence and generation of ring fractures*). Por lo tanto, describe como

muy probable una erupción paroximal bajo la forma de derrames de cenizas (*ash flows*), que podría alcanzar 200 km³, y destruir por completo a la Ciudad de Guadalajara, cubriéndola con más de 100 m de productos piroclásticos. Esto corresponde con la fase II de Smith y Bailey (1968), o sea, las erupciones responsables de la formación de la caldera.

La argumentación de Mahood (1977) se basa en la suposición de que la Toba Tala es posterior a la formación de los domos riolíticos, pero no presenta argumentos de campo que muestren con certeza la sobreposición de ésta sobre un domo. Los autores de la presente discusión han encontrado contactos geológicos que demuestran claramente que la Toba Tala es anterior a los domos riolíticos. Así, en un pequeño cañón ubicado inmediatamente al oriente del Balneario La Primavera (20°42' N-103°35' W, Mapa Guadalajara Oeste, DETENAL), se observa el derrame afírico de obsidiana del Cañón de Las Flores cubriendo un derrame de ceniza (*ash flow*) no piroconsolidada (*non welded*), de 6-8 m de espesor. En la parte alta de este derrame de ceniza, aparecen niveles finamente estratificados que representan acumulaciones mediante caídas por aire (*ash falls*). El mismo contacto obsidiana-toba se vuelve a observar a lo largo del camino que se dirige al Balneario La Primavera, al norte del cruce con otro camino que va al Balneario Las Flores. Asimismo, en el Cañón de Las Tortugas (20°43' N - 103°34' W; Figura 1), debajo de la lava porfídica con facies de perlita de la Mesa del Burro, fechada como 0.97 ± 0.06 m.a. por Mahood (1977), se observa una toba ignimbrítica de poca piroconsolidación que tiene todas las características de la Toba Tala. Estas relaciones observadas demuestran claramente que la Toba Tala es anterior al desarrollo de los domos riolíticos; es decir, que tiene como mínimo 100,000 años.

Por otro lado, la topografía de la región hace muy dudosa una edad reciente para esta toba. Forma en efecto una superficie muy poco inclinada, con una altura que baja gradualmente desde 1,500 m, cerca de los domos riolíticos, hasta 1,400 m, en las inmediaciones de Tala. En contraste, los domos forman relieves más jóvenes que alcanzan más de 2,000 m de altura. En el mismo mapa de Mahood (1977), parece evidente que los domos riolíticos son posteriores a la toba ignimbrítica.

1 Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México 20, D. F.

2 Département de Géologie, UER des Sciences Exactes et Naturelles, 63038 CLERMONT FERRAND Cedex, Francia.

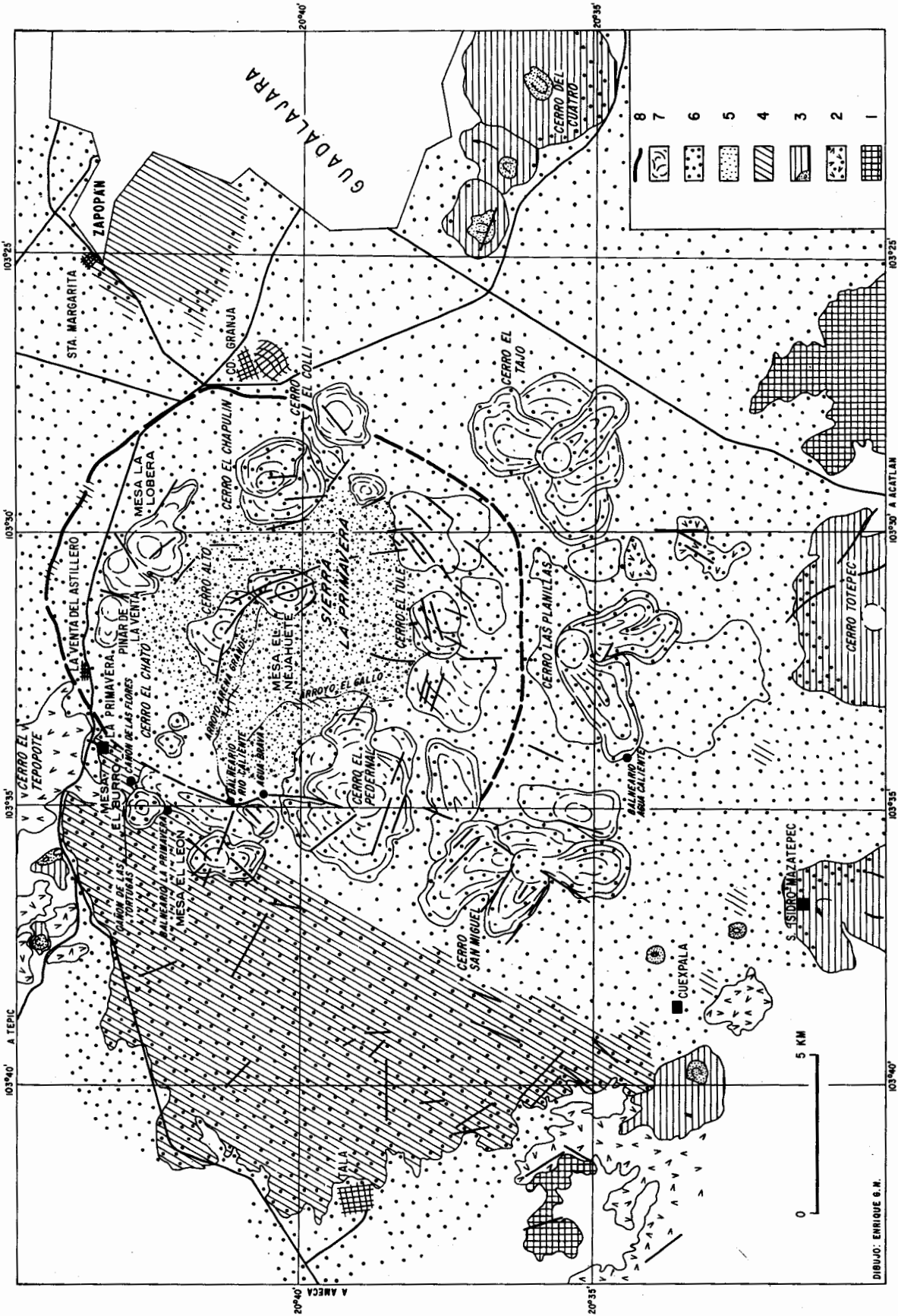


Figura 1.—Mapa geológico de la Sierra La Primavera.

8. Límite de la caldera | 6. Pómez de caída aérea | 4. Toba Tala | 2. Ignimbrita miocénica |
 7. Domo ríofítico | 5. Sedimento infra-caldera | 3. Basalto plio-cuaternario | 1. Andesita oligocénica

En realidad, todos los datos geológicos en la Sierra La Primavera pueden integrarse en el modelo de evolución de las calderas propuesto por Smith y Bailey (1968).

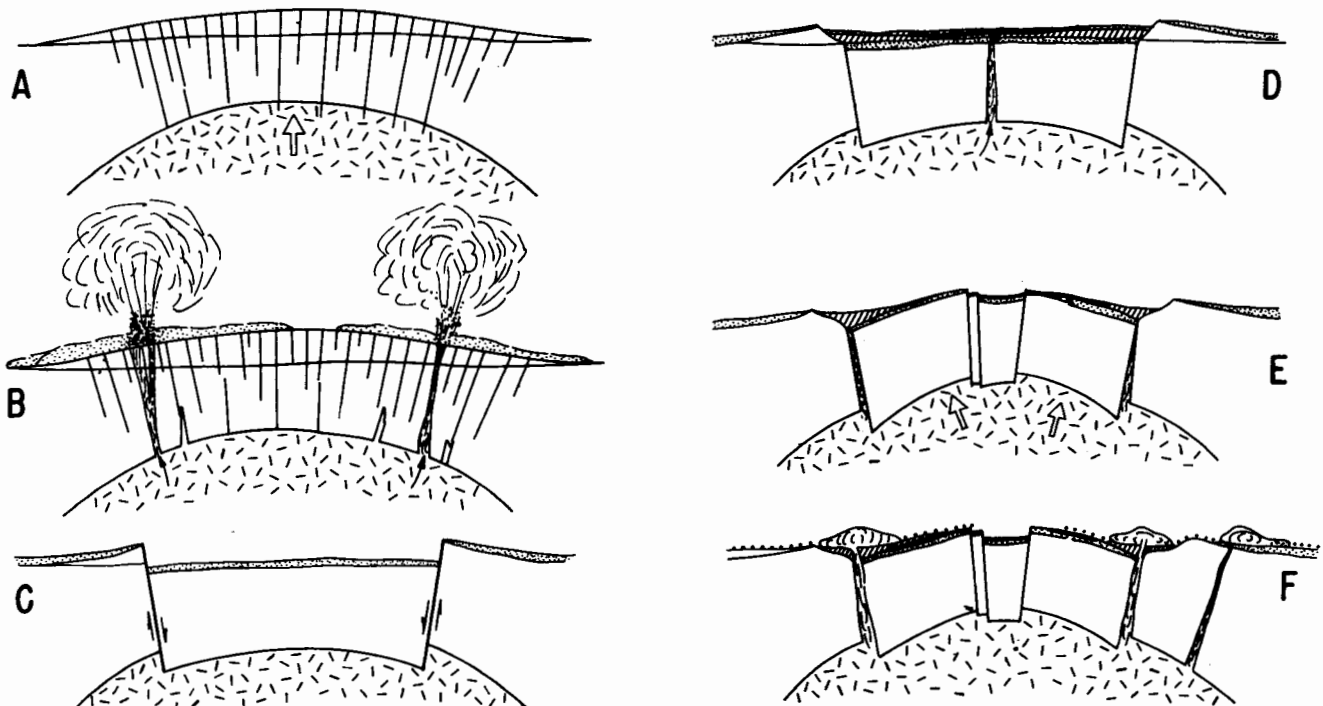
Existen pocos datos para comprobar la existencia de una fase de levantamiento regional en el área de La Primavera, durante su etapa temprana de evolución (fase I de Smith y Bailey); es decir, antes de la emisión de la Toba Tala. Sin embargo, si se considera la altura de este depósito piroclástico, se observa una disminución progresiva en altura, desde el oriente hasta el poniente, que equivale a una pendiente del orden de $1-2^\circ$, lo que podría considerarse como la pendiente original del área levantada antes de la erupción. Este proceso de deformación, que se debe al aumento de la presión en la cámara magmática, provoca la formación de fracturas anulares (*ring fractures*) que guiarán hacia la superficie los primeros magmas (Figura 2).

La Toba Tala fue originada por erupciones ubicadas probablemente sobre estas fracturas, como lo demuestra la distribución espacial de este material. Esta toba cubre una extensión mucho más amplia que la señalada por Mahood (1977, fig. 2). Se observa alrededor de toda la Sierra La Primavera, menos en el flanco suroriental (Figura 1). Al norte se encuentra debajo de depósitos de pómez y cenizas más recientes (*pumice falls*), en el pequeño desnivel que se observa entre la Venta del Astillero y Ciudad Granja (Figura 1); asimismo, aparece entre Santa Margarita y Zapopan, en los cortes de los arroyos. Al sur, también se puede comprobar la presencia de la Toba Tala, entre San Isidro Mazate-

pec y Cuexpala. En la parte central, limitada por el anillo de domos riolíticos, este depósito piroclástico aflora en los arroyos principales. En el Arroyo del Gallo, ubicado al oriente del Cerro El Pedernal (Figura 1), en la toba se observan bombas con "cor-teza de pan" que alcanzan hasta 50 cm de diámetro. Tales fragmentos, representativos del magma enfria-do rápidamente, muestran el contacto del magma con agua durante su ascenso, probablemente al cruzar un nivel freático. Las bombas presentan además un aspecto brechoide, resultado de una mezcla de dos tipos de lavas, una con fenocristales y la otra afírica, lo que confirma, desde el principio de la evolución en la cámara magmática, la presencia de dos tipos de magmas, como lo subraya Mahood (1977), para los domos riolíticos.

Existen diferentes unidades de toba, tal como lo demuestran las variaciones de facies, pero se trata siempre de derrames de cenizas (*ash flows*), con pómez en cantidad menor. En el Cañón de Las Flores, entre dos unidades piroclásticas, se observa un material burdo, formado por numerosos fragmentos de ignimbritas y andesitas probablemente constituyentes del sustrato de la caldera; tales depósitos corresponden sin duda con explosiones freato-magmáticas, el magma "fresco" está presente en la forma de fragmentos de obsidiana.

Tomando en cuenta la superficie que cubre la Toba Tala, y considerando un espesor promedio de 50 m para esta formación, se puede estimar en 15 km^3 (equivalente roca) el volumen emitido durante esta primera erupción en La Primavera. Como resultado del vaciado rápido de la cámara magmática



A.—Levantamiento regional en relación con el desarrollo de la cámara magmática.

B.—Emisión de la Toba Tala.

C.—Hundimiento en caldera.

D.—Sedimentación lacustre y emisión del derrame pumfítico.

E.—Formación de un domo de "resurgimiento".

F.—Desarrollo de los domos riolíticos sobre las fracturas concéntricas y emisiones de pómez asociadas.

Figura 2.—Diferentes etapas del desarrollo de la caldera de La Primavera, utilizando el esquema de Smith y Bailey, 1968.

que se produce generalmente después de la emisión de tobas, un hundimiento de la parte central, a lo largo de las fallas anulares, conduce a la formación de una caldera (Figura 2). En La Primavera no existen desniveles importantes que permitan detectar a primera vista una caldera. Sin embargo, el pequeño acantilado de 30 m y de forma curva que se sigue al norte, desde la Venta del Astillero hasta Ciudad Granja (Figura 1), probablemente marca el límite septentrional de la caldera. Al noroeste, en el Cañón de Las Tortugas, afloran riolitas terciarias pertenecientes al Cerro Tepopote (Figura 1), lo que indica que esta área está fuera de la caldera; el límite de ésta probablemente corresponde con la falla de Río Caliente (Mahood, 1977), donde son numerosos los manantiales de agua caliente y las huellas de alteración hidrotermal. En las demás áreas de La Primavera, no existen evidencias de campo para ubicar el límite de la caldera. Sin embargo, debe hacerse notar que los domos riolíticos más meridionales han producido derrames que fluyeron hacia la periferia del macizo, lo que indica que se formaron en el flanco de la zona levantada y afuera de la zona central hundida. Por lo tanto, el límite probable de ésta se encontrará entre los dos anillos de riolitas (Figura 1).

El colapso de poca importancia que se produjo en la caldera de La Primavera puede explicarse por la cantidad reducida de toba que se emitió durante la primera erupción. Esta, que suma 15 km³, forma un volumen muy limitado en comparación con los 100 ó 1,000 km³ indicados como orden de magnitud por Smith y Bailey (1968) o con los 150 ó 200 km³ frecuentes en las calderas del Tibesti (Vincent, 1963). Considerando que la zona central como fue delimitada tiene una superficie de 130 km², el hundimiento producido por la erupción de la Toba Tala no pudo haber superado los 150 m.

La formación de una caldera propicia que existan lagos en la zona deprimida. En La Primavera, tales depósitos se observan en toda la parte central comprendida dentro del anillo interno de domos, donde cubren la Toba Tala. Estos sedimentos son de color blanco, muy finos, tienen el aspecto de diatomitas y contienen en algunos niveles fragmentos de pómez que flotaban en agua (*ponces flottées*). Los depósitos lacustres forman la parte superior de mesetas sub-horizontales, que se encuentran muy disectadas por la red hidrográfica, y su espesor puede alcanzar más de 100 m. En el Arroyo del Gallo, al oriente del Cerro El Pedernal (Figura 1), se observa un derrame pumítico de riolita entre los sedimentos. Este derrame fue arrojado bajo el agua, como lo atestiguan las formas en almohadillas que se desarrollaron, y es muy extendido, puesto que se distingue también en las mesetas ubicadas al poniente del Arroyo Arena Grande (Figura 1). La lava que forma este derrame es afírica y representa la primera emisión volcánica posterior a la formación de la caldera. Desde el punto de vista vulcanológico, también constituye un elemento interesante, ya que hasta la fecha no se han descrito formas en almohadillas en material riolítico.

La altura promedio de los depósitos lacustres en la caldera de La Primavera es de 1,800 m; se encuentran encima del nivel de la Planicie de Guadalupe (1,600 m.s.n.m.). Esto podría explicarse

con una deformación posterior de la zona central.

También puede deducirse la existencia de un levantamiento central, correspondiente con la formación de un "domo de resurgimiento" (*resurgent cauldron*), si se compara la altura de la Toba Tala en la caldera (1,750 m en el Arroyo del Gallo), con la que tiene esta formación en las zonas externas (1,500 m al oeste de los domos). Los depósitos lacustres tienen 1,800 m de altura y se encuentran a más de 150 m arriba del margen septentrional de la caldera (desnivel La Venta-Ciudad Granja). Si se considera que estos depósitos se formaron después de la fase de hundimiento, cuya magnitud se estimó en 150 m, puede deducirse que el levantamiento ligado a la fase de domo de resurgimiento (Smith y Bailey, 1968) fue del orden de 250 m - 300 m. El levantamiento afectó toda la zona central, razón por la cual ya no se manifiesta desnivel topográfico en los bordes de la caldera, aunque con un grado mayor en la región de la Mesa El Nejahuete, como lo indica la red de arroyos que se observa en la zona central. Según Smith y Bailey (1968), tales movimientos verticales, presentes en la mayoría de las calderas, se deben a la subida de plutones en la parte interna de la caldera y/o a la intrusión de magmas a lo largo de las fracturas concéntricas (Figura 2).

El vulcanismo a lo largo de las fracturas concéntricas corresponde con el desarrollo de los aparatos riolíticos (Figura 2); en La Primavera son 20 los principales domos que se formaron, agrupados sobre dos sistemas de fracturas concéntricas. Los que constituyen el anillo externo están mejor conservados y confirman la cronología establecida por Mahood (1977). Sin embargo, esta sucesión en el tiempo, lava porfídica - lava afírica, no se verifica en algunos casos, como en el Cerro Las Planillas, en donde el domo de riolita afírica fue destruido en toda la parte meridional por explosiones *vulcanianas* en relación con el desarrollo de un nuevo aparato, el cual alimentó hacia el sur dos derrames de riolita porfídica (Figura 1). Cerca del Cañón de Las Flores, un derrame de obsidiana está también cubierto por las lavas porfídicas de las mesetas El León y El Burro (Figura 1). Tomando en cuenta los datos K/Ar de Mahood (1977), se puede evaluar la duración de la fase de construcción de los domos en 70,000 años; la última erupción fue la del Cerro El Colli, hace 30,000 años (Figura 1).

La emisión de lava por cada uno de los domos estuvo precedida por fases explosivas, durante las cuales se emitieron grandes cantidades de pómez y cenizas (*pumice falls*). Si en general se observan niveles poco espesos de pómez y cenizas que indican erupciones cíclicas, existen también grandes espesores de material pumítico, que alcanzan 5 m en el flanco suroriental del Cerro Las Planillas, correspondientes a erupciones *plinianas*; es decir, emisión continua de pómez por un conducto abierto. Además, son escasos los fragmentos ajenos al magma, indicando vías de acceso fáciles hacia la superficie. Estas pómezes forman una capa continua sobre la mayoría de los relieves de la Sierra La Primavera y de los alrededores, lo que demuestra sus características de pómez de caída aérea (*pumice falls*), contribuyendo así a borrar los límites de la caldera. La presencia de estratificaciones irregulares en estos depósitos de-

muestra que ciertas fases de erosión se desarrollaron entre dos períodos explosivos; es decir, entre el desarrollo de dos domos sucesivos. Esto no debe confundirse con las amplias ondulaciones, visibles a lo largo del camino que penetra en la parte meridional de la Sierra La Primavera. Tales rasgos corresponden a depósitos relacionados con "explosiones rasantes" (*base surge*), es decir, explosiones horizontales que se desarrollan en la base de una columna explosiva vertical. Estas formas de depósitos se observan en las explosiones freato-magmáticas, ya sea en los *maares* (Schmincke *et al.*, 1973), o en las islas oceánicas; el ejemplo más representativo corresponde a la erupción de Surtsey al sur de Islandia (Thorarinsson, 1964).

En los depósitos pumíticos se logran reconocer dos tipos de pómez con aspecto morfológico diferente: (1) pómez de forma irregular, con vesículas de gas muy alargadas y paralelas, constituidas únicamente por un vidrio transparente que se quiebra fácilmente; (2) pómez más redondeadas, de color blanco, en las cuales se observan fenocristales y vesículas no alineadas. Se trata de los dos tipos de magma que construyeron los domos. Cabe señalar que, en ocasiones, las dos formas de pómez están presentes en un mismo depósito.

Al final de las erupciones riolíticas, la caldera permanece en una fase únicamente con emisión de vapor y aguas calientes. La caldera de La Primavera se encuentra actualmente en este estado. En efecto, si se considera que la duración total de la actividad para formar los 20 domos fue de 70,000 años, y que la última erupción ya tiene 30,000 años de haber ocurrido, existen pocas posibilidades de que otra erupción riolítica se presente. Las aguas calientes son frecuentes en La Primavera, sobre todo en el límite noroccidental, con los balnearios de Cañón de Las Flores, La Primavera y Río Caliente; el de Agua Caliente, al sur (Figura 1), se localiza fuera del límite de la caldera. Mahood (1977) señala la presencia de vapor en la parte alta de la Mesa El Nejahuete. Estas manifestaciones tardías están relacionadas con la cristalización del magma en profundidad bajo la forma de plutones (Smith y Bailey, 1968).

En conclusión, las observaciones llevadas a cabo por los autores en la Sierra La Primavera permiten reconocer en esta estructura las diferentes etapas del desarrollo de una caldera. La sucesión de los eventos es la siguiente: (1) levantamiento regional, (2) emisión de tobas sin piroconsolidación (Toba Tala), (3) hundimiento en caldera relacionado con el vaciado rápido de la cámara magmática, (4) sedimentación lacustre y vulcanismo de la caldera (derrame pumítico), (5) levantamiento de la zona central formando un domo de resurgimiento, (6) desarrollo de los domos riolíticos a lo largo de las fracturas anulares, (7) manifestaciones hidrotermales tardías. Estas consideraciones permiten poner en duda la interpretación vulcanológica preliminar de Mahood (1977), según la cual la caldera de La Primavera se encuentra en su primera fase. La discrepancia en la interpretación consiste en la inadecuada ubicación estratigráfica de la Toba Tala como última manifestación volcánica (Mahood, 1977), y no considerarla como la primera erupción volcánica importante.

Es de particular importancia considerar este factor para los riesgos que representa la Sierra La Primavera, especialmente en relación a la existencia de una ciudad de la importancia de Guadalajara a menos de 20 km de distancia. La reconstrucción de la historia volcánica de la caldera que aquí presentamos elimina casi por completo la probabilidad de una erupción volcánica importante, habiendo ocurrido la última hace 30,000 años. Aún cuando se llevase a cabo otra erupción, correspondería a la llegada de otro domo riolítico, y ocasionaría únicamente caídas aéreas de pómez alrededor del punto de salida. La etapa más peligrosa del desarrollo de una caldera, la emisión de grandes volúmenes de derrames de cenizas, ocurrió en La Primavera hace más de 100,000 años, y no se conocen ejemplos en donde esta fase se produjese en dos ocasiones.

Otra aplicación importante del estudio vulcanológico de esta área es la explotación de la energía geotérmica. Las calderas constituyen zonas muy favorables para esta forma de energía, como lo demuestran los estudios realizados en la caldera de Valles en Nuevo México (Smith *et al.*, 1970). La Sierra La Primavera representa un lugar potencial como lo atestiguan los numerosos manantiales de agua caliente, que no se deben a la presencia de una cámara magmática (Mahood, 1977), sino a la formación de cuerpos graníticos. Al encontrarse la caldera La Primavera en su etapa final de evolución, se caracteriza en efecto por la cristalización en profundidad del magma bajo la forma de plutones, que generan flujos de calor importantes. Esta fase tiene una duración en función al tamaño de las masas que cristalizan. En La Primavera, como se demostró por el estudio vulcanológico, el volumen de toba y lava es, en comparación con otras calderas, bastante reducido. Esto puede significar que el volumen de magma en la cámara magmática no fue importante, o que parte de éste cristalizó en profundidad. De cualquier forma, la importancia de estas masas plutónicas puede evaluarse mediante la geofísica, la cual permite tener una buena evaluación del campo geotérmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Mahood, G. A., 1977, A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista, v. 1, p. 177-190.
- Schmincke, H. U., Fisher, R. V., y Waters, A. C., 1973, Antidune and chute pool structures in the base surge deposits of the Laacher see area, Germany: Sedimentology, v. 20, p. 553-574.
- Smith, R. L., y Bailey, R. A., 1968, Resurgent cauldrons: Geol. Soc. America, Mem. 116, p. 613-662.
- Smith, R. L., Bailey, R. A., y Ross, C. S., 1970, Geologic map of the Jemez Mountains: New Mexico, U. S. Geol. Survey, Map I-571, Escala 1:125,000.
- Thorarinsson, Sigurdur, 1964, Surtsey, the new island in the North-Atlantic: Reykjavik, Almenna Bokafelagid. 64 p.
- Vincent, P. M., 1963, Les volcans tertiaires et quaternaires du Tibesti occidental et central (Sahara du Tchad): B.R.G.M. Mém. 23, 304 p.