

GEOLOGÍA DEL VOLCÁN ZAMORANO, ESTADO DE QUERÉTARO

Gerardo Carrasco-Núñez¹,
Marcos Milán² y
Surendra P. Verma³

RESUMEN

El volcán Zamorano, situado en la porción centroseptentrional del Cinturón Volcánico Mexicano, a casi 465 km de distancia de la Trinchera Mesoamericana, es un estratovolcán andesítico de edad miocénico-pliocénica, al cual se encuentran asociados importantes volúmenes de ignimbritas de composición riolítica, estimados en 27 km³. La secuencia evolutiva de este aparato se puede resumir en las siguientes etapas: (a) edificación de un volcán central constituido por derrames de lava y piroclásticos intercalados, de composición andesítica; (b) emisión de grandes volúmenes de ignimbritas originadas a partir de erupciones muy explosivas, de tipo San Vicente; y (c) emplazamiento de domos dacítico-andesíticos, uno de los cuales ocupa la parte central del cono, y de derrames de lava andesítica en forma de mesas. Las características químicas, mineralógicas y volumétricas de sus productos permiten inferir la presencia de una cámara magmática emplazada someramente, cuyo volumen se ha estimado en 477 km³.

Palabras clave: vulcanismo, estratovolcán, volcán Zamorano, Querétaro, México.

ABSTRACT

The Zamorano volcano is located in the north-central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, at almost 465 km from the Middle American Trench. It is an andesitic stratovolcano with a Miocene-Pliocene age, to which important volumes of rhyolitic ignimbrites, estimated in about 27 km³, are associated. The evolution of this volcano can be summarized in three different stages: (a) construction of a central volcano formed by andesitic lava flows intercalated with pyroclastics; (b) large volumes of ignimbrites were produced by Saint Vincent-type eruptions; and (c) rise of a dacitic dome-spine on the central crater, and eruption of andesitic lava flows forming little plateaus. The chemical, mineralogical and volumetric characteristics of their products suggest the existence of a shallow and large magmatic reservoir whose volume has been estimated in about 477 km³.

Key words: volcanism, stratovolcano, Zamorano volcano, Querétaro, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El volcán Zamorano se localiza 40 km al noreste de la ciudad de Querétaro, en las coordenadas 20°56'N y 100°10'W (Figura 1). Se trata de un estratovolcán con una altura de 3,400 m s.n.m., construido sobre una topografía irregular, cuyo nivel inferior es de 1900 m s.n.m. Presenta la forma de un cono truncado y subredondeado hacia su cima, configurando una pequeña caldera de forma elíptica cuyos ejes son de 2300 y 3300 m de diámetro, respectivamente, y en cuyo interior se encuentra un domo de 1500 m de diámetro (Figura 2). El cono presenta un fracturamiento radial y se encuentra bisectado simétricamente por una fractura mayor orientada NE-SW que sigue aproximadamente el curso del Arroyo Hondo. La extensión de esta fractura es un poco menor que el diámetro basal del volcán, pero no llega a cortar a los derrames piroclásticos que lo rodean (Figura 3).

Este volcán presenta una evolución interesante, pues constituye uno de los pocos estratovolcanes de tamaño mode-

rado que, a pesar de los grandes volúmenes de ignimbritas que emitió, aún conserva su estructura original. Es posible que la actividad de este centro pueda correlacionarse con la observada en áreas adyacentes, como en las calderas de Huichapan (Yáñez-García, 1984; Milán *et al.*, 1988) y Amealco (Carrasco-Núñez *et al.*, 1988) que son de edad pliocénica. En esta forma, podría considerarse al Zamorano como el sexto centro silícico del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), en adición a los cinco ya propuestos por Ferriz y Mahood (1986).

A pesar de la importancia geológica que el volcán Zamorano pudiera tener en un contexto regional, no existen trabajos de este tipo en la zona, lo cual motivó la realización del presente estudio, que consiste en un reconocimiento de campo a semidetalle, apoyado por trabajos de laboratorio (petrografía y análisis químicos). Los resultados derivados de esta investigación son presentados a continuación.

SECUENCIA VOLCÁNICA

El vulcanismo manifestado por esta estructura fue de tipo central, siendo emitido un volumen de roca estimado en cerca de 60 km³, de lavas andesíticas y dacíticas, y material piroclástico riolítico, mientras que sólo una pequeña proporción de lavas andesíticas, estimada en 7 km³ fue emitida de manera periférica, posiblemente a través de fracturas anulares.

Las unidades definidas en este trabajo fueron nombradas considerando el elemento geográfico más próximo a la lo-

¹ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D. F.

Dirección actual: Department of Geology and Geological Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI 49931, E. U. A.

² Ciencias de la Tierra, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero, 07360 D. F.

³ Departamento de Geotermia, División Fuentes de Energía, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Apartado Postal 475, 62000 Cuernavaca, Morelos.



Figura 1.- Localización del volcán Zamorano en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).

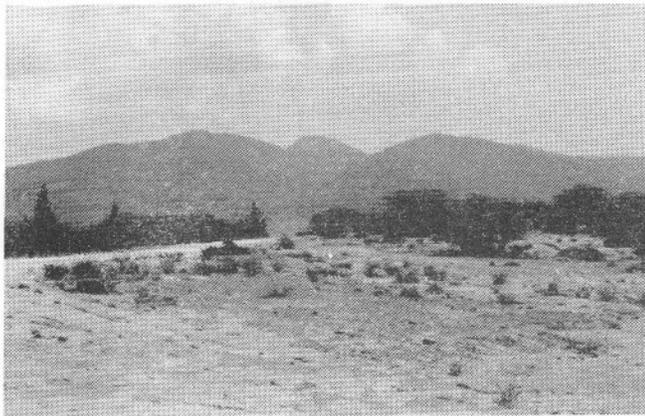


Figura 2.- Perfil característico del volcán Zamorano con un domo ocupando el centro del cráter. En primer plano, se observa los derrames ignimbriticos asociados al volcán.

calidad más característica. Las muestras de cada unidad que fueron caracterizadas petrográficamente están señaladas en la Figura 3 y se hará referencia a ellas en su oportunidad. A continuación se describe las unidades litológicas que integran al campo volcánico, empezando por la más antigua.

ANDESITA ARROYO HONDO.

Con este nombre se designa a unos derrames predominantemente andesíticos, intercalados con algunos horizontes piroclásticos, que afloran a lo largo del arroyo del mismo nombre y forman la estructura principal del volcán Zamorano.

En la parte basal de la secuencia existen derrames masivos y parcialmente lajeados de andesita basáltica de color gris oscuro, con textura afanítica, en ocasiones porfídica y anisotrópica; algunas veces también están presentes algunos xenolitos riolíticos. La secuencia está compuesta por microlitos orientados de labradorita y microfenocristales de orto- y clinopiroxeno (muestras ZA8 y ZA28) y, en algunos casos, olivino y óxidos de Fe y Ti, rodeados todos por una matriz vítrea (ZA30b). En la parte superior, se tiene una andesita porfídica de color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa maclada y zonada (andesina y oligoclasa-andesina), clino- y ortopiroxeno, en una matriz hialopílica (ZA2, ZA9 y ZA27). Estas andesitas están presentes en capas individuales que varían desde 5 hasta 10 m de espesor y suelen alternar con depósitos piroclásticos medianamente consolidados, tanto de caída libre en la parte media y superior de la secuencia, como de flujo en la parte superior. Estos últimos están compuestos principalmente por fragmentos de roca, escoria y material juvenil de composición andesítico-basáltica (ZA26).

La andesita Arroyo Hondo está cubierta discordantemente por la ignimbrita Zamorano; sin embargo, no aflora el contacto inferior de esta unidad, que representa las emisiones más antiguas del volcán. Por esta razón, se desconoce el espesor total de la misma, aun cuando puede estimarse en no menos de 100 m.

Los volúmenes emitidos por la Andesita Arroyo Hondo fueron calculados conservadoramente en 32 km^3 (Figura 4), haciendo una analogía con la geometría de un cono truncado de 850 m de altura y 5 km de radio, que comparativamente es muy similar a la morfología que presenta el volcán.

Por otra parte, la edad de esta unidad fue considerada como pliocénica temprana o miocénica tardía, con base en su expresión geomorfológica que es parecida a la que muestran algunas estructuras volcánicas de áreas vecinas como Huichapan o Amealco, cuya edad es definitivamente pliocénica (Yáñez-García, 1984; Milán *et al.*, 1988; Sánchez-Rubio, 1983; Carrasco-Núñez, 1988). A pesar de esa consideración, en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) se fechó una de las muestras (ZA8), procedente de la parte basal de la secuencia ($20^{\circ}54'50''\text{N}$ y $100^{\circ}12'00''\text{W}$). Esta roca se analizó por roca total empleando el método K-Ar, para lo cual fueron utilizados los siguientes valores: 1.5349% de K, 57% de ^{40}Ar radiogénico y 29.1392×10^{-12} moles/g de ^{40}Ar , obteniéndose una edad de $10.9 \pm 0.5 \text{ Ma}$. Las constantes de decaimiento empleadas fueron: $\lambda_e = 0.582 \times 10^{-10}/\text{años}$ y $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10}/\text{años}$.

IGNIMBRITA ZAMORANO

Se propone en este artículo el nombre de "ignimbrita Zamorano" para designar a un grueso paquete de depósitos de flujo piroclástico intercalados con algunos horizontes de ceniza de caída libre, que se encuentran ampliamente distribuidos en torno al volcán Zamorano. La ignimbrita Zamorano se ha subdividido en dos unidades: superior e inferior, cuyo contacto está marcado por un escarpe de erosión que se desarrolla en casi todo el ambiente ignimbritico.

Unidad inferior

Esta unidad se distribuye ampliamente en la zona, alcanzando radios de 12 a 16 km de extensión. Está constituida por una secuencia de 50 a más de 150 m de espesor de ignimbritas

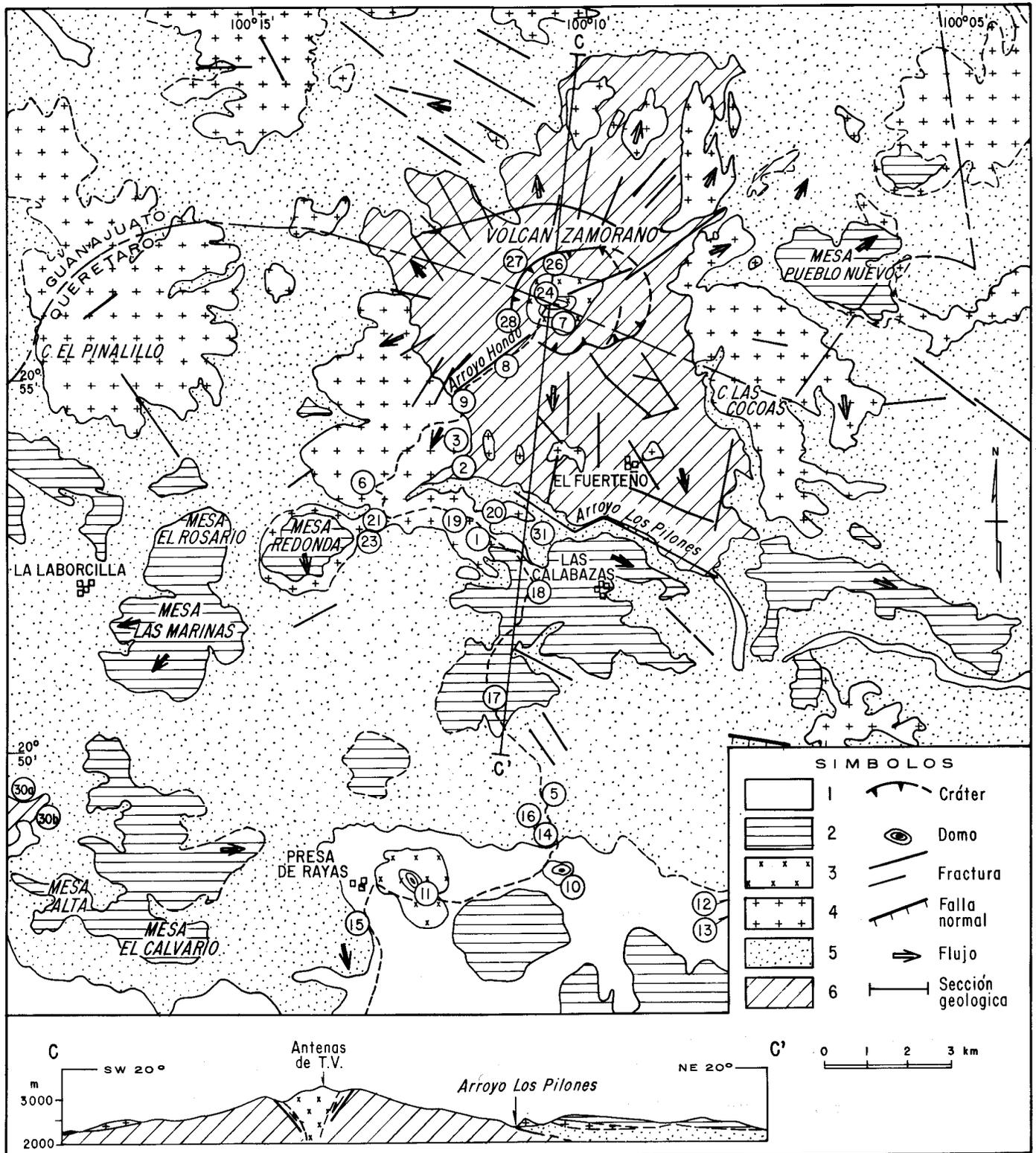


Figura 3.- Mapa geológico del área que comprende el volcán Zamorano (modificado de Carrasco-Núñez, 1988). Símbolos: 1 = aluvión; 2 = andesita Mesa Redonda; 3 = dacita del domo central; ignimbrita Zamorano 4 = unidad superior, 5 = unidad inferior; 6 = andesita Arroyo Hondo. Los números encerrados por un círculo corresponden a las muestras empleadas en este artículo; para fines prácticos se eliminó el prefijo "ZA".

irregularmente piroconsolidadas que, hacia la base de la columna, contiene algunos horizontes delgados de tobas de caída libre. Estas últimas son de color crema y están compuestas predominantemente por pómez dacítica, cristales de cuarzo, fel-

despato y biotita, con una ligera alteración a caolín, y algunas concreciones de sílice de forma esférica (ZA31b); presentan una estratificación bien definida en la ladera meridional del arroyo Los Pilonés. Las ignimbritas, por su parte, están pre-

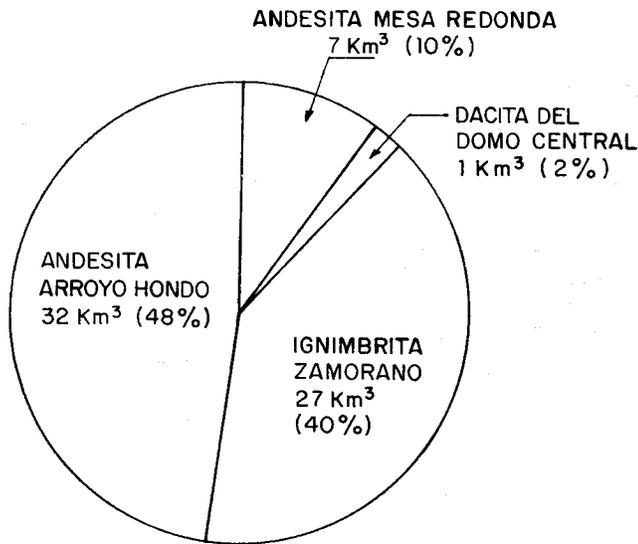


Figura 4.- Porcentaje del volumen de las unidades de roca que componen el volcán Zamorano.

sentes en unidades de enfriamiento masivas, muy compactas y de color predominantemente rosado. Petrográficamente, están compuestas por cristales de cuarzo, sanidino, oligoclasa, biotita (parcialmente alterada) y hematita; y por vidrio de color pardo claro, desvitrificado (ZA14, ZA16, ZA23, ZA30a y ZA31); además, contienen algunos fragmentos de roca de composición riolítica y cristales de zircón, con una textura fluidal muy característica (ZA5). La predominancia del vidrio permite nombrar a estas rocas de manera general como ignimbritas vitrocrystalinas piroconsolidadas de naturaleza riolítica (Tabla 1), en la inteligencia de que existen variaciones laterales donde predominan los fragmentos de pómez de la misma composición, sobre todo en los afloramientos más alejados del volcán a 12 km de distancia (ZA13).

Unidad superior

Esta unidad aflora en los cerros El Pinalillo y Las Coas, y en las laderas suroccidental y nornororiental del volcán (Figura 3). Comprende varias capas individuales de ignimbritas consolidadas, de 10 a 15 m de espesor que, en su parte superior, suelen presentar un típico fracturamiento columnar (ZA1, ZA19 y ZA20; Figura 5), expresado en algunos frentes de los derrames expuestos. Las direcciones de flujo de estas ignimbritas son claramente observables en fotografías aéreas e imágenes de satélite y son una prueba indiscutible de que la procedencia de estas rocas definitivamente deriva del conducto central que alimentó al volcán Zamorano. Por su parte, la composición química de estas unidades es riolítica (Tabla 1) y están compuesta por cristales de cuarzo y oligoclasa zonada y, en algunos casos, por óxidos de Fe y Mn, así como por fragmentos de roca andesítica y riolítica (ZA21). Algunas veces aparecen cristales de anfíbol oxidado (ZA21), ortopiroxeno o sanidino (ZA1 y ZA6), dentro de una matriz vítrea fluidal con esferulitas abundantes (ZA20). Este miembro carece de tobas de caída libre.

Resulta evidente que entre la emisión de la andesita Arroyo Hondo y el emplazamiento de la ignimbrita Zamorano ocurrió un período prolongado de calma eruptiva, ya que el intenso fracturamiento que afectó al cono se interrumpió bruscamente en la ignimbrita Zamorano (Figura 3). De esta forma, puede asegurarse que la edad de la ignimbrita sea mucho menor que 10.9 Ma. Respecto a los volúmenes emitidos, se estimó que la ignimbrita queda circunscrita en un área de aproximadamente 450 km² y que, considerando un espesor de 60 m en promedio, se obtiene como resultado un volumen total de 27 km³, es decir 40% del volumen total del campo (Figura 4). Por otra parte, en algunos sitios esta unidad suele estar coronada por los derrames de lava correspondientes a la andesita Mesa Redonda.

Tabla 1.- Análisis químicos de las rocas pertenecientes al volcán Zamorano.

Muestra Roca	ZA22 AND.	ZA26 AND.	ZA8 AND.	ZA10 DAC.	ZA2 DAC.	ZA7 DAC.	ZA16 IGN. RIOL.	ZA30a IGN. RIOL.	ZA21 IGN. RIOL.	ZA6 IGN. RIOL.	ZA14 IGN. RIOL.	ZA20 IGN. RIOL.	ZA1 IGN. RIOL.	ZA3 IGN. RIOL.
SiO ₂	56.99	59.65	61.10	63.01	63.80	64.63	70.13	72.54	74.24	75.16	75.21	75.33	75.90	76.96
TiO ₂	0.90	1.04	0.83	0.89	0.98	0.90	0.23	0.19	0.06	0.12	0.10	0.06	0.24	0.08
Al ₂ O ₃	18.28	16.96	18.49	17.40	16.07	18.23	16.42	15.62	15.27	12.98	14.90	14.99	13.64	11.28
FeO _{total}	4.23	3.75	4.70	3.19	4.61	4.45	2.29	1.42	1.03	2.24	1.08	1.02	2.16	1.39
MnO	-	-	0.09	0.08	0.09	0.09	-	-	-	0.01	-	-	0.05	0.06
MgO	2.99	2.73	2.53	3.42	2.45	2.00	1.64	1.84	1.50	0.56	1.47	1.34	0.38	0.14
CaO	10.82	9.80	5.36	5.00	5.27	4.77	1.66	1.73	1.00	0.43	1.42	0.79	0.95	0.41
Na ₂ O	3.35	3.65	1.20	3.10	3.60	1.66	1.60	1.10	2.50	2.10	0.80	2.70	1.75	2.50
K ₂ O	1.70	1.78	2.03	2.12	1.83	1.75	3.80	4.55	4.26	4.55	4.36	4.55	4.06	4.83
P ₂ O ₅	-	-	0.05	-	0.30	0.10	-	-	-	0.14	-	-	-	0.08
H ₂ O ⁺	0.60	1.10	1.26	0.71	0.26	0.57	1.46	0.66	0.72	1.04	0.86	0.14	0.68	0.44
H ₂ O ⁻	0.36	0.01	0.49	0.44	0.73	0.33	0.24	0.76	0.38	0.47	0.22	0.10	0.91	1.15
Total	100.22	100.47	99.13	99.36	99.99	99.48	99.55	100.41	100.96	99.80	100.42	101.04	100.72	99.32
Unidad	AMR	AAH	AAH	DDC	AAH	DDC	IZI	IZI	IZS	IZS	IZI	IZS	IZS	IZS

Roca: AND. = andesita, DAC. = dacita, IGN. RIOL. = ignimbrita riolítica.

Unidad: AAH = andesita Arroyo Hondo, IZI = ignimbrita Zamorano inferior, IZS = ignimbrita Zamorano superior, DDC = dacita del domo central, AMR = andesita Mesa Redonda.

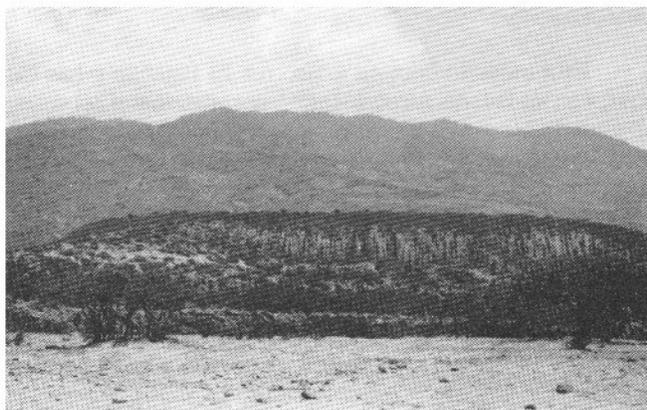


Figura 5.- Estructura columnar de la ignimbrita Zamorano (unidad superior). Sobreyace discordantemente a la andesita Arroyo Hondo que aparece al fondo, formando parte de la estructura principal.

DACITA DEL DOMO CENTRAL

El domo que ocupa la parte central del cráter está formado por derrames lajeados de lava dacítica (Tabla 1) de color gris claro y textura porfídica, holocristalina, constituidos por cristales de plagioclasa zonada (oligoclasa y andesina), clinopiroxeno, ortopiroxeno, magnetita (ZA24) y, en casos excepcionales, biotita (ZA7). La textura que presentan estos derrames, así como su forma, permiten considerar a esta estructura como parte de una espina volcánica, que obstruyó el conducto principal del volcán.

Por otra parte, aproximadamente 14 km al sur del cráter (Figura 3), aparecen dos domos constituidos por dacita porfídica de color gris, compuestas por fenocristales de plagioclasa (oligoclasa y andesina), anfíbol, clinopiroxeno biotita y minerales opacos, dentro de una matriz de plagioclasa y vidrio desvitrificado (ZA10 y ZA11).

Se considera que el domo central se haya emplazado posteriormente a la andesita Arroyo Hondo y a la ignimbrita Zamorano, como un evento póstumo de la actividad magmática que ascendió a través del conducto principal, aun cuando se encuentre únicamente en contacto con la andesita Arroyo Hondo. El domo central no se encuentra afectado por la fractura que bisecta al volcán, lo que implica que fue emitido en forma posterior. Por otra parte, el volumen estimado para esta unidad es de 0.6 km^3 , aunque en la Figura 5 y en la Tabla 2 aparece este valor redondeado a 1 km^3 .

ANDESITA MESA REDONDA

En este artículo, se designa con el nombre de andesita Mesa Redonda a un grupo de derrames periféricos que aflora en la parte meridional del volcán, preferentemente en forma de mesas de 50 m de espesor promedio y longitudes que varían desde 1 hasta 5 km. Las mesas, que destacan por su característica forma plana, son: El Rosario, Las Marinas, Alta, El Calvario, Las Calabazas, Pueblo Nuevo y Redonda (Figura 3). Esta unidad está compuesta por andesitas de tendencia basáltica (Tabla 1), de color gris y gris oscuro, con fenocristales de plagioclasa (andesina y labradorita), ortopiroxeno, clinopiroxeno y óxidos de Fe y Mn, en una matriz hialopilitica (ZA12, ZA17, ZA18 y ZA22).

Los volúmenes de todas las manifestaciones que componen la andesita Mesa Redonda han sido estimados en 7 km^3

Tabla 2.- Volúmenes de magma involucrados en el volcán Zamorano. Explicación en el texto sobre la estimación de los volúmenes dejados en la cámara magmática.

Unidad de roca	Volumen de roca emitido (km^3)	Volumen de roca sólida equivalente (km^3)	SiO ₂ (%)	Volumen dejado en la cámara magmática (km^3)
Andesita Mesa Redonda	7	7	56-57	63
Dacita del domo central	1	1	64-65	9
Ignimbrita Zamorano	27	13	66-77	117
Andesita Arroyo Hondo	37	32	60-64	288
				477

(Figura 5). Las mesas sobreyacen a la ignimbrita Zamorano y seguramente su emplazamiento estuvo ligado a superficies de debilidad de tipo fisural, ya que además de ser formas tabulares de espesor más o menos constante, están aisladas y alejadas de posibles aparatos volcánicos fuente; sin embargo, no fue posible determinar su conexión directa con estructuras (fracturas) derivadas de un sistema tectónico particular. Aparentemente, representan los últimos eventos eruptivos asociados al sistema magmático y no están cubiertos por otra unidad.

GEOQUÍMICA

En la Tabla 1 se muestra los análisis químicos seleccionados de las muestras utilizadas en este estudio, mismas que están localizadas en la Figura 3. El análisis de los elementos mayores se realizó en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología (U.N.A.M.), empleando el método de fluorescencia de rayos X complementado con análisis por vía húmeda. Para ello, se utilizó un espectrómetro marca Phillips PW con ánodo de Cr.

En el diagrama TAS (*Total Alkali-Silica*) propuesto por Le Bas y colaboradores (1986; Figura 6) se aprecia un claro agrupamiento de las muestras representativas de la Ignimbrita Zamorano dentro del campo de la riolita, distinguiéndose en ella dos subgrupos donde la unidad inferior presenta un contenido en álcalis menor que el observado en la unidad superior. Las unidades restantes se concentran en los campos andesítico y dacítico de la serie calcalcalina. En esa misma gráfica las rocas ignimbríticas se encuentran separadas parcialmente del resto de los eventos, aspecto que podría estar asociado a la interrupción del vulcanismo que ocurrió entre ésta y el resto de las manifestaciones volcánicas del centro.

Los diagramas de variación (Figura 7), que utilizan como índice de fraccionamiento al MgO, muestran diferentes grados de correlación de los elementos mayores. Se observa que al disminuir los valores de MgO, se tiene un incremento general del SiO₂ y Na₂O+K₂O, y un decrecimiento en TiO₂, Al₂O₃, FeO total y CaO; de estos valores, el SiO₂ y el Al₂O₃ presentan una tendencia más lineal; sin embargo, en el caso del TiO₂ se visualiza una abrupta separación entre las lavas intermedias y los productos piroclásticos félsicos.

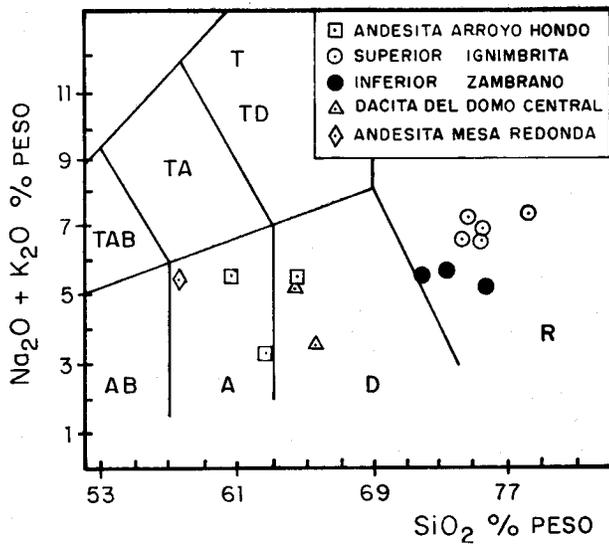


Figura 6.- Diagrama TAS (*Total Alkali-Silica*) propuesto por Le Bas y colaboradores (1986) como una clasificación geoquímica de las rocas ígneas. Clave: TAB = traquiandesita basáltica; TA = traquiandesita; TD = traquidacita; T = traquita; AB = andesita basáltica; A = andesita; D = dacita y R = riolita.

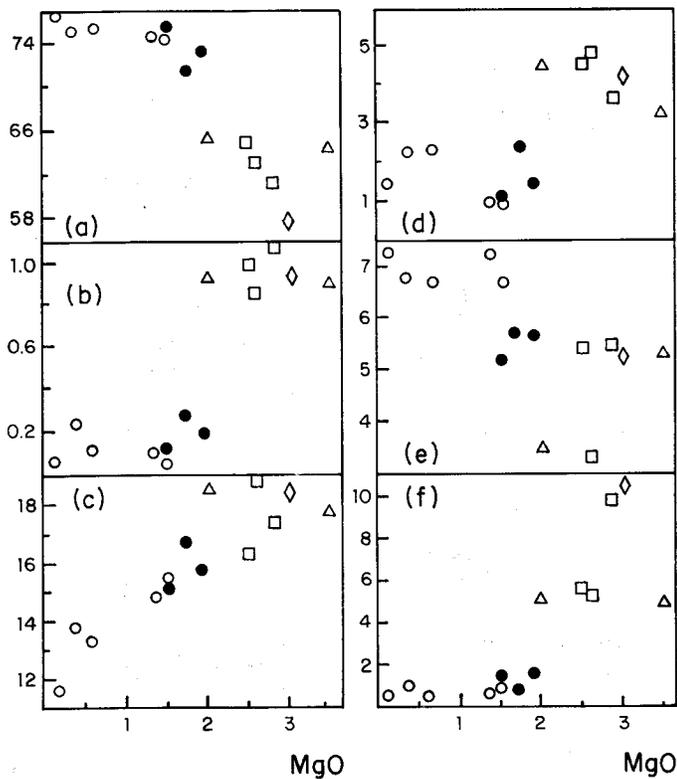


Figura 7. Diagramas de variación de óxidos vs. MgO. Símbolos iguales a los utilizados en la Figura 6. (a) SiO_2 , (b) TiO_2 , (c) Al_2O_3 , (d) $\text{FeO}_{\text{total}}$ (e) $\text{Na}_2\text{O}_4\text{K}_2\text{O}$, (f) CaO .

EVOLUCIÓN DEL VOLCÁN

La construcción del volcán Zamorano ha pasado por diferentes etapas, que han sido agrupadas en tres grandes episodios de vulcanismo: (a) la edificación de un estratovolcán; (b) el emplazamiento de la ignimbrita Zamorano; y (c) la emisión de domos y derrames periféricos de tipo fisural.

En la primera etapa, un cono central se fue erigiendo mediante el apilamiento sucesivo de lavas andesíticas de tendencia basáltica (labradorita, opx y cpx; y color oscuro) y textura afanítica, que progresivamente fueron cambiando a lavas más félsicas de textura porfídica, compuestas por dos piroxenos, plagioclasas macladas y ocasionalmente zonadas (oligoclasa-andesina). Químicamente, las rocas de la parte superior de la columna presentan un ligero incremento en los contenidos de SiO_2 y K_2O , así como decrementos relativos en los valores de MgO y CaO (Tabla 1), respecto a la base de la misma. Las variaciones mineralógicas y químicas antes descritas posiblemente sugieran que uno de los procesos dominantes en esa etapa fuese la cristalización fraccionada. El régimen explosivo de las erupciones se fue incrementando de tal forma que los depósitos piroclásticos que se originaron, quedaron eventualmente intercalados entre las coladas de lava.

Al cesar la actividad central, ocurrió un prolongado período de calma durante el cual se desarrolló un sistema de fracturamiento de tipo radial, en el que el cono fue seccionado diametralmente por una fractura de orientación NE-SW. Esto dio tiempo para que se formara una cámara magmática con un grado de zonación que probablemente incluyó, por lo menos, un nivel inferior dacítico y otro superior riolítico, como se infiere de la composición que presentan las pómez. Tal zonación pudo crearse por procesos de convección termogravitacional, de acuerdo con el modelo propuesto por Hildreth (1981) o, alternativamente, por separación de cristales (Cox *et al.*, 1979). Una sucesión de erupciones plinianas originó abundantes flujos piroclásticos, que de acuerdo con MacDonald (1972) pudieran clasificarse como de tipo San Vicente, en función de su distribución en todas direcciones y por estar compuestos esencialmente por material juvenil. A partir de los volúmenes de ignimbritas emitidos, se estimó un volumen para la cámara magmática hipotética del orden de 117 km^3 , según la proporción de 1 a 10 propuesta por Smith (1979), pero considerando en conjunto el volumen total de las manifestaciones volcánicas, el volumen de la cámara podría ser hasta de 477 km^3 (Tabla 2). Para estimar el volumen de roca sólida equivalente de la ignimbrita Zamorano, se utilizó un factor de 2:1 respecto al volumen de roca emitido, haciendo una comparación con la estimación realizada por Ferriz y Mahood (1984) para las ignimbritas Xaltipan y Zaragoza del campo volcánico de Los Humeros.

En la tercera etapa de desarrollo del centro volcánico fueron emplazadas lavas viscosas, dando lugar a la formación de un domo-espina en la parte central del cráter. Con este evento, quedó sellado el conducto principal, por lo que las emisiones dacíticas subsecuentes se encauzaron de manera periférica a través de pequeñas estructuras dómicas, localizadas en la porción meridional del volcán.

Contemporáneos o posteriores a estas últimas manifestaciones, numerosos derrames andesíticos de textura afanítica y apariencia basáltica fueron emitidos, que cubrieron discordantemente a la ignimbrita Zamorano y formaron mesetas singulares de algunos kilómetros de longitud. Al no encontrarse aparatos cercanos con los cuales pudiera relacionarse su actividad, su emplazamiento se atribuye a fracturas de dimensiones reducidas. El carácter químico de esas lavas es calciocalcínico, como el del resto de los eventos del volcán Zamorano, y de otros centros volcánicos localizados en la parte central del CVM (Carrasco-Núñez, 1988).

La composición química de estos últimos eventos es riolítica, dacítica y andesítica. Su mineralogía varía de la asociación de cuarzo, feldespato y biotita, a plagioclasa sódica, piroxeno y anfíbol, y a la asociación de plagioclasa sodico-cálcica, y piroxeno; sin embargo, en cada uno de esos eventos existieron interrupciones de tiempo significativas, que permiten suponer la interacción de otros procesos como son la reinyección y/o la mezcla de magmas, como en el caso del domo dacítico central cuya formación podría estar asociada a la existencia de dos depósitos de magma distintos, inferidos a partir de las diferencias en composición observadas entre el episodio andesítico de construcción del cono y la fase ignimbítica.

UBICACIÓN DEL VOLCÁN EN EL CONTEXTO REGIONAL

El volcán Zamorano representa una de las manifestaciones más alejadas del frente volcánico que constituye el CVM, a 465 km de distancia de la Trinchera Mesoamericana. Esta razón y el aparentemente fuerte grado de erosión que exhibe han motivado que virtualmente se le excluya de tal provincia al asignarle una edad miocénico-oligocénica (Demant, 1981). Asimismo, los volúmenes de ignimbritas que presenta este volcán han originado que algunos autores como Demant (*op. cit.*) tiendan a asociar este tipo de manifestaciones volcánicas más con la provincia de la Sierra Madre Occidental que con el CVM; sin embargo, el grado de conservación del cono principal y la relativa juventud que muestra el domo que se instaló en el centro del cráter, hacen pensar que el volcán sea mucho más joven, posiblemente pliocénico o, cuando más, miocénico tardío. En concordancia con estas observaciones, la edad radiométrica que se obtuvo de uno de los derrames andesíticos más antiguos del volcán (aunque con base en una sola muestra) es miocénica tardía (10.9 Ma), que es muy inferior al período (34 a 27 Ma) reportado por McDowell y Clabaugh (1981) para la secuencia superior de la Sierra Madre Occidental. Además, la etapa de vulcanismo mencionada por estos últimos autores es de naturaleza riolítica y se atribuye a grandes estructuras de tipo caldera, que fueron destruidas con el paso del tiempo, a diferencia del volcán Zamorano, cuya estructura principal es un estratovolcán y está bien conservada.

CONCLUSIONES

Del presente estudio, se deriva las siguientes conclusiones generales:

1. Se definió cuatro diferentes unidades, cuyas características son representativas de las etapas de evolución que tuvo el volcán.

2. La evolución del volcán Zamorano muestra acentuadas interrupciones que modificaron drásticamente su régimen eruptivo y la composición de sus productos. En un principio, fueron emitidas lavas y piroclásticos andesíticos que originaron la construcción del estratovolcán. Éste fue posteriormente afectado por un fracturamiento en donde destaca el sistema NE-SW. La reactivación del volcán fue extremadamente violenta, emplazándose numerosas unidades de flujo piroclástico de naturaleza riolítica, que concluyeron con erupciones tranquilas asociadas al ascenso del domo-espina dacítico que selló el conducto central. Las manifestaciones póstumas del centro quedaron representadas por derrames andesíticos encauzados periféricamente y de manera aparentemente fisural.

3. Los volúmenes de roca estimados para la ignimbrita Zamorano (27 km³) y para la andesita Arroyo Hondo (32 km³), que ocupan más del 85% del total emitido por el centro volcánico, sugieren la presencia de un depósito de magma de grandes dimensiones, estimado hipotéticamente en 477 km³, que alimentó al volcán durante un lapso prolongado.

4. El comportamiento químico de todos los productos que integran el volcán es de naturaleza calcialcalina. No se observa afinidad con las series alcalinas, como podría esperarse en los modelos tradicionales de arco-trinchera para ambientes alejados de la trinchera que, como en este caso, se manifiesta a aproximadamente 465 km de la Trinchera Mesoamericana.

5. La edad, tipo de estructura y grado de conservación de la misma, sugieren que el volcán Zamorano pertenezca a una de las fases tempranas de vulcanismo relacionadas con la formación del CVM.

AGRADECIMIENTOS

La etapa inicial de este estudio se efectuó en el Instituto de Investigaciones Eléctricas con la colaboración del CONACYT. El desarrollo y culminación del mismo fue realizado en el Instituto de Geología de la U.N.A.M. gracias al apoyo de su director, Dr. Fernando Ortega. La realización de los análisis químicos estuvo a cargo de las siguientes personas: Dr. Liberto De Pablo, Dr. Octavio Cano, Quím. Anastasio Lozano y Quím. Patricia Girón, del Instituto de Geología. El Ing. Baldomero Carrasco, el Dr. David Terrell y el Ing. Gustavo Murillo, de la Subdirección de Tecnología de Exploración del Instituto Mexicano del Petróleo, fecharon radiométricamente de una muestra. El manuscrito fue revisado por el Dr. James Luhr y por un árbitro anónimo a quienes se agradece sus valiosas sugerencias y comentarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carrasco-Núñez, Gerardo, 1988, Geología y petrología de los campos volcánicos de Los Azufres (Mich.), Amealco y El Zamorano (Qro.): Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de maestría, 148 p. (inédita).
- Carrasco-Núñez, Gerardo, Milán, Marcos, y Verma, S. P., 1988, Fases volcánicas de la caldera de Amealco: GEOMIMET (México), núm. 153, p. 69-82.
- Cox, K. G., Bell, J. D., y Pankhurst, R. J., 1979, The interpretation of igneous rocks: Londres, George Allen & Unwin, 450 p.
- Demant, Alain, 1981, l'Axe Néovolcanique Transmexicain—Étude volcanologique et pétrographique; signification géodynamique: Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, disertación doctoral, 259 p. (inédita).
- Ferriz, Horacio, y Mahood, G. A., 1984, Eruption rates and compositional trends at Los Hornos volcanic center, Puebla, Mexico: Journal of Geophysical Research, v. 89, p. 8511-8524.
- , 1986, Vulcanismo riolítico en el Eje Neovolcánico Mexicano: Geofísica Internacional (México), v. 25, p. 85-117.
- Hildreth, Wes, 1981, Gradients in silicic magma chambers—Implications for lithospheric magmatism: Journal of Geophysical Research, v. 86, p. 10153-10192.
- Le Bas, M. J., Le Maître, R. W., Streckeisen, A., y Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica diagram: Journal of Petrology, v. 27, p. 745-750.
- MacDonald, G. A., 1972, Volcanoes: Nueva Jersey, Prentice-Hall, 463 p.
- McDowell, W. F., y Clabaugh, E., S., 1981, The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 5, p. 195-206.
- Milán, Marcos, Carrasco-Núñez, Gerardo, y Verma, S. P., 1988, Muestreo y resultados preliminares del estudio petrológico transversal al Cinturón Volcánico Mexicano: GEOMIMET (México) núm. 151, p. 18-34.
- Sánchez-Rubio, Gerardo, 1983, Cenozoic vulcanism in Toluca-Amealco region, central Mexico: University of London, Imperial College of Science and Technology, tesis de maestría, 275 p. (inédita).
- Smith, R. L., 1979, Ash-flow magmatism: Geological Society of America, Special Paper 180, p. 5-127.

Yáñez-García, Camilo, 1984, Exploración geológica de la caldera de Huichapan, Edo. de Hidalgo: México, D. F., Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 7, p. 171 (resumen).

Manuscrito presentado: 13 de enero de 1989.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 13 de septiembre de 1989.

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 1990.