

Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares

José Rosas Elguera* and J. Urrutia-Fucugauchi**

* Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal.

** Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear, Instituto de Geofísica, UNAM, México, D.F.

Recibido: 15 julio, 1990; aceptado: 13 septiembre, 1991.

RESUMEN

Se presentan resultados preliminares de un estudio conjunto de paleomagnetismo, reconocimiento geológico de campo y de fechamiento de K-Ar encaminado a documentar la estratigrafía volcánica en las zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Estado de Michoacán. Se determinaron polaridades, direcciones de magnetización remanente y polos geomagnéticos virtuales para catorce sitios y se contó con cinco fechamientos de K-Ar de unidades volcánicas seleccionadas en las zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán. Estos resultados permiten sugerir que la actividad volcánica en esta zona geotérmica se ha desarrollado durante un intervalo que comprende desde el Cron Ocho (Mioceno Tardío, fechamiento K-Ar de 8.8 ± 0.8 Ma) hasta el Cron Brunhes (Reciente). La relación entre los fechamientos y la Escala Geomagnética de Polaridades indica que la mayoría de los sitios analizados corresponden al Cron reverso Matuyama, 0.73-2.48 Ma y se documenta la ocurrencia de los eventos de polaridad Reunión, de 2.01-2.04 Ma y 2.12-2.14 Ma presentes posiblemente en dos de los sitios (fechamiento K-Ar de 2.0 ± 0.2 Ma).

PALABRAS CLAVE: Magnetoestratigrafía, fechamiento de K-Ar, volcanismo, geotermia, Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México.

ABSTRACT

Preliminary results of a study comprising paleomagnetism (magnetostratigraphy from fourteen sites), radiometric K-Ar dating (five dates) and field reconnaissance surveys in the geothermal area of Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, Mexico are presented. Volcanic activity covers an interval extending from chron 8 (Late Miocene, K-Ar date 8.8 ± 0.8 Ma) to the Recent Brunhes chron. Most units correspond to the Matuyama reverse chron, (0.73 to 2.48 Ma). Normal polarity is observed for two sites within the reverse Matuyama chron. From polarity and a K-Ar date of 2.0 ± 0.2 Ma, this may correspond to the Reunion normal polarity subchrons (2.01-2.04 Ma and 2.12-2.14 Ma).

KEY WORDS: Magnetostratigraphy, K-Ar dating, volcanism, geothermal energy, Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México.

INTRODUCCION

El extremo occidental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) presenta un relieve conformado por bloques levantados y hundidos (Campos Enríquez *et al.*, 1990). Una de las depresiones es la Cuenca de Chapala-Atotonilco (Figura 1), de aproximadamente 115 km de longitud y 37 km de ancho, en cuyo interior se ubica el Lago de Chapala. Este lago está circundado por sierras de dirección E-W. En sus márgenes ocurren gran cantidad de manantiales calientes. Al oriente se ubica la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán (Figura 1). Estudios preliminares de esta zona han sido efectuados por Palma y Reyes, 1988; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 1989; Rosas Elguera *et al.*, 1989, y otros.

El paleomagnetismo presenta un alto potencial de aplicación en la solución de problemas geológicos y geofísicos y en particular estratigráficos y tectónicos (Valencio, 1980; Tarling, 1983). Esta técnica se ha empleado, por ejemplo, para establecer la estratigrafía y correlacionar diferentes unidades volcánicas (Choiniere y Swanson, 1979; Grommé *et al.*, 1972, Morán Zenteno *et al.*, 1986; Mora Alvarez *et al.*,

1991). En algunas zonas geotérmicas de México la aplicación del paleomagnetismo ha mostrado ser útil para correlacionar unidades volcánicas, estimar la temperatura de emplazamiento de flujos piroclásticos, direcciones de flujo y otros aspectos (Urrutia-Fucugauchi, 1979, 1983, 1986; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1985, 1988).

En este estudio se aprovechan las propiedades magnéticas de las rocas y su registro paleomagnético para, junto con los fechamientos radiométricos y las observaciones de campo, investigar la estratigrafía volcánica de la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán.

LA ZONA GEOTERMICA DE IXTLAN DE LOS HERVORES-LOS NEGRITOS.

La temperatura de los manantiales de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos varía de 30° a 90°C (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 1989). La composición química es de tipo clorurado-sódica. Las temperaturas de fondo estimadas con el geotermómetro sodio-potasio dan valores máximos entre 221° y

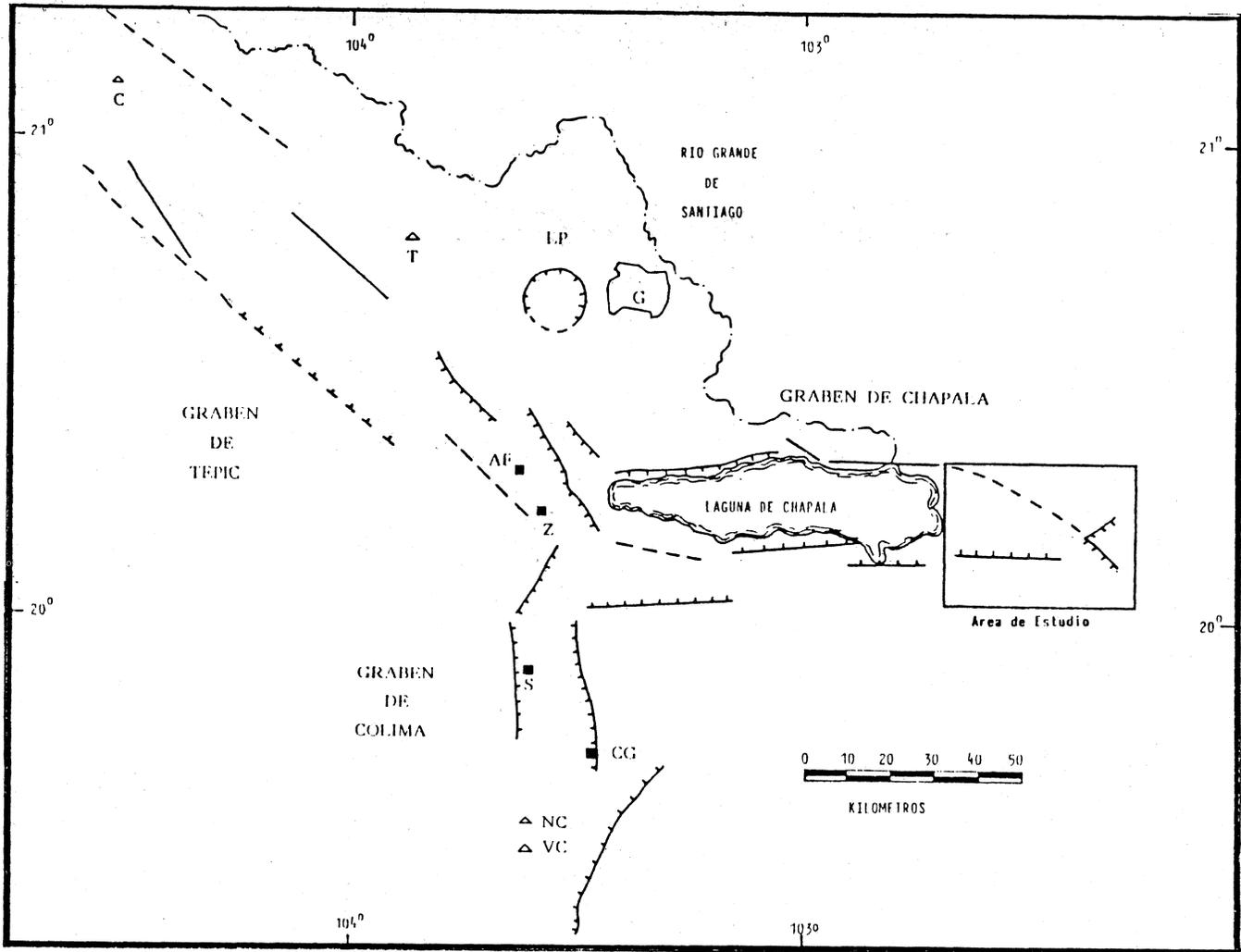


Fig. 1. Localización de la zona de estudio. Los triángulos representan estructuras volcánicas y los cuadrados representan poblaciones. AF, Andrés Figueroa; C, volcán Ceboruco; CG, Ciudad Guzmán; G, Ciudad de Guadalajara; LP, caldera de la Primavera; NV, Volcán Nevado de Colima; S, Sayula; T, volcán Tequila; VC, volcán de Colima; y Z, Zacualco.

243°C. Los resultados de los estudios isotópicos sugieren una mezcla entre las aguas meteóricas y las geotérmicas.

Un conjunto de fallas normales ha servido como conducto para el ascenso de los fluidos geotérmicos, especialmente en Ixtlán de los Hervores y Pajacuarán. Las fallas más importantes son las de Ixtlán-Encinal, Pajacuarán y Nogales (Figura 2). Las dos primeras forman los flancos sur y norte de la parte oriental del graben de Chapala (Rosas Elguera *et al.*, 1989; Rosas Elguera, 1991).

La falla de Pajacuarán (Figura 2) limita la Ciénaga de Chapala en su porción sur. Tiene una longitud de 18 km y afecta a los volcanes andesíticos que constituyen la Sierra de Pajacuarán. Es probable que el fallamiento se prolongue hacia el oriente donde quizá actuó como conducto para el desarrollo de una serie de volcanes (Figura 2) así como para el ascenso de fluidos hidrotermales.

Hacia el norte, la falla Ixtlán-Encinal determina el cauce del Río Duero. La falla tiene una dirección general NW-SE

y una longitud aproximada de 35 km. Afecta al volcán Encinal, cuya edad estimada por el método K-Ar es de 3.3 ± 0.3 Ma (muestra ROE-144, Figura 3), lo que indica la ocurrencia de actividad neotectónica. El volcán Encinal se localiza al sureste de la zona de Ixtlán de Los Hervores (Figura 2).

La falla Nogales, de dirección NE-SW, es aproximadamente perpendicular a la falla Ixtlán-Encinal; precisamente hacia el ESE de la intersección entre estas dos estructuras desaparecen las manifestaciones termales superficiales.

En la Figura 2 se muestran los 44 volcanes existentes en el área de este estudio; de ellos, 22 son conos cineríticos y los restantes están formados por flujos lávicos. Los volcanes más conspicuos son de composición andesítica-basáltica y constituyen la Sierra de Pajacuarán; mientras que los conos cineríticos -de mucho menor relieve y prácticamente distribuidos por toda el área- presentan flujos andesíticos asociados.

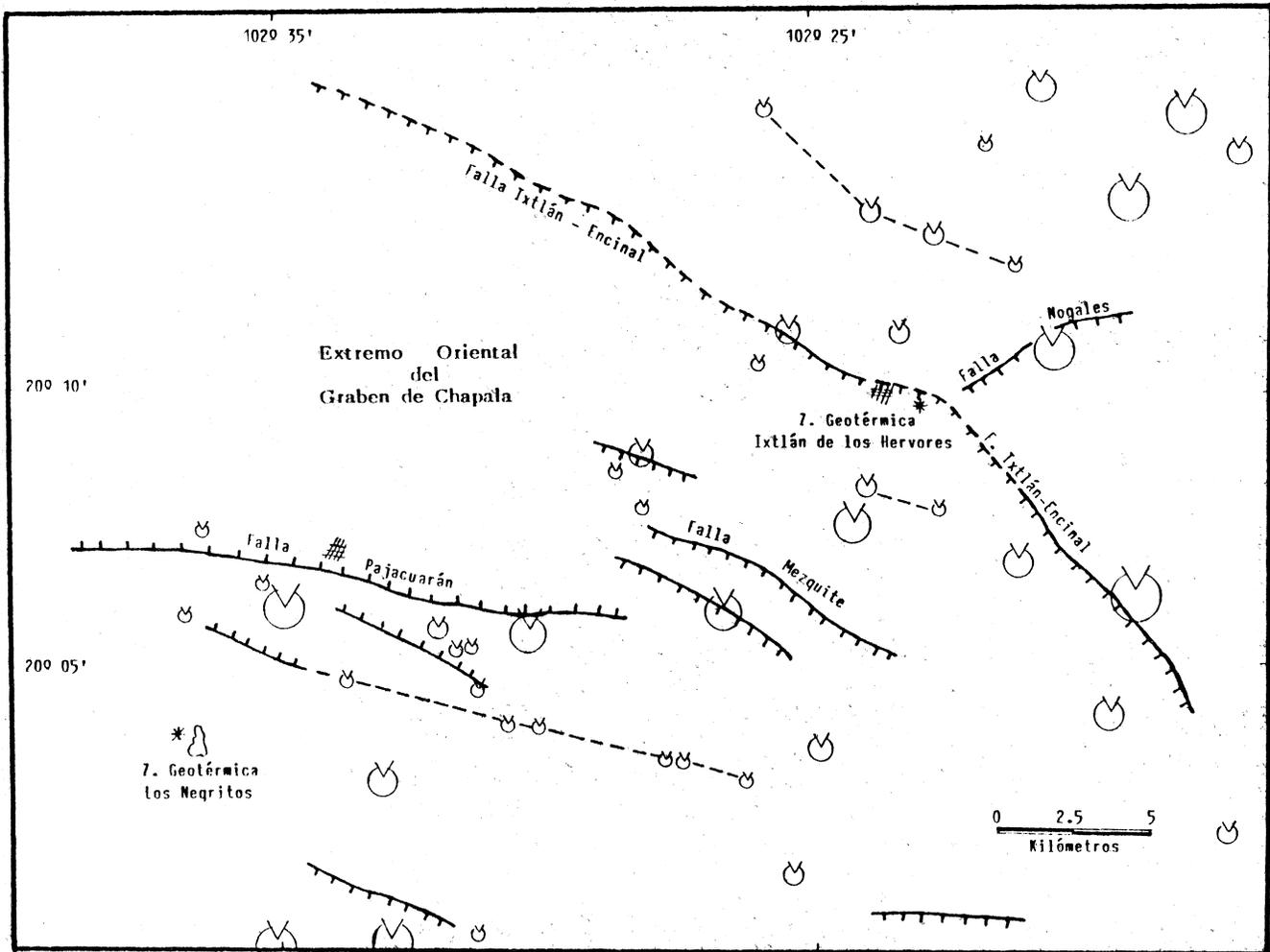


Fig. 2. Zona de estudio en el extremo oriental del lago de Chapala. Se ilustran conos volcánicos, fallas y lineamientos y la localización de las zonas geotérmicas de Ixtlán de Los Hervores y de Los Negritos, Michoacán.

En el Campo Volcánico de Michoacán y Guanajuato (CVMG), Hasenaka y Carmichael (1985) señalan alineamientos preferenciales de los conos cineríticos en los sectores noreste, con alineamientos E-W y sureste, con alineamientos NE-SW. A escala regional indican un alineamiento preferencial de estructuras NE-SW. En la zona de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, ubicada en el sector occidental del CVMG (Figura 2), los alineamientos inferidos en la distribución de los conos cineríticos son preferencialmente WNW-ESE, lo que indica diferencias entre los campos de esfuerzos para uno y otro sector del CVMG suponiendo que los volcanes estén emplazados en arreglos normales a las direcciones de σ_3 (Nakamura, 1977).

ESTUDIOS DE CAMPO Y DE LABORATORIO

Para el estudio paleomagnético se muestrearon 118 núcleos correspondientes a 17 sitios en diferentes unidades volcánicas (Figura 3). Se utilizó una perforadora portátil con barrenas de borde diamantado y material no magnético. La orientación de los núcleos se obtuvo con brújula e inclinómetro (véase Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1985). Los datos de orientación de campo se corrigieron por la declinación mag-

nética del área, que es de aproximadamente N8°W (Campos Enríquez *et al.*, 1991). En la Figura 3 se incluye la localización de los sitios de muestreo para los estudios radiométricos por el método de K-Ar (Rosas Elguera *et al.*, 1989).

En el laboratorio los núcleos se cortaron en cilindros de 2.5 cm de diámetro y 2.2 a 2.5 cm de longitud. La dirección e intensidad de la magnetización remanente natural (NRM) se determinaron para todas las muestras utilizando un magnetómetro de discriminación de flujo Molspin con interfase a una computadora. La composición vectorial y estabilidad de las componentes magnéticas se investigaron por desmagnetización térmica, empleando un sistema Schonstedt TSD-1. Para las mediciones iniciales se seleccionaron especímenes piloto de cada sitio, los que se trataron con incrementos sucesivos de temperatura (100°, 200°, 300°, 350°, 400°, 450°, 500° y 550°C). Los resultados se analizaron por medio de diagramas vectoriales (Figura 4) y de diagramas de cambios de intensidad normalizada (Figura 5). Una vez estimados los rangos de temperatura óptimos a los cuales los pilotos alcanzaron su dirección de remanencia estable, se desmagnetizaron a esta temperatura los especíme-

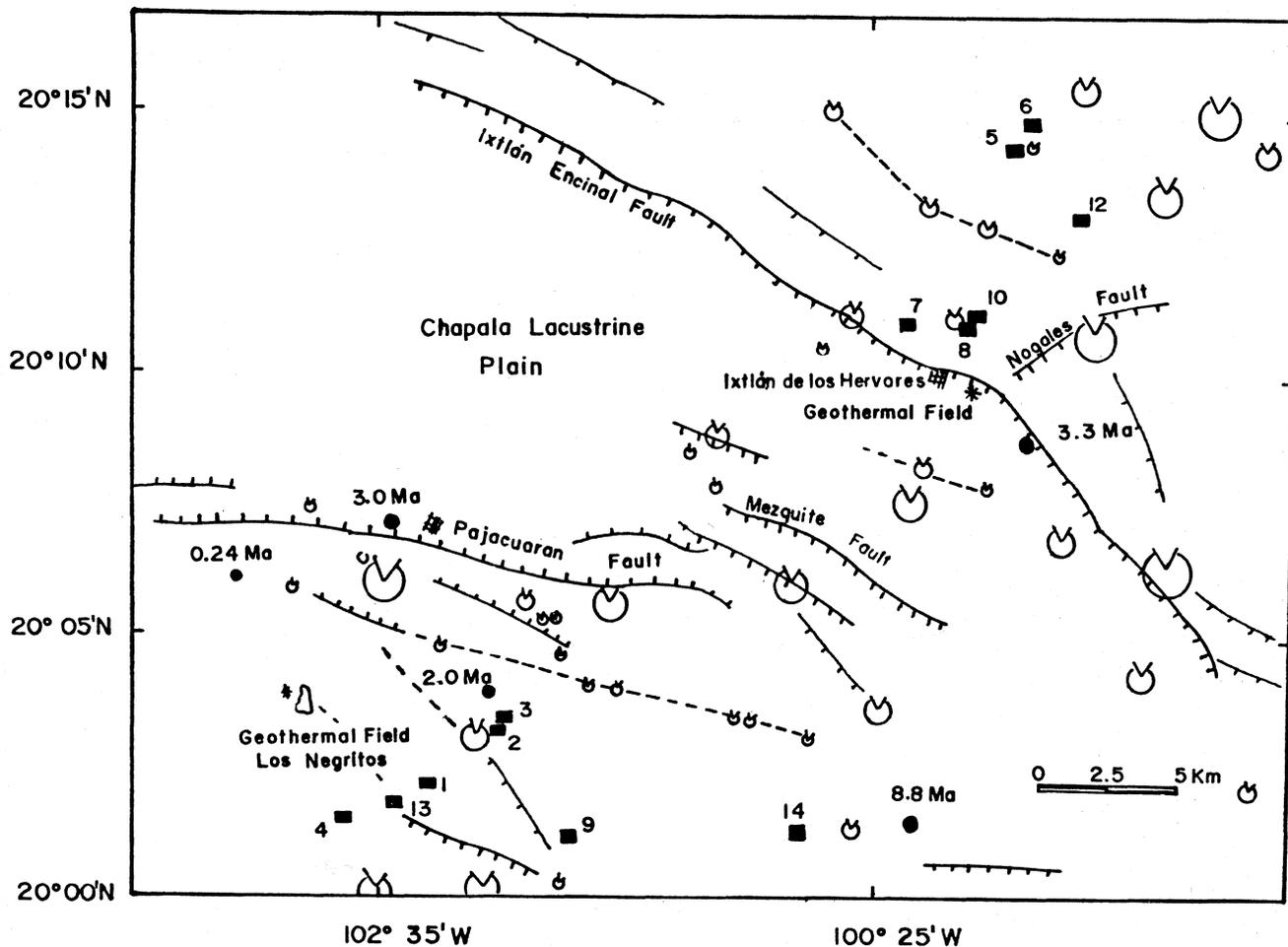


Fig. 3. Localización de los sitios de muestreo paleomagnético (cuadros) y de fechamiento de K-Ar (círculos). Cron normal Brunhes, 0-0.73 Ma ; Cron reverso Matuyama, 0.73-2.48 Ma ; Cron normal Gauss, 2.48-3.40 Ma ; Cron reverso Gilbert, 3.40-5.5 Ma ; y Cron reverso 8, 8.1-8.8 Ma (Fig. 10 y Tabla 1).

nes restantes de cada sitio. Detalles de los métodos de campo y de laboratorio pueden consultarse en Urrutia-Fucugauchi (1979) y Urrutia-Fucugauchi *et al.* (1985).

En las muestras analizadas se observan diferentes composiciones de NRM y diversos comportamientos magnéticos (Figuras 4 y 5). Las temperaturas de bloqueo de los minerales portadores de las magnetizaciones son en general menores de 450°C, lo que sugiere minerales de la serie de las titanomagnetitas, con contenidos variables de hierro y titanio que se reflejan en los rangos de temperatura a los que decrece la intensidad (Figura 5). Las magnetizaciones constan de una o dos componentes, que pueden observarse en los diagramas, con los segmentos rectos indicando una componente y los segmentos curvos dos o más componentes (Figura 4). Las magnetizaciones características para las muestras se seleccionaron de los segmentos rectos que terminan en el origen de los diagramas.

A cada espécimen se le aplicó la corrección de campo y de declinación magnética, y para cada sitio se estimaron la dirección media y los parámetros estadísticos correspondien-

tes a k , parámetro de concentración y $\alpha-95$, como de dispersión angular al 95% de confiabilidad (Fisher, 1953; Valencio, 1980). A partir de las direcciones medias y parámetros de concentración y dispersión de los sitios se calcularon las posiciones polares (polos geomagnéticos virtuales, PGV) suponiéndose un campo dipolar.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 se resumen los resultados del estudio paleomagnético y fechamientos de K-Ar de los diversos sitios estudiados. También se presentan los parámetros estadísticos asociados a las direcciones medias de cada sitio.

Para la evaluación se utilizaron los diagramas vectoriales, y las direcciones características se estimaron a partir de diferencias vectoriales y puntos finales de desmagnetización. Sólo en siete sitios se encuentran concentradas las direcciones de magnetización característica y se logró obtener una desmagnetización aceptable a una temperatura de 450°C. En los siete sitios restantes se observa una dispersión angular alta o bien no se logró eliminar alguna fase secundaria (Figura 4). Se tuvo especial cuidado en evitar los

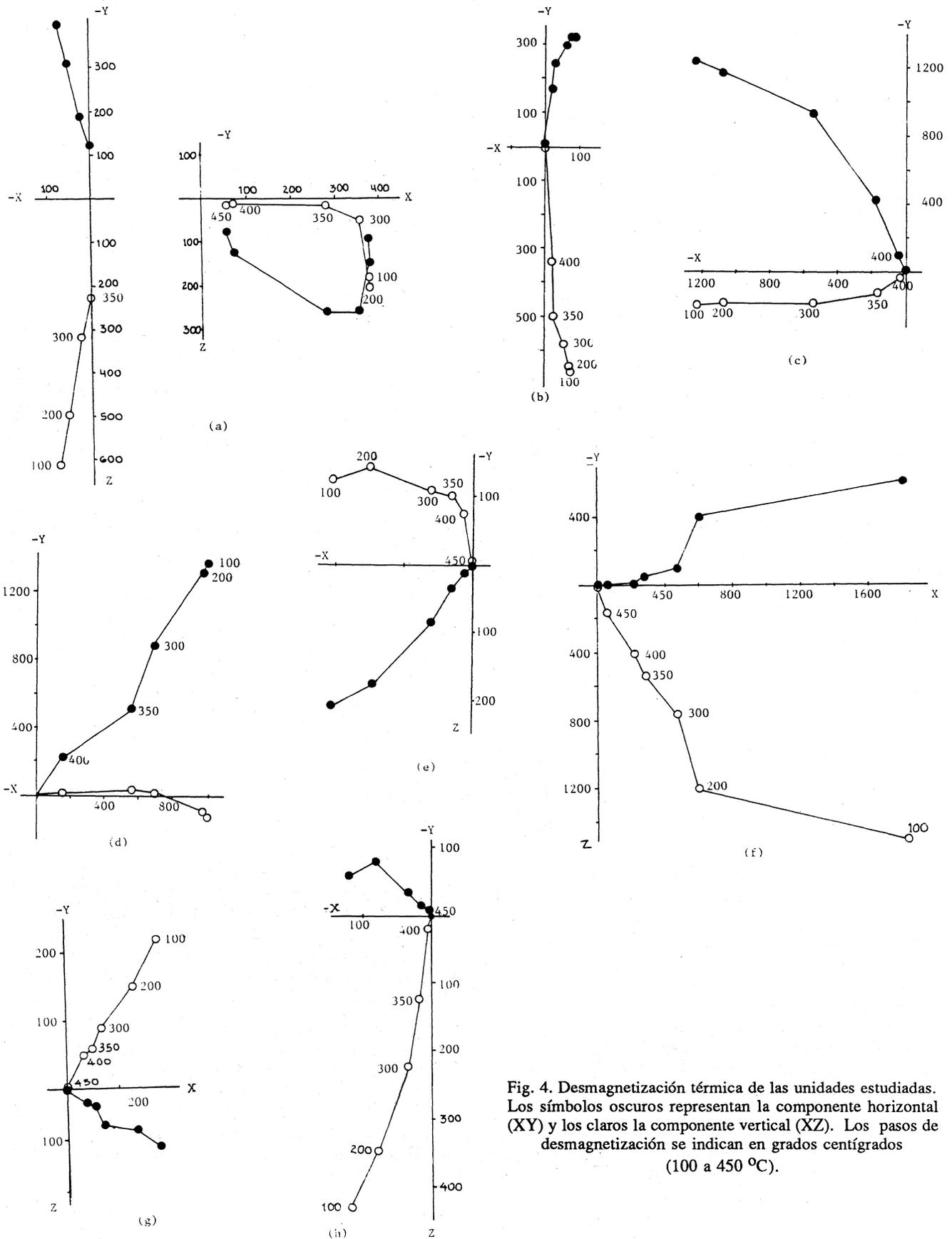


Fig. 4. Desmagnetización térmica de las unidades estudiadas. Los símbolos oscuros representan la componente horizontal (XY) y los claros la componente vertical (XZ). Los pasos de desmagnetización se indican en grados centígrados (100 a 450 °C).

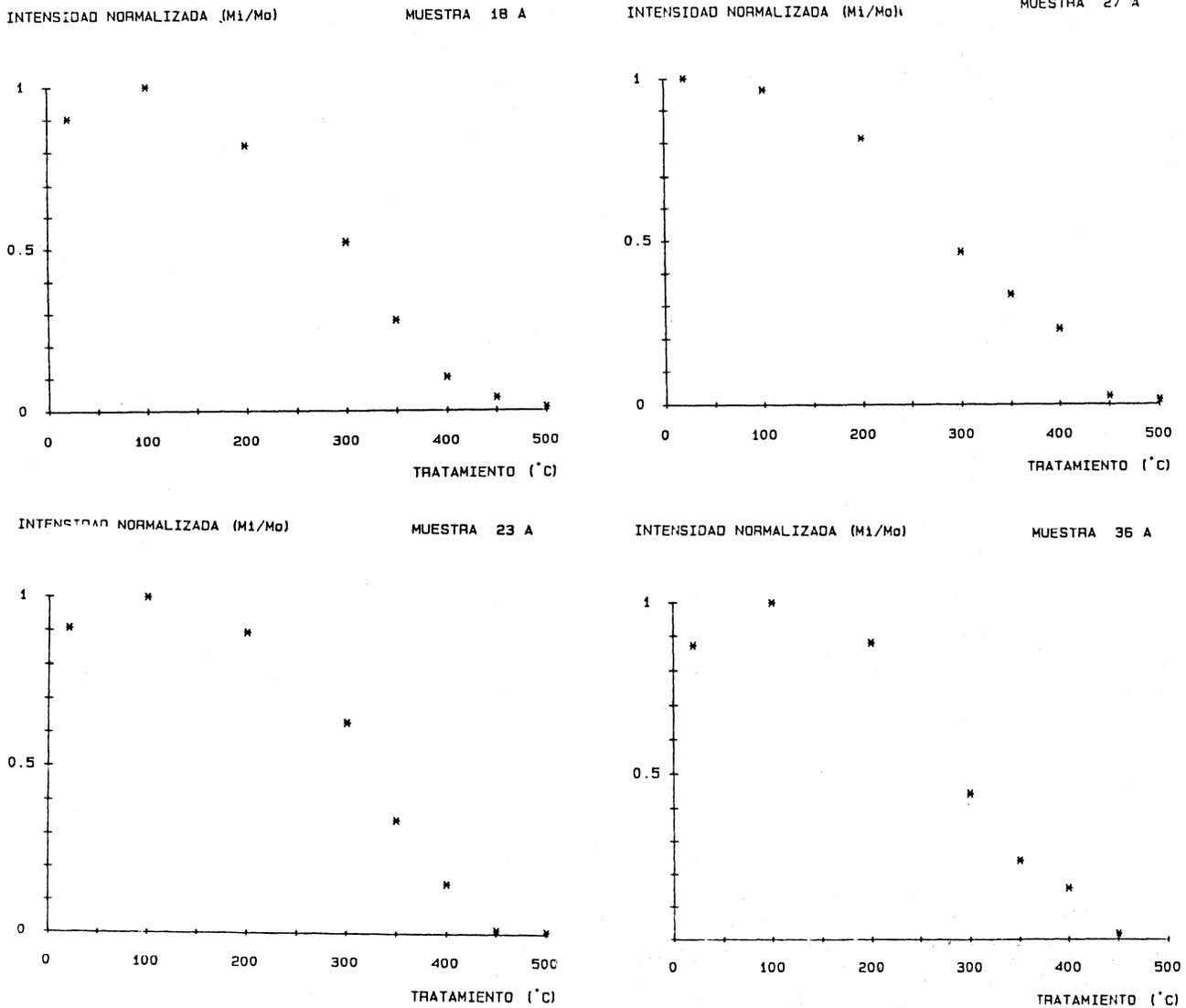


Fig. 5. Diagramas de intensidad normalizada. Las temperaturas de bloqueo son menores de 450°C, lo que en términos de minerales es interpretado como de la serie de titanomagnetitas.

errores inherentes al estudio paleomagnético (Urrutia-Fucugauchi, 1979; Morán Zenteno *et al.*, 1986).

Del análisis de diferencias vectoriales, sólo se consideran en forma completa las direcciones e inclinaciones medias en los sitios donde se obtuvo la magnetización característica. Las declinaciones e inclinaciones medias en los sitios donde se obtuvo la magnetización característica. Las declinaciones e inclinaciones medias para estos siete sitios se resumen en la proyección estereográfica de la Figura 6. Para los siete sitios adicionales sólo se reporta al análisis de la polaridad. Estos datos adicionales se incluyen también en la Tabla 1, por lo que la discusión sobre magnetoestratigrafía se realiza con referencia a 14 sitios. Finalmente, tres sitios con dispersión angular mayor de $\alpha-95 = 25$ ($k < 10$) no se utilizaron en la discusión.

Los sitios 2, 3 y 12 tienen polaridad normal y los sitios 5, 6, 8 y 14 tienen polaridad reversa. En los diagramas de proyección polar de las figuras 7, 8 y 9 se incluyen las posiciones polares PGV correspondientes a las unidades separadas en grupos de acuerdo con la asignación de cronos de polaridad geomagnética. La Escala Geomagnética de Polaridades se incluye en la Figura 10 (adaptada de Cox, 1982, y Tarling, 1983).

Las polaridades observadas (y su asignación al cron geomagnético) en los sitios restantes corresponden a: Sitio 1 Basurero, normal (Cron Brunhes); sitio 4 Villamar, normal (Cron Brunhes); sitio 7 Coruco, reversa (Cron Matuyama); sitio 9 Zarquilla, normal; sitio 10 San Francisco, normal (Cron Gauss); sitio 11 Venustiano, normal (Cron Gauss); y sitio 13 Salitre, reversa (Cron Gilbert).

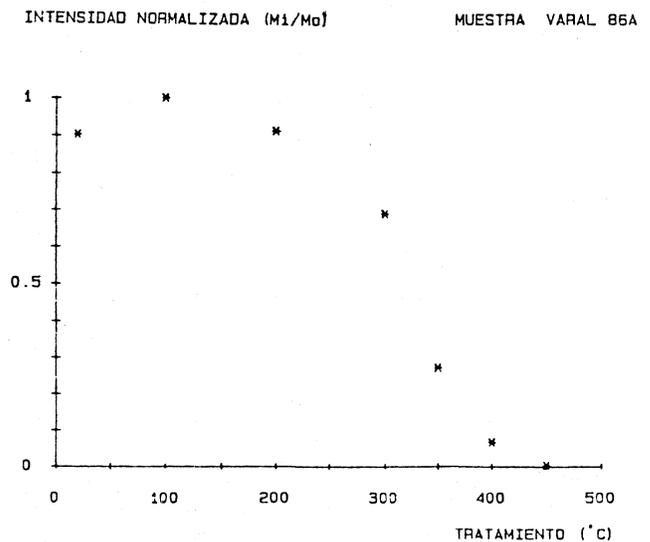
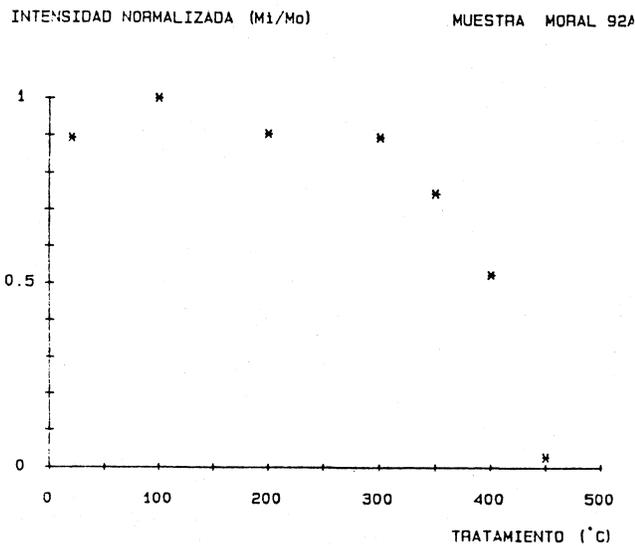
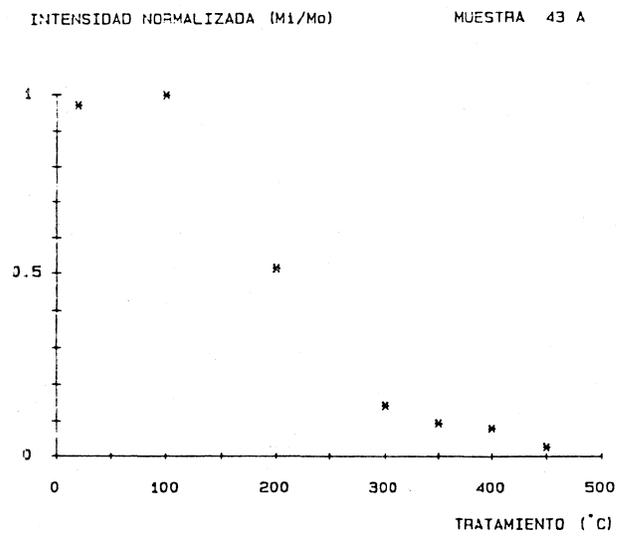
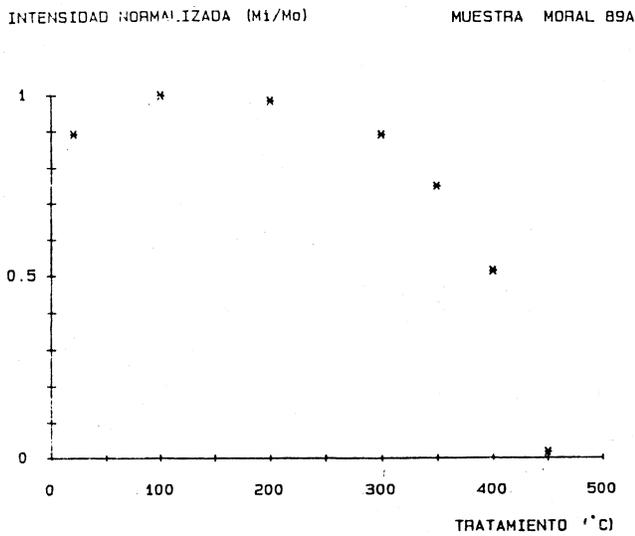


Fig. 5. Cont.

En el sitio Quiroseña (centro-sur del área) se fechó una muestra por el método K-Ar obteniéndose 8.8 ± 0.8 Ma (muestra ROE-142; Figura 3). Este sitio presenta una polaridad reversa (Tabla 1, Figura 6); relacionando la edad radiométrica de este sitio con la escala de polaridades (Figura 10) es posible asignar este sitio al Cron 8, entre los 8.1 y 8.8 Ma, que corresponde aproximadamente a la parte media del Mioceno Tardío.

Aunque no se analizaron paleomagnéticamente los sedimentos lacustres, es conveniente señalar que en esta parte de la cuenca se presentan limolitas arcillosas y diatomitas en estratos horizontales; su cima se encuentra a sólo unos cuantos metros sobre la Ciénaga de Chapala. Esto contrasta notablemente con los materiales lacustres en la porción central del graben, los cuales están a unos 120 m sobre el

nivel del lago y con una inclinación de 18° N. En esta última localidad no se han efectuado análisis micro-paleontológicos así que su posible correlación con los sedimentos lacustres del oriente es meramente litológica.

Los microfósiles encontrados en los sedimentos lacustres de la porción oriental son: *Cocconesís placentula*, *Denticula elegans*, *Cymbella cymbiformis*, *Stephanodiscus niagarae*, *Epithemia turgida* y *Fragilaria construens*, que corresponden al Plioceno.

La actividad volcánica del Plioceno probablemente se inició con cortas fases andesítico-basálticas que después evolucionaron a basaltos de hiperstena y formaron volcanes como el Encinal y Nogales (Figura 2) y aquéllos que forman las partes altas de la Sierra de Pajacuarán. Para esta ac-

Tabla 1

Resumen de los resultados del estudio paleomagnético del área de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México.

No	Sitio	P	Dec	Inc	PGV		Latitud	Long.	Polaridad	Epoca	Fecha
					k	$\alpha \cdot 95$					
1	Basuroro	10	346.1	28.4	450.7	2.3	75.9	149.3	N	Brunhes	
2	Moral	8	346.2	31.5	231	3.6	76.6	156.8	N	Matuyama	
3	Varal	7	343.4	24.6	47	8.9	72.5	145.6	N	Matuyama	2.0 \pm 0.2
4	Villamar	12	350.3	28.8	54.3	6.0	79.6	142.4	N	Brunhes	
5	Gertrudis	8	180.9	-41.3	21	12.4	-86.4	270.8	R	Matuyama	
6	Pelón	8	157.5	-39.6	29	10.4	-68.9	177.7	R	Matuyama	
7	Coruco	7	135.0	-34.08	27.1	11.8	-47.6	173.6	R	Matuyama	
8	Trompeta	6	114.1	-15.6	12	20.3	-25.3	167.0	R	Matuyama	
9	Zarquillo	8	251.0	9.40	14.0	15.4	-16.0	178.8	N	-	
10	Sn.Fco.	8	326.6	37.80	36.5	11.0	58.8	175.5	N	Gauss	
11	Venustiano	6	333.0	5.36	17.6	16.4	59.0	137.3	N	Gauss	
12	Bolita	7	12.9	33.8	25	12.3	77.7	353.4	N	Gauss	
13	Salitre	7	166.1	-13.67	50.3	8.6	71.2	125.1	R	Gilbert	
14	Quiroseña	10	146.5	-36.1	81	5.4	-58.6	173.5	R	Ocho	8.8 \pm 0.8

No., Número arbitrario de cada sitio; P, Número de especímenes, Dec., Declinación; Inc., Inclinación; k, parámetro de precisión; $\alpha \cdot 95$, Círculo de confianza; PGV, Polo Geomagnético Virtual; N, Normal; R, Reversa; Los fechamientos se hicieron por el método K/Ar y están en millones de años.

tividad volcánica existen dos fechamientos radiométricos. Las lavas se fecharon por el método de K-Ar dando una edad de 3.3 ± 0.3 Ma (ROE-144) mientras que las lavas ubicadas al sur de Pajacuarán se fecharon en 3.0 ± 0.3 Ma (muestra N-2, Figura 3).

En la Tabla 1 y en la Figura 7 se muestran los resultados correspondientes al sitio Bolita, cuya polaridad es normal. Por lo preservado de la forma, bien puede suponerse que este volcán es relativamente reciente. Con estas bases y considerando su polaridad, es posible que corresponda al Cron Gauss.

De la relación estratigráfica entre los sitios Gertrudis y Pelón así como de la base cartográfica (Figura 8) se concluye que las lavas del primero sobreyacen a las del segundo. Estos sitios pertenecen a una serie de volcanes monogenéticos desarrollados en la Ciénaga (planicie) de tal manera que sobreyacen a los sedimentos lacustres datados como del Plioceno. Considerando que su polaridad es reversa (Figura 6), es posible que estos sitios correspondan al

Cron Matuyama. Las lavas del sitio Trompeta (sitio 8) también se encuentran sobreyaciendo a los sedimentos lacustres. Siguiendo el mismo razonamiento que en los sitios anteriores, y en virtud de que su polaridad es reversa, se concluye que este sitio también pertenece al Cron Matuyama.

Finalmente en la Figura 9 se presentan los PGV's correspondientes a los sitios Varal (sitio 3) y Moral (sitio 2) cuyas polaridades son normales. La intersección entre los conos de A-95 correspondientes al 95% de confiabilidad es casi completa. Esto pudiera sugerir que la velocidad de erupción fue mayor que la de la variación secular, de tal manera que la actividad volcánica de estos sitios fue contemporánea.

Para evaluar esta alternativa, se compararon las direcciones medias de estos sitios de acuerdo con el método estadístico propuesto por McFadden y Lowes (1981), para el caso en que k1 y k2 son diferentes según la relación siguiente:

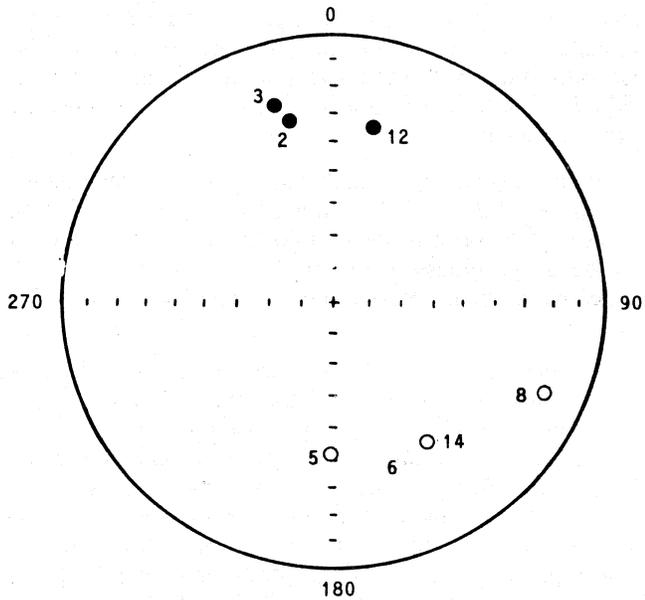


Fig. 6. Direcciones medias para siete sitios selectos, graficadas en una proyección estereográfica de igual área. Sitios 2, 3 y 12 presentan polaridades normales y sitios 5, 6, 8 y 14 presentan polaridades reversas.

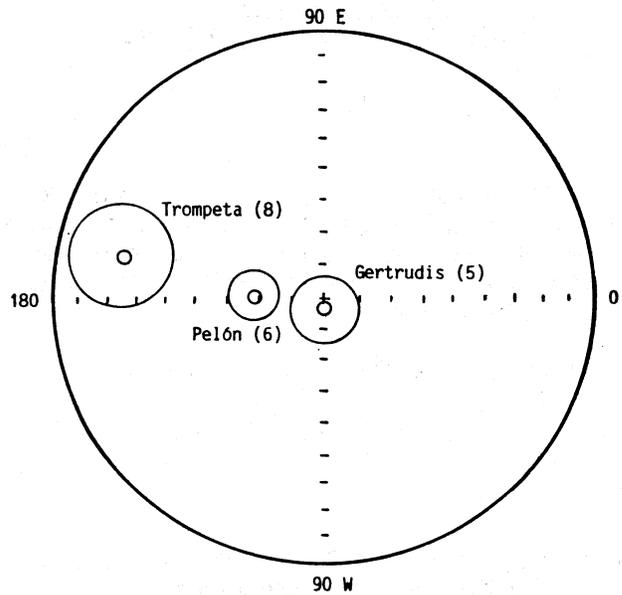


Fig. 8. Posiciones polares medias (PVG) para los sitios Gertrudis (5), Pelón (6) y Trompeta (8). Las tres unidades son correlacionadas con el Cron reverso Matuyama, 0.73 - 2.48 Ma (Figura 10).

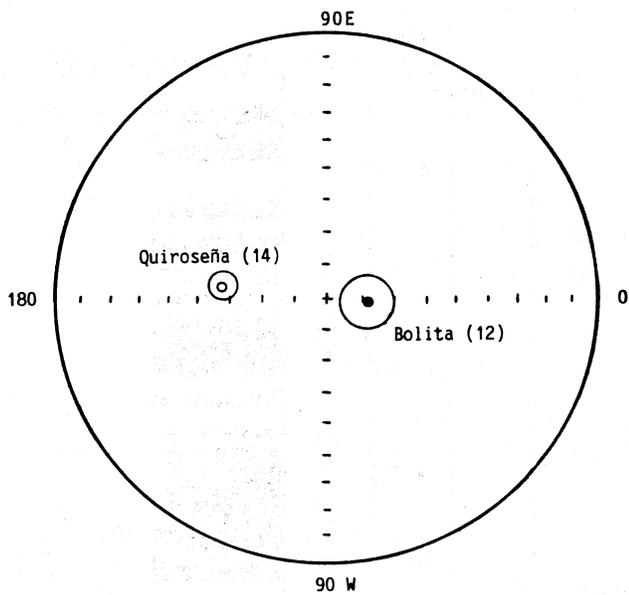


Fig. 7. Posiciones polares medias (PGV) para los sitios Bolita (12) y Quiroseña (14) (los círculos indican la dispersión angular al 95% de nivel de confiabilidad). Proyección estereográfica con centro en el polo norte geográfico. El fechamiento de K-Ar para la unidad Quiroseña es de 8.8 ± 0.8 Ma y la asignación magnetoestratigráfica es con el Cron reverso 8 del Mioceno tardío, 8.1 - 8.8 Ma. La unidad Bolita es considerada dentro del Cron normal Gauss, 2.48 - 3.40 Ma.

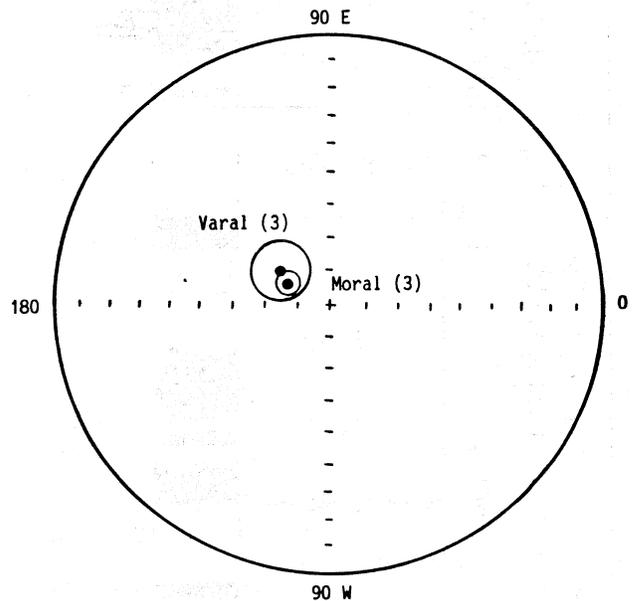


Fig. 9. Posiciones polares medias (PVG) para los sitios Moral (2) y Varal (3). Las unidades son interpretadas como contemporáneas, con una edad de aproximadamente 2.0 ± 0.2 Ma y correlacionables con los sub-rones de polaridad normal Reunión, 2.01 - 2.04 y 2.12 - 2.14 Ma.

$$\frac{r \left((R_1 + R_2)^2 - R_2 \right)}{2((N_1 - R_1) + r(N_2 - R_2))(R_1 + rR_2)}$$

$$> \frac{1}{p} e^{(1/(N-2))} - 1$$

donde: N_i = número de especímenes por sitio; R_i = longitud del vector resultante; R = longitud del vector suma de los vectores resultantes de cada una de las poblaciones: $r = k_2/k_1$ con $k_2 > k_1$; p = nivel de significado (en este caso $p = 0.05$); $N = N_1 + N_2$. con:

$N_1 = 7$ $R_1 = 6.8723$ $k_1 = 47$ (sitio Varal, 3)

$N_2 = 8$ $R_2 = 7.9696$ $k_2 = 231$ (sitio Moral 2)

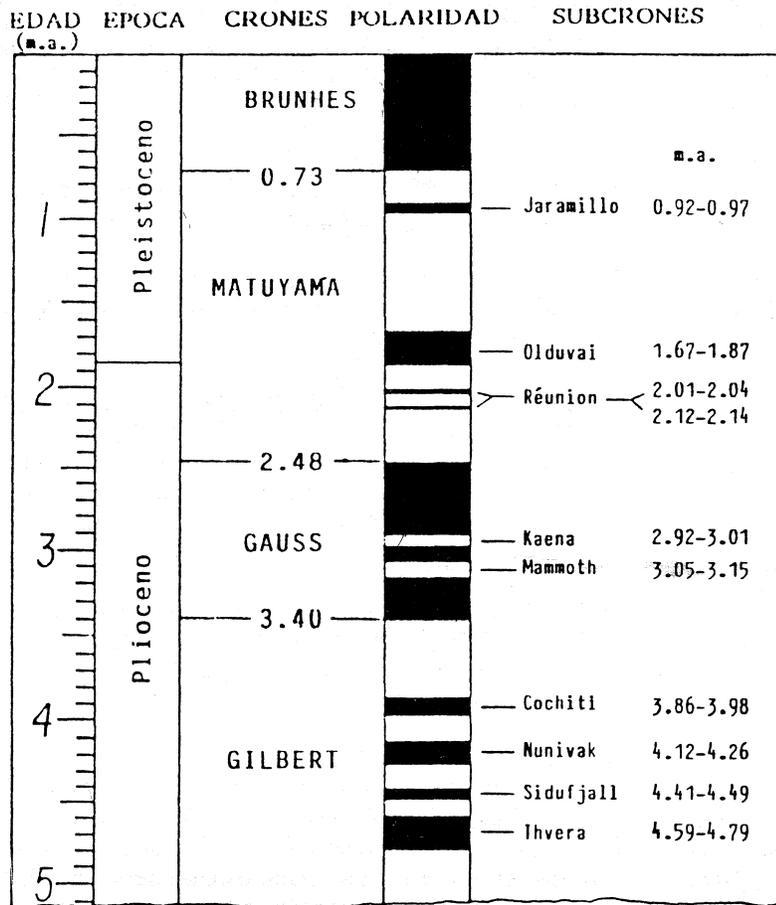
$R = 14.811$

Se obtiene $0.1719 > 0.2592$, con lo que se rechaza la hipótesis de independencia de las poblaciones.

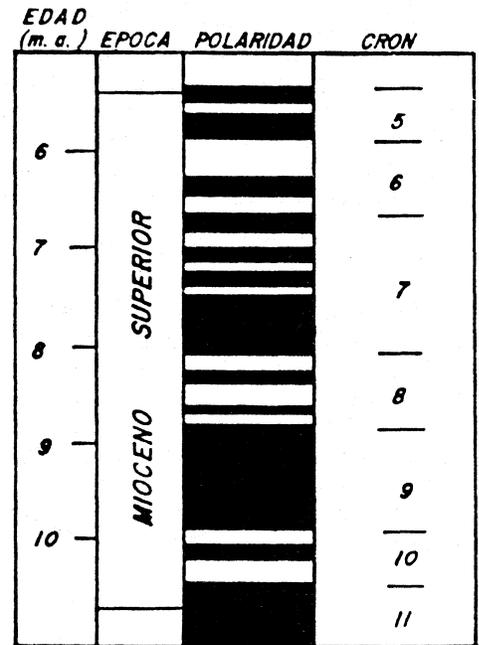
Como el valor del lado izquierdo de la desigualdad (1) es menor que el del lado derecho, la prueba se acepta; esto significa que es muy probable que las direcciones medias de los sitios Varal y Moral provengan de una misma población y en consecuencia son correlacionables, a un nivel de significancia de 95%.

Hacia el sur de la Sierra de Pajacuarán se fechó otra localidad en 2.0 ± 0.2 Ma (muestra N-5, Figura 3). La muestra N-5 corresponde al flujo lávico de donde fueron colectadas las muestras del sitio Varal, lo que permite suponer que también el sitio Moral tiene una edad de alrededor de 2 Ma.

La fecha de 2.0 ± 0.2 Ma corresponde aproximadamente a los eventos de polaridad normal Reunión ($2.01-2.04$ Ma y $2.12-2.14$ Ma, respectivamente; Cox, 1982), dentro del Cron Matuyama, cuya polaridad es reversa (Figura 10). Aunque todavía hay incertidumbre sobre el número, edad y duración de los subcrones de polaridad normal ocurridos en este Cron (Tarling, 1983; Jacobs, 1984), parece razonable la interpretación de que las polaridades normales en los sitios Varal y Moral representan po-



Tomada de Cox (1981)



Modificada de Tarling (1983)

Fig. 10. Escala de polaridad del campo geomagnético. En negro se ilustra la polaridad normal y en blanco la polaridad reversa. Según Cox (1982).

siblemente alguno de los eventos normales, Reunión, ocurridos en el Cron Matuyama.

Hacia el SE de la Sierra de Pajacuarán se fechó otra muestra (N-3, Figura 3) en 0.244 Ma, la cual constituye evidencia adicional de la actividad volcánica desarrollada en el Cron de Brunhes.

En la Figura 3 se ilustra en forma esquemática y simplificada la cartografía (basada en observaciones geológicas, en el estudio paleomagnético y en los fechamientos radiométricos) para las zonas geotérmicas de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán.

CONCLUSIONES

Los resultados magnetoestratigráficos, junto con los fechamientos de K-Ar y las observaciones geológicas, documentan una actividad volcánica en la porción oriental del Lago de Chapala, en la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán desarrollada durante un intervalo que comprende desde el Cron 8 (Mioceno tardío, fechamiento K-Ar de 8.8 ± 0.8 Ma) hasta el Cron Brunhes (Reciente).

La mayoría de las unidades analizadas magnetoestratigráficamente parecen corresponder al Cron reverso Matuyama, del Plioceno-Pleistoceno. Los límites del Cron Matuyama se han estimado entre 0.73 y 2.48 Ma (Cox, 1982). Dos de las unidades con polaridad normal, una de ellas fechada en 2.0 ± 0.2 Ma, se correlacionan con los subcrones Reunión, estimados en 2.01-2.04 Ma y 2.12-2.14 Ma. Los datos paleomagnéticos sugieren que estas dos unidades fueron extruídas contemporáneamente, ya que sus direcciones medias pertenecen a una misma población.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo proporcionado para la realización de este estudio por parte de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los comentarios críticos por J. J. Schott (Strasbourg, France), Harald Böhnel (UNAM), J. Nieto Obregón (UNAM) y J. O. Campos Enríquez (UNAM) han sido útiles en la preparación de este manuscrito. Contribución CIPP-021 del Centro Internacional de Paleomagnetismo y Paleogeofísica.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS ENRIQUEZ, J. J., J. O. CAMPOS ENRIQUEZ y J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 1991. Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México. *Geofís. Int.*, 30, 107-116.

CAMPOS ENRIQUEZ, J. O., M. A. ARROYO ESQUIVEL y J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 1990. Basement, Curie isotherm and shallow crustal structure of the Trans-Mexican volcanic belt from aeromagnetic data. *Tectonophysics*, 172, 77-90.

CHOINIÈRE, S. R. y D. A. SWANSON, 1979. Magnetostratigraphy and correlation of Miocene basalts of the northern Oregon Coast and Columbia Plateau, southwest Washington. *Am. J. Sci.*, 279, 295-305.

COX, A., 1982. Magnetostratigraphic Time Scale. In: Harland, B. et al., Geological Time Scale, Cambridge University Press.

FISHER, R. A., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. London*, A217, 295-305.

GROMME, S. C., E. H. MCKEE y M. C. BLAKE, 1972. Paleomagnetic correlations and potassium argon dating of Middle Tertiary ash-flows in the Eastern Great Basin, Nevada and Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 16519-1630.

GUTIERREZ NEGRIN, L. C. A., A. H. LOPEZ y J. L. QUIJANO, 1989. Zonas geotérmicas de interés en México. *Geotermia*, 5, 283-346.

HASENAKA, T. y I. S. E. CARMICHAEL, 1985. A compilation of location, size and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico. *Geofís. Int.*, 24, 577-607.

JACOBS, J. A., 1984. Reversals of the Earth's Magnetic Field. Adam Hilger Ltd., UK.

MCFADDEN, P. L. y F. J. LOWES, 1981. The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 67, 19-33.

MORA ALVAREZ, G., C. CABALLERO MIRANDA, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI y S. UCHIUMI, 1991. Southward migration of volcanic activity in the Sierra de las Cruces, Basin of Mexico? - A preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study. *Geofís. Int.*, 30, 61-70.

MORAN ZENTENO, D. J., J. URRUTIA FUCUGAUCHI y J. O. CAMPOS ENRIQUEZ, 1986. Magnetoestratigrafía del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. *Rev. Geogr.*, 1, 35-41.

NAKAMURA, K., 1977. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation: Principle and proposal. *J. Volc. Geoth. Res.*, 2, 1-16.

PALMA, O. y P. REYES., 1988. Estudio de resistividad, polarización inducida, gravimetría y magnetometría en la zona geotérmica de Los Negritos, Michoacán. *Geotermia*, 4, 211-245.

ROSAS ELGUERA, J., 1987. Los bajos estructurales como indicadores para la exploración geotérmica. *Geotermia*, 3, 19-29.

- ROSAS ELGUERA, J., 1991. Una cuenca tensional: El Graben de Chapala y paleomagnetismo de su porción oriental. Tesis Maestría en Ingeniería (Exploración), Facultad de Ingeniería, UNAM, D.F., México.
- ROSAS ELGUERA, J., J. URRUTIA FUCUGAUCHI y R. MACIEL, 1989. Geología del extremo oriental del Graben de Chapala; breve discusión sobre su edad - Zonas geotérmicas Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, México. *Geotermia*, 5, 3-18.
- TARLING, D. H., 1983. Palaeomagnetism. Chapman and Hall, UK, 202 pp.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1979. Palaeomagnetism of Caldera de Los Humeros, Mexican volcanic belt. Proc. Latin American Geol. Congr., Trinidad and Tobago, 1, 4-15.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1983. Palaeomagnetic estimation of emplacement temperature of pyroclastic deposits - Preliminary study of Caldera de Los Humeros and Alchichica crater. *Geofís. Int.*, 22, 277-292.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1986. Estimación de direcciones de flujo en rocas ígneas a partir de datos de propiedades magnéticas. *Geotermia*, 2, 125-140.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., D. J. MORAN ZENTENO y J. O. CAMPOS ENRIQUEZ, 1985. Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y magnetismo de rocas en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Reporte Comisión Federal de Electricidad CFE-05-85, Morelia, Michoacán, México.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. *et al.*, 1988. Paleomagnetismo y magnetoestratigrafía de la Sierra de La Primavera, Jalisco. *Geof. Intern.*, 27, 395-414.
- VALENCIO, D. A., 1980. El magnetismo de las rocas. Ed. EUDEBA, Buenos Aires, Argentina.

José Rosas Elguera
*Centro de Ciencias de la Tierra,
Universidad de Guadalajara,
Juan N. Cumplido No. 36
44100 Guadalajara, Jalisco, México*

Jaime Urrutia-Fucugauchi
*Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear,
Instituto de Geofísica, UNAM
Cd. Universitaria
04510 México, D. F., México*