

Aporte de calor por cristalización fraccionada en dos campos geotérmicos del Cinturón Volcánico Mexicano

Jorge Andaverde¹, Surendra P. Verma¹ y Friedrich Schildknecht²

¹Depto. de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México.

²Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., Linares, México.

Recibido: 28 de octubre, 1991; aceptado: 11 de mayo, 1992.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología para el cálculo del aporte de calor por el proceso de cristalización fraccionada en cámaras magmáticas y se le aplica en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich. y Los Humeros, Pue. La cantidad de calor generada por cristalización fraccionada y aportada al medio resulta ser mayor que la calculada al considerarse que la cámara se enfría en un sólo paso, encontrándose que el aumento en temperatura es de $\sim 411^\circ\text{C}$ para Los Azufres y de $\sim 472^\circ\text{C}$ para Los Humeros y no de $\sim 300^\circ\text{C}$ como fue antes considerada. Los resultados de este trabajo se incluirán en las pruebas posteriores de modelación térmica en ambos campos geotérmicos.

PALABRAS CLAVES: Cristalización fraccionada, Los Azufres, Los Humeros, aporte de calor, cámara magmática, modelado térmico.

ABSTRACT

A methodology for the computation of heat liberated by fractional crystallization in a magma chamber is presented, with application to Los Azufres (Mich.) and Los Humeros (Pue.) geothermal fields. The heat from fractional crystallization increases the temperature of the magma chambers in Los Azufres and Los Humeros in $\sim 411^\circ\text{C}$ and $\sim 472^\circ\text{C}$ respectively. These new estimates are higher than previously reported estimates from "one-step cooling" of the entire magma chamber ($\sim 300^\circ\text{C}$).

KEY WORDS: Fractional crystallization, Los Azufres, Los Humeros, heat liberated, magma chamber, thermal modelling.

INTRODUCCION

En la mayoría de los campos geotérmicos, la fuente de calor está relacionada con cámaras magmáticas y para el estudio de las mismas se desarrollan metodologías a fin de conocer sus propiedades físicas y químicas, así como los procesos petrogenéticos dominantes tales como cristalización fraccionada, asimilación, re-inyección y mezcla de magmas (Verma, 1990).

Una etapa importante en este estudio es el modelado térmico, que tiene como objetivo ayudar a conocer las fuentes profundas de calor de estos yacimientos, la distribución de temperaturas a profundidad y su evolución térmica, con base en la información geológica, geoquímica y geofísica disponible (Castillo-Román *et al.*, 1991).

El presente trabajo tiene como objetivo calcular el aporte de calor al medio geológico, al solidificarse la cámara magmática en dos centros volcánicos (Los Azufres y Los Humeros), suponiendo que el proceso de cristalización fraccionada (C.F.) es dominante (Andaverde *et al.*, 1991).

GEOLOGIA

Los Azufres

El área de Los Azufres se localiza en el Estado de Michoacán, ~ 200 km al noroeste de la ciudad de México (Fig. 1; modificado de Verma, 1990). La geología del área es descrita por Camacho (1979), De la Cruz *et al.* (1982), Dobson y Mahood (1985), Cathelineau *et al.* (1987) y Ferrari *et al.* (1991).

El basamento prevolcánico de esta región consiste de lutitas ligeramente plegadas, areniscas y conglomerados de edad Eoceno - Oligoceno (Ferrari *et al.*, 1991). Sobreacen a estos sedimentos andesitas pobres en fenocristales con intercalaciones de depósitos piroclásticos, basaltos, andesitas porfíricas y flujos de lavas dacíticas, con espesor mínimo de 2,900 metros, con edades radiométricas K-Ar de 10.2 ± 0.6 Ma en las muestras más profundas y 1.03 ± 0.20 Ma en las superiores (Dobson y Mahood, 1985). El volcanismo silíceo está dividido en tres grupos:

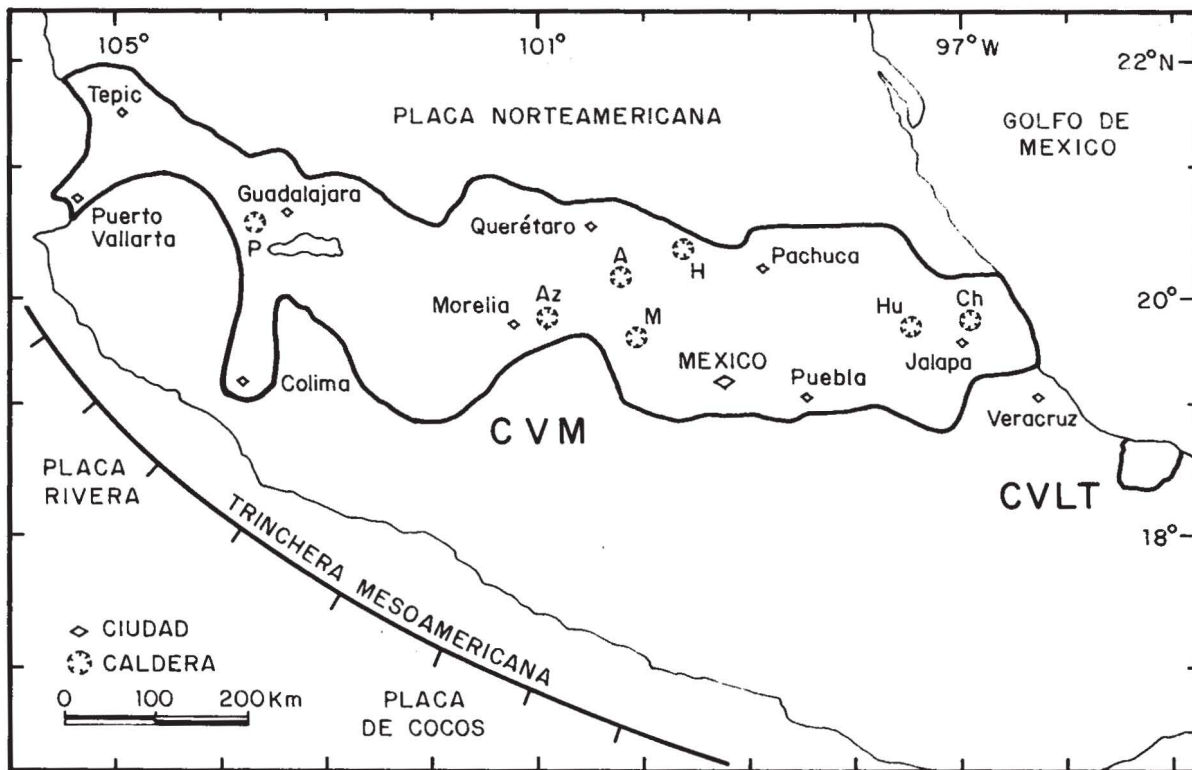


Fig. 1. Localización de las calderas del CVM (P = La Primavera, Az = Los Azufres, A = Amealco, M = Mazahua, H = Huichapan, Hu = Los Humeros, Ch = Chiconquaco); CVM = Cinturón Volcánico Mexicano; CVLT = Campo Volcánico de Los Tuxtlas.

- a) Agua Fría consiste en domos riolíticos con volumen de $\sim 13 \text{ km}^3$ y cubriendo un área de 35 km^2 , con edades entre $1.2 \pm 0.4 \text{ Ma}$ y $0.84 \pm 0.02 \text{ Ma}$ y localizado en la parte central del campo.
- b) San Andrés consiste en domos y flujos de composición dacítica y riolítica, volumen erupcionado de $\sim 18 \text{ km}^3$ y cubre un área de 70 km^2 , con edad de $0.33 \pm 0.07 \text{ Ma}$. Este grupo se localiza al este de Los Azufres.
- c) Yerbabuena constituido por domos de riolitas y riolíticas con volumen de $\sim 8 \text{ km}^3$, edades de $0.33 \pm 0.07 \text{ Ma}$ a $0.14 \pm 0.02 \text{ Ma}$ y localizada al oeste de Los Azufres.

La última actividad magmática del área está representada por la erupción de 52 conos tipo cinerítico compuestos por cenizas, brechas y lavas de composición basáltica que Carrasco-Núñez (1989) ha denominado Basaltos Cd. Hidalgo. El volumen erupcionado de estas rocas es $\sim 4.7 \text{ km}^3$.

Los Humeros

El campo geotérmico de Los Humeros se localiza en el Estado de Puebla, en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, a $\sim 180 \text{ km}$ al este de la Ciudad de México (Fig. 1). La geología es descrita por Pérez-Reynoso (1978), Demant (1981), Verma y López M.

(1982), Ferriz y Mahood (1984) y Romero-Ríos (1988).

El basamento local está constituido por un complejo paleozoico metamórfico e intrusivo, una secuencia sedimentaria mesozoica plegada, intrusiones sieníticas y granodioríticas del Terciario inferior y andesitas pliocénicas.

La primera actividad volcánica en el área está representada por la erupción de lavas andesíticas y ferrobásicas de la Formación Teziutlán (3.6 a 1.6 Ma). El colapso de la caldera de Los Humeros fue provocado por la erupción de la Ignimbrita Xáltipan (0.46 Ma); representa aproximadamente 115 km^3 de magma y es predominantemente de composición riolítica. Posterior al colapso, se formaron varios domos silícicos (0.3 Ma). Otra emisión de ignimbrita intermedia a ácida (Ignimbrita Zaragoza, 0.1 Ma) provocó el colapso de la Caldera de Los Potreros, dentro de la Caldera de Los Humeros. Las emisiones de andesitas, andesitas basálticas y lavas, pómez y cenizas de composición andesítica a riolítica (0.08 - 0.04 Ma) dieron origen a otra caldera (Calderita El Xalapazco) dentro de las anteriores.

La última actividad volcánica está representada por la eyección de aproximadamente 0.25 km^3 de basaltos de olivino, durante los últimos 0.02 Ma.

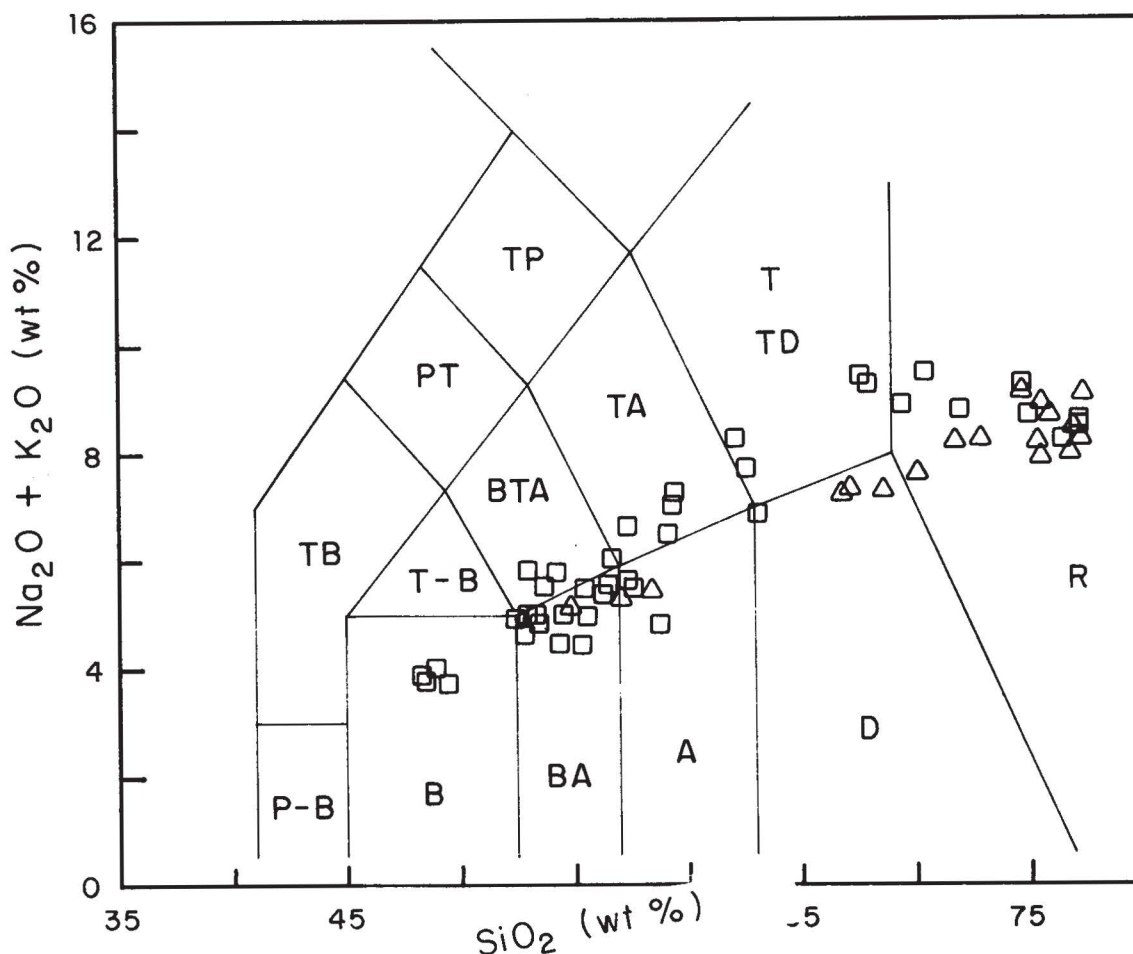


Fig. 2. Diagrama TAS (Total de Alkalies vs. Sílice; Le Bas *et al.*, 1986) para rocas de Los Azufres (triángulos) y Los Humeros (cuadros). Las subdivisiones son: P-B = basalto picrítico; B = basalto; BA = andesita basáltica; A = andesita; D = dacita; R = riolita; TB = basanita tefrítica; T-B = traqui-basalto; BTA = traqui-andesita basáltica; TA = traqui-andesita; TD = traqui-dacita; T = traquita; PT = fono-tefrita; TP = tefri-fonolita.

GEOQUIMICA

En la Figura 2 se presenta el diagrama TAS (Total de Alkalies vs. Sílice; Le Bas *et al.*, 1986) donde se grafican los resultados de los análisis geoquímicos para rocas de Los Azufres y Los Humeros, según datos de Dobson y Mahood (1985) y Verma y López-M. (1982), respectivamente. Se observa que existe en ambos campos evolución petrológica, variando de basaltos hasta riolitas.

Cathelineau *et al.* (1987) presentan un modelo de evolución magmática para Los Azufres, así como Verma (1984, 1985) y Ferriz y Mahood (1987) para Los Humeros, proponiendo para ambos campos la cristalización fraccionada como proceso dominante y partiendo de magmas de composición basalto-olivínico (Fig. 3a y b). El volumen de la cámara es calculado mediante balance de masas, siendo de ~ 400 km³ para Los Azufres y de ~ 1,500 km³ para Los Humeros (Verma, 1985). En ambos casos, el número de fases a modelar es de cuatro, desde

basaltos hasta riolitas. Recientemente, Navarro-L. (1992) y Verma *et al.* (1992) proponen un modelo más discretizado para el proceso de cristalización fraccionada (23 fases) en la Caldera de Huichapan. Cabe mencionar que modelos geoquímicos para los campos geotérmicos de Los Azufres y Los Humeros similares al de Huichapan serían de mucha utilidad en las modelaciones térmicas de fuentes de calor.

METODOLOGIA

En trabajos anteriores de modelación térmica, como los realizados por Castillo-Román y Verma (1989) y Castillo-Román *et al.* (1991), el aporte de calor por la solidificación del magma se considera aumentando en 300°C la temperatura inicial del magma, de la forma en que proponen Giberti *et al.* (1984). La ecuación utilizada es la siguiente:

$$T_e = T_o + (L/c) \quad (1)$$

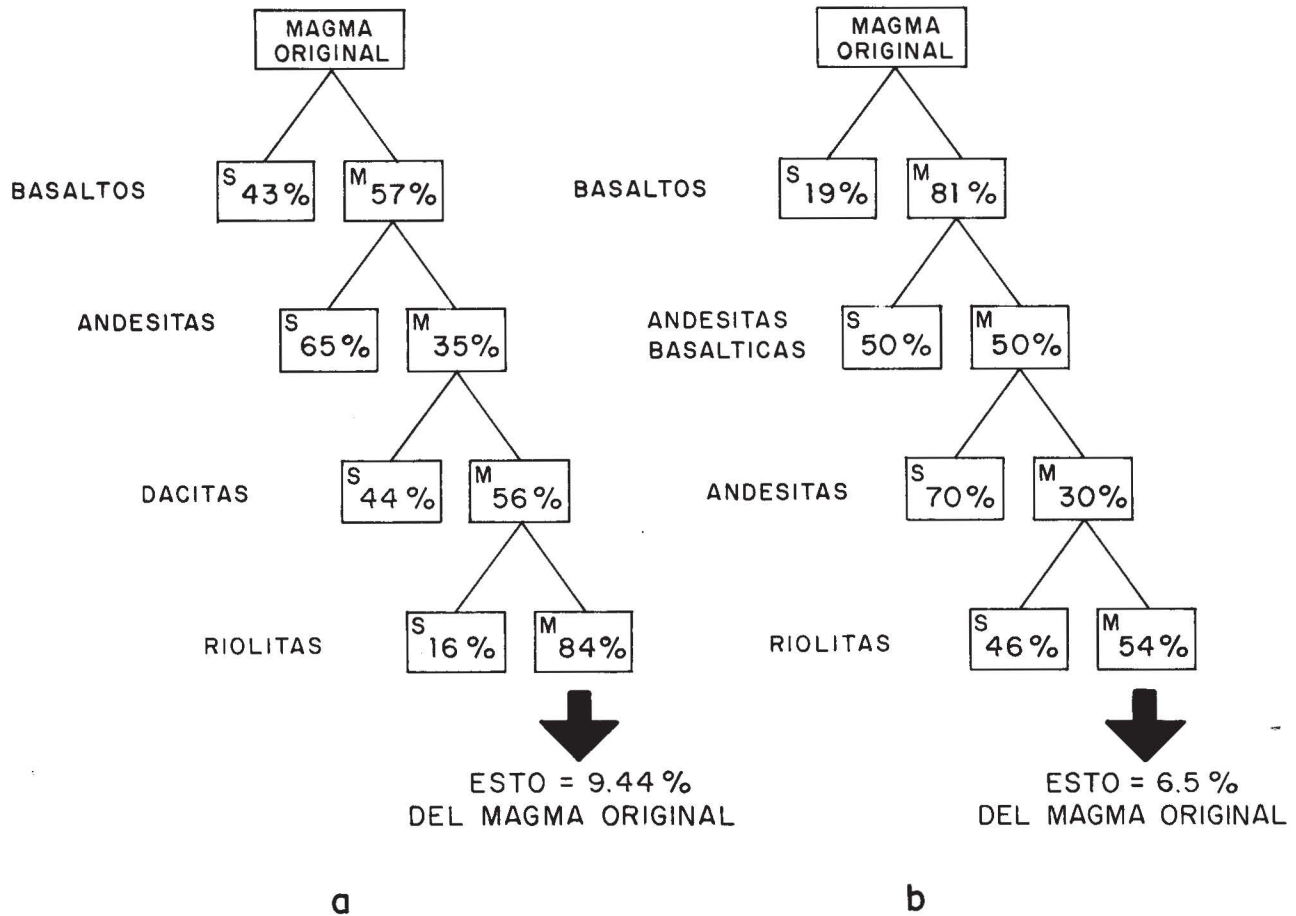


Fig. 3. Modelos de evolución por el proceso de Cristalización Fraccionada a) Los Azufres y b) Los Humeros (S = Sólido, M = Magma).

en donde T_e es la temperatura efectiva, T_o es la temperatura inicial, L corresponde al calor latente de solidificación del magma y c es el calor específico de la intrusión.

En el presente trabajo, para el cálculo de la cantidad de calor liberado, se toma en cuenta la evolución geoquímica de la cámara, discretizándose este proceso en igual número de fases de la cristalización fraccionada.

Se calculan primeramente los porcentajes en peso de magma y minerales presentes en cada fase, al igual que los porcentajes de los minerales que participan, expresados con respecto al peso total de la cámara.

Con la información anterior y tomando en cuenta el calor latente de fusión de cada mineral y peso total de la cámara, se obtiene el aporte de calor por mineral y por fase.

Con los valores de calor por fase, expresados en Joules, se calcula el aumento de temperatura del material de la cámara a fin de involucrar esto en el modelado térmico. Para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 + \frac{\sum_{i=1}^n L(i) \cdot m(i)}{\sum_{i=1}^n M(i) \cdot c(i)} \quad (2)$$

en donde T_2 es la temperatura efectiva, T_1 es la temperatura inicial del magma, para el material original, así como el diferenciado según la etapa de cristalización considerada, $L(i)$ es el calor latente de cada mineral que cristaliza, $m(i)$ es la masa de mineral por fase, M es la masa del material solidificado y $c(i)$ es el calor específico de cada uno de los componentes de la cámara, repitiéndose esto según las fases de cristalización (n).

RESULTADOS Y DISCUSION

En las Tablas 1 y 2 se muestran los porcentajes de minerales solidificados en cada fase durante el enfriamiento para ambos campos geotérmicos. Estos porcentajes están

Aporte de calor por cristalización fraccionada en dos campos geotérmicos

Tabla 1

Porcentaje de minerales solidificados en cada fase de la cristalización fraccionada para el campo geotérmico de Los Azufres.

FASE	PLA	OLI	CPX	TMT	TOTAL POR FASE
BASALTO	21.00	17.00	5.00	---	43.00
ANDESITA	23.37	2.85	7.41	3.42	37.05
DACITA	6.19	0.60	1.20	0.80	8.79
RIOLITA	1.45	0.11	0.05	0.11	1.72
SUMA	52.01	20.56	13.66	4.33	90.56

(PLA = Plagioclasas, OLI = Olivinos, CPX = Clinopiroxenos, TMT = Titanoamagnetitas; nomenclatura utilizada en las Tablas 1-4).

Tabla 2

Porcentaje de minerales solidificados en cada fase de la cristalización fraccionada para el campo geotérmico de Los Humeros.

NOMBRE DE FASE	PLA	OLI	CPX	TMT	TOTAL POR LA FASE
BASALTO	6.80	8.90	3.30	----	19.00
BASALTO-ANDESITA	17.01	16.20	7.29	----	40.50
ANDESITA	14.58	9.32	4.05	0.57	28.52
RIOLITA	3.24	-----≡1248X1.74		0.35	5.33
SUMA	41.63	34.42	16.38	0.92	93.35

(Para nomenclatura ver Tabla 1).

referidos al total de la masa de la cámara. Los minerales que participan son Plagioclasas (PLA), Olivinos (OLI), Clinopiroxenos (CPX) y Titanomagnetitas (TMT). En Los Azufres se solidifica ~91% del total del magma original y en Los Humeros ~94%, siendo la diferencia con respecto al 100%, para ambos casos, equivalente al magma diferenciado.

Con los datos de las tablas anteriores se construye la Figura 4, mostrándose los porcentajes de cada especie mineral para ambos centros volcánicos. Si en ambos casos partimos de un magma de la misma composición se esperaría que los porcentajes para cada especie mineral fuesen iguales, encontrándose que las titanomagnetitas y los clinopiroxenos cumplen tal suposición, no sucediendo así con los olivinos y plagioclasas. Esto da como resultado una mayor cantidad de olivino en la cámara de Los Humeros, mientras que en la de Los Azufres predominan las plagioclasas.

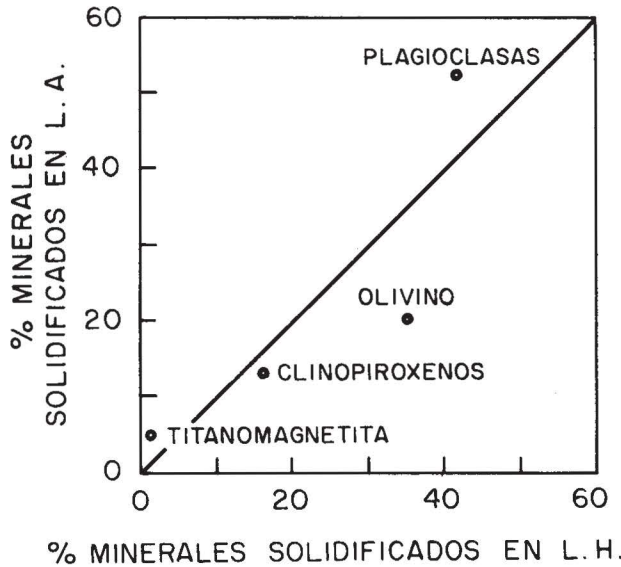


Fig. 4. Gráfica de comparación entre los porcentajes de minerales formados para Los Azufres (L.A.) y para Los Humeros (L.H.)

En la Figura 5 se grafican los valores acumulativos de magma cristalizado para ambos campos, cuyas tendencias se igualan a medida que avanza el proceso de diferenciación. En el caso de la fase común andesítica, el valor acumulado de minerales cristalizados es del ~88% para Los Humeros y de ~80% para Los Azufres. De lo anterior, se observa que la velocidad de enfriamiento para Los Humeros es mayor que en Los Azufres, en lo que se refiere a la cristalización de rocas máficas.

Los valores promedio de calor latente para cada mineral fueron tomados de Nicholls y Stout (1982), ya que no existen determinaciones de esta propiedad física de muestras de alguno de los campos geotérmicos, por lo que

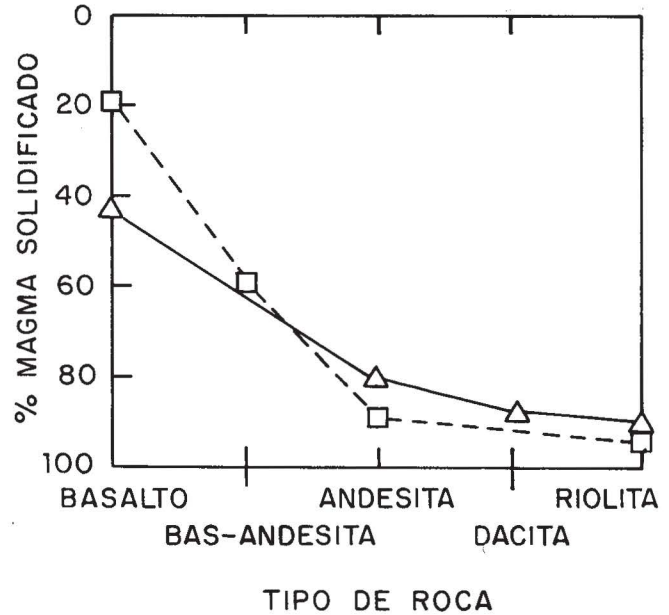


Fig. 5. Valores acumulativos de cristalización del magma para ambos campos geotérmicos (triángulos para Los Azufres y cuadros para Los Humeros).

se recomienda para estudios posteriores. Los valores son de 3.6824×10^5 J/kg para las plagioclasas, 8.3134×10^5 J/kg para los olivinos, 7.8067×10^5 J/kg para los clinopiroxenos y 5.9632×10^5 J/kg para las titanomagnetitas. Con estos valores y tomando en cuenta el porcentaje de cada mineral por fase y la masa total de la cámara, se calcula el aporte de calor para cada mineral, sumándose para obtener el aporte total de calor por fase y por especie mineral. Los resultados se presentan en las Tablas 3 y 4.

Con la información de las Tablas 3 y 4 y haciendo uso de la ecuación 2 se calcula el aumento de temperatura para cada fase. Para el cálculo anterior, los valores de calores específicos son tomados a la temperatura promedio de cristalización de cada una de las rocas involucradas en el modelo. Estos valores son: $1,400$ J/kg°C para el magma, $1,080$ J/kg°C para los basaltos, $1,100$ J/kg°C para las andesitas y $1,200$ J/kg°C para las dacitas, riolodacitas y riolitas (Touloukian *et al.*, 1981), ya que para ambos casos no han sido determinadas a temperaturas de solidificación de las rocas, sino a temperatura ambiente, tal y como se reporta en el trabajo de Contreras *et al.* (1988).

El aumento de temperatura, considerando la cristalización de las diferentes rocas en Los Azufres, es de $\sim 204^\circ\text{C}$ para basaltos, $\sim 163^\circ\text{C}$ para andesitas, $\sim 37^\circ\text{C}$ para dacitas y $\sim 7^\circ\text{C}$ para riolitas, siendo el aumento total de $\sim 411^\circ\text{C}$. Para el caso de Los Humeros, el aumento es de $\sim 93^\circ\text{C}$ para basaltos, $\sim 210^\circ\text{C}$ para andesitas basálticas, $\sim 44^\circ\text{C}$ para andesitas y $\sim 25^\circ\text{C}$ para riolodacitas, dando un aumento total de $\sim 472^\circ\text{C}$.

Aporte de calor por cristalización fraccionada en dos campos geotérmicos

Tabla 3

Aporte de calor por especie mineral en cada una de las fases para el campo geotérmico de Los Azufres (en 10^{19} J).

FASE	PLA	OLI	CPX	TMT	TOTAL POR FASE
BASALTO	8.04	14.70	4.06	----	26.80
ANDESITA	8.95	2.46	6.02	2.12	19.55
DACITA	2.37	0.52	0.97	0.49	4.35
RIOLITA	0.56	0.10	0.05	0.07	0.78
SUMA	19.92	17.78	11.10	2.68	51.48

(Para nomenclatura ver Tabla 1).

Tabla 4

Aporte de calor por especie mineral en cada una de las fases para el campo geotérmico de Los Humeros (en 10^{20} J).

FASE	PLA	OLI	CPX	TMT	TOTAL POR FASE
BASALTO	0.98	2.89	1.00	----	4.87
BASALTO-ANDESITA	2.44	5.25	2.21	----	9.90
ANDESITA	2.09	3.02	1.23	0.13	6.47
RIOLITA	0.48	----	0.55	0.08	1.11
SUMA	5.99	11.16	4.99	0.21	22.35

(Para nomenclatura ver Tabla 1).

El cálculo de aporte de calor puede ser más detallado si los modelos geoquímicos para la evolución magmática lo son también, modelándose con un mayor número de fases de formación de rocas. Es conveniente el proporcionar en cada fase la composición de los minerales que intervienen, con el fin de utilizar los valores específicos de calor latente para cada composición y no los promedios para cada serie mineral.

Los incrementos de temperatura calculados serán incluidos en las modelaciones térmicas en ambos campos geotérmicos, esto con el objeto de refinar más las ya existentes. La metodología para ello sería linealizar el aporte de calor a fin de darle similitud con el proceso continuo de cristalización fraccionada (Andaverde, 1991; Andaverde y Verma, 1993).

CONCLUSIONES

El cálculo del incremento de temperatura al considerarse la cristalización fraccionada en una cámara magmática resulta ser mayor que el propuesto por Giberti *et al.* (1984) en el que se consideraba el enfriamiento del magma en un paso y obteniendo un aumento de 300°C. El aumento de temperatura resulta de ~411°C para el caso de Los Azufres y de ~472°C para Los Humeros, al tomar en cuenta la cristalización fraccionada

Un modelo geoquímico más detallado considerando las propiedades termofísicas de las rocas a diferentes temperaturas así como mayor información experimental resultarían en mejores estimaciones del aporte de calor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado bajo el auspicio del IIE y el CONACYT (Convenio P221CCON891521). Agradecemos al Sr. A. Patiño, quién realizó profesionalmente las figuras presentadas. Las críticas constructivas de los árbitros y de los editores del número especial nos ayudaron a mejorar nuestra presentación.

BIBLIOGRAFIA

ANDAVERDE, J., 1991. Modelado térmico de la cámara magmática en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México. *Tesis Profesional*, Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., México, 69 p + anexos.

ANDAVERDE, J. y S.P. VERMA, 1993. Programa de cómputo para involucrar la cristalización fraccionada en el modelado térmico de cámaras magmáticas. *Geothermia, Rev. Mex. Geoener.*, 19, 59-74.

ANDAVERDE, J., S.P. VERMA y F. SCHILDKNECHT, 1991. Aporte de calor al medio por el proceso de cristalización fraccionada de la cámara magmática del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México. *En: S.P. VERMA, J.A. RAMIREZ-F., C.O. RODRIGUEZ DE B., J.M. BARBARIN-C., G. IZQUIERDO-M., M.A. ARMIENTA-H. y D.J. TERRELL, (Eds.) Actas Fac. Ciencias Tierra UANL Linares, 6, 137-141.*

CAMACHO, F., 1979. Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán. Comisión Federal de Electricidad (reporte interno MICH/06/00/083 - MO83 - 0142), 18 p.

CASTILLO-ROMAN, J. y S.P. VERMA, 1989. Modelado térmico como una herramienta en estudios de áreas geotérmicas y volcánicas. *Unión Geofís. Mex. Bol., Geos, época II, 9, 217-230.*

CASTILLO-ROMAN, J., S.P. VERMA y J. ANDAVERDE, 1991. Modelado térmico de la Caldera de Los Humeros, Puebla, México. *Geofís. Int.*, 30, 135-148.

CARRASCO-NUÑEZ, G., 1989. Petrología del campo volcánico de Los Azufres. *Bol. Mineral.*, 4, 3-18.

CATHELINÉAU, M., R. OLIVER y D. NIEVA, 1987. Geochemistry series of the Los Azufres geothermal field (Mexico). *Geofís. Int., Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3B (Ed. VERMA, S.P.)*, 26, 273-290.

CONTRERAS, E., B. DOMINGUEZ, E. IGLESIAS, A. GARCIA y R. HUITRON, 1988. Compendio de resultados de mediciones petrofísicas de núcleos de perforación del campo geotérmico Los Azufres., *Geothermia, Rev. Mex. Geoener.*, 4, 79-105.

DE LA CRUZ, V., J. AGUILERA, D. ORTEGA y J.M. SANDOVAL, 1982. Estudio geológico-estructural a detalle del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Comisión Federal de Electricidad (reporte interno MICH/06/00/610 -MO88 - 0075), 41 p.

DEMANT, A., 1981. L'axe néo-volcanique transmexicain, étude volcanologique et petrographique significant géodynamique. *Ph. D. thesis*, Univ. de Droit, d'économie et des Sciences d'Aix-Marseille, 259 p y appendix 106 p.

DOBSON, P.F. y G.A. MAHOOD, 1985. Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *J. Vulcanol. Geotherm. Res.*, 25, 273-287.

- FERRARI, L., V.H. GARDUÑO, G. PASQUARE y A. TIBALDI, 1991. Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics. *Calderas: Genesis, Structure and Unrest (Ed. S. P. Verma) J. Vulcanol. Geotherm. Res.*, 47, 129-148.
- FERRIZ, H. y G.A. MAHOOD, 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89, 8511-8524.
- FERRIZ, H. y G.A. MAHOOD, 1987. Strong compositional zonation in a silicic magmatic system: Los Humeros, Mexican Neovolcanic Belt. *J. Petrol.*, 28, 171-209.
- GIBERTI, G., S. MORENO y G. SARTORIS, 1984. Evaluation of approximations in modelling the cooling of magmatic bodies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 297-310.
- LE BAS, M.J., R.W. LE MAITRE, A. STRECKEISEN y B. ZANETTIN, 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27, 745-750.
- NAVARRO-L., I., 1992. Balance petrológico de rocas volcánicas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. *Tesis Profesional*, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.
- NICHOLLS, J. y M.Z. STOUT, 1982. Heat effects of assimilation, crystallization and vesiculation in magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 81, 328-339.
- PEREZ-REYNOSO, J., 1978. Geología y petrografía de la caldera de los Humeros. *Geomimet*, 3a. época, 91, 97-106.
- ROMERO-RIOS, F., 1988. Análisis de las estructuras en el subsuelo de Los Humeros, Puebla. *Geofis. Int.*, 21, 295-307.
- TOULOUKIAN Y.S., W.R. JUDD y R.F. ROY, 1981. Physical properties of rocks and minerals. McGraw Hill, New York. 502 p.
- VERMA, S.P., 1984. Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico. *J. Vulcanol. Geotherm. Res.*, 20, 21-40.
- VERMA, S.P., 1985. On the magma chamber characteristics as inferred from surface geology and geochemistry: examples from Mexican geothermal areas. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 41, 207-214.
- VERMA, S.P., 1990. Metodología para el estudio del Cinturón Volcánico Mexicano. *Bol. IIE*, 14, 224-229.
- VERMA, S.P y M. LOPEZ-M., 1982. Geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico. *Bull. Vulcanol.*, 45, 63-79.
- VERMA, S.P., I. NAVARRO-L. y L. GARCÍA-CACHO, 1992. Major element geochemistry and mineralogy of Huichapan Caldera, Hidalgo, Mexico. *J. South Am. Earth Sci.*, 5, 327-336.
-
- Jorge Andaverde¹, Surendra P. Verma¹ y Friedrich Schildknecht²
- ¹Depto. de Geotermia, Div. Fuentes de Energía Instituto de Investigaciones Eléctricas Apdo. Postal 475, Cuernavaca, Mor. 62000, México.
- ²Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. Apdo. Postal 104, Linares, N.L., 67700, México.