

Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración

Raymundo G. Martínez Serrano^{1,2} y Chantal Alibert¹

¹Centre de Recherches Péetrographiques et Géochimiques, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

²Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F., México.

Recibido: 14 de enero, 1994; aceptado: 18 de abril, 1994.

RESUMEN

Las rocas volcánicas presentes en el sistema geotérmico Los Humeros varían de andesitas-basálticas a riolitas con diferentes grados de alteración hidrotermal. Los estudios petrográficos realizados, aunados con análisis de difracción de Rayos X, permitieron determinar que los minerales de alteración son de diversos tipos; sin embargo, éstos se presentan en asociaciones paragenéticas indicadoras de temperaturas que varían de 150° a más de 300° C. Este rango de temperaturas coincide con el gradiente actual del sistema. La composición de elementos mayores y traza de las diversas unidades litológicas permite proponer que las rocas volcánicas de Los Humeros siguen un comportamiento evolutivo calcoalcalino con un ligero enriquecimiento en potasio. Ciertos elementos químicos (Zr, V, Ti o P), considerados como relativamente inmóviles bajo la acción hidrotermal, fueron utilizados en la estimación de la transferencia de masa ocurrida dentro de las rocas volcánicas del sistema. El uso de relaciones isotópicas ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr como indicadores de la procedencia de ciertos constituyentes químicos puede ser de gran utilidad. En el caso de Los Humeros las rocas volcánicas y las calcitas hidrotermales presentan valores isotópicos similares (0.70414 promedio), lo cual indica que los constituyentes químicos del tipo Ca y Sr fueron derivados de fuentes magmáticas similares. Dichos valores isotópicos contrastan con los valores encontrados en las rocas carbonatadas del basamento (0.70730).

PALABRAS CLAVE: Sistema geotérmico, alteraciones hidrotermales, elementos mayores, elementos traza, valores isotópicos ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr.

ABSTRACT

Volcanic rocks of the Los Humeros geothermal system range in composition from basaltic andesites to rhyolites and display different degrees of hydrothermal alteration. Petrographic examination, combined with x-ray diffraction, permitted the identification of different alteration minerals in paragenetic associations indicating temperatures from 150° to more than 300° C. This temperature range coincides with the current thermal gradient in the system. Major and trace elements from different lithological units suggest that the volcanic rocks from Los Humeros follow a calc-alkaline evolutionary trend with slight enrichment in potassium. The study of certain chemical elements (Zr, V, Ti o P), considered as relatively immobile in a hydrothermal environment, allow the estimation of mass transfer in volcanic rocks of the system. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios can be very useful as indicators for the source of certain chemical components (Ca and Sr). In the case of Los Humeros, volcanic rocks and hydrothermal calcites with similar isotopic values (averaging 0.70414) indicate that the chemical constituents were derived from similar magmatic sources. These isotopic values contrast with those found in the carbonate basement rocks (0.70730).

KEY WORDS: geothermal system, hydrothermal alterations, major elements, trace elements, isotopic values ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr.

INTRODUCCION

Los sistemas geotérmicos activos son considerados como grandes laboratorios naturales donde la mayor parte de los parámetros geológicos, petrográficos y fisicoquímicos que intervienen en las interacciones fluido-roca pueden ser determinados directamente. En este sentido, resulta de gran interés el caracterizar el tipo de transformaciones mineralógicas, químicas y físicas que han sufrido las rocas encajonantes de un sistema geotérmico dado. Dichas caracterizaciones son útiles, por ejemplo, en la explicación de la presencia de ciertas asociaciones minerales secundarias, o en la comprensión de la evolución térmica que ha seguido un campo geotérmico a través de la proposición de diversos modelos geoquímicos de funcionamiento.

Son objetivos de este trabajo: 1) reconstruir la columna litológica del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y determinar la mineralogía de alteración presente, a través de un estudio petrográfico detallado; 2) determinar las concentraciones de elementos mayores y traza de las principa-

les unidades litológicas del sistema; 3) discriminar los posibles cambios químicos que han sufrido las rocas encajonantes del sistema, por el efecto de la circulación de fluidos calientes, usando como referencia resultados químicos de rocas sanas ubicados en la misma región; 4) determinar el posible origen de los constituyentes catiónicos de los carbonatos y de las rocas volcánicas de Los Humeros mediante el análisis isotópico de estroncio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) de diversas muestras.

MARCO GEOLOGICO

El sistema geotérmico Los Humeros se localiza en la parte centro-oriental de México, dentro de un centro volcánico complejo de tipo caldera de edad inferior a 500 000 años (Yañez-G., 1980; Ferriz, 1982; Ferriz y Mahood, 1984; Martínez-S., 1993). Este centro volcánico se encuentra en la parte oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) del plio-cuaternario (Robin, 1982), casi en los límites con la provincia volcánica alcalina del Golfo (Figura 1) (Torres-R. *et al.* 1988). Las manifestaciones termales así

como la mayor parte de los pozos de exploración se ubican dentro de una pequeña región llamada Colapso Central - Xalapazco, al interior de las calderas "concéntricas" Los Potrereros y Los Humeros (Figura 2).

La región de Los Humeros ha sido estudiada en reiteradas ocasiones durante los últimos 25 años por diversos autores y con diferentes fines. Gracias a estos estudios se puede mencionar que la columna litológica de la región está compuesta por un basamento metamórfico de esquistos de clorita-muscovita, intrusionado por rocas graníticas del Paleozoico (Yañez-G. 1980, Ferriz, 1982, Ferriz y Mahood, 1984); Una secuencia mesozoica formada por rocas clásticas y calcáreas de más de 3000 m de espesor sobreyace al basamento metamórfico. Las rocas clásticas están formadas por conglomerados, areniscas y lutitas del Triásico-Jurásico medio (Viniegra-O., 1965; Menes-L., 1965 y Tarango-O., 1967), mientras que las rocas calcáreas fueron depositadas durante el Jurásico medio - Cretácico superior en diversos ambientes marinos (Viniegra-O., 1965, Yañez-G. *et al.*, 1979 y Yañez-G. 1980).

Después de un intenso período de deformación y erosión aparecieron los primeros eventos volcánicos de la región. Una serie de lavas andesíticas de piroxeno y brechas andesíticas, llamadas Formación Teziutlán, cuya edad varía de 3.5 ± 0.3 a 1.55 ± 0.1 m.a. (K-Ar, Yañez-G., 1980), conforman estos primeros eventos volcánicos. Sin embargo, la mayor parte de las unidades volcánicas de Los Humeros (más de 1500 m de espesor) fueron emplazadas hace menos de 500 000 años, siendo acompañadas por la formación de calderas (Figura 2). La Figura 3 muestra una columna litológica esquemática de la región, la cual fue compilada a partir de las descripciones de Yañez-G. (1980) y Ferriz y Mahood (1984).

TECNICAS ANALITICAS Y MUESTRAS ANALIZADAS

La Comisión Federal de Electricidad ha perforado más de 30 pozos de exploración y explotación dentro de las zonas anómalas del Colapso Central, Xalapazco y Corredor Maztaloja, cuyas profundidades varían de 1600 a 2800 m. La mayoría de las perforaciones realizadas producen una mezcla de abundante vapor y agua relativamente salada, donde las entalpías de mezcla de fluidos varían de 1300 a 2600 joules/g. Dado que la mayor parte de los pozos de exploración se han perforado en las zonas anómalas del campo, es aquí donde se conocen con mayor detalle las características litológicas y petrográficas del sistema.

Para la realización de los estudios de este trabajo se contó con material de recortes de pozo (cutting) muestreados cada 20 m, en cinco pozos de exploración. Cuatro pozos se localizan en la zona del Colapso Central (H15, H16, H17 y H29) y el quinto (H12) en las proximidades del Xalapazco (Figura 2).

Con este muestreo sistemático se logró efectuar un estudio petrográfico detallado cada 20 m, con el fin de determinar las características petrográficas de las unidades atravesadas y tratar de reconstruir la columna litológica del cam-

po. Al mismo tiempo, se distinguió la mineralogía primaria de las rocas de la mineralogía de alteración producida por la circulación de fluidos calientes. Esto permitió tener un perfil continuo del grado y naturaleza de las alteraciones hidrotermales presentes. Los estudios petrográficos se llevaron a cabo mediante la observación de más de 600 muestras de roca, con la ayuda de un microscopio binocular, además de la observación de detalle de casi 250 láminas delgadas bajo los microscopios petrográfico y mineralográfico. La identificación de la mayor parte de los minerales de alteración fue facilitada gracias a que las rocas volcánicas de Los Humeros son relativamente recientes y no muestran ninguna alteración anterior al funcionamiento del sistema.

Se recurrió a técnicas de difracción de rayos X para identificar ciertos minerales de alteración que no son característicos bajo el microscopio petrográfico. Dichos análisis de difracción se desarrollaron sistemáticamente cada 100 m en muestras del pozo H16. Las muestras fueron molidas finamente y compactadas para su análisis posterior en un difractómetro tipo JOBIN - YBON, perteneciente al Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (C.R.P.G.) de Nancy, Francia. La técnica de muestra compactada, utilizada aquí, es equivalente a la técnica de muestras orientadas colocadas sobre una lámina de vidrio. El límite de detección del difractómetro se sitúa entre el 1 y 2% de la muestra total.

Se determinaron las concentraciones de los elementos mayores y traza. Esto se llevó a cabo mediante el análisis químico de 50 muestras de roca representativas de las diferentes unidades volcánicas identificadas, cuyo contenido de minerales de alteración era inferior a 15%. Los análisis químicos fueron efectuados con la ayuda del Servicio de Análisis del C.R.P.G. de Nancy, Francia, utilizando las técnicas de emisión-ICP, para los elementos mayores y de ICP-MS, para los elementos traza (Govindaraju, 1989). Los resultados químicos fueron determinados con una incertidumbre máxima de 10% para los elementos mayores y de 5% para los elementos traza.

Las composiciones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de diversas muestras de calcita y roca entera fueron medidas en un espectrómetro de masas multicolector tipo Finnigan MAT 262 perteneciente al C.R.P.G. de Nancy, Francia. La preparación de las muestras así como la realización de las medidas se realizaron en colaboración con Danielle Dautel, del mismo centro de investigaciones.

ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA COLAPSO CENTRAL - XALAPAZCO

Gracias a los estudios petrográficos realizados en este trabajo sobre muestras de los pozos H15, H16, H17, H29 y H12, además de la información geológica obtenida por otros autores (Gutiérrez-N., 1982a y 1982b; Viggiano y Robles, 1988a y 1988b), sobre los pozos H8, H4, H1 y H6, se pudo reconstruir la columna litológica del sistema geotérmico Los Humeros.

Los pozos perforados en las zonas del Colapso Central y Xalapazco cortan aproximadamente las mismas unidades litológicas. Las únicas diferencias observadas fueron el es-

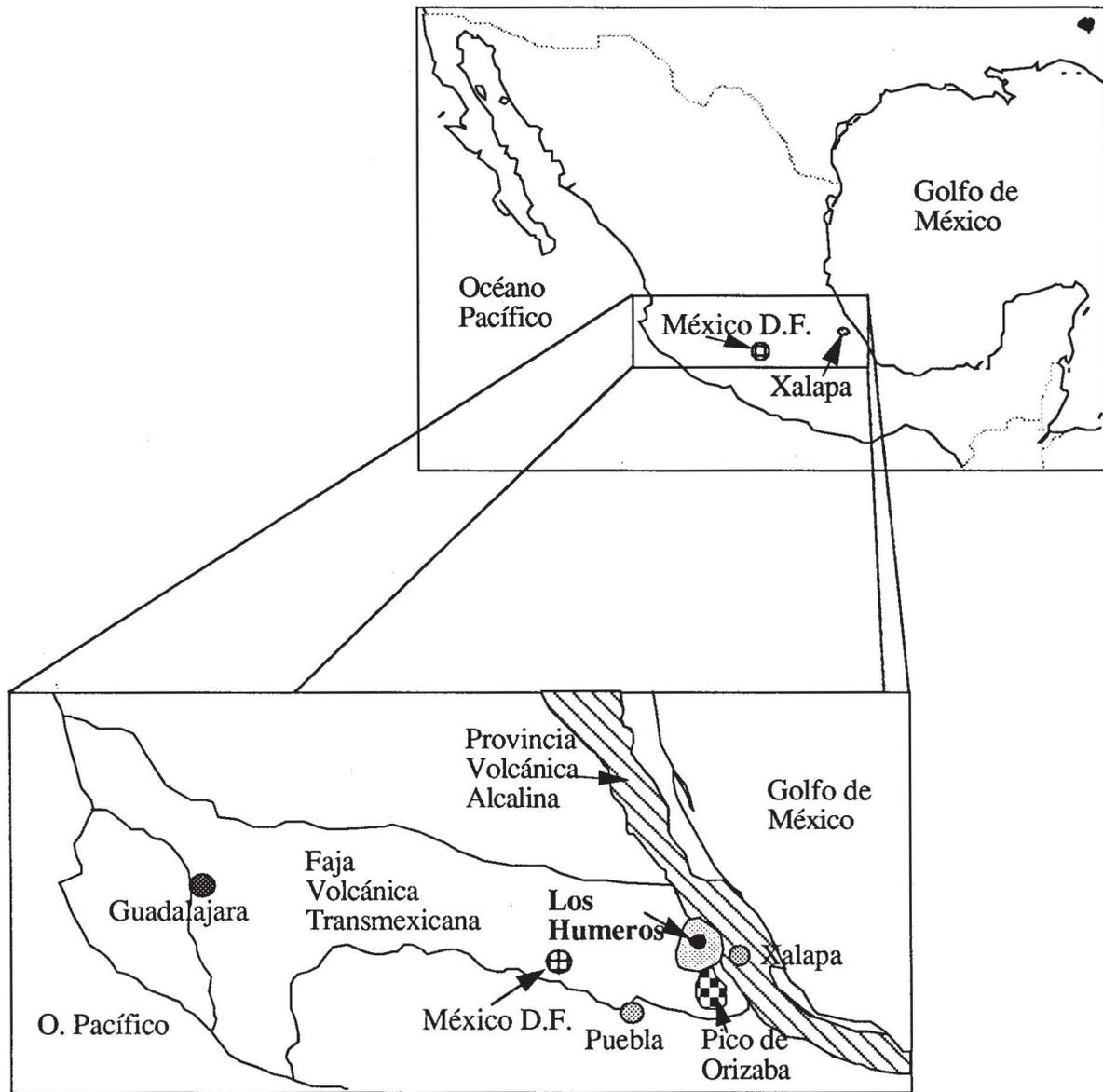


Fig. 1. Localización del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla. Este se ubica en el extremo oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, casi en los límites con la Provincia Volcánica Alcalina del Golfo.

pesor de las unidades, la textura de las rocas, una ligera variación en la composición petrográfica y el tipo y distribución de los minerales de alteración presentes. Las Figuras 4 y 5 presentan las secciones litológicas A - B y B - C respectivamente, reconstruidas a partir de los resultados petrográficos (Figura 2). Las características mayores de las unidades litológicas del sistema geotérmico Los Humeros pueden ser descritas de la siguiente manera:

i) La unidad litológica más profunda, cortada por los pozos H15, H16, H17 y H29 (Colapso Central) pertenece a una serie de calizas con diversas texturas y tipo de fauna. Esta unidad, considerada como parte del basamento de la región, pertenece al Cretácico Superior, de acuerdo

con las correlaciones y edades paleontológicas (Viniégra-O. 1965, Yañez-G. 1980). Estas rocas carbonatadas han sido afectadas por fenómenos de metamorfismo de contacto o hidrotermalismo de alta temperatura, ya que se encuentran parcialmente transformadas a skarn de wolastonita, granate, clinopiroxeno y calcita recristalizada. La presencia de un cuerpo intrusivo cercano es muy probable, ya que en algunos pozos se pudieron recuperar algunos fragmentos de rocas graníticas poco alteradas.

ii) Andesitas y dacitas microlíticas, traquíticas y algunas veces porfiríticas, cuyos espesores varían de 100 a 500 m, recubren discordantemente las calizas cretácicas. Estas rocas están compuestas por algunos fenocristales de

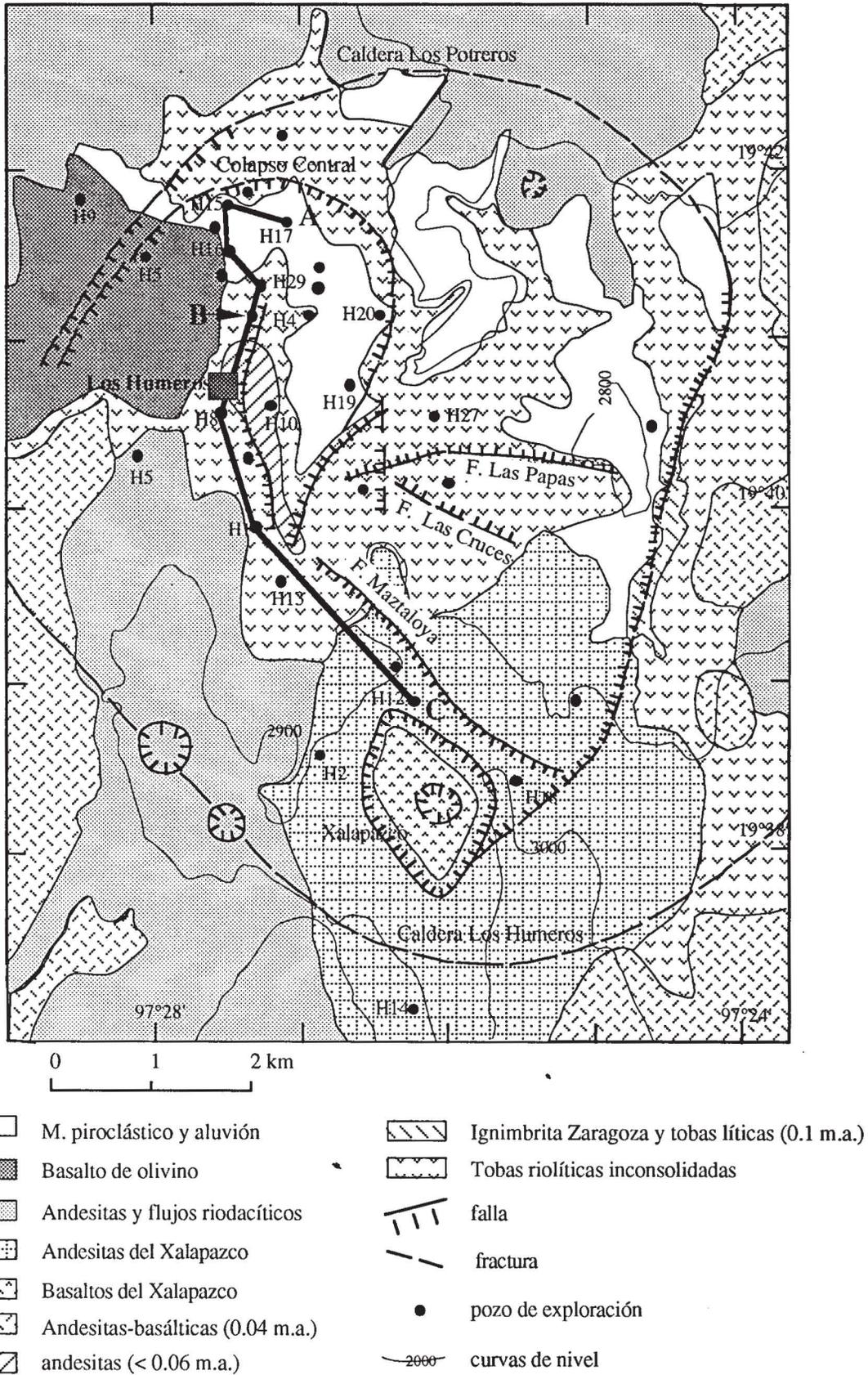


Fig. 2. Mapa geol3gico de la caldera de Los Humeros, Puebla (modificado de Yañez-G., 1980 y Ferriz y Mahood, 1984). Las rectas A-B y B-C se±alan la posici3n de las secciones litoestratigr3ficas construidas en las Figuras 4 y 5.

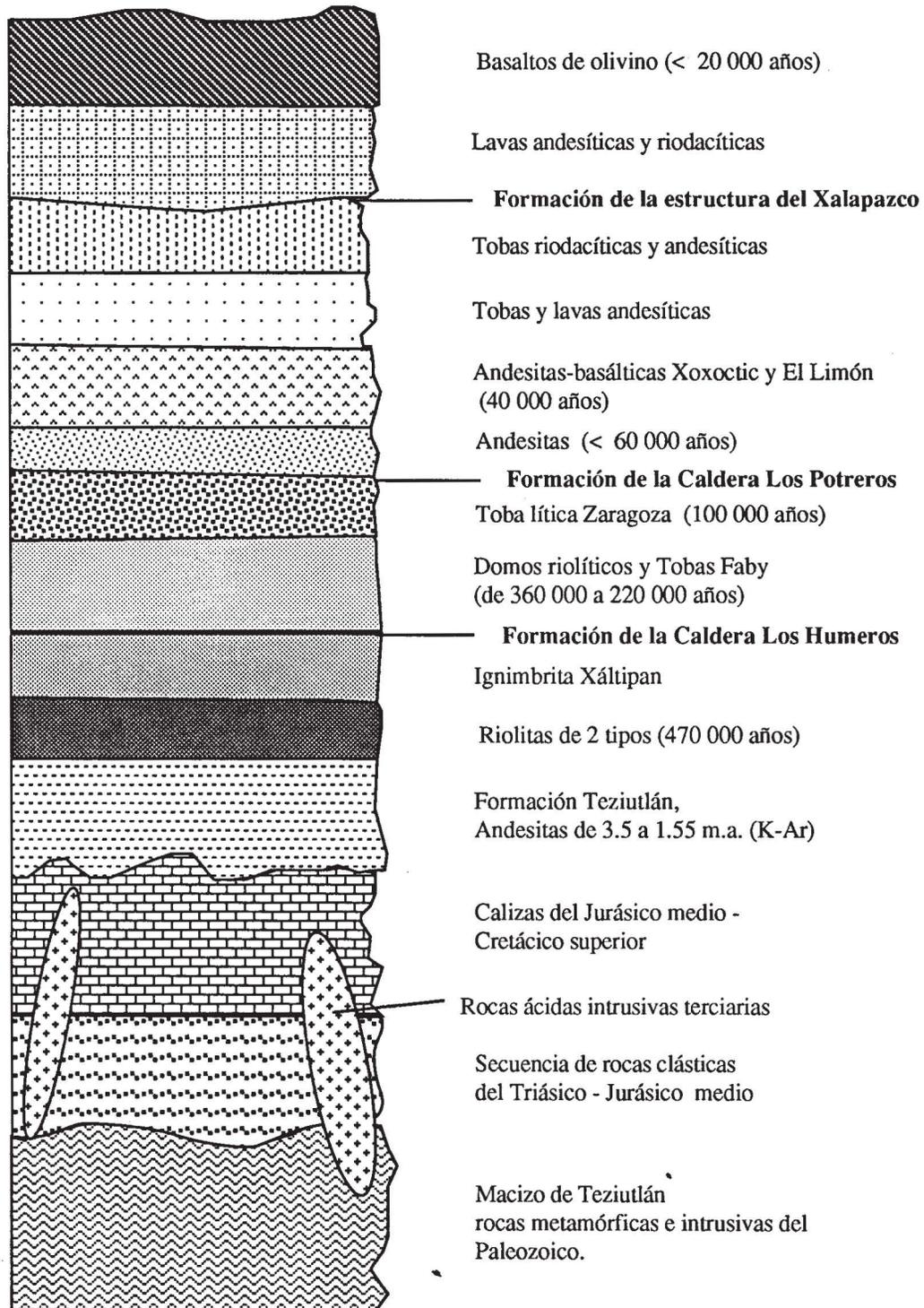


Fig. 3. Columna litológica esquemática del centro volcánico Los Humeros. Esta describe de una manera sencilla las principales unidades litológicas observadas y los eventos volcánicos ocurridos en la región. La columna fue reconstruida a partir de información geológica de Yañez-G. (1980) y Ferriz y Mahood (1984).

plagioclasa (An_{20-40}), ocasionalmente cuarzo, y hornblenda verde oscuro, todos incluidos dentro de una matriz de microlitos de plagioclasa (An_{50-60}) y vidrio de composición intermedia. Ocasionalmente la augita es el

mineral accesorio predominante de estas rocas. Los pozos H29 y H16 (Figura 4) cortaron una pequeña capa de tobas andesíticas sin consolidar, formada por lapilli y cenizas volcánicas, a más de 1900 m de profundidad.

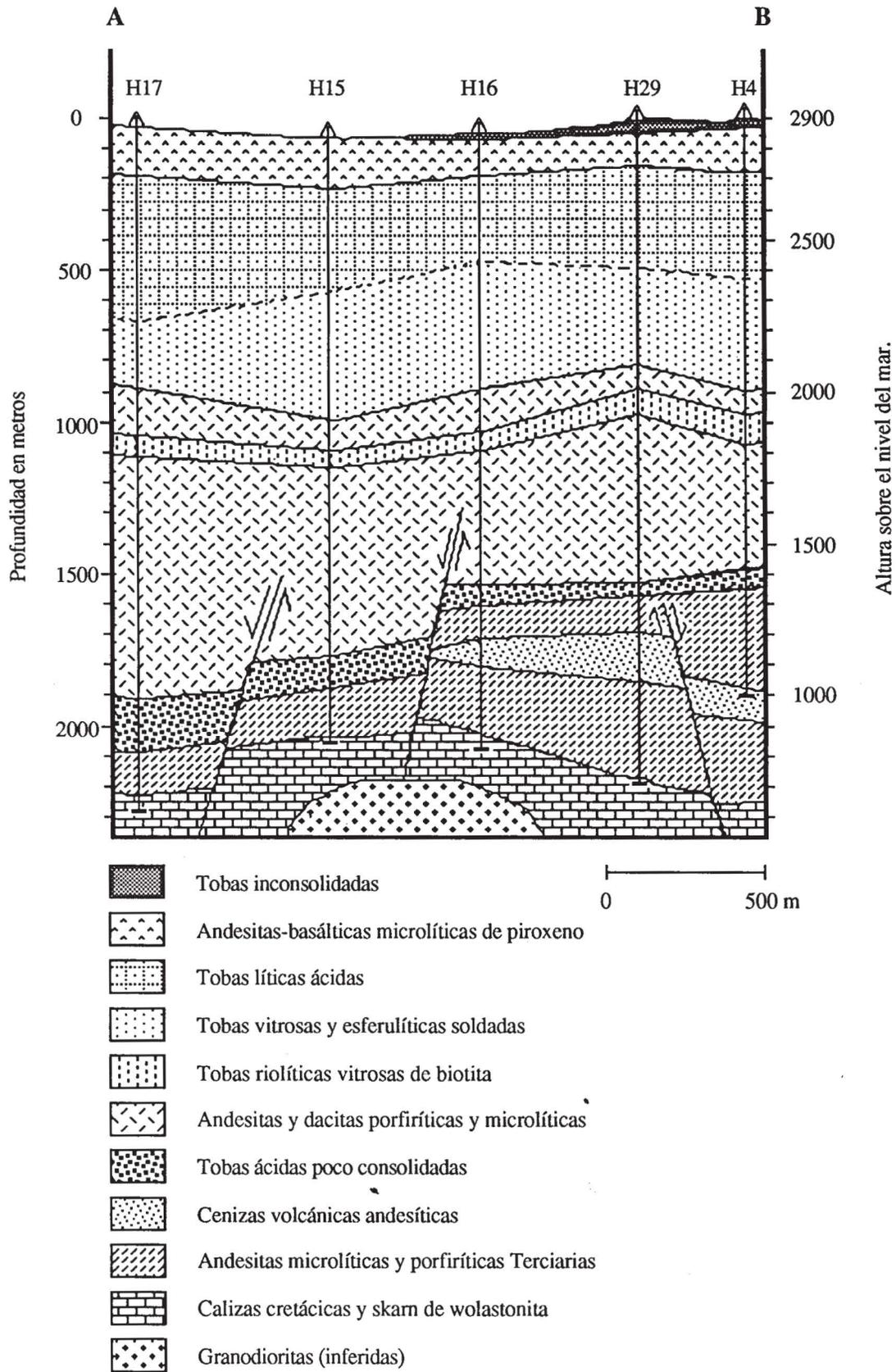


Fig. 4. Sección litoestratigráfica A - B. Esta fue reconstruida a partir de la descripción petrográfica de muestras de los pozos H17, H15, H16 y H29 ubicados en la zona del Colapso Central.

Este conjunto de rocas puede asociarse con la Formación Teziutlán descrita por Yañez-G. (1982), cuya edad es de 3.5 m.a. Los principales minerales de alteración observados en estas rocas son epidota, anfíbol, cuarzo, un poco de piroxeno, clorita y biotita. Excepcionalmente se ha observado granate y wolastonita de origen hidrotermal.

- iii) Un conjunto de riolitas y tobas riolíticas, de 50 a 100 m de espesor, con diferentes texturas y grados de consolidación se presenta sobre la unidad anterior. Así, se pueden distinguir tobas vitrosas con algunos fragmentos de cuarzo y feldespato potásico, tobas líticas con abundantes fragmentos de riolita y andesita dentro de una mesóstasis de vidrio ácido y riolitas esferulíticas. La alteración hidrotermal de esta unidad es ligera, observándose sobre todo cuarzo, clorita y a veces epidota.
- iv) Un conjunto de andesitas, dacitas, algunas tobas andesíticas y ciertos niveles de tobas riolíticas, alcanzando un espesor promedio de 800 m, conforman la siguiente unidad. La textura de estas rocas es porfirítica y eventualmente microlítica o traquítica. Se presentan algunos fenocristales de oligoclasa-andesina (An_{20-40}) y cuarzo dentro de una pasta de microlitos de plagioclasa, augita fina, magnetita y vidrio de composición intermedia. Los niveles riolíticos muestran espesores relativamente pequeños dentro de las andesitas. Así, sólo el nivel encontrado a 1100 m de profundidad pudo ser identificado dentro de la columna (Figura 4). Estas rocas muestra el mayor grado de alteración hidrotermal del sistema, ya que el porcentaje de minerales secundarios puede alcanzar hasta el 60% del total de la roca original. Se observa abundante epidota, clorita, feldespato-K, cuarzo, anfíbol, un poco de granate y clinopiroxeno.
- v) La unidad precedente está cubierta por rocas ácidas cuyo espesor promedio es de 700 m. Este paquete de rocas ácidas fue dividido en dos sub-unidades debido a las características petrográficas observadas. La sub-unidad más profunda está constituida por tobas riolíticas, riolitas esferulíticas y algunas ignimbritas. Se observan algunos fragmentos de cuarzo, feldespato potásico y algo de biotita diseminada dentro de una matriz desvitrificada, o bien, esferulitas alteradas a feldespato-K, cuarzo, arcillas, clorita y a zeolitas. El espesor promedio de esta sub-unidad varía de 200 a 500 m pero aumenta hacia el Xalapazco (Figuras 4 y 5). La sub-unidad superior está formada por tobas líticas ácidas. Los líticos pertenecen a calizas fosilíferas, andesitas, microdioritas y riolitas, todos dentro de una matriz vítrea ácida ligeramente alterada a minerales arcillosos, cuarzo, calcita y un poco a clorita. El espesor promedio observado para esta segunda sub-unidad varía de 100 a 300 m.
- vi) La última unidad importante de la sección se compone de andesitas y andesitas-basálticas de texturas afañítica y microlítica. Estas contienen raros fenocristales de plagioclasa (An_{20-40}) y clinopiroxeno, dentro de una matriz

fina de microlitos de plagioclasa (An_{50-60}) y vidrio oscuro abundante poco alterado. Hacia el Xalapazco se observa un aumento en la cantidad del clinopiroxeno (augita-diosida), por lo que algunas veces este ferromagnésiano puede formar texturas glomeroporfídicas en las andesitas basálticas. Los minerales de alteración observados aquí son: calcedonia, calcita, minerales arcillosos, clorita escasa y algunas zeolitas. El espesor de esta unidad varía de 150 m, en el Colapso Central, a 400 m cerca del Xalapazco, lo cual indica que el conducto volcánico de erupción se encuentra en las proximidades de esta última localidad.

- vii) Finalmente, algunas zonas del campo geotérmico muestran una capa muy delgada de tobas ácidas sin consolidar, mezcladas con material aluvial y suelos actuales, los cuales algunas veces muestran sílice amorfa, calcedonia, sulfatos, minerales arcillosos y algo de azufre nativo (Figuras 4 y 5).

Las unidades litológicas del campo geotérmico están cortadas por diversas fallas normales lo cual da el aspecto de un conjunto de bloques de formas irregulares al subsuelo de Los Humeros (Campos-E. y Arredondo-F., 1992). Dichas fallas son muy importantes desde el punto de vista de circulación de fluidos, ya que algunas de ellas actúan como límites laterales, mientras que otras son los principales conductos donde ocurre la mayor circulación.

MINERALOGIA HIDROTHERMAL

La Figura 6 muestra la lista de los principales minerales de alteración encontrados en los estudios petrográficos con respecto a los rangos de temperatura observados en el sistema. La mayoría de las alteraciones hidrotermales fueron identificadas en cavidades y porosidades de las rocas, en vetillas o como sustitución de minerales primarios. Dichos minerales se distribuyen de la siguiente manera:

- En las partes profundas del sistema geotérmico (profundidades > 1900 m) se observaron fases minerales tales como: biotita, granate, anfíbol y clinopiroxeno formando asociaciones paragenéticas, las cuales son estables a temperaturas superiores a 300° C.
- En las partes intermedias del sistema (entre 1700 y 800 m) se observó una importante cantidad de epidota, clorita, cuarzo, feldespato-K, piritita y calcita, cuyas asociaciones paragenéticas pueden indicar temperaturas de estabilidad de entre 150° a 270°C. Dada la abundancia y distribución de dichas fases minerales en el campo se puede considerar que a estos intervalos se sitúa el reservorio principal del sistema (Martínez-S., 1993).
- Finalmente, en las partes superficiales de la columna litológica (profundidad < 700 m) se observaron los siguientes minerales autógenos: piritita, calcita abundante, clorita, cuarzo, minerales arcillosos, algunas zeolitas, óxidos de hierro, sílice amorfa y algunas veces azufre nativo. Las temperaturas de estabilidad para estos minerales pueden

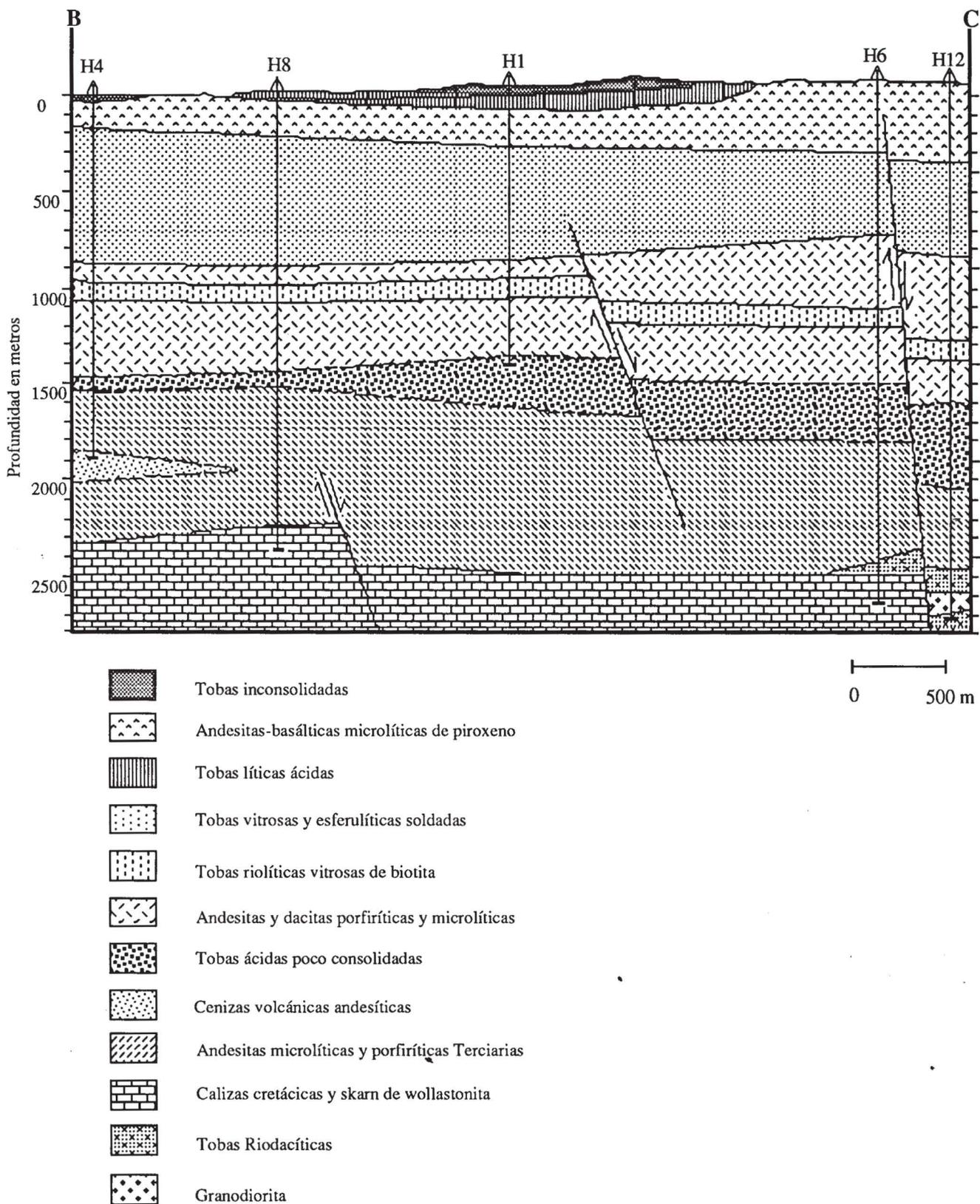


Fig. 5. Sección litoestratigráfica B - C ubicada dentro de la zona Maztaloya - Xalapazco. La información litológica de los pozos H1 y H4 fue tomada de Gutiérrez-N. (1982b), mientras que la información de los pozos H8 y H6 es de Viggiano y Robles (1988a y 1988b). Las descripciones petrográficas de las muestras del pozo H12 estudiadas en este trabajo coinciden con las descripciones petrográficas realizadas en pozos vecinos.

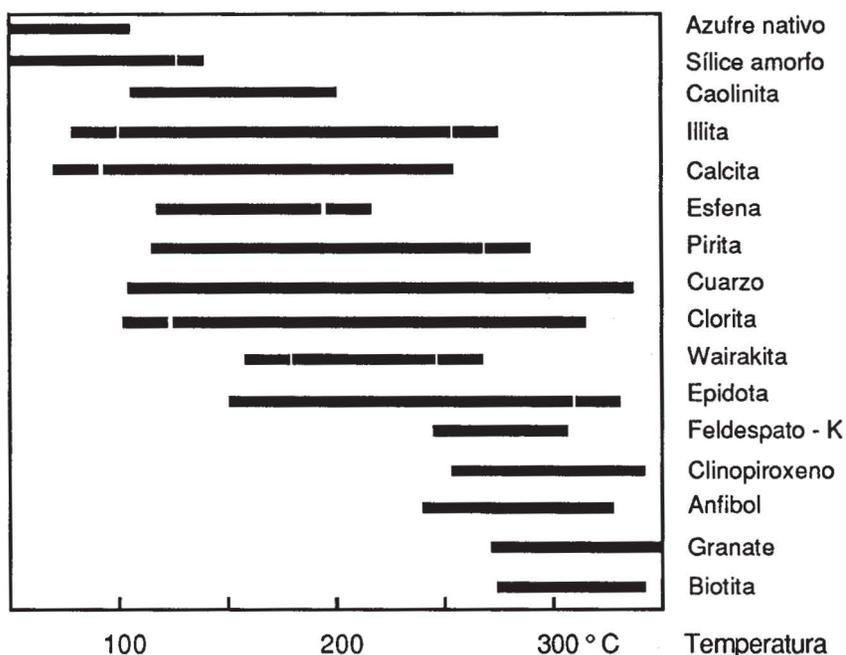


Fig. 6. Minerales de alteración determinados mediante los estudios petrográficos y de difracción de rayos X, en diversos pozos del Campo Los Humeros. Estos han sido representados en función de sus temperaturas de estabilidad, las cuales coinciden con el gradiente geotérmico actual del sistema.

ir de 90° hasta 170° C. La distribución de estos minerales es muy extensa, puesto que en la mayor parte del campo (Caldera de Los Potreros), se han registrado temperaturas de al menos 90° C a 700 m de profundidad.

Los minerales hidrotermales se distribuyen dentro del sistema geotérmico de una manera muy similar a las isotermas locales actuales, lo cual puede apoyar la hipótesis de que las condiciones térmicas del sistema se han mantenido aproximadamente constantes durante un tiempo suficientemente largo (Figura 7). Dichas isotermas del sistema fueron construidas utilizando mediciones directas de temperatura y estudios de inclusiones fluidas efectuados por González-P. *et al.* (1991).

RESULTADOS QUÍMICOS

Después de haber identificado las principales unidades volcánicas del sistema geotérmico (Figuras 4 y 5), se procedió a la determinación de las concentraciones de elementos mayores y traza de cada una de ellas.

Las concentraciones de los elementos mayores y traza de las rocas analizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 1. A pesar de que las muestras analizadas son obtenidas como fragmentos de barrenación (cuttings) y que existe un cierto número de alteraciones hidrotermales presentes, el porcentaje de pérdidas al fuego obtenido para cada una de ellas varía de 0.5 a 4.5% en peso. Este rango de valores no es muy alto considerando los procesos químicos ocurridos. Dentro de estas pérdidas se incluyen los porcentajes de H_2O^+ y H_2O^- , además de otros compuestos volátiles.

Con el fin de reducir el posible error analítico y de tener una base de comparación correcta con respecto a otros análisis químicos de rocas ígneas, se recalcularon los resultados químicos obtenidos al 100%. Estos resultados son recalculados sobre una base anhidra.

DISCUSION DE RESULTADOS Y ANALISIS ESTADISTICOS POR ACP

Para tener una mejor visión de los resultados químicos obtenidos y determinar las posibles relaciones existentes entre los diferentes elementos químicos, se realizó un tratamiento estadístico de tipo Análisis en Componente Principal (ACP). Para esto se utilizó un programa de computadora desarrollado por Royer y Mezgache (1989), cuyos resultados obtenidos fueron representados en términos de dos factores anticorrelacionables (F1 y F2). El diagrama circular obtenido es mostrado en la Figura 8.

Los factores anticorrelacionables F1 y F2 cubren aproximadamente el 70% de la varianza total de los datos, lo cual es representativo del comportamiento químico de los elementos. El factor F1 agrupa los dos polos más característicos de una serie evolutiva magmática normal. Un polo está compuesto por elementos tales como: MgO, CaO, Fe_2O_3 , MnO, P_2O_5 , TiO_2 , un poco Al_2O_3 , Sr, Sc, V y Ni los cuales muestran una fuerte correlación positiva con el factor F1. Este polo ha sido denominado "ferromagnesiano cálcico". El otro polo muestra una correlación negativa con el factor F1 y está compuesto por la distribución del SiO_2 , K_2O , Rb y Th, el cual puede llamarse "polo cuarzofeldes-

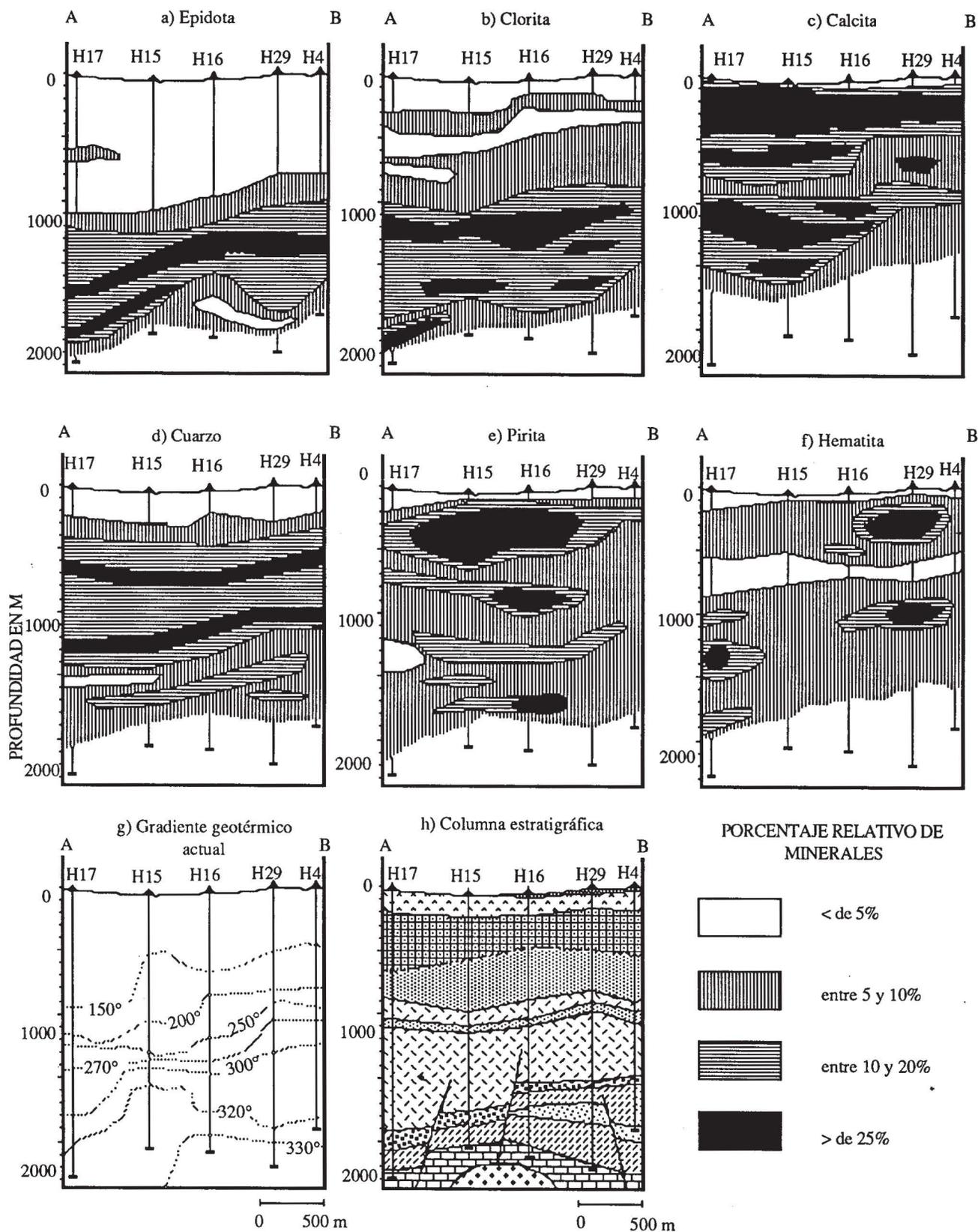


Fig. 7. Distribución espacial de algunos minerales de alteración presentes en la zona del Colapso Central (Secciones a - f) con respecto a la profundidad. En la sección (g) se muestran las isotermas de la misma zona, calculadas a partir de medidas directas de temperatura y resultados de inclusiones fluidas presentados por González-P. *et al.* (1991). La sección (h) es la sección estratigráfica A - B reducida mostrada en la Figura 4, como una comparación con la distribución de las alteraciones (la nomenclatura de las unidades litológicas es la misma que se empleó en la Figura 4).

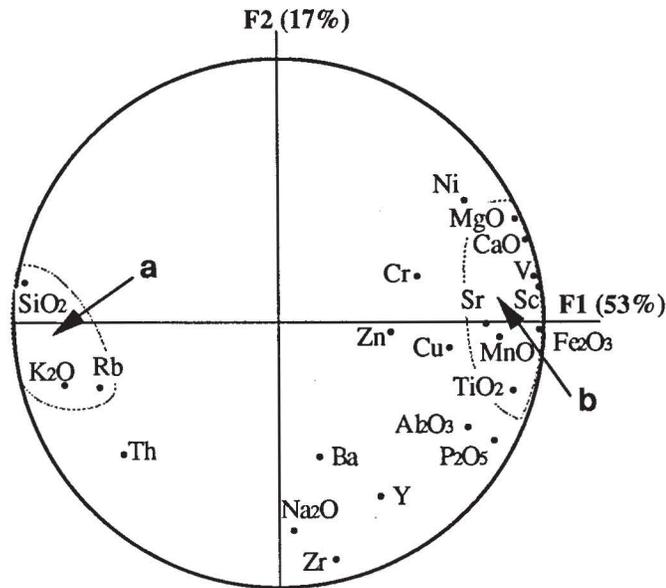


Fig. 8. Distribución de los elementos mayores y en traza de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros dentro de un diagrama estadístico de Análisis en Componente Principal (ACP). La suma de la varianza de los factores anticorrelacionables F1 y F2 es de 70% (buena representatividad). a = Polo cuarzo-feldespático y b = polo ferromagnesiano-cálcico.

pático o riolítico" (Figura 8). Dentro de una serie volcánica evolutiva compuesta por diversos miembros petrográficos (basaltos a riolitas), las concentraciones de K_2O y SiO_2 van a aumentar progresivamente a medida que el magma evoluciona dentro de la cámara magmática, por efecto de cristalización fraccionada. Al mismo tiempo, elementos químicos representados por el polo ferromagnesiano cálcico disminuyen paulatinamente al ocurrir el fraccionamiento (caso de una serie magmática calcoalcalina). Con base en lo anterior se propone que los magmas que produjeron las rocas volcánicas de Los Humeros sufrieron diversos fenómenos de cristalización fraccionada en una cámara magmática, lo cual explicaría el comportamiento de los dos polos dentro del análisis estadístico de ACP.

Sobre el diagrama de la Figura 8 se puede observar que Na_2O , Ba, Y y Zr muestran una correlación negativa con el factor F2, el cual es anticorrelacionable con el factor F1. Lo anterior puede deberse a que la concentración de estos elementos dentro de rocas volcánicas de diferente composición, muestra un comportamiento irregular o complejo. Un ejemplo de lo anterior es la distribución del Zr en rocas volcánicas. Para basaltos y riolitas calcoalcalinas, la concentración de este elemento es muy baja (< 200 ppm), mientras que en rocas de composición intermedia a ligeramente ácida, su concentración puede alcanzar 420 ppm. La distribución no lineal de este elemento conforme avanza el grado de diferenciación magmática explicaría su comportamiento anticorrelacionable con los polos del factor F1, dentro del diagrama ACP. Una explicación similar puede ser propuesta para la distribución del sodio (Na_2O). En efecto, si se observa la concentración de Na_2O para las diferentes rocas en la Tabla 1, esta varía de 3.1 a 5.7% en peso, sin mostrar ninguna relación directa con la evolución petrográfica de las rocas. Además dichos cambios en las concentraciones del sodio pueden incrementarse bajo la ac-

ción de hidrotermalismo, ya que la aparición de zeolitas sódicas o de otros minerales de sodio puede incrementar las cantidades esperadas de este elemento dentro de ciertos niveles.

DIAGRAMAS DE VARIACION QUIMICA

En la Tabla 1 se observa que la concentración de MgO para las rocas de Los Humeros varía de 0.1 a 6.16% en peso. Los mayores porcentajes de este elemento se observaron en rocas poco diferenciadas y las concentraciones más bajas en riolitas, por lo cual se pueden construir diagramas "MgO -vs- elementos" que muestren la variación química de las rocas. Este tipo de representaciones puede ayudar en la comprensión de la evolución química de los magmas derivados de una misma fuente. La Figura 9 muestra algunos de estos diagramas bidimensionales con los resultados químicos de las rocas de Los Humeros. En cada uno de los diagramas se incluyó como referencia el comportamiento químico de rocas volcánicas no alteradas del mismo centro volcánico determinado por Ferriz y Mahood (1984), y la variación química promedio de una serie calcoalcalina tipo utilizando datos de Miller *et al.* (1992).

A pesar de la presencia de alteraciones hidrotermales en las rocas analizadas de Los Humeros, las composiciones químicas de las rocas siguen un comportamiento evolutivo muy similar al de series calcoalcalinas típicas (Figura 9). Así, las rocas más evolucionadas químicamente presentan una disminución progresiva en las concentraciones de MgO, Fe_2O_3 , CaO y TiO_2 , mientras que las cantidades de SiO_2 y K_2O aumentan paulatinamente. Lo anterior confirma los resultados del estudio estadístico (ACP) desarrollado en la sección precedente.

Sobre los mismos diagramas se pudo observar que el comportamiento químico de las rocas volcánicas situadas a

Tabla 1a

Análisis químicos de roca total para el sitio de Los Humeros. Las muestras: LH8, LH11, LH16, LH17, LH33, LH41, LH42, LH45, LH53, LH57, LH82 Y LH94 fueron analizadas por Ferriz y Mahood (1984). Las concentraciones en elementos mayores fueron normalizadas a 100%. T Rd=tobas riódacíticas, T Rl=toba riolítica, T dac=toba dacítica, andes=andesita Rd=Riodacita, Rl=riolita, And-da=andesita-dacita, And-ba=andesita-basáltica, Bas=basalto Ig Rl.=ignimbrita riolítica, Ig Rd.=ignimbrita riódacítica, T And=toba andesítica

Muestra	Ig Rl.	Ig Rd.	T Rd.	T And	T Rl.	T Rl.	Ig Rd.	Andes	T And	Andes	Rd	Bas	And-ba	Andes	Andes
	Xal	Xal	Xal	Xal	Faby	Zar.	Zar.	Zar.	Xox.	Tepey	S Anto	de oliv.	H12	H12	H12
	LH8	LH11	LH16	LH17	LH33	LH41	LH42	LH45	LH53	LH57	LH82	LH94	P-120	P-220	P-400
SiO ₂	76.60	71.50	70.60	61.30	72.20	71.10	70.10	59.10	65.10	59.20	69.00	49.00	59.76	58.17	57.99
TiO ₂	0.08	0.27	0.42	0.99	0.36	0.46	0.50	1.45	0.65	1.15	0.54	1.40	0.84	0.90	0.98
Al ₂ O ₃	12.90	16.70	14.90	16.50	14.80	14.90	15.20	17.20	16.50	17.60	15.70	17.10	16.36	16.91	16.87
Fe ₂ O ₃	0.48	0.58	0.87	1.84	0.67	0.68	0.76	1.49	1.05	1.92	0.77	1.48	5.78	6.55	6.67
FeO	0.67	1.32	1.74	3.95	1.22	1.88	2.10	5.32	3.21	4.31	2.17	8.26	0.00	0.00	0.00
MnO	0.02	0.04	0.04	0.10	0.04	0.04	0.05	0.11	0.08	0.09	0.06	0.16	0.07	0.08	0.08
MgO	0.10	0.31	0.90	3.38	0.43	0.52	0.59	2.90	1.70	2.92	0.79	8.93	3.62	4.26	3.73
CaO	0.41	0.86	1.95	5.19	1.22	1.49	1.70	6.08	3.62	6.37	1.97	10.26	7.76	7.39	7.54
Na ₂ O	2.91	2.98	3.85	3.73	4.10	4.20	4.38	3.93	4.45	4.06	4.72	2.90	3.62	3.70	3.87
K ₂ O	5.80	5.35	4.58	2.83	4.88	4.66	4.48	2.08	3.44	2.09	4.13	0.37	1.99	1.80	1.97
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.11	0.21	0.05	0.08	0.11	0.39	0.17	0.28	0.14	0.19	0.21	0.22	0.30
Total %	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0
							(ppm)								
Ba	115	780	710	460	780	820	880	560	830	570	760	78	586	548	542
Cr													109	129	104
Cu													25	30	31
Ni													58	61	41
Rb	136	114	119	67	127	110	85	57	65	52	98	5	52	45	43
Sc													15	16.39	17
Sr	17	76	136	295	108	110	138	427	271	458	168	357	473	511	508
Th													8	8	8
V													111	128	139
Y	31	26	28	30	30	34	30	31	33	26	28	27	17	17	19
Zn													60	71	65
Zr	104	256	320	280	304	352	326	217	400	208	343	98	157	152	173

Muestra	And-ba	And-ba	T. dac	T Rd.	T Rl.	T Rl.	T Rd.	T Rl.	T Rl.	Andes	And-ba	Andes	Andes	Andes	Rd
	H16	H29	H12	H12	H15	H15	H16	H17	H29	H12	H15	H16	H17	H29	H12
	P-40	P-100	P-620	P-740	P-320	P-640	P-400	P-600	P-600P-1180	P-1000	P-900	P-980	P-840	P-1440	
SiO ₂	49.34	51.87	66.05	68.92	71.32	76.41	71.26	76.13	73.78	60.39	50.12	63.56	62.91	61.11	64.72
TiO ₂	2.07	1.41	0.83	0.61	0.48	0.13	0.50	0.19	0.23	1.03	2.65	0.87	1.24	1.19	0.99
Al ₂ O ₃	16.88	16.66	15.69	15.05	13.02	12.49	13.76	12.57	12.71	17.66	16.28	16.60	16.63	17.01	16.04
Fe ₂ O ₃	10.92	9.06	4.53	2.61	3.07	1.18	2.92	1.65	1.47	6.12	12.37	5.32	6.22	6.74	5.52
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.16	0.14	0.08	0.04	0.04	0.00	0.03	0.02	0.02	0.08	0.16	0.07	0.06	0.08	0.11
MgO	6.16	5.90	1.25	0.55	0.67	0.12	0.86	0.26	0.33	2.38	4.10	1.75	1.01	1.11	0.85
CaO	9.38	10.34	3.67	3.69	3.87	1.06	2.98	1.18	3.55	7.67	7.98	4.57	3.17	5.12	3.29
Na ₂ O	3.67	3.25	4.32	4.03	3.03	3.93	3.78	3.54	3.62	3.32	4.45	4.07	4.47	4.28	5.14
K ₂ O	1.01	1.10	3.32	4.31	4.33	4.62	3.78	4.36	4.17	1.06	1.33	2.94	3.82	2.91	2.93
P ₂ O ₅	0.43	0.27	0.25	0.20	0.17	0.07	0.14	0.10	0.11	0.28	0.55	0.25	0.45	0.44	0.41
Total %	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
							(ppm)								
Ba	244	222	663	819	298	164	290	194	200	388	269	520	696	523	748
Cr	126	172	28	24	18	49	40	30	10	112	136	41	49	32	17
Cu	42	39	13	11	9	5	22	5	9	22	49	69	68	30	7
Ni	65	67	15	10	10	5	15	5	5	25	22	20	14	17	5
Rb	21	30	94	119	131	147	113	140	126	25	28	79	121	76	69
Sc	25.2	25.1	9.1	7	7.1	2.9	7	3.5	5	16.6	25.8	11	10	13.1	11.3
Sr	462	375	288	223	202	42	184	58	98	519	493	373	316	437	342
Th	5	5	12	15	19	21	18	17	17	5	5	17	22	15	8
V	230	185	62	35	35	7	45	12	17	134	278	81	74	121	47
Y	28	25	25	22	23	17	21	19	20	16	30	22	28	24	32
Zn	82	105	83	48	55	43	68	56	50	65	115	94	113	72	94
Zr	207	166	286	288	184	139	171	149	144	114	232	252	510	328	357

Tabla 1b

Análisis químicos de roca total para el sitio de Los Humeros. Las muestras: LH8, LH11 LH16, LH17, LH33, LH41, LH42, LH45, LH53, LH57, LH82 Y LH94 fueron analizadas Ferriz y Mahood (1984). Las concentraciones en elementos mayores fueron normalizadas a 100%. T Rd=tobas riódacíticas, T Rl=toba riolítica, T dac=toba dacítica, andes=andesita Rd=Riodacita, Rl=riolita, And-da=andesita-dacita, And-ba=andesita-basáltica, Bas=basalto Ig Rl.=ignimbrita riolítica, Ig Rd.=ignimbrita riódacítica, Grdior=granodiorita

Muestra	And-da	Rl	Rl	Rd	Andes	T Rd.							
	H16	H17	H29	H12	H15	H15	H15	H15	H16	H16	H17	H17	H29
	P-1040	P-1040	P-920	P-1600	P-1160	P-1300	P-1520	P-1140	P-1480	P-1400	P-1820	P-1100	P-1820
SiO2	61.94	75.38	73.44	69.46	57.73	57.83	61.08	58.52	59.19	61.39	63.79	58.74	65.64
TiO2	1.12	0.27	0.45	0.41	1.38	1.40	1.34	1.36	1.33	1.06	0.93	1.32	0.91
Al2O3	18.06	13.43	13.51	14.97	18.50	17.84	16.67	19.19	17.99	17.40	16.41	19.01	16.55
Fe2O3	5.92	2.06	2.64	3.97	6.78	6.74	5.91	5.37	6.68	5.41	5.79	6.04	3.48
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.10	0.02	0.03	0.15	0.10	0.08	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07
MgO	1.55	0.35	0.30	0.21	1.95	2.00	1.15	1.76	1.49	1.61	1.06	1.62	0.83
CaO	4.48	0.96	1.85	1.74	6.57	6.04	4.19	6.26	4.82	4.08	4.46	5.44	2.46
Na2O	4.46	3.10	3.86	5.73	4.39	4.73	4.86	4.44	4.60	4.93	4.67	4.71	5.27
K2O	2.01	4.30	3.77	3.20	2.14	2.86	4.27	2.53	3.36	3.66	2.51	2.58	4.49
P2O5	0.36	0.14	0.16	0.16	0.45	0.47	0.47	0.49	0.46	0.39	0.31	0.46	0.30
Total %	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
						(ppm)							
Ba	594	191	358	801	554	609	736	606	657	708	639	948	853
Cr	109	64	8	35	137	168	139	181	195	32	66	30	19
Cu	15	5	11	12	31	39	33	24	81	11	19	33	9
Ni	14	5	5	5	16	16	8	14	13	10	11	10	7
Rb	40	117	109	77	48	77	139	69	137	99	58	63	129
Sc	12.1	4	5	8.8	14.6	14.8	11.6	13.3	13	10.5	10.1	12.6	8.1
Sr	461	78	167	173	549	503	371	588	435	457	461	540	323
Th	14	18	17	11	16	17	25	13	18	17	9	15	18
V	96	18	25	10	116	124	80	101	109	80	96	92	29
Y	23	20	16	34	26	26	31	24	25	23	17	24	27
Zn	64	48	49	136	78	77	87	63	178	62	90	86	43
Zr	303	152	198	423	319	347	530	313	436	408	223	357	475

Muestra	T Rl	Andes	Rd	Dac	Andes	Andes	Andes	Andes	Andes	T Rd	Grdior	T Rd
	H15	H12	H15	H16	H16	H17	H29	H29	H29	H12	H12	H12
	P-1760	P-2200	P-1880	P-1700	P-1920	P-2100	P-1640	P-2040	P-2120	P-2480	P-2700	P-2760
SiO2	76.95	60.54	71.64	64.17	56.69	59.96	57.93	55.67	51.79	66.63	61.95	67.92
TiO2	0.19	1.45	0.39	0.49	1.32	0.92	1.22	1.20	1.34	0.65	0.82	0.49
Al2O3	12.56	17.27	13.51	16.10	17.66	16.63	17.43	15.64	15.04	16.02	16.76	14.68
Fe2O3	1.82	6.10	2.88	3.20	8.26	7.00	6.71	8.42	9.58	4.25	5.21	3.00
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.04	0.13	0.05	0.12	0.11	0.10	0.10	0.11	0.14	0.14	0.08	0.08
MgO	0.30	1.80	0.70	2.80	3.15	2.18	2.16	4.59	5.85	1.50	2.45	1.10
CaO	1.78	5.28	3.42	6.66	7.40	7.25	8.14	7.90	9.80	4.32	5.40	4.40
Na2O	2.19	4.47	3.60	4.10	2.88	3.82	3.93	3.39	3.23	4.20	4.48	4.15
K2O	4.09	2.46	3.66	2.15	2.01	1.75	1.96	2.62	2.67	2.02	2.60	4.01
P2O5	0.08	0.49	0.15	0.22	0.52	0.38	0.41	0.47	0.55	0.28	0.24	0.17
Total %	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
						(ppm)						
Ba	634	573	634	612	702	546	505	650	609	881	623	729
Cr	43	31	86	31	259	102	70	305	503	86	51	510
Cu	12	37	27	17	39	18	28	41	112	18	9	25
Ni	11	17	36	13	71	19	16	80	127	23	23	14
Rb	102	75	90	48	59	34	48	92	103	61	71	96
Sc	3.2	14.3	6.3	8	23.1	14.3	16.3	22	27.1	8.5	12.3	8
Sr	124	451	196	408	598	1204	551	664	616	423	366	271
Th	11	19	13	10	9	8	11	9	8	10	10	15
V	15	138	35	57	180	105	135	180	213	73	87	45
Y	10	27	14	13	24	20	28	22	23	14	19	20
Zn	76	74	61	64	98	95	167	472	99	80	42	48
Zr	88	379	128	179	234	144	244	295	348	183	215	226

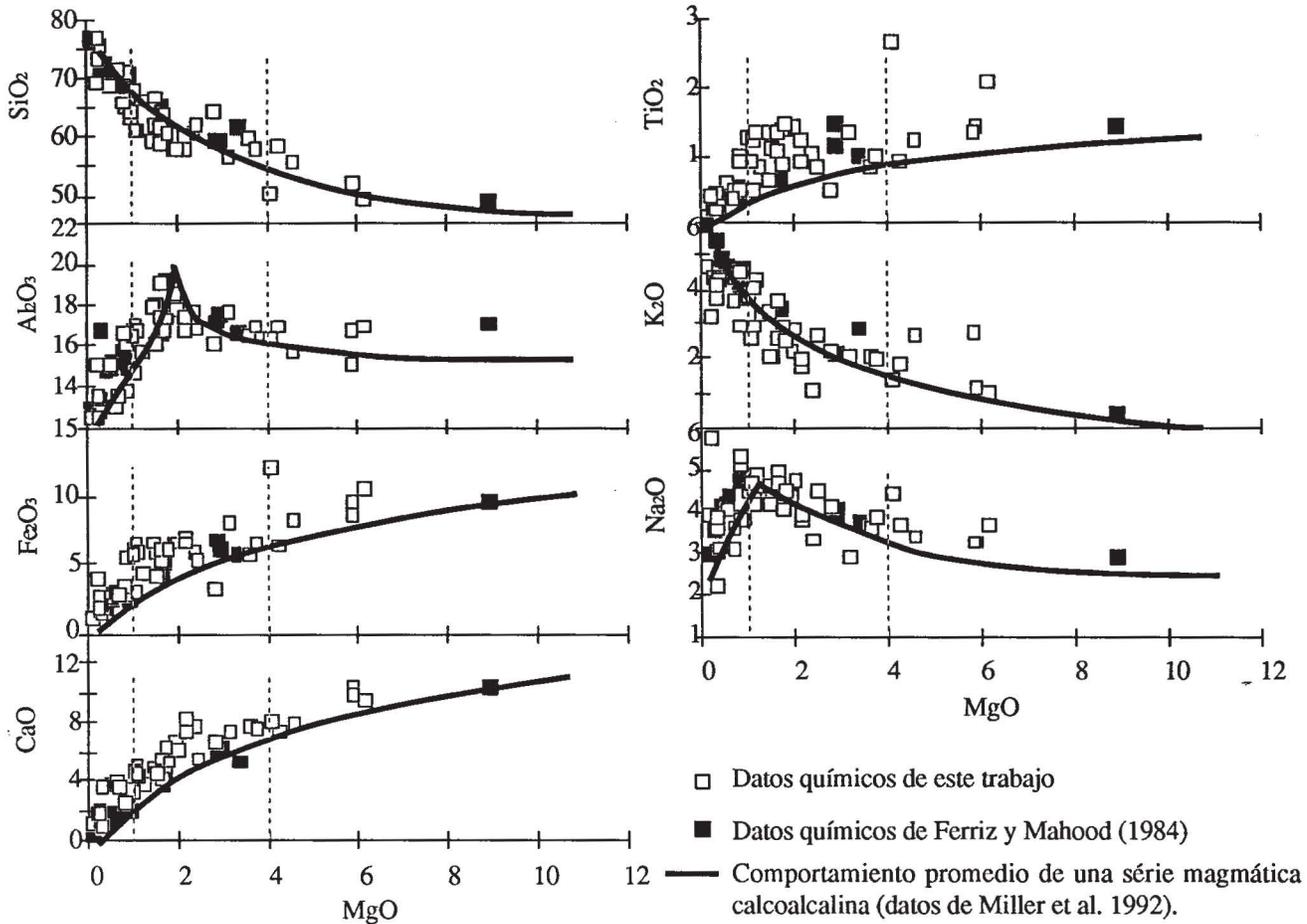


Fig. 9. Diagramas de variación química MgO -vs- "elementos" de las rocas volcánicas de Los Humeros. Los cuadros negros muestran el comportamiento químico promedio de rocas volcánicas sin alteración pertenecientes al mismo centro volcánico, las cuales fueron analizadas por Ferriz y Mahood (1984) y que se usaron como referencia. Las curvas dentro de cada gráfica representan el comportamiento químico promedio de rocas pertenecientes a una serie evolutiva calcoalkalina (Datos tomados de Miller *et al.*, 1992).

profundidades de entre 600 y 1700 m (zonas muy alteradas), cuyas composiciones de MgO varían de 1 a 4% (Figura 9), muestran un ligero aumento en las cantidades de CaO, Na₂O, Fe₂O₃ y TiO₂, y al mismo tiempo una ligera disminución en SiO₂ y K₂O, en comparación con el comportamiento promedio de las rocas volcánicas sin alteración de Los Humeros. Dichos cambios son debidos probablemente a la movilidad de estos elementos químicos bajo la acción de fluidos hidrotermales. Algunos elementos tienden a concentrarse dentro de ciertas rocas mientras que otros son fácilmente removilizados por la presencia de fluidos a alta temperatura.

Los resultados químicos de las rocas volcánicas fueron también representados dentro de un diagrama clásico SiO₂ - K₂O (Figura 10), junto con la nomenclatura propuesta por Peccerillo y Taylor (1976). En este diagrama se puede ver que todas las rocas volcánicas de Los Humeros, alteradas o sin alteración (datos químicos de Ferriz y Mahood, 1984), siguen aproximadamente una línea magmática evolutiva similar. La línea parte de la región de basaltos o andesitas

basálticas calcoalkalinas, pasa por los campos de las andesitas calcoalkalinas, andesitas y dacitas ricas en potasio, llegando en su estado más evolucionado hasta las riolitas ricas en potasio, casi en los límites con los campos shoshoníticos. La determinación de una línea evolutiva calcoalkalina, para las rocas analizadas aquí, coincide con los resultados obtenidos por Ferriz y Mahood (1984) para el mismo sitio. Además, la presencia de magmas calcoalkalinos ligeramente ricos en potasio puede indicar que efectivamente la caldera de Los Humeros se encuentra posiblemente en el límite entre dos provincias magmáticas distintas: hacia el oeste, la Faja Volcánica Transmexicana con magmas predominantemente calcoalkalinos y algunos otros alcalinos, dentro de los grabens de Colima y Tepic, y hacia el oriente la provincia volcánica del Golfo con magmas de tipo alcalino y edades plio-cuaternarias (Negendank *et al.* 1985; Torres *et al.* 1988).

Las tobas y riolitas situadas a profundidades inferiores a 800 m, dentro del sistema geotérmico (Figura 10), no parecen seguir la tendencia magmática promedio de las secuen-

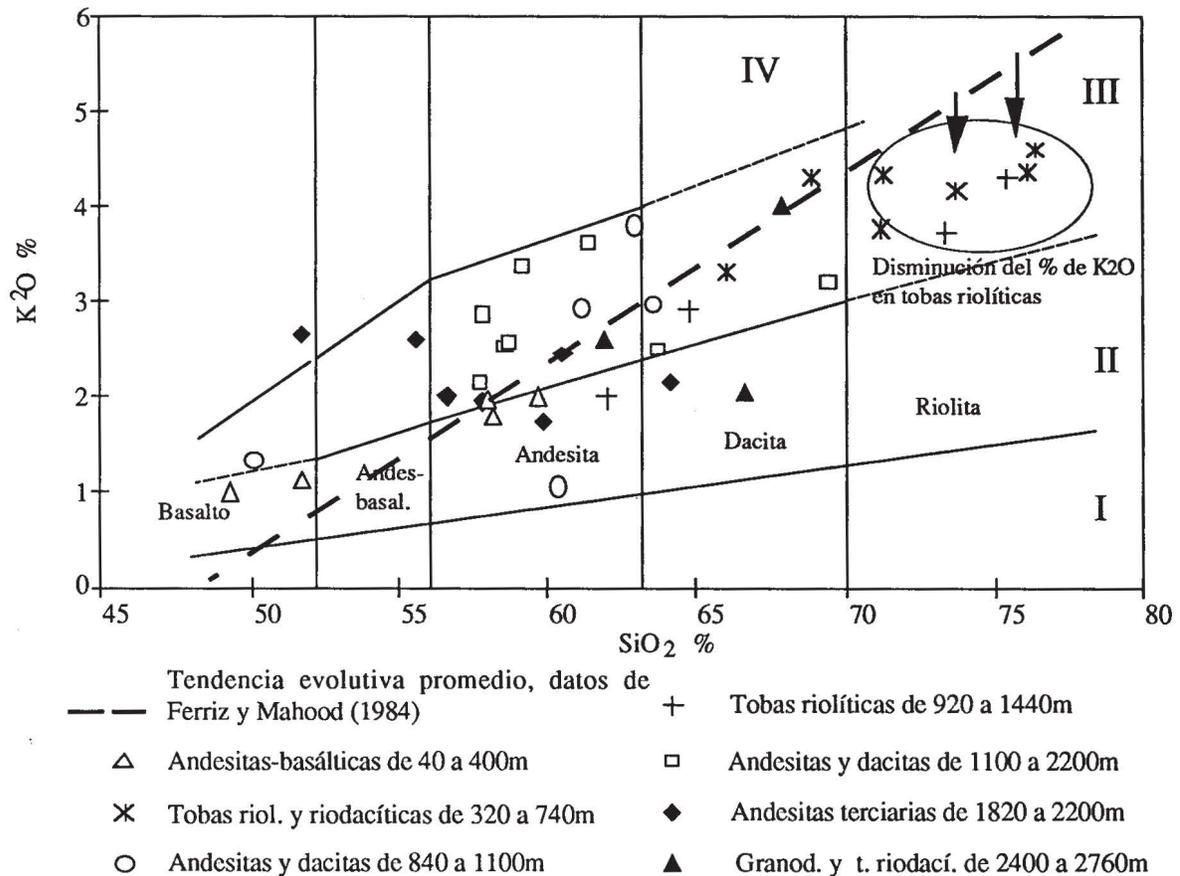


Fig. 10. Representación de la evolución química de las rocas volcánicas de Los Humeros dentro de un diagrama SiO₂ -vs- K₂O. Los límites de cada campo así como la nomenclatura fueron tomados de Peccerillo y Taylor (1976). I. Serie Toleítica, II. Serie Calcoalcalina, III. Serie Calcoalcalina rica en potasio y IV. Serie Shoshonítica.

cias sin alteración. Esto puede deberse a una fuerte remoción del potasio en dichas rocas por la acción de los fluidos hidrotermales.

Como se puede ver, la representación de los resultados químicos en diagramas bidimensionales y la posible correlación existente entre los diferentes constituyentes químicos se pueden anticipar utilizando la interpretación del análisis estadístico de ACP.

FLUIDOS HIDROTERMALES Y TRANSFERENCIA DE MASA

Con el fin de cuantificar la transferencia de masa relacionada con la circulación de fluidos hidrotermales, es necesario conocer a la vez las composiciones químicas de las rocas frescas y de las rocas alteradas pertenecientes al mismo evento volcánico y grado de diferenciación. En efecto, para determinar las proporciones de los elementos mayores y en traza que se han desplazado durante la hidrotermalización de una roca primaria se deben sustraer las concentraciones de los elementos presentes en la roca inicial de los de la roca final o alterada. En lo concerniente a las rocas de Los Humeros analizadas en este trabajo, no se dispuso de muestras de roca sin alteración que sean equivalentes en composición y grado de diferenciación a las rocas volcánicas alteradas para tratar de estimar la transferencia de masa

ocasionada por los fenómenos hidrotermales. Con el fin de tener una composición promedio de rocas volcánicas sin alteración, fueron considerados los resultados químicos de roca total obtenidos por Ferriz y Mahood (1984) para el mismo centro volcánico, los cuales fueron utilizados como referencia de rocas sanas.

Autores como Pearce y Cann (1973) y Browne *et al.* (1992) consideran que ciertos elementos químicos tales como Ti, V, Zr y P son casi inmóviles bajo la acción de fluidos hidrotermales. Por lo tanto, dichos elementos pueden ser utilizados como "marcadores" dentro de la caracterización de rocas volcánicas alteradas. Para el caso de Los Humeros, se construyeron algunos diagramas ortogonales que describen la variabilidad de los óxidos mayores en función de la cantidad de Zr presente en las rocas. Un ejemplo de estos diagramas es mostrado en la Figura 11, donde se incluyeron las composiciones promedio de las rocas sin alteración de Los Humeros (resultados de Ferriz y Mahood, 1984). Las principales observaciones que se hicieron sobre estos diagramas son las siguientes:

- Se confirma la disminución de la cantidad de potasio (K₂O) dentro de las unidades riolíticas y dacíticas hidrotermalizadas, situadas a profundidades inferiores a 1300m,

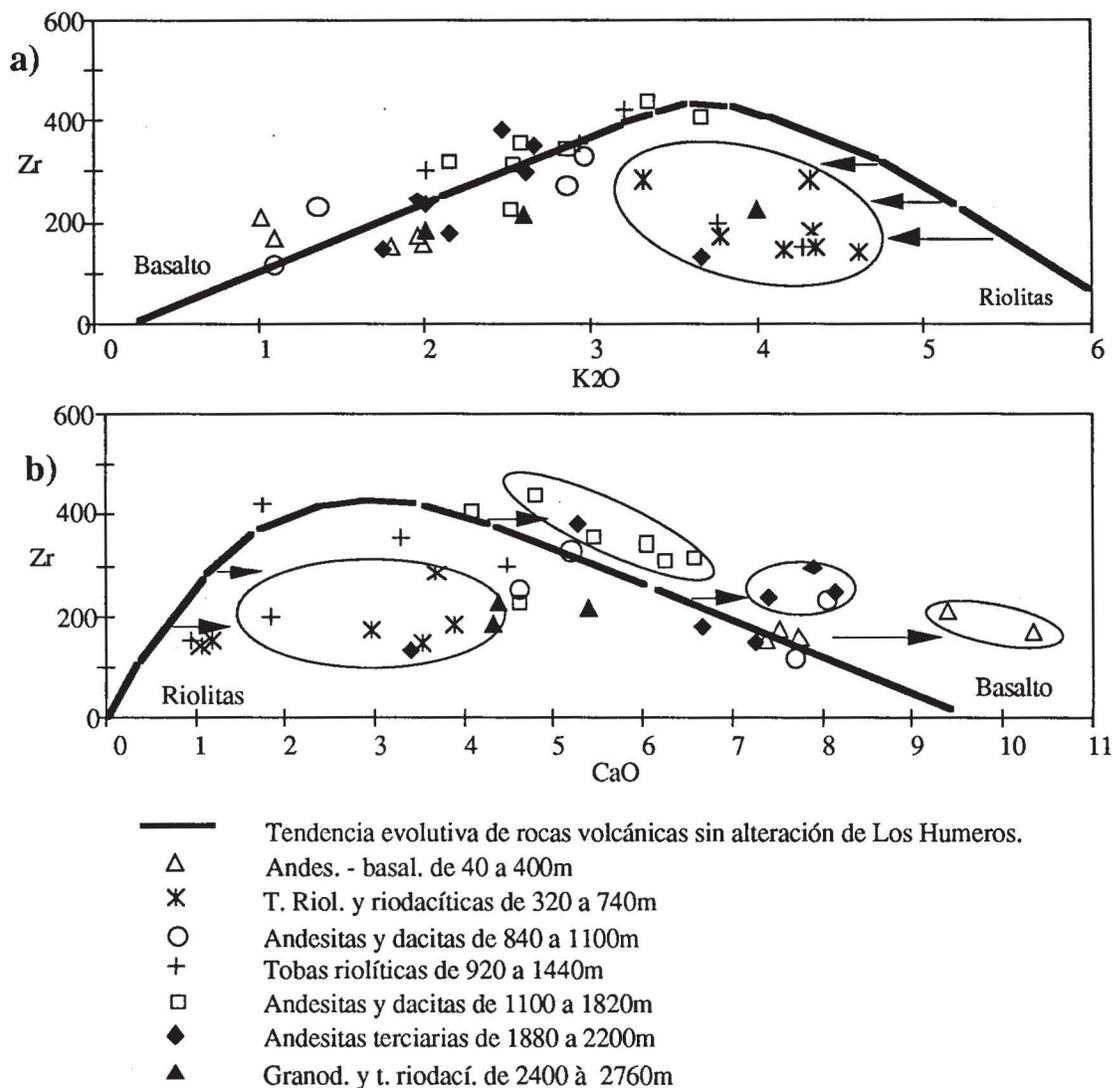


Fig. 11. Variación de K₂O (%) -vs- Zr (ppm) figura (a) y CaO (%) -vs- Zr (ppm) figura (b) de las rocas alteradas de Los Humeros. Se utilizó como referencia de comparación las concentraciones de los mismos elementos encontrados en las rocas "frescas" analizadas por Ferriz y Mahood (1984), para el mismo centro volcánico (Comportamiento promedio de éstas representado por la curva gruesa en las figuras (a) y (b)). El Zr puede ser considerado como un elemento relativamente inmóvil bajo el efecto de hidrotermalismo, por lo que se puede utilizar como marcador en la estimación de transferencia de masa.

m, con respecto a la tendencia general que siguen las rocas sin alteración (línea gruesa en la Figura 11a). Esta disminución de la cantidad de potasio en las riolitas alteradas se debe probablemente a la pérdida de dicho elemento durante la albitización hidrotermal de los feldespatos potásicos primarios, evento que fue observado durante los estudios petrográficos de las rocas. Autores como Cathelineau *et al.* (1991) y Dypvik (1983) han mostrado que no existe ninguna reacción tardía que reestablezca el potasio libre durante la formación de los diversos minerales arcillosos. Por lo tanto este compuesto puede perderse fácilmente por la circulación de fluidos calientes.

- En un segundo diagrama se pudieron distinguir aumentos en las concentraciones de calcio para la mayor parte de las rocas volcánicas alteradas (Figura 11b). Sin embargo, los mayores incrementos en las concentraciones de CaO

fueron observados en riolitas, tobas riolíticas-riolíticas, andesitas y tobas asociadas presentes a profundidades inferiores a 1500 m dentro de la zona del Colapso Central.

En observaciones similares se determinó la existencia de altas concentraciones de sodio (Na₂O) en tobas ácidas situadas a profundidades inferiores a 1000 m. Estas concentraciones anómalas pueden ser explicadas por la fuerte transformación de los minerales primarios en minerales arcillosos y zeolitas sodico-cálcicas. En lo concerniente al calcio (CaO), la abundancia excesiva de este constituyente debe estar relacionada con la presencia de importantes cantidades de calcita secundaria en vetillas, cavidades o como sustitución de feldespatos. Otras posibles contribuciones al aumento de la concentración del CaO en las rocas volcánicas pueden deberse a la presencia de abundante epidota y al-

gunas zeolitas cálcicas, las cuales fueron observadas a profundidad de 800 a 1500 m.

Se puede mencionar que la cantidad de calcita secundaria, dentro del sistema geotérmico, disminuye con el incremento de la profundidad y la temperatura para desaparecer completamente a más de 1400 m. La disminución del porcentaje modal de calcita con respecto a la profundidad está relacionada con la curva de disolución de dicha fase mineral. Así, a temperaturas superiores a 250° C, la solubilidad de la calcita es menor, mientras que a bajas temperaturas es mayor (Ellis, 1963). Sin embargo, para el caso de Los Humeros, al incrementarse la presión del sistema y disminuir el pH la solubilidad de la calcita también aumenta para temperaturas superiores a 250° C, por lo cual esta fase mineral desaparecerá al aumentar la profundidad. La calcita reaparece en asociación con wolastonita y granate, a más de 1900 m de profundidad, donde las calizas cretácicas se encuentran parcialmente metamorfizadas.

Resulta evidente, que los demás elementos mayores y en traza, pertenecientes a las rocas encajonantes, puedan ser removilizados durante la acción hidrotermal. Sin embargo, la visualización de los niveles de roca que han ganado o perdido elementos es más difícil de llevar a cabo, ya que su distribución no es regular dentro de las distintas unidades. Este es el caso del SiO₂, Al₂O₃ o el MgO. Para la mayor parte de rocas ácidas, las concentraciones de SiO₂ parecen disminuir, mientras que para otras rocas (andesitas y ciertas tobas riolíticas) las concentraciones de SiO₂ muestran fuertes aumentos con respecto a las rocas sin alteración. Elementos tales como el titanio o magnesio parecen mostrar una menor movilidad química bajo la acción de fenómenos hidrotermales, pero tampoco se puede asegurar que dichos elementos sean completamente inmóviles.

Además de los aumentos o disminuciones en las concentraciones de elementos mayores y en traza, ocurridos en las rocas del sistema geotérmico, se puede mencionar la adición de H₂O. Este compuesto contribuye fuertemente en la formación de cloritas, minerales arcillosos, epidotas y de otros minerales hidratados como son las zeolitas y algunos anfíboles. Desafortunadamente, en los análisis químicos de roca total no se dispone de la cantidad de agua presente tanto en las rocas sanas como en las hidrotermalizadas, por lo cual no se puede visualizar la cantidad adicionada de este compuesto. Autores como Bird *et al.* (1984), Cathelineau *et al.* (1991) o Kristmannsdottir (1983) han demostrado el importante papel que juega el agua en la formación de minerales de alteración hidratados, en los sistemas geotérmicos de Cerro Prieto y Los Azufres en México y de Krafla en Islandia, respectivamente.

RELACIONES ISOTOPICAS ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ENTRE CALCITAS Y ROCAS VOLCANICAS

La presencia de abundante calcita secundaria encontrada a profundidades de entre 100 y 1400 m, dentro del sistema geotérmico, evidencia la existencia de fluidos calientes sobresaturados en carbonatos, los cuales depositaron su carga

al ocurrir fenómenos tales como la ebullición o la condensación de fases gaseosas (CO₂) en aguas freáticas.

En un principio se propuso que los componentes de la calcita secundaria, presente en las rocas del sistema, eran derivados del basamento calcáreo de la región (calizas cretácicas). Así, dichos carbonatos fueron probablemente disueltos por los fluidos calientes geotérmicos y luego redepositados a lo largo de la pila volcánica de más de 2000 m de espesor. Con el fin de determinar el origen de los constituyentes catiónicos de los carbonatos (Ca y Sr) se realizaron algunos análisis isotópicos de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr en calcitas de origen hidrotermal presentes en vetillas o vesículas, en calcitas profundas pertenecientes posiblemente a calizas cretácicas y en rocas volcánicas sin calcita asociadas al sistema. Los resultados isotópicos obtenidos, así como los errores de medición con respecto al estándar utilizado, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Relaciones isotópicas ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de algunas calcitas hidrotermales y calcitas cretácicas, así como de andesitas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla.

Pozo profundidad	Muestra	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	± 2σ (error estándar) ¹
H16 600 m	calcita hidrotermal	0.70440	0.00002
H16 920 m	calcita hidrotermal	0.70417	0.00002
H16 1240 m	andesita Los Humeros	0.70414	0.00002
H15 1940 m	calcita del Cretácico	0.707302	0.00002
Faja Volcánica Transmexicana ²	andesita promedio 1	0.70388	0.00004
Faja Volcánica Transmexicana ²	andesita promedio 2	0.70445	0.00005

¹ La composición del estándar utilizado NBS 987 es ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.71018 ± 1 (1σ de la población).

² Composición isotópica promedio de rocas de la Faja Volcánica Transmexicana, datos según Verma (1983a y 1983b).

Las relaciones isotópicas ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr medidas en este trabajo para las andesitas sin calcita del sistema geotérmico (Tabla 2) son relativamente bajas (0.70414 ± 0.00002), pero similares a las obtenidas por Verma (1983a y 1983b) para rocas del centro volcánico Los Humeros y de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Así, las relaciones ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr para rocas de la FVT varían de 0.70388 a 0.70445, las cuales son compatibles con la existencia de una fuente magmática principal de origen mantálico. De

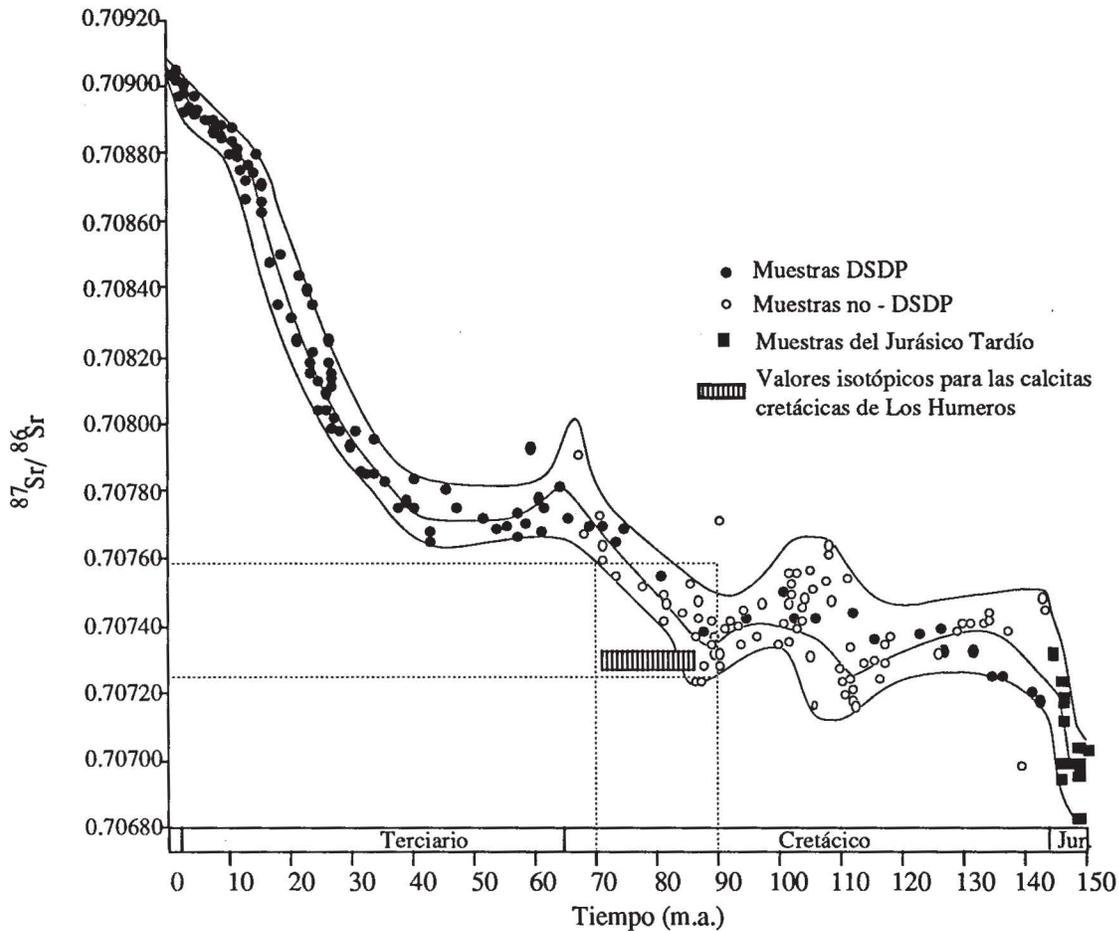


Fig. 12. Diagrama Tiempo -vs- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que muestra la variación de las relaciones isotópicas de estroncio para el agua de mar desde el Jurásico hasta el Cenozoico, según Koepnick *et al.* (1985). Dentro de este diagrama se muestra, con líneas discontinuas, el rango de edades del basamento calcáreo de Los Humeros de donde se obtuvieron las calcitas terciarias analizadas del sitio (de 70 a 90 m.a.) y los posibles valores isotópicos para el agua de mar de esa época (de 0.70725 a 0.70758). El pequeño rectángulo representa el posible rango de edades de las calcitas analizadas y también los valores isotópicos obtenidos para estas, los cuales caen perfectamente dentro de las composiciones isotópicas del agua de mar para estas épocas (Los datos isotópicos de las muestras DSDP fueron tomadas a través del programa Deep See Drilling Project, mientras que las muestras No-DSPD no fueron obtenidas por este programa).

acuerdo con Verma (1983a) dichos valores isotópicos reflejan también una ligera contaminación de los magmas mantálicos con materiales de origen cortical.

Revisando los valores isotópicos de estroncio para las calcitas hidrotermales (Tabla 2), se puede ver que estos son muy similares a los valores isotópicos medidos en las andesitas sin calcita del sistema. Se propone que los constituyentes catiónicos (Ca y Sr) de las calcitas hidrotermales fueron derivados probablemente de una fuente magmática equivalente a la de las rocas volcánicas. En consecuencia, dichos constituyentes de las calcitas secundarias no han sido derivados de la removilización de los carbonatos cretácicos del basamento, tal y como se había propuesto en un principio.

En lo concerniente a los valores isotópicos de calcitas pertenecientes a calizas del Cretácico (parcialmente metamorfizadas), se puede ver que estos son diferentes a los obtenidos en calcitas hidrotermales. Los carbonatos del Cretácico mostraron valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0.70730 ± 0.00002 ,

mientras que las calcitas hidrotermales tienen un valor isotópico promedio de 0.70440.

Los trabajos geológicos y paleontológicos realizados por Viniestra-O. (1965), Yañez-G. *et al.* (1979) y Yañez-G. (1980) mostraron que la parte superior del basamento sedimentario de la región está formado por calizas arrecifales o de cuenca, cuyas edades varían, según fechamientos paleontológicos, de entre 70 y 90 m.a. Si se introduce este rango de edades dentro del diagrama "tiempo geológico -vs- composición $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ " (Figura 12), establecido por Koepnick *et al.* (1985) para la curva de variación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua de mar, se pueden inferir los valores isotópicos para esta época. Estos valores caen en un rango de 0.70725 a 0.70758, dentro del cual se encuentran comprendidos los valores determinados para las calcitas del Cretácico.

Lo anterior confirma por un lado que los componentes catiónicos de los carbonatos hidrotermales del sistema no fueron derivadas de la disolución de carbonatos del basamento, sino más bien de una fuente magmática similar a la

que dió origen a las rocas volcánicas del sistema. Por otro lado, los valores isotópicos de calcita (Ca y Sr) del basamento caen dentro del rango de valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ esperados para carbonatos marinos depositados hace más de 70 m.a.

Los resultados isotópicos y las observaciones presentadas anteriormente parecieran estar en contradicción con los resultados isotópicos de carbono encontrados por González-P. *et al.* (1993) en carbonatos del mismo sistema geotérmico de Los Humeros. Dichos autores encontraron valores $\delta^{13}\text{C}$ de -3.86 a $+0.70\text{‰}$ para calcitas hidrotermales, con un ligero enriquecimiento en isótopos ligeros conforme disminuye la profundidad, y de -3.2 a -0.14‰ para calcitas derivadas del basamento sedimentario cretácico. Estos valores isotópicos permiten proponer a González-P. *et al.* (1993) que el basamento calcáreo mesozoico parece ser la principal fuente de las especies carbónicas hidrotermales, puesto que los $\delta^{13}\text{C}$ de las especies analizadas son muy similares. Los resultados isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ y de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtenidos para especies minerales similares (carbonatos), en este caso, no pueden dar interpretaciones geoquímicas equivalentes, puesto que en el caso de los análisis isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en calcitas se intenta determinar el origen o procedencia de las especies catiónicas (Ca y Sr), mientras que en los resultados isotópicos de carbono se intenta determinar el origen de las especies carbónicas (CO_2) de las calcitas. Por lo tanto, no existe ninguna contradicción en cuanto a suponer que los componentes carbónicos (CO_2) de las calcitas de Los Humeros sean derivados del basamento, mientras que los componentes catiónicos (Ca y Sr) procedan de fuentes similares a las que produjeron las rocas volcánicas y no de los carbonatos del basamento. Esto último es muy importante, ya que frecuentemente en el uso de métodos isotópicos para la determinación del origen de especies químicas se generalizan los resultados obtenidos sobre la procedencia de todos los elementos que componen una fase mineral. Los componentes químicos de fases minerales hidrotermales pueden ser aportados por la circulación de fluidos calientes o ser derivados de las rocas encajonantes en proceso de alteración y transformación de minerales primarios.

CONCLUSIONES

Los estudios petrográficos y de difracción de rayos X permitieron determinar diversas fases minerales secundarias distribuidas en fracturas, cavidades o como sustitución de minerales primarios en las rocas del sistema geotérmico Los Humeros. Dichas fases se encuentran formando asociaciones minerales paragenéticas indicadores de condiciones particulares de temperatura. Así, estas se encuentran distribuidas en función del gradiente de temperaturas actual del sistema, lo cual puede ser un indicio de que las condiciones térmicas del sistema se han mantenido estables durante un período relativamente largo.

La aplicación de técnicas estadísticas tales como la utilizada aquí (diagramas ACP) resulta de gran utilidad en la visualización y comprensión de las diferentes relaciones de correlación y anticorrelación existentes entre los constituyentes químicos de una serie de rocas. Es por esto que los

resultados obtenidos a través de un análisis de ACP pueden ser equivalentes a las observaciones realizadas en diagramas de variación química o de tipo Harker.

Gracias a los diagramas de variación química utilizados y a la descripción litoestratigráfica detallada se pudo ver que no existe una relación directa entre la profundidad de emplazamiento de las rocas volcánicas y las concentraciones observadas de SiO_2 , K_2O , MgO o CaO . Es decir, no existe una evolución continua de la composición química y petrográfica de las rocas a través del tiempo. Sin embargo, si se considera todo el conjunto de análisis químicos disponibles, las rocas de Los Humeros siguen una tendencia evolutiva calcoalcalina con diferentes grados de cristalización fraccionada. Esta línea evolutiva es comparable a la esperada en rocas pertenecientes a la Faja Volcánica Transmexicana, aunque con un ligero enriquecimiento en potasio.

Utilizando marcadores químicos tales como el Zr, V o Ti, los cuales muestran un comportamiento químico relativamente estable bajo la acción de fluidos hidrotermales, fue posible determinar las variaciones químicas ocurridas en las rocas volcánicas de Los Humeros. Se mostró, gracias a estos análisis, que las rocas volcánicas del sistema están enriquecidas en calcio, sodio o sílice mientras que ciertas rocas riolíticas presentan una pérdida importante en potasio y sílice. El potasio fue posiblemente lixiviado por los fluidos calientes, ya que de acuerdo con ciertos autores (Cathelineau *et al.*, 1991) no existen reacciones secundarias que lo reestabilicen al formarse diversos minerales arcillosos.

Finalmente, se puede afirmar que la determinación de valores isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en minerales hidrotermales y en rocas volcánicas resultan de gran utilidad en la comprensión del origen de algunos de sus constituyentes químicos. En el presente caso se pudo mostrar que los constituyentes de carbonatos (Ca, Sr) hidrotermales y de rocas volcánicas de Los Humeros fueron derivados de una fuente magmática cuyos valores isotópicos son similares. Dicha fuente magmática no sufrió grandes modificaciones o mezclas con materiales del basamento calcáreo ya que los valores isotópicos de éste son diferentes en comparación con los valores isotópicos de rocas volcánicas y minerales hidrotermales de Los Humeros.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Comisión Federal de Electricidad y al Instituto de Investigaciones Eléctricas por habernos proporcionado las muestras de recortes de pozo (cuttings) del sitio Los Humeros. De la misma manera agradecemos las facilidades prestadas por el Service d'Analyses des Roches du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques de Nancy, Francia. Hacemos un reconocimiento especial a Barbara Martiny por sus comentarios sobre el texto. Se agradece a los árbitros sus sugerencias constructivas para el mejoramiento del presente trabajo. Los gastos ocasionados por estos estudios fueron cubiertos por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

BIBLIOGRAFIA

- BIRD, D. K., P. SCHIFFMAN, W. A. ELDERS, A. E. WILLIAMS y S. D. McDOWELL, 1984. Calc-silicates mineralization in active geothermal systems. *Econ. Geol.*, 79, 671-695.
- BROWNE, P. R. L., I. J. GRAHAM, R. J. PARKER y C. P. WOOD, 1992. Subsurface andesite lavas and plutonic rocks in the Rotokawa and Ngatamariki geothermal systems, Taupo Volcanic zone, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 51, 199-215.
- CAMPOS-E., J. O. y J. J. ARREDONDO-F., 1992. Gravity study of Los Humeros caldera complex Mexico: structure and associated geothermal system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 51, 199-215.
- CATHELINÉAU, M., G. IZQUIERDO, G. VAZQUEZ y M. GUEVARA, 1991. Deep geothermal wells in the Los Azufres (Mexico) caldera: Volcanic basement stratigraphy based on major-elements analysis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47, 149-159.
- DYPRVIK, H., 1983. Clay mineral Transformation in Tertiary and Mesozoic sediments from the North-Sea. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 67, 160-165.
- ELLIS, A. J., 1963. Solubility of calcite in sodium chloride solutions at high temperatures. *Amer. J. of Science*, 261, 259-267.
- FERRIZ, H., 1982. Geological and preliminary reservoir data on the Los Humeros geothermal system, Puebla, Mexico. Proceedings, Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University Cal., 19-24.
- FERRIZ, H. y G. A. MAHOOD, 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89, B10, 8511-8524.
- GONZALEZ-P. E., D. BARRAGAN-R., D. NIEVA, J. QUIJANO-L., J. LOPEZ-M. y H. GUTIERREZ-P., 1991. Estudio de inclusiones fluidas en cuatro pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. *Geotermia. Rev. Mex. Geo.*, 7, 185-199.
- GONZALEZ-P. E., D. BARRAGAN-R. y D. NIEVA- G., 1993. Análisis geoquímico-isotópico de las especies carbónicas del fluido geotérmico de Los Humeros, Puebla, Mexico. *Geofis. Int.*, 32, 2, 299-310.
- GOVINDARAJU, K., 1989. 1989 compilation of working values and sample description on 272 geostandards. *Geostandards Newsletter*, 13, Special Issue: 113 pp.
- GUTIERREZ-N., L. 1982a. Petrografía del pozo H-2 del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue., Informe interno C.F.E., N. 22-82.
- GUTIERREZ-N., L. 1982b. Litología y zoneamiento hidrotermal en los pozos H-1 y H-2 del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe interno C.F.E., N. 23-82.
- KOEPNICK, R. B., W. H. BURKE, R. E. DENISON, E. A. HETHERINGTON, N. F. NELSON, J. B. OHO y L. E. WAITE, 1985. Construction of Seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr curve for the Cenozoic and Cretaceous supporting data. *Chemical Geology*, 58, 55-81.
- KRISTMANNDOTTIR, H., 1983. Chemical evidence from Icelandic geothermal systems as compared to submarine geothermal systems. *In: Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*. Ed. Rona Plunun press, N.Y. 291-320.
- MARTINEZ-S., R., 1993. Caractérisation minéralogique, géochimique et isotopique du champ géothermique de Los Humeros, Mexique. Interactions fluide-roche dans un système à fluide mixte (eau-vapeur). Thèse de l'INPL, Nancy, France, 232 pp.
- MENEZ-L. S., 1965. Estratigrafía y tectónica de la porción Oriental del Macizo de Teziutlán, Pue. y sus relaciones geológicas regionales con el frente de la Sierra Madre Oriental entre Pemuxco, Hgo. y el Valle de Oaxaca. México, D.F. Inst. Pol. Nal.; ESIA. Tesis Profesional, 51 pp.
- MILLER, D. M., CH. H. LANGMUIR, S. L. GOLDSTEIN y A. L. FRANKS, 1992. The importance of parental magma composition to calc-alkaline and tholeiitic evolution : evidence from Umnak Island in the Aleutians. *J. Geophys. Res.*, 97, 321-343.
- NEGENDANK, J. F. W., R. EMMERMAN, R. KRAWCZYK, F. MOOSER, H. TOBSCHALL y D. WEHRLE, 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Transmexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.*, 24, 4, 477-575.
- PEARCE, J. S. y J. R. CANN, 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 290-300.
- PECCERILLO, A. y S. R. TAYLOR, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- ROBIN, C. 1982. Relations volcanologie-magmatologie-géodynamique, application au passage entre volcanisme alcalin et andésitique dans le Sud Mexicain (Axe Transmexicain et Province Alcaline Orientale). Thèse de Doc. d'Etat Univ. de Clermont-Ferrand 2, 503 pp.
- ROYER, J. J. et H. MEZGACHE, 1989. Programme informatique pour le traitement multivariable des données. Inédito, C.R.P.G., Francia.

- TARANGO-O., G, 1967. Estudio geológico petrolero del área Rio Laxaxalpa-Teziutlán, Edo. de Puebla. México, D.F. Inst. Pol. Nal; ESIA. Tesis Profesional, 51pp.
- TORRES-R., V., R. MARTINEZ-S. y L. SILVA-M., 1988. Interpretación de las características geoquímicas de la parte oriental de la Faja Volcanica Transmexicana. *Geotermia, Rev. Mex. Géoen.*, 4, 3, 139-193.
- VERMA, S. P. 1983a. Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, Mexico: Nd and Sr isotope data. *Nature*, 301, 52-55.
- VERMA, S. P. 1983b. Datos isotópicos de Sr y Nd en el Cinturón Volcánico Mexicano: Una síntesis e implicaciones. Mem. Reunión 1982-1983 Unión Geofis. Mexicana (resúmenes completos).
- VIGGIANO-G., J. C. y J. ROBLES, 1988a. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: sus usos como indicador de temperaturas y del régimen hidrológico. *Geotermia, Rev. Mex. Geoen.*, 4, 15-28.
- VIGGIANO-G., J. C. y J. ROBLES, 1988b. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. II: Geometría del yacimiento. *Geotermia, Rev. Mex. Geoen.*, 4, 29-40.
- VINIEGRA-O., F., 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y la Cuenca Cenozoica de Veracruz. *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros*, 17, N. 7-12, 100-135.
- YAÑEZ-G., C., S. GARCIA-D. y J. CASIQUE-V., 1979. Geothermics exploration in the Los Humeros-Derrumbadas Area. *Geothermal Resources Council Transaction*, 3, 801-803.
- YAÑEZ-G., C. 1980. Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros-Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz. Informe Interno C.F.E., 59 pp.
-
- Raymundo G. Martínez Serrano^{1,2} y Chantal Alibert¹
- ¹Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Vandoeuvre-lès-Nancy, France
- ²Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F. Del. Coyoacán, 04510 México, D. F. México.