

GEOCRONOLOGÍA, TERMOMICROMETRÍA E ISOTOPIA DE AZUFRE Y CARBONO DE LA BRECHA CUPRÍFERA LA SORPRESA, ESTADO DE JALISCO

Eduardo González-Partida¹ y
Raymundo Martínez-Serrano²

RESUMEN

El yacimiento de cobre La Sorpresa se ubica al SW de Ameca, Estado de Jalisco, el cual está asociado a un intrusivo cuarzomonzonítico de 54.3 ± 4.9 Ma (datación realizada por el método de K-Ar), emplazado dentro de una secuencia volcánica andesítica del Terciario inferior. La forma del yacimiento de cobre es cilíndrica, casi vertical, con un diámetro promedio de 150 m y una profundidad de 150 m; se encuentra formado por fragmentos angulares a subredondeados, cuyo tamaño varía desde 1 hasta 50 cm, y de composición predominantemente cuarzomonzonítica.

La mineralización de la brecha ocurrió en tres etapas esenciales: La primera fue una alteración sericitica del intrusivo antes del brechamiento. La segunda puede dividirse en dos alteraciones, una potásica y otra propilítica presentes en forma de zonación alrededor de los fragmentos. La última está representada por el relleno de los espacios vacíos de la brecha por turmalina, cuarzo, pirita, calcopirita y algo de molibdenita. La hematita está distribuida en toda la mineralización y es masiva en la andesita.

Se llevó a cabo estudios termomicrométricos de inclusiones fluidas en muestras representativas de cada etapa de mineralización con el propósito de conocer las condiciones fisicoquímicas de formación del yacimiento, obteniéndose que la temperatura varían de 150 a 410°C, con salinidad de 2 a 37% equivalente en peso de NaCl y algo CaCl₂. La presión calculada es de 500 bars a condiciones de ebullición durante el proceso hidrotermal.

También se realizó estudios de isótopos estables de azufre en calcopirita y de carbono en calcita con la finalidad de conocer la posible fuente de aporte de los sulfuros y carbonatos del depósito mineral, lo cual dio valores de $\delta^{34}\text{S}$ de +1.86 a +4.72‰ y de $\delta^{13}\text{C}$ de -1.24 a -3.85‰, evidenciando una fuente magmática.

Por lo anterior, se concluyó que la formación de la brecha fue causada por una explosión hidrotermal, la mineralización se debió a distintos aportes de fluidos calientes del intrusivo en proceso de enfriamiento hacia la brecha, en condiciones de temperatura de entre 150 a 410°C y presiones de 500 bars, por lo que se calculó una profundidad de formación, bajo régimen hidrostático, de 1,000 m respecto a la paleogeografía, dato que concuerda con los rasgos topográficos presentes actualmente.

Palabras clave: fechamiento K-Ar, inclusiones fluidas, isótopos de azufre y carbono, brecha cuprífera La Sorpresa, Jalisco, México.

ABSTRACT

The copper orebody La Sorpresa is located southwest of Ameca, Jalisco. It is associated with a quartz monzonite intrusion of 54.3 ± 4.9 Ma (K-Ar dating method), emplaced in an early Tertiary andesite. The copper orebody is in the form of a nearly vertical pipe with an average diameter of 150 m. It is constituted by angular to subangular fragments ranging in size from 1 to 50 cm, predominantly composed of quartz monzonite.

The mineralization of the breccia pipe took place in three stages. The first was a sericitic alteration of the intrusion prior to the fragmentation. The second stage can be divided into a propylitic and a potassic alteration, present in the form of zones around rock fragments. The third stage is represented by tourmaline, quartz, pyrite, chalcopyrite and some molybdenite filling the open spaces around the breccia fragments. Hematite is distributed throughout the mineralized zone and is massive in the andesite.

Thermomicrometric fluid inclusion studies were carried out in representative samples of each stage of mineralization with the objective of identifying the physicochemical conditions during the formation of the orebody. Temperature ranges between 150 to 410°C with salinity from 2 to 37% NaCl weight equivalent with some CaCl₂. The calculated pressure of the boiling point during the hydrothermal process is 500 bars.

Stable isotope studies of sulfur in chalcopyrite and carbon in calcite were carried out in order to identify the possible source of the sulfides and carbonates in the mineral deposit. These gave values of $\delta^{34}\text{S}$ of +1.86 to +4.72‰ and $\delta^{13}\text{C}$ of -1.24 to -3.85‰, showing that they derive from a magmatic source.

¹ Departamento de Geotermia, División Fuentes de Energía, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Apartado Postal 475, 62000 Cuernavaca, Morelos.

² División Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D. F.

It is concluded from the above that the formation of the breccia was caused by a hydrothermal explosion. The mineralization was due to contributions from individual hot fluids cooling from the intrusive towards the breccia at temperatures between 150 and 410°C and at a pressure of 500 bars. From this, it is calculated that the formation occurred at a depth of 1,000 m, which agrees with the topographic features present today.

Key words: geochemistry, K-Ar dating, fluid inclusions, sulfur and carbon isotopes, La Sorpresa copper-bearing breccia pipe, Jalisco, Mexico.

AMBIENTE METÁLICO-TECTÓNICO REGIONAL

Los yacimientos de cobre en la cordillera de América del Norte forman una franja de 180 km de longitud que se extiende desde el Estado de Guerrero (Las Salinas) hasta el NW de Arizona, en Estados Unidos, por sólo mencionar un trayecto de la cintura cuprífera peripacífica reconocida desde Alaska, en América del Norte, hasta Chile en América del Sur (Figura 1). Por sus características de emplazamiento (ambiente subvolcánico o hipabisal) estos yacimientos son de los tipos: diseminado, *stockwork* y brechas mineralizadas someras, como es el caso de La Sorpresa, Jal. La cintura cuprífera tiene una relación muy estrecha con el emplazamiento de cuerpos ígneos en el occidente de México (González-Partida *et al.*, 1987; González-Partida y Torres-Rodríguez, 1989). La migración magmática W-E y N-S postulada por Coney y Reynolds (1977) y Damon y colaboradores (1983) habría podido contribuir a que las épocas metalogénicas para el cobre presenten una variación cronológica en la misma dirección: jurásico-cretácicas en el norte, laramídicas en el centro y pliocénicas en Chiapas, fenómenos ligados a las particularidades de subducción-transformación de la Placa Pacífica sobre el continente americano.

zada por Martínez-Serrano (1984) y el esquema geológico se muestra en la Figura 1.

La base de la secuencia litológica consiste en una andesita microlítica cortada por una cuarzomonzonita de textura fanerítica holocristalina; tiene un patrón de diaclasas de dirección NE-SW, que en las cercanías a la brecha mineralizada presenta alteraciones incipientes de turmalina, cuarzo, epidota y arcillas. El intrusivo fue fechado a partir de roca fresca por el método K-Ar, y estudiado por petrografía y geoquímica de roca total; se muestra los resultados en la Tabla 1. La cuarzomonzonita, confirmada por petrografía y geoquímica, pertenece a la serie calcialcalina y su edad es de 54.3 ± 4.9 Ma, lo que permite correlacionar la andesita y el intrusivo con el "complejo volcánico inferior" de la Sierra Madre Occidental reportado por McDowell y Keizer (1977). Cortando a las rocas anteriores, se encuentra algunos diques láuticos, posteriores a la mineralización.

Tabla 1.- Resultados geocronológicos por K-Ar y geoquímicos de roca total del intrusivo cuarzomonzonítico. Los análisis fueron hechos en el C.R.P.G., del C.N.R.S., de Nancy, Francia (Zimmermann *et al.*, 1988).

MUESTRA	NATURALEZA		K%	⁴⁰ Ar rad	⁴⁰ Ar atm	EDAD				
CUARZOMONZONITA	ROCA TOTAL		2.60	[10 ⁻⁶ cm ³ / g]	15.5	[Ma ± 2σ]				
				5.57		54.3 ± 4.9				
COMPOSICIÓN	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
QUÍMICA	62.02	15.77	5.34	0.10	2.60	4.58	3.51	3.30	0.69	0.12
CONSTANTES: λ _β = 4.962 X 10 ⁻¹⁰ / año; λ _γ = 0.581 X 10 ⁻¹⁰ / año; ⁴⁰ K = 0.01167 K%										

Unas capas de riolita y riodacita sobreyacen a la andesita y el intrusivo, formando mesetas muy erosionadas. La unidad más joven cubre discordantemente las anteriores y pertenece a derrames basálticos de olivino-augita, poco alterados, los cuales son propios del Eje Neovolcánico Transmexicano.

EL CUERPO MINERALIZADO

La mineralización se encuentra diseminada en una brecha de explosión hidrotermal y se restringe a la andesita (sombbrero de hierro) y, fundamentalmente, al cuerpo intrusivo; presenta una forma columnar casi vertical con un diámetro de aproximadamente 150 m; la profundidad, conocida por barrenación somera, no sobrepasa los 150 m, con posibilidades de prolongarse. Los contactos entre el cuerpo mineralizado y la roca encajonante están bien definidos, pasando del intrusivo fresco a alterado y aun a fragmentos brechoides mineralizados; en la Figura 2, se muestra una secuencia esquemática de la evolución estructural; los fragmentos del cuerpo columnar-tabular son de angulosos a subredondeados, con tamaños que varían desde 1 hasta 50 cm, aun cuando existen, esporádicamente, bloques hasta de 2 m de diámetro, presentando un arreglo irregular y caótico, como lo muestra la fotografía de la Figura 3. Los componentes litológicos de los bloques son cuarzomonzoníticos y hacia la superficie, en menor proporción, son andesíticos.

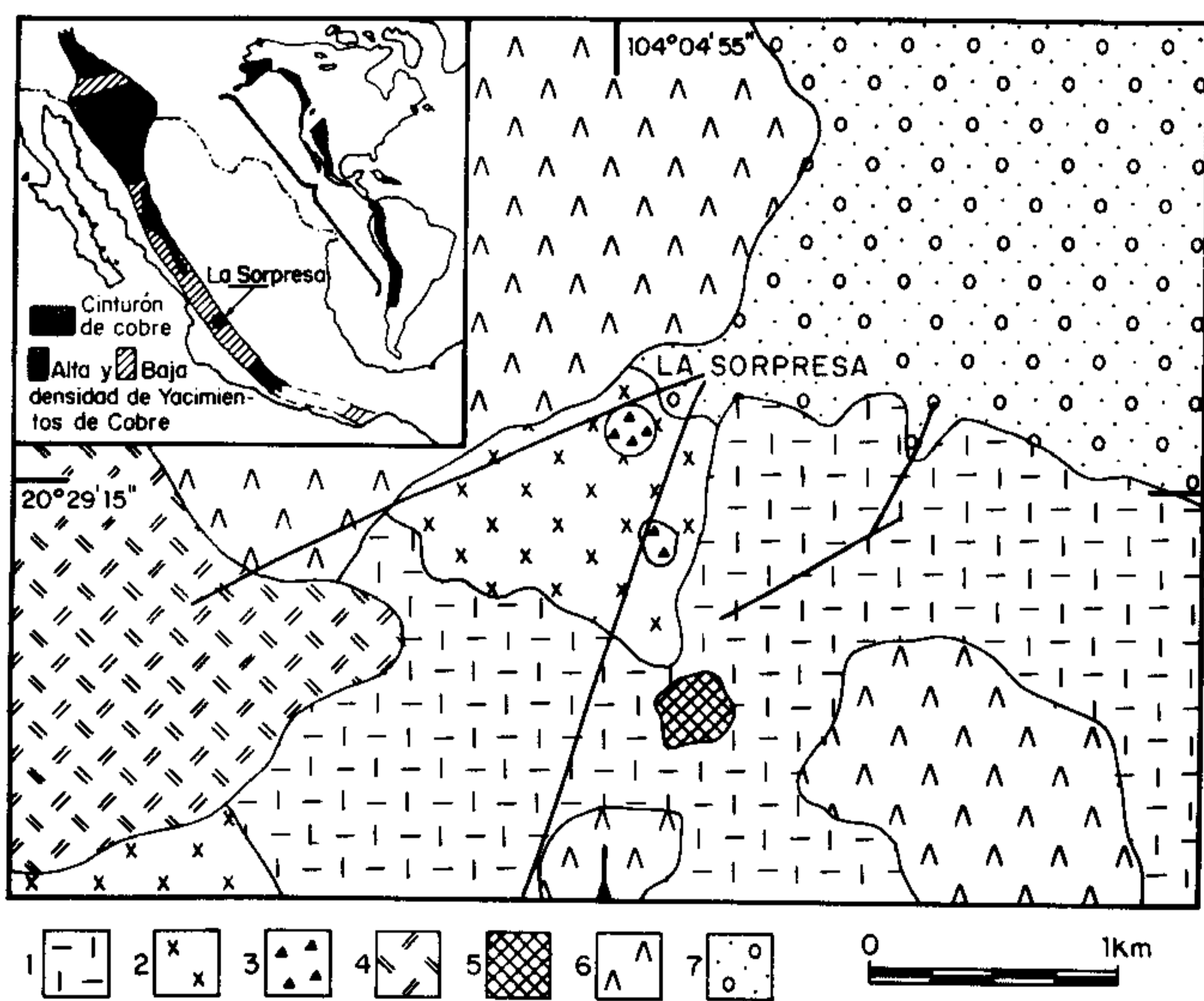


Figura 1.- Esquema geológico local de la brecha cuprífera La Sorpresa. Distribución de las provincias cupríferas en América y zonas de densidades baja (rayas) y alta (negro) de los yacimientos de cobre en México (tomada de Damon *et al.*, 1983; cartografía original de Martínez-Serrano, 1984). Explicación: (1) andesita, (2) cuarzomonzonita, (3) brecha de turmalina, (4) riolita-riodacita, (5) "sombbreros de hierro", (6) basalto, (7) conglomerado reciente.

GEOLOGÍA LOCAL

El yacimiento de cobre La Sorpresa se ubica 13 km al suroeste del poblado de Ameca, Jal. La cartografía fue reali-

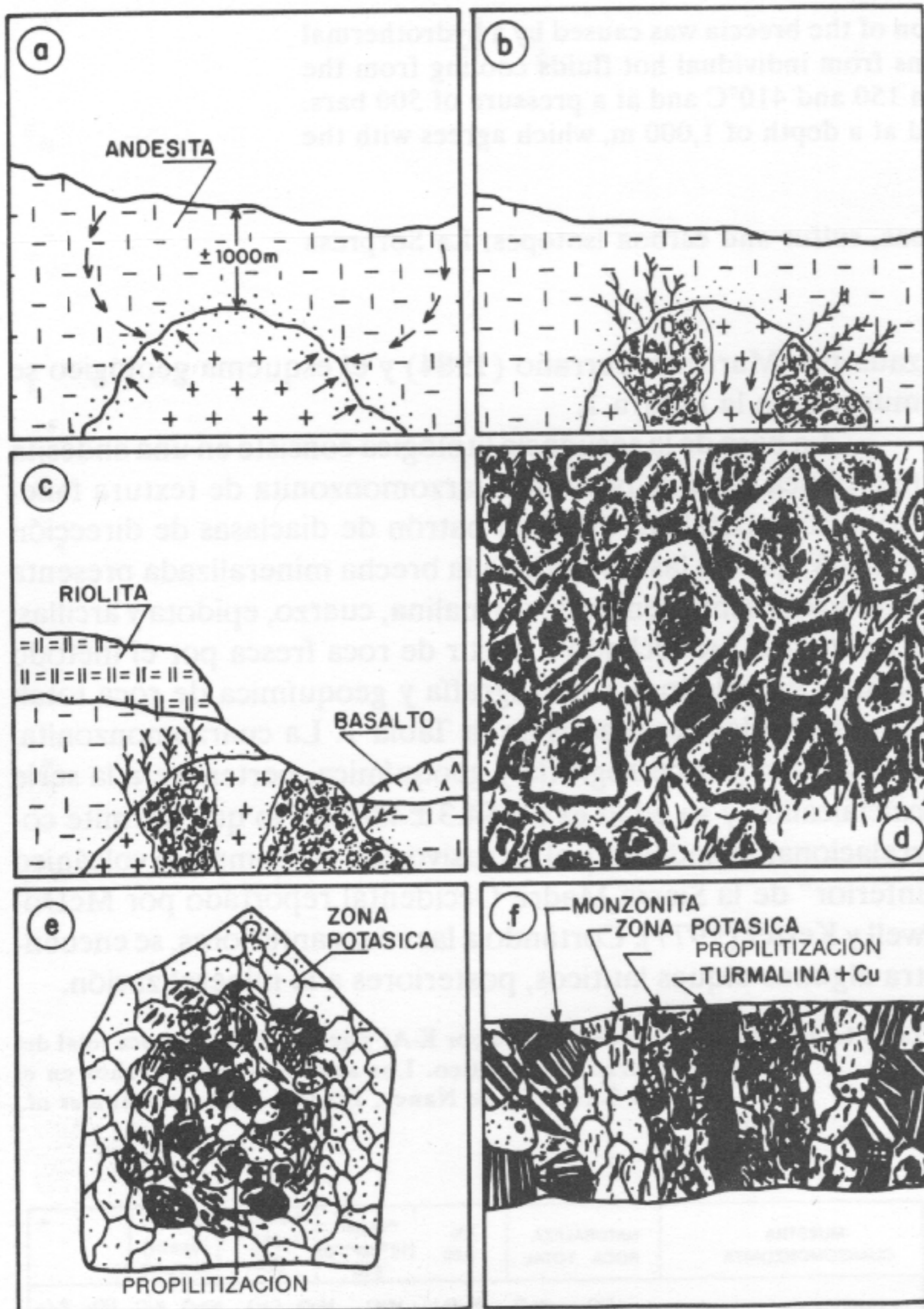


Figura 2.- Evolución estructural y textural del yacimiento cuprífero La Sorpresa, Estado de Jalisco. (a) Emplazamiento de la cuarzomonzonita en la andesita a profundidad somera, lo que provoca una descomposición y formación de brechas en el intrusivo; (b) desarrollo de vetillas irregulares en la andesita; (c) riolita y basalto del Eje Neovolcánico Transmexicano cubren posteriormente, en discordancia, a la andesita e intrusivo; (d) detalle a partir de una fotografía de la posición errático-caótica de los fragmentos ígneos cementados por turmalina y sulfuros de cobre; (e) zonación típica de un fragmento ígneo, que en los bordes presenta alteración potásica y hacia el centro propilítica; (f) las fracturas presentan, en algunos casos, una zonación repetida del centro hacia el exterior: turmalinización + sulfuros → propilítización → zona potásica → roca fresca.

ALTERACIÓN HIDROTHERMAL Y PARAGÉNESIS

De acuerdo con los estudios petrográficos y minerográficos realizados, el proceso de mineralización se dividió en tres etapas de alteración hidrotermal:

La primera etapa consistió en la alteración sericitica de los feldespatos en el intrusivo cercano a la brecha.

La segunda etapa ocurrió después de haberse formado la columna brechoide, puesto que alrededor de los fragmentos se presenta una zonación de alteración potásica (en el exterior) y de alteración propilítica (en el centro), tal y como se muestra en la Figura 2. El balance mineralógico, que se muestra en la Tabla 2, ocurrió por una transformación de la mineralogía primaria de la cuarzomonzonita debida a la alteración potásica, en la cual las plagioclasas del intrusivo fueron reemplazadas o alteradas a ortoclasa y cuarzo, con escasa calcita, clorita y sericita; en este proceso ocurre un enriquecimiento de potasio en los feldespatos alcalinos ígneos, la biotita mag-



Figura 3.- Fotografía que muestra la naturaleza típica de la brecha: En claro, la alteración potásica; en oscuro fuerte y como cementante, la turmalina masiva; en oscuro claro predomina la propilítización.

mática es descompuesta a una variedad más magnesiana, la cual está acompañada por rutilo, mientras que el hierro liberado por la biotita es absorbido en la formación de los sulfuros. La alteración más extendida en el yacimiento es la propilítización, que consistió en el reemplazamiento de las plagioclasas, en los fragmentos intrusivos, a epidota, clorita, calcita, poca piritita y sericita, cambiando la textura original.

La tercera etapa comprendió el relleno de los espacios existentes entre los fragmentos, por medio de un primer depósito de turmalina masiva, granular, de color azul oscuro a verde pardo (chorlita), intercrecida con cuarzo anhedral. El relleno continuó con turmalina, cuarzo, calcita, piritita, calcopiritita, hematita y poca molibdenita. La mineralización en la andesita consistió esencialmente en hematita masiva, variedad especularita. Estos minerales fueron transformados a carbonatos de cobre y hematita por procesos supergénicos, llegando a formar un "sombrero de hierro" en la superficie. En la Figura 4, se muestra un diagrama de la sucesión paragenética determinada. El cuerpo mineralizado es de bajo tonelaje, mismo que no sobrepasa los 5 millones, con leyes promedio de 1.75% de Cu, por lo que por el momento no es económicamente explotable.

ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS

Fueron estudiadas 200 inclusiones fluidas en una platina Chaixmeca, en la ganga de cuarzo y calcita de la zona mineralizada y de las zonas de alteración potásica y propilítica de la brecha cuprífera; esto permitió caracterizar la salmuera hidrotermal que participó en el fenómeno de interacción agua-roca,

Tabla 2.- Balance mineralógico a partir de una cuarzomonzonita fresca que se transforma en un ambiente de alteración propilitica y potásica.

PORFIDO CUARZOMONZONITICO (Fresco)	ZONA PROPILITICA	ZONA POTASICA
CUARZO	No cambia	Aumenta
ORTOCLASA - MICROCLINA	No cambia	Reemplazamiento por feldespato-K y cuarzo
PLAGIOCLASA (An 35-45)	A epidota, zoizita, calcita, tr. clorita, coalin	Reemplazada completamente por feldespato-K, sericita, biotita
BIOTITA	A clorita, zoizita, calcita, leucoseno	Fresca o cruzada por granulos de bornita, clorita
HORNBLENDA	A epidota, clorita, monticelita	A biotita, clorita, rutilo
MAGNETITA	Trazas de pirita	A pirita
A-K-C-F A=Al K=K, Na C=Ca, Soles F=Fe, Mg		
RELLENO DE VETAS	Qz + Cal + Feld-K ± Plag + Clor	Qz + Feld-K + Bio + Ser + Anh + Cal

cada uno de los eventos considerados en este estudio se muestra en las Figuras 6 y 7. En la primera, se graficó los resultados obtenidos a partir de las temperaturas de fusión de hielo basados en las tablas de Potter y Brown (1977), mientras que los fluidos sobresaturados en sales, fueron interpretados a partir de los diagramas de Sourirajan y Kennedy (1962). Por la comparación de estas figuras con la Figura 8, que muestra las temperaturas de homogeneización, es posible interpretar que los fluidos calientes saturados en sales se diluyen progresivamente a medida que la temperatura desciende, al menos desde los 410 hasta los 150°C, valores registrados a lo largo de todo el proceso mineralizante; un argumento más que apoya esta observación es la existencia de inclusiones fluidas con cubos de sal + líquido en el cuarzo primario del intrusivo fresco. La Figura 9 muestra un diagrama de temperatura de homogeneización (Th°C) contra salinidad en % en peso equivalente a NaCl para cada una de las fases mineralizantes y de alteración hidrotermal; se ha graficado igualmente el comportamiento de otros tipos de yacimientos minerales: los polimetálicos filonianos de Tierra Caliente, que evolucionaron en tres importantes etapas, con densidades bajas (Charoy y González-Partida, 1984); los de reemplazamiento de calizas tipo Providencia, Zac.; los clásicos pórfidos de cobre; y los paleokársticos de alta densidad y baja temperatura. El comportamiento tan variado en la densidad del fluido estudiado respecto a las temperaturas de homogeneización, apoya igualmente la idea de una dilución progresiva de la salmuera a medida que la temperatura es menor en el sistema. La salmuera de la brecha cuprífera La Sorpresa, tiene características de un fluido hidrotermal, proveniente muy probablemente del intrusivo, puesto que una concentración tan alta en sales es típica de ambientes magmáticos (Roedder, 1984).

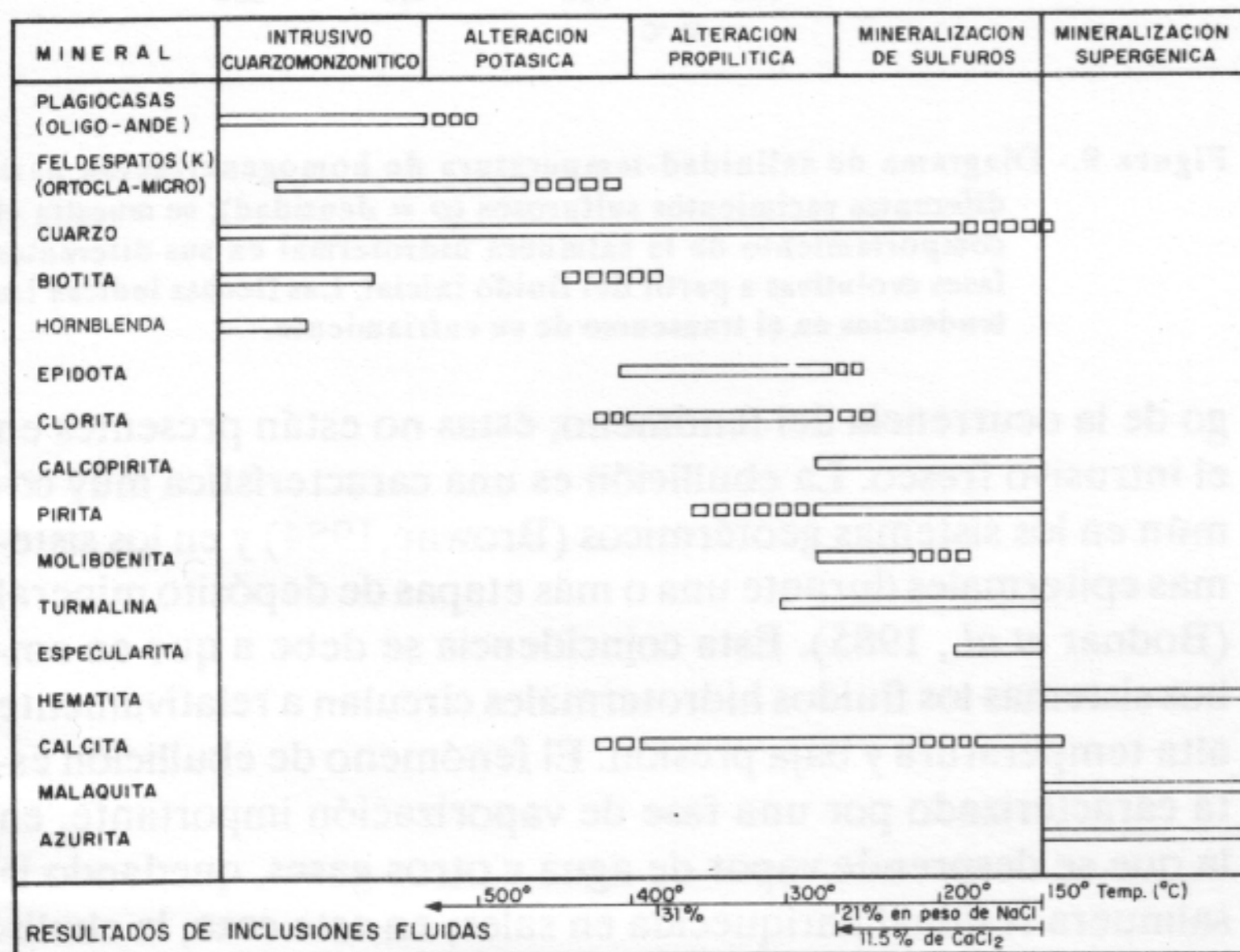


Figura 4.- Sucesión paragenética de la brecha cuprífera La Sorpresa, Estado de Jalisco.

dando por resultado la alteración hidrotermal y el depósito de sulfuros de cobre. En la zona mineralizada fueron estudiados dos tipos de cuarzo: el cuarzo II, más temprano, presenta inclusiones fluidas de líquido + vapor + sólido (cubo de sal y, en ocasiones, calcopirita); el cuarzo I contiene inclusiones con fluidos bifásicos (líquido + vapor). Las inclusiones encontradas en la zona de alteración propilitica son igualmente trifásicas, como se muestra en la Figura 5. En la zona potásica, las inclusiones contienen: vapor, líquido + vapor, líquido, sólidos + líquido, sólidos + líquido + vapor; todas, en ocasiones, se muestran en un mismo plano cristalino evidenciando así un fenómeno de ebullición (Bodnar *et al.*, 1985, p. 81; Roedder, 1981, 1984; Shepherd *et al.*, 1985) que caracteriza a la salmuera hidrotermal desde su fase más precoz. Este comportamiento es razonable debido a la descompresión a la que fue sometido el sistema al momento de la explosión hidrotermal que originó la brecha La Sorpresa. Las salinidades encontradas en

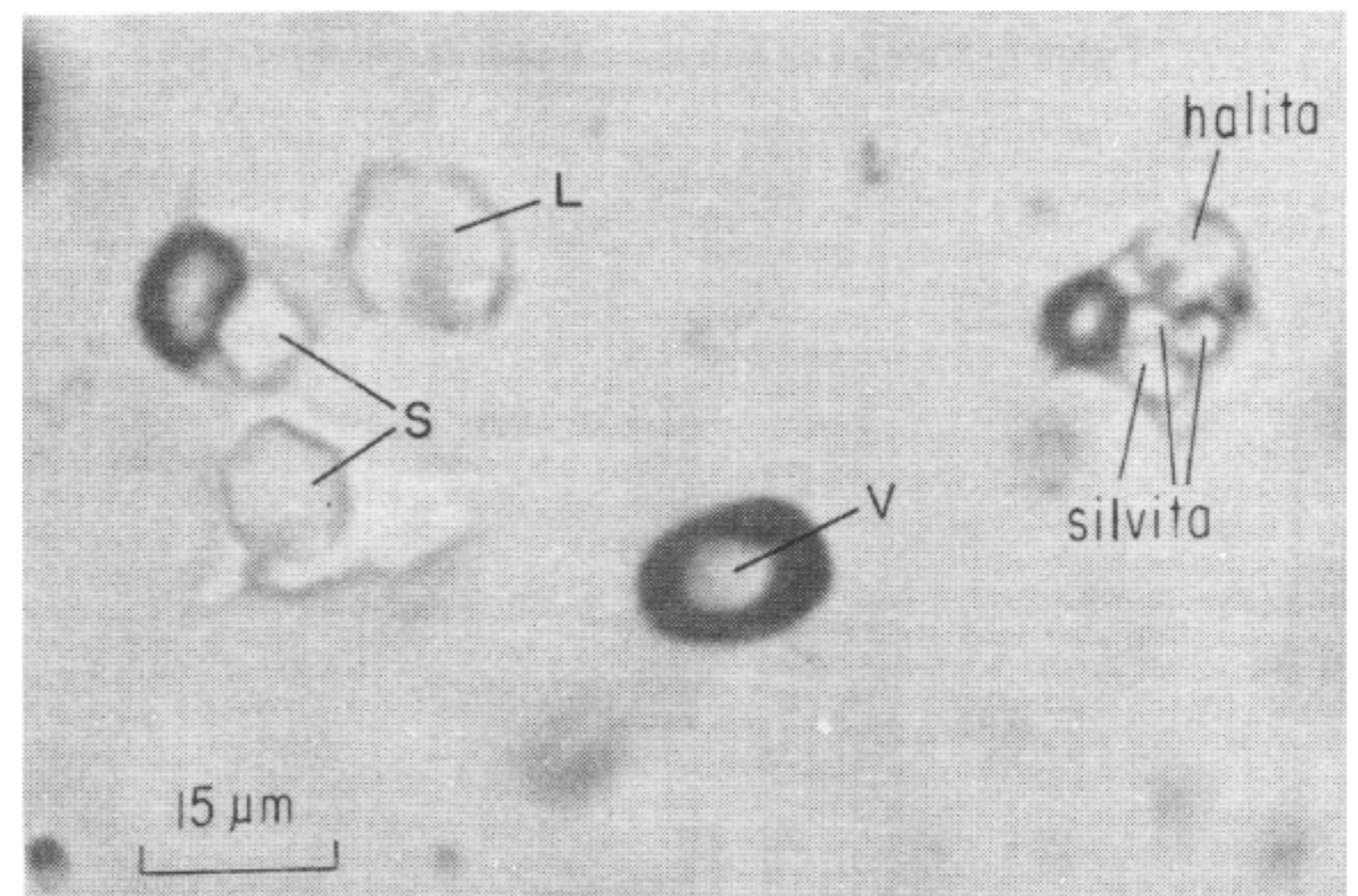


Figura 5.- Inclusión fluida multifásica, característica de los fluidos mineralizantes de La Sorpresa, Estado de Jalisco; tamaño de la inclusión de vapor, 15 µm; S = sólido (halita y silvita), L = líquido, V = vapor.

La compilación de datos de diferentes brechas cupríferas en el mundo (Tabla 3) muestra que, por lo general, la salinidad y la temperatura son altas; asimismo, para mantener el sistema en equilibrio se requiere presión alta. La descompresión debida al emplazamiento somero del intrusivo parece ser el mecanismo más probable de la ebullición y formación de la brecha, puesto que evoluciona de un sistema cerrado a uno abierto, es decir, se pasa de un régimen litostático a uno hi-

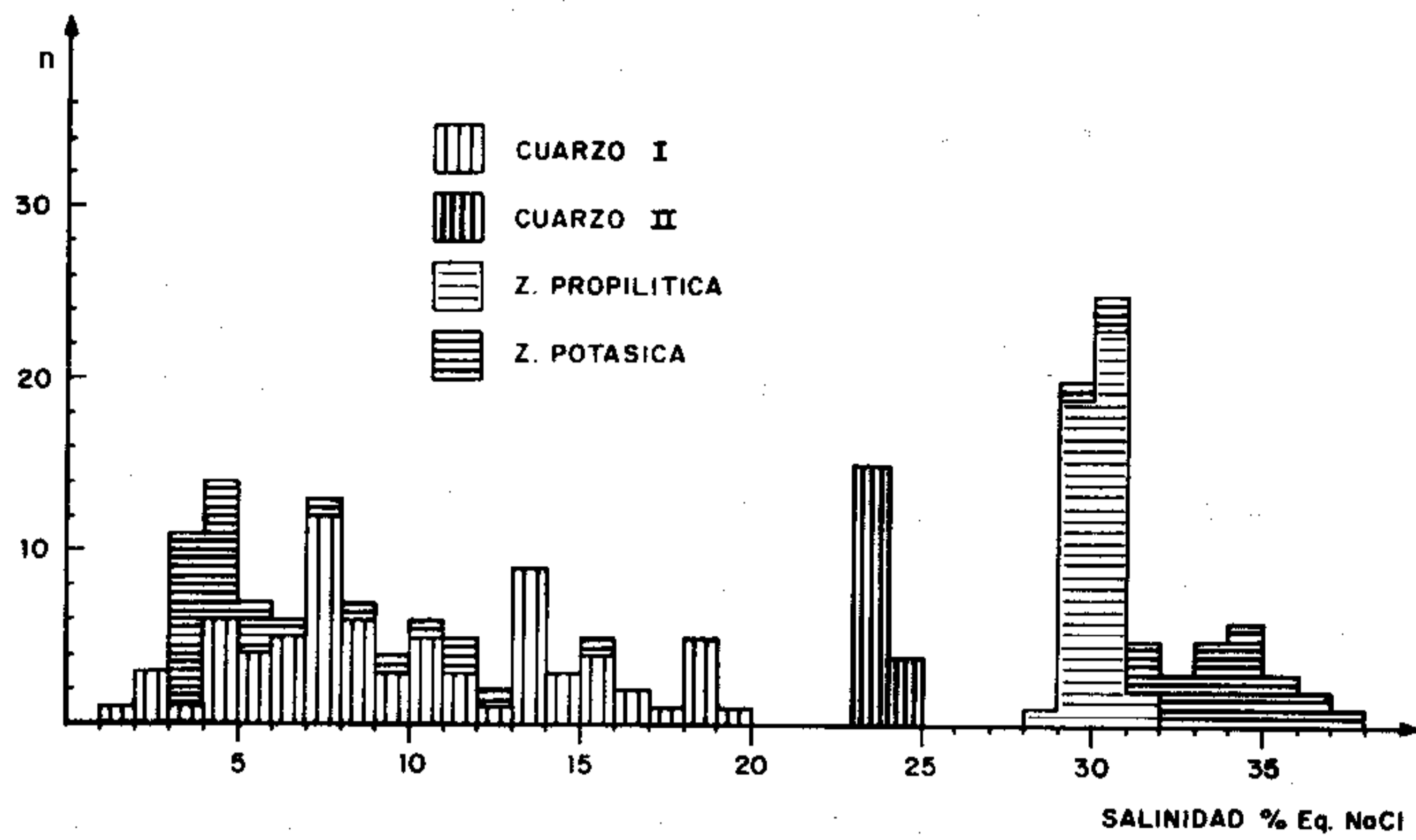


Figura 6.- Histograma de salinidad en los distintos medios estudiados.

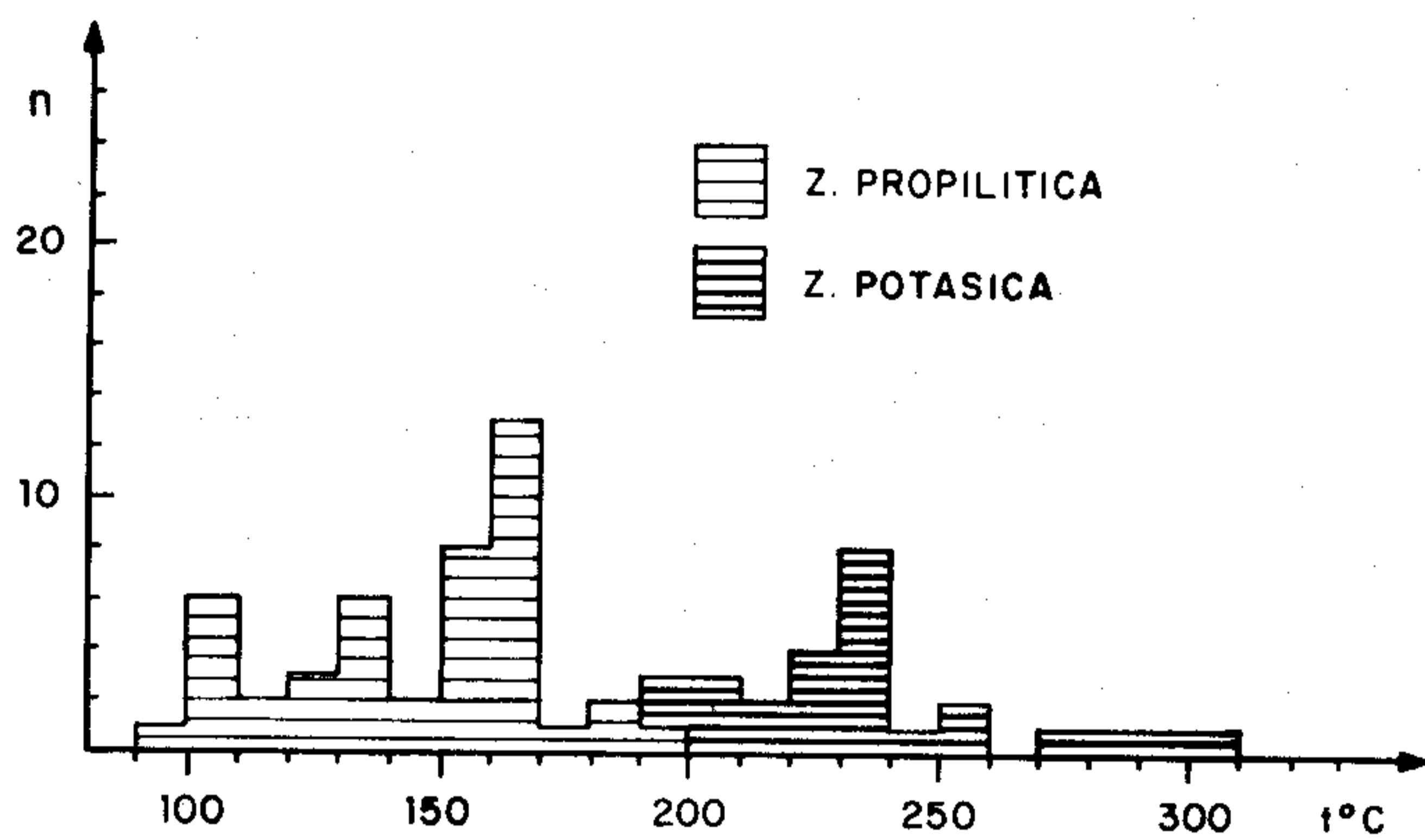


Figura 7.- Histograma de temperatura de fusión del NaCl.

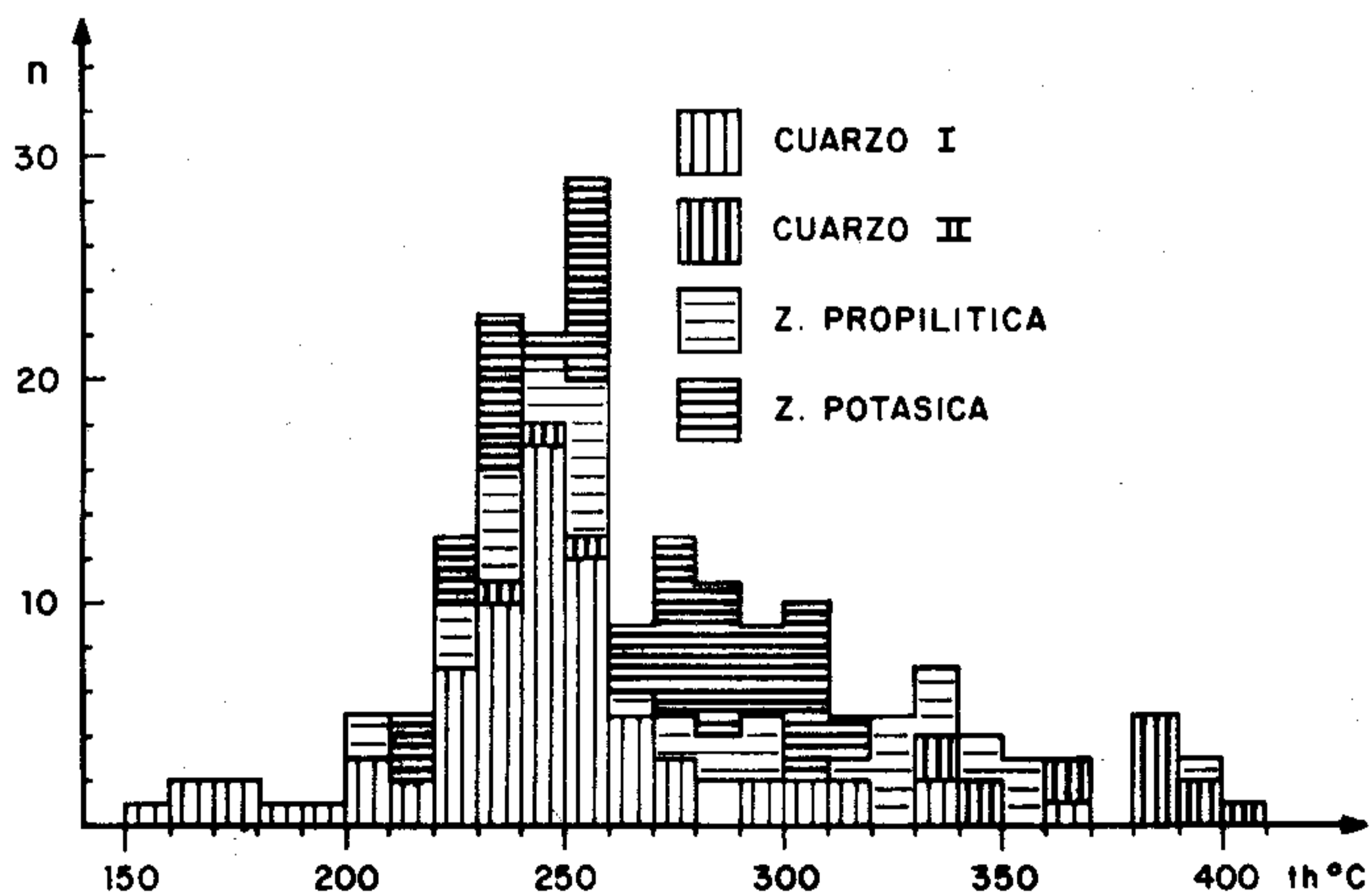


Figura 8.- Histograma de temperatura de homogeneización.

drostático; la salinidad y temperatura más precoces son, en este caso, las más representativas para determinar la presión inicial del fenómeno mineralizante. La pérdida de presión y temperatura origina una tasa de vaporización en aumento, por lo cual la observación de inclusiones fluidas de vapor es un testi-

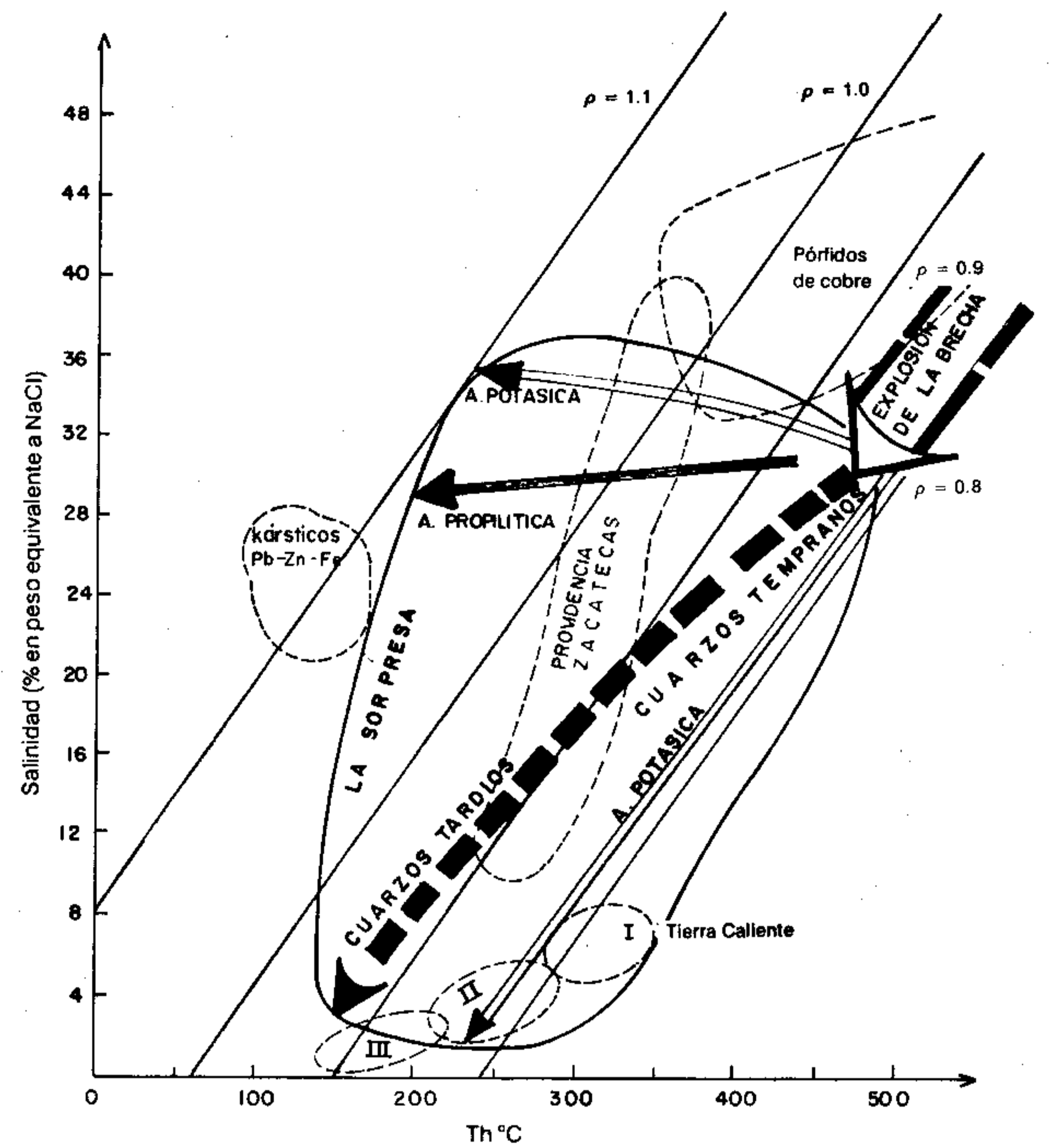


Figura 9.- Diagrama de salinidad-temperatura de homogeneización para diferentes yacimientos sulfurosos (ρ = densidad); se muestra el comportamiento de la salmuera hidrotermal en sus diferentes fases evolutivas a partir del fluido inicial. Las flechas indican las tendencias en el transcurso de su enfriamiento.

go de la ocurrencia del fenómeno; éstas no están presentes en el intrusivo fresco. La ebullición es una característica muy común en los sistemas geotérmicos (Browne, 1984) y en los sistemas epitermales durante una o más etapas de depósito mineral (Bodnar *et al.*, 1985). Esta coincidencia se debe a que en ambos sistemas los fluidos hidrotermales circulan a relativamente alta temperatura y baja presión. El fenómeno de ebullición está caracterizado por una fase de vaporización importante, en la que se desprende vapor de agua y otros gases, quedando la salmuera residual enriquecida en sales; en este caso, la ebullición provoca o se manifiesta por fluidos más concentrados en relación con los iniciales. Lo anterior fue demostrado por González-Partida y colaboradores (1987), en el fluido similar de la salmuera real del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en fases diferentes de ebullición y temperatura; el comportamiento termodinámico teórico de la salmuera geotérmica precoz profunda fue comparado con el comportamiento termomicrométrico de 4,500 inclusiones fluidas estudiadas en 15 pozos, a profundidades de hasta 4,560 m (González Partida *et al.*, 1989); se comprobó que la salmuera profunda atrapada en las redes cristalinas de los minerales de neoformación era baja en concentraciones iónicas, la ebullición ocurrida a aproximadamente 10°C y presiones de 95 ± 5 bars, modificó la actividad de las especies iónicas y el fluido capturado reflejó valores entre 5 y 10 veces más concentrados con relación al inicial, observándose igualmente inclusiones de vapor dominante en un mismo plano cristalino con fluidos bifásicos, mientras que en los niveles profundos el fluido era homogéneo y bifásico.

La dilución progresiva de la salmuera magmática concentrada de la brecha La Sorpresa se demuestra en el compor-

Tabla 3.- Comparación de las principales características de algunas brechas mineralizadas.

BRECHA MINERALIZADA	TIPO	T(°C)	% EN PESO DE NaCl	PROFUNDIDAD	GEOLOGIA	MINERALOGIA	ALTERACION	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}$	EDAD	REFERENCIAS
ILKWANG, COREA	Cu-W	305 a 435	5 a 12	1000-2500 m	CUARZOMON-ZONITA	SULFU.-TUGS. QZ-TURMALI.	SERICITICA PROPILITICA	-1.6 a 0.3	69 Ma	Chil-Sup y Shelton, 1983
DALSUNG, COREA	W-Cu	310 a 370	26	1500 m	ANDESITAS	QZ-TUGS. SULFU.	SERICITICA PROPILITICA		CRETACICO	Chi y Hwang, 1974
CHILE	Cu(W)	350 a 440	3 a 36	2000-3000 m	GRANITO Y ANDESITAS	QZ-TURMALI. SULFU.-TUGS.	SERICITICA		TERCIARIO	Sillitoe y Sawkins, 1971
TURMALINA, PERU	Cu-Mo	400 a 470	1 a 50	1380-3600 m	GRANODIO	QZ-TURMALI. SULFU.-TUGS.	SERICITICA		TERCIARIO	Carlson y Sawkins, 1980
SAN JUAN, ARGENTINA	Bi-Cu				ROCAS SEDIMENTA.	QZ-TURMALI. SULFU.	POTASICA		PERMICO	Llambías y Malvicini, 1969
INGUARAN, MICHOACAN MEXICO	Cu	310 a 365	12 a 36	1000 m	GRANITO Y GRANODIO	QZ-SULFU. TUGS.	PROPILITICA		100 Ma	Sawkins, 1979
TRIBAG, CANADA	Cu-Mo	265 a 405	1 a 17	2500 m	GRANITO-METAVOLCA.	QZ-CARBO. SULFU.	HEMATI-SERI. CLORITA		PRECAM-BRICO	Norman, 1974
MESSINA, SUDAFRICA	Cu	120 a 210	1 a 26	3000 m	ROCAS METAMORFICAS	QZ-SULFU. CARBONATOS	SERICITA CLORITA	-3.4 a 0.4	170 a 210 m. a	Sawkins, 1977
REDBANK, AUSTRALIA	Cu			2000-3000 m	R. IGNEAS Y SEDIMENTA.	QZ-SULFU. CARBONATOS	POTASICA	-2.0 a 16.1	PROTERO.	Knutson et al., 1977
LA SORPRESA MEXICO	Cu	150 a 410	1 a 31.1	800 a 1000 m	CUARZOMON-ZONITA	TURMALI.-QZ. SULFU.-CARBO.	PROPILITICA POTASICA	1.86 a 4.72	TERCIARIO	Este artículo

tamiento de las diferentes fases minerales estudiadas. La presencia de ebullición, inferida por las evidencias de las inclusiones fluidas está apoyada por dos hechos: González-Partida y Barragán-Reyes (1989), al estudiar el sistema Fe-Cu-S en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., demostraron que a medida que progresa la ebullición, el medio resultante es más oxidante; lo mismo demostraron Arnold y González-Partida (1986, 1987) en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Este fenómeno se refleja con la aparición de calcita, pirita y hematita masiva; las zonas más someras actuales del yacimiento La Sorpresa (en la andesita), muestran hematita masiva, formada por lixiviación. Los sombreros de hierro y la calcita, que es parte principal de la ganga (Drummond y Ohmoto, 1985), demostraron que, a medida que la temperatura decrece, la eficiencia de la ebullición para depositar metales en solución se incrementa; en el caso del cobre, que necesita de la participación de hierro y azufre, el fenómeno parece estar controlado por la abundancia de hierro y no tanto por los cambios en la actividad del cobre y ebullición en el sistema. Así, en la brecha cuprífera la explosión hidrotermal provocó ebullición del fluido salado, fenómeno que se registra en la morfología y comportamiento heterogéneo de las inclusiones fluidas, así como en la precipitación de hematita y calcita.

La presión de aproximadamente 500 bars, a la cual ocurrió la mineralización, fue calculada a partir del fluido en estado de ebullición, considerando la temperatura y la salinidad más tempranas registradas y utilizando los datos de Sourirajan y Kennedy (1962) y Haas (1971), por lo que se estima una profundidad de formación de entre 800 y 1,000 m, considerando un régimen de presión hidrostática.

ESTUDIO ISOTÓPICO DE AZUFRE Y CARBONO

Se llevó a cabo estudios isotópicos de azufre en 10 muestras de calcopirita, previamente estudiadas por mineragrafia. El azufre de los sulfuros fue oxidado a SO_2 , siguiendo el método descrito por González-Partida (1981, 1985); el análisis

isotópico fue realizado con un espectrómetro VG602D y los resultados ($\delta^{34}\text{S}$) están dados en relación con la referencia internacional CDT (Tabla 4); la imprecisión espectrométrica es del orden de 0.05%.

Tabla 4.- Datos isotópicos de azufre y carbono en la mena y la ganga del yacimiento La Sorpresa, Estado de Jalisco.

MUESTRA	MINERAL	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C} \text{‰}$
1	CCP, Ca	+ 4.72	- 3.7
2	CCP, Ca	3.32	- 3.7
3	CCP, Ca	4.37	- 3.6
4	CCP, Ca	3.73	- 3.0
5	CCP, Ca	3.55	- 3.4
6	CCP, Ca	4.28	- 1.9
7	CCP, Ca	3.21	- 1.9
8	CCP, Ca	3.17	- 1.6
9	CCP, Ca	1.86	- 1.4
10	CCP, Ca	2.92	- 1.2
11	Ca		- 3.8

CCP = CALCOPIRITA, Ca = CALCITA; DATOS DE $\delta^{34}\text{S} \text{‰}$ HECHOS EN EL C.R.P.G. FRANCIA Y $\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ INSTITUTO DE FISICA DE LA UNAM.

Las 11 muestras de calcita, ganga mineral, fueron estudiadas por medio de isótopos de carbono; el procedimiento experimental es dado en detalle por Castillo y colaboradores (1988); los resultados ($\delta^{13}\text{C}$) están dados en relación con la referencia internacional PDB (*Belemnite americana* de la Formación Peedee, del Cretácico Superior, de Carolina del Sur). La imprecisión espectrométrica es menor que 0.1%. Los resultados están consignados en la Tabla 4.

ISÓTOPOS DE AZUFRE

El azufre se encuentra en casi todos los ambientes naturales existentes: en pequeñas cantidades de sulfuros en rocas ígneas y metamórficas, en la biosfera y en sustancias orgánicas relacionadas como el petróleo crudo y el carbón, en el agua marina en forma de sulfatos, así como en yacimientos minerales metálicos en forma de sulfuros. El comportamiento isotópico de los meteoritos y rocas ígneas ultrabásicas y básicas manifiesta un origen común con valores positivos cercanos al cero; el azufre marino varía de valor (de $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$), de acuerdo con la época geológica, de +12 a +21, mientras que los yacimientos hidrotermales presentan una gama de valores negativos.

La Figura 10 es una recopilación de datos isotópicos (de $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$) en yacimientos cupríferos. Las calcopiritas medidas muestran una dispersión de $+1.8 \pm 0.06$ a -4.72 ± 0.03 , en el que la media correspondiente es de $+3.51\text{‰}$. Estos valores caen dentro del intervalo correspondiente al azufre de origen magmático indiscutible, lo que sugiere que los sulfuros de la brecha cuprífera sean cogénéticos con la cuarzomonzonita de la cual se lixiviarían; la pequeña dispersión isotópica observada puede deberse a la mayor movilidad del isótopo ligero al momento del proceso hidrotermal, por lo que los valores más fraccionados corresponden a sulfuros tardíos.

Por otro lado, la composición isotópica de sulfuros asociados a intrusivos ácidos es generalmente positiva, según la compilación de un gran número de resultados hecha por Nielsen (1978). La composición isotópica de la pirita es sistemáticamente superior a 0‰, las compilaciones de Ohmoto y Rye (1979) confirman esta tendencia.

ISÓTOPOS DE CARBONO

El carbono es uno de los elementos relativamente más abundantes en la naturaleza; representa la base de la existencia de la vida sobre la tierra, por lo que su distribución en la corteza y manto superior es muy importante. A diferencia de otros elementos, el fraccionamiento isotópico del carbono se debe a un gran número de procesos naturales; los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en plantas terrestres varían de -24 a -34‰, mientras que en las acuáticas varían de -7 a -19‰. Los estudios isotópicos en combustibles fósiles consignan valores muy similares a los anteriores. Las rocas carbonatadas marinas muestran valores de $\delta^{13}\text{C}$ de +0.56 a +1.55‰, mientras que en los carbonatos no marinos varían de -7.5 a -2.5‰. Los valores de carbonatitas y de diamantes en kimberlitas caen dentro del intervalo de $-5 \pm 2\text{‰}$, por lo que se puede considerar que éste es el valor promedio del carbono en magmas formados por fusión parcial de rocas del manto superior. Aun cuando en la naturaleza el carbono en rocas graníticas muestra una amplia distribución (-15 a 30‰), debida particularmente a las características genéticas del magma, los valores obtenidos para la brecha cuprífera de La Sorpresa, que varían de

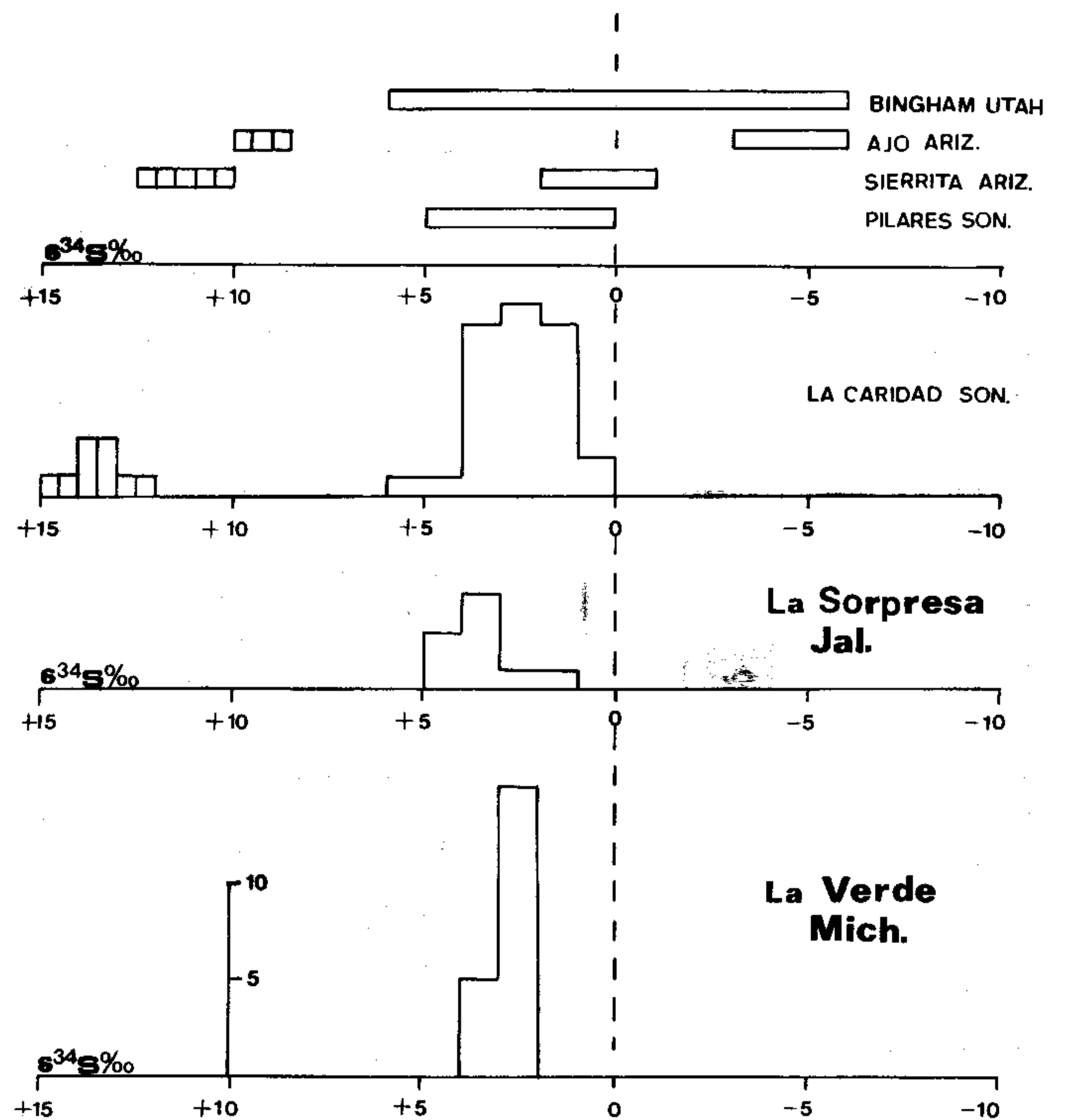


Figura 10.- Comportamiento isotópico del azufre, en yacimientos de tipo pórfido cuprífero (datos tomados de Ohmoto y Rye, 1979; Vélez-Sánchez, 1984; González-Partida, 1985).

-1.2 a -3.8‰, caen dentro del rango magmático, de acuerdo a las consideraciones de Ohmoto y Rye (1979).

DISCUSIÓN SOBRE EL ORIGEN DE LAS BRECHAS

El problema del origen y la clasificación de los cuerpos brechoides mineralizados ha recibido mucha atención en la literatura existente. Algunos autores ofrecen diferentes teorías para explicar la formación de estos yacimientos:

Buttler *in* Martínez-Serrano (1984) propone que la roca fue brechada aparentemente por una falla pequeña, por la cual circularon soluciones hidrotermales confinadas con fuerte acción corrosiva, las que al reaccionar con los fragmentos brechoides de la roca encajonante produjeron un aumento de los espacios porosos. En una etapa posterior, estos espacios fueron rellenados por minerales de mena y ganga (Johnston and Lowell, 1961).

Entre los que proponen un origen explosivo para estos depósitos, se encuentra Anderson (*in* Martínez-Serrano, *op. cit.*), quien piensa que algunos de estos yacimientos están asociados con fenómenos volcánicos, debido a la rotura o fracturamiento de la roca por escape o salida de gases. Dichas fracturas o espacios pueden ser rellenados por fragmentos de roca encajonante o material ígneo (Johnston y Lowell, *op. cit.*).

Scherkenbach (1982) calculó que la energía liberada por una solución hidrotermal salada y calentada a fase de vapor, es suficiente para formar brechas análogas a las de explosiones hidrotermales en los campos geotérmicos actuales. El mismo autor sugiere que los fluidos son calentados por un magma en proceso de enfriamiento a una profundidad dada, los que al atravesar fallas y fracturas pueden ser sometidos a una disminución de presión (cambio del régimen de presión de litoestático a hidroestático), produciendo una explosión instantánea

de vapor dominante. Esto induce a la formación de brechas que se extienden hacia abajo hasta que la presión de vapor de los fluidos se equilibra con la presión y temperatura ambiente. La explosión hidrotermal resulta en un arreglo caótico de los fragmentos angulosos.

El origen de algunos cuerpos columnares mineralizados se puede interpretar como brechas de colapso posmagmáticas, formadas a partir de la removilización de roca a través de conductos. El colapso se debe a la acción corrosiva de fluidos hidrotermales calientes que producen la abertura de espacios y el incremento de la porosidad de la roca, la cual es incapaz de soportar la sobrecarga superior y, en consecuencia, se produce el colapso. El punto de origen de dicha caída o hundimiento puede estar asociado a una falla litológica o estructural (Sawkins, 1969). El movimiento de los fluidos hacia arriba a través de la masa brechosa no cementada provoca el reemplazamiento y relleno de los espacios por varios minerales tales como cuarzo, turmalina, clorita, epidota, sulfuros, etc.

Norton y Cathles (1973) descartan que el mecanismo de corrosión de los fluidos sea esencialmente un evento posmagmático, ya que si esto fuera posible, se requeriría de grandes cantidades de reactivos solventes, por lo que ellos proponen que el vacío necesario para la formación de las brechas pueda ser generado por el poder de la explosión del agua de un magma durante el tiempo de emplazamiento. En cambio, Mitcham (1974) le da mayor importancia al problema espacial del emplazamiento de los depósitos y sugiere que todos fueron fallas de fisura de gran escala, como resultado del movimiento sobre un multiplano de falla común en zonas someras de la corteza terrestre. El desarrollo de esta sección de fallas es perpendicular al movimiento del vector principal, en el cual se produce un efecto de vacío y presión diferencial entre la fisura y sus paredes creando ruptura y brechamiento de la roca. En este estado, la brecha puede ser receptáculo de fluidos hidrotermales.

En resumen, se puede decir que debido al arreglo caótico que presentan los fragmentos brechoides del yacimiento La Sorpresa, se considera que, posiblemente, se originó por una explosión hidrotermal somera, ya que no se encuentra fragmentos orientados o tabulares propios de las brechas de colapso de otras provincias cupríferas. Esta suposición es evidenciada por la ebullición de fluidos mineralizantes observados en la ganga y alteración hidrotermal, la composición de los fragmentos brechoides, la alteración hidrotermal y el comportamiento isotópico de las menas y ganga.

CONCLUSIÓN

La brecha cuprífera de La Sorpresa, Jal., forma parte de una franja de cobre que avanza en el tiempo y el espacio desde el Estado de Sonora hasta el de Guerrero. La intrusión ígnea del Eoceno inferior es responsable de la formación del yacimiento, el cual se encuentra cubierto por los productos de la actividad del Eje Neovolcánico Transmexicano.

El intrusivo cuarzomonzónico de carácter calcalcalino fechado por K-Ar refleja una edad de emplazamiento de 54.3 ± 4.9 Ma; la mineralización se puede considerar contemporánea, ya que es producto de una explosión hidrotermal intragranítica. La forma cilíndrica del yacimiento está constituida fundamentalmente por fragmentos angulosos y subredondeados de 1 a 50 cm, mal clasificados, cementados por turmalina y sulfuros de cobre. Los fragmentos presentan una zo-

nación en la alteración hidrotermal: potásica, propilítica y turmalinización. El enfriamiento de los fluidos hidrotermales que participan en el proceso hidrotermal indica igualmente un sentido de enfriamiento en la misma dirección, que varía de 410 a 150°C. La observación óptica del fenómeno de ebullición y la alta concentración en sales que varía desde 2 hasta 37% en peso equivalente a NaCl, ponen de manifiesto una dilución progresiva de la salmuera a medida que el fluido es menos caliente, correspondiendo las temperaturas más bajas a los fluidos menos salados.

La presión calculada bajo régimen hidrostático (500 bars) para la formación de la brecha en condiciones de ebullición durante todo el proceso hidrotermal implica una profundidad de entre 800 y 1,000 m.

Los estudios isotópicos de azufre y carbono revelan que el azufre y el carbono de la ganga y la mena son de origen magmático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo reconocimiento al Dr. Stephen E. Kesler y al Dr. Joaquín Ruiz por la revisión crítica del manuscrito, la que contribuyó sustancialmente al mejoramiento del mismo, así como al Ing. Pedro Faz, quien mecanografió el manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, Michel, y González-Partida, Eduardo, 1986, Capacités oxydantes d'un fluide hydrothermal en ébullition: C. R. Académie des Sciences, t. 303, ser. 2, núm. 9, p. 817-820.
- Arnold, Michel, y González-Partida, Eduardo, 1987, Le système hydrothermal actuel de Los Humeros (Mexique)—État du système SO_4^{2-} - SiH_2 à 300°C, origine du soufre et phénomènes d'oxidation associés à l'ébullition du fluide ascendant: *Mineralium Deposita*, v. 22, p. 90-98.
- Bodnar, R. J., Reynolds, T. J., y Kuehn, C. A., 1985, Fluid inclusion systematics in epithermal systems, in Berger, B. R., y Bethke, P. M., eds., *Geology and geochemistry of epithermal systems: Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, v. 2, p. 73-97.
- Browne, P. R. L., 1989, Lectures on geothermal geology and petrology: Islandia, National Energy Authority y United Nations University, eds., 93 p.
- Carlson, S. R., y Sawkins, F. J., 1980, Mineralogic and fluid inclusion studies of the Turmalina Cu-Mo-bearing breccia pipe, northern Peru: *Economic Geology*, v. 75, p. 1233-1238.
- Castillo, R. C., Ramos, S., Nieto-Obregón, Jorge, y González-Partida, Eduardo, 1988, Carbon isotopic analysis in Mexico—A progress report on some Mexican ore deposits and metamorphic rocks: *Geofísica Internacional (México)*, v. 27, p. 149-157.
- Charoy, B., y González-Partida, Eduardo, 1984, Analyse des phases fluides associées a la genèse des amas sulfures et des filons Au-Ag de la province de Taxco-Guanajuato (Mexique): *Bulletin Mineralogique*, v. 107, p. 285-305.
- Chi, J. M., y Hwang, H. S., 1974, A study for genesis by homogenization temperature and paragenesis of Dalsung mine: *Korean Inst. Mining Geology Journal*, v. 7, p. 23-25.
- Chil-Sup, So, y Shelton, K. L., 1983, A sulfur isotopic and fluid inclusion study of the Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe, Ilkwang mine, Republic of Korea: *Economic Geology*, v. 78, p. 326-332.
- Coney, P. J., y Reynolds, S. J., 1977, Cordilleran Benioff zones: *Nature*, v. 270, núm. 5636, p. 403-406.
- Damon, P. E., Shafiqullah, Muhammad, y Clark, K. F., 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1052-1071.
- Drummond, E. S., y Ohmoto, Hiroshi, 1985, Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems: *Economic Geology*, v. 80, p. 126-147.
- González-Partida, Eduardo, 1981, La province filonienne Au-Ag de Taxco-Guanajuato (Mexique): Nancy, École Nationale Supérieure de Géologie, tesis (doctor-ingeniero), 234 p. (inérita).
- 1985, Étude métallogénique de la partie centre-occidentale du Mexique: Nancy, École Nationale Supérieure de Géologie, tesis de doctorado de estado, 400 p. (inérita).
- González-Partida, Eduardo, y Barragán-Reyes, R. M., 1989, El sistema Cu-Fe-S en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 5, p. 107-125.

- González-Partida, Eduardo, y Torres-Rodríguez, Vicente, 1988, Evolución tectónica de la porción centro-occidental de México y su relación con los yacimientos minerales asociados: *Geofísica Internacional (México)*, v. 27, p. 543-581.
- González-Partida, Eduardo, Barragán-Reyes, R. M., y Nieva-Gómez, David, 1987, Consecuencias químicas y mineralógicas de la ebullición en el sistema de Los Azufres, Michoacán: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Simposio internacional sobre desarrollo y explotación de recursos geotérmicos, Memoria, p. 178-188.
- González-Partida, Eduardo, Nieva-Gómez, David, y Barragán-Reyes, R. M., 1989, Estudio detallado de las inclusiones fluidas en el sistema hidrotermal activo del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 5, p. 126-152.
- González-Partida, Eduardo, Torres-Rodríguez, Vicente, Stussi, J. M., y Zimmermann, J. L., 1987, Análisis geoquímico de los granitos aflorantes en el sector Puerto Vallarta-Río Grande de Santiago, México: *Litosfera*, v. 1, p. 33-50.
- Haas, J. L., 1971, The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure: *Economic Geology*, v. 66, p. 940-946.
- Johnston, W. P., y Lowell, J. D., 1961, Geology and origin of mineralized breccia pipes in Copper Basin, Arizona: *Economic Geology*, v. 56, p. 916-940.
- Knutson, J., Ferguson, J., Roberts, W. M. B., Donnelly, T. H., y Lambert, I. B., 1979, Petrogenesis of the copper-bearing breccia pipes, Redbank, Northern Territory, Australia: *Economic Geology*, v. 74, p. 814-826.
- Llambías, E. J., y Malvicini, L., 1969, The geology and genesis of the Bi-Cu mineralized breccia-pipe, San Francisco de los Andes, San Juan, Argentina: *Economic Geology*, v. 64, p. 271-286.
- Martínez-Serrano, Raymundo, 1984, Estudio metalogenético de la brecha de cobre La Sorpresa, Jal.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 85 p. (inérita).
- McDowell, F. W., y Keizer, R. P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 88, p. 1479-1487.
- Mitcham, T. W. L., 1974, Origin of breccia pipes: *Economic Geology*, v. 69, p. 412-413.
- Nielsen, H., 1978, Sulfur isotopes, in Wedepohl, K. H., ed., *Handbook of geochemistry*: Berlín, Springer-Verlag, p. 16-B.
- Norman, D. I., 1974, Fluid inclusion study of Precambrian breccia pipes, Tribag, Ontario: *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, v. 6, p. 893 (resumen).
- Norton, D., y Cathless, L. M., 1973, Breccia pipes—products of exsolved vapor from magmas: *Economic Geology*, v. 68, p. 540-546.
- Ohmoto, Hiroshi, y Rye, R. O., 1979, Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (2ª ed.): Nueva York, John Wiley and Sons, p. 509-567.
- Potter, R. W., II, y Brown, D. L., 1977, The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 500°C at pressures up to 200 bars based on a regression of available data in the literature: *U. S. Geological Survey Bulletin* 1421C, p. C1-C36.
- Roedder, Edwin, 1981, Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping, in Hollister, L. S., y Crawford, M. L., eds., *Short course in fluid inclusions—Applications to petrology*: Calgary, Mineralogical Association of Canada, p. 101-137.
- 1984, Fluid inclusions: *Mineralogical Society of America, Reviews in mineralogy*, v. 12, 644 p.
- Sawkins, F. J., 1969, Chemical brecciation and unrecognized mechanism for breccias formation: *Economic Geology*, v. 64, p. 613-617.
- 1977, Fluid inclusion studies of the Messina copper deposits, Transvaal, South Africa: *Economic Geology*, v. 72, p. 619-631.
- 1979, Fluid inclusion studies of the Inguarán copper breccia pipes, Michoacán, México: *Economic Geology*, v. 74, p. 924-927.
- Sillitoe, R. H., y Sawkins, F. J., 1971, Geologic, mineralogic, and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile: *Economic Geology*, v. 66, p. 1028-1041.
- Scherkenbach, D. A., 1982, Geologic, mineralogic, fluid inclusion and geochemical studies of the mineralized breccia at Cumobabi, Son., Mexico: University of Minnesota, disertación doctoral, 190 p. (inérita).
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H., y Alderton, D. H. M., 1985, A practical guide to fluid inclusion studies: Nueva York, Chapman Hall, eds., 239 p.
- Sourirajan, S., y Kennedy, G. C., 1962, The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures: *American Journal of Science*, v. 260, p. 115-141.
- Vélez-Sánchez, V. C., Étude métallogénique du porphyre Cu-Mo de La Caridad, Son. (México): INPL, tesis (doctor-ingeniero), 234 p. (inérita).
- Zimmermann, J. L., Stussi, J. M., González-Partida, Eduardo, y Arnold, Michel, 1988, K-Ar evidence for age and compositional zoning in the Puerto Vallarta-Río Santiago batholith (Jalisco, México): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 3, p. 267-274.

Manuscrito presentado: 16 de diciembre de 1988.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 15 de julio de 1989.

Manuscrito aceptado: 20 de julio de 1989.