

## Fluidos asociados al skarn Au(-Cu) de La Joya, distrito de Mezcala, Guerrero, México: implicaciones regionales para depósitos formados a partir de rocas calcoalcalinas vs. adakíticas

**Eduardo González-Partida, Antoni Camprubí\*, Gilles Levesse  
Jordi Tritlla, Alejandro Carrillo-Chávez**

*Programa de Geofluidos, Centro de Geociencias,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, 76230 Querétaro, Qro., México.  
Apartado Postal 1-742, 76001 Querétaro, Qro., México.  
\* camprubi@geociencias.unam.mx*

### RESUMEN

*El prospecto de La Joya se localiza en el Distrito de Mezcala, Guerrero. La mineralización aurífera está relacionada a jasperoides que conforman un cuerpo lenticular de pequeñas dimensiones en superficie. La mena está relacionada a un intrusivo granodiorítico que desarrolla un skarn con granate grosulárico sobre calizas recristalizadas de la Formación Morelos. Entre el skarn y las calizas se desarrolló una zona de alteración argílica con pequeños lentes de sulfuros de cobre, que antecede a los jasperoides auríferos.*

*En el Distrito de Mezcala se relaciona la formación de skarns actualmente explotables con la intrusión de adakitas en el Paleoceno. Sin embargo, en la misma zona existen numerosos depósitos de tipo skarn asociados con intrusivos de carácter calcoalcalino, la mayoría de los cuales son de carácter subeconómico, como el depósito de La Joya.*

*En el skarn de La Joya se realizó un estudio microtermométrico de inclusiones fluidas con el objeto de conocer la evolución de las soluciones hidrotermales a partir de las que se produjo la mineralización, en (1) vetillas dentro de la granodiorita, (2) la zona de alteración argílica+skarn, (3) jasperoides y (4) calizas recristalizadas. Se definió la presencia de inclusiones bifásicas (líquido+vapor) en las vetillas magmáticas tardías, en los jasperoides y en las calizas recristalizadas, y de inclusiones multifásicas del tipo líquido+NaCl+vapor en la zona de skarn y en la zona de alteración argílica.*

*Las inclusiones fluidas en cuarzo de las vetillas magmáticas tardías en la granodiorita presentan salinidades calculadas entre 15.5 y 17.3% en peso NaCl equivalente, y temperaturas de homogeneización entre 361 y 413 °C. En inclusiones fluidas en cuarzo de la zona de skarn y de alteración argílica se obtuvieron salinidades calculadas entre 32 y 42% en peso NaCl equivalente, y temperaturas de homogeneización entre 306 y 348 °C. En las inclusiones fluidas en calcita de las calizas recristalizadas se obtuvieron salinidades calculadas entre 5 y 15% en peso NaCl equivalente, y temperaturas de homogeneización entre 172 y 205 °C. Por último, en inclusiones fluidas en cuarzo de los jasperoides auríferos se obtuvieron salinidades calculadas entre 0.3 y 1% en peso NaCl equivalente y temperaturas de homogeneización entre 160 y 170 °C.*

*Se interpreta la existencia de ebullición en la zona mineralizada con sulfuros de cobre y un transporte inicial de oro mediante complejos clorurados, que constituyen unos fluidos iniciales "medianamente" salinos. Hacia la superficie, en la zona de jasperoides, esta salmuera se diluyó propiciando la precipitación del oro. Las características de los fluidos mineralizantes magmáticos iniciales podrían explicar, en parte, el relativo bajo contenido en oro del depósito de La Joya, en contraste con los depósitos relacionados a magmas adakíticos del Paleoceno en el Distrito de Mezcala, asociados a fluidos iniciales oxidantes e hipersalinos.*

*Palabras Clave: skarn, oro, ebullición, inclusiones fluidas, La Joya, Distrito de Mezcala, Guerrero, México.*

### ABSTRACT

The La Joya prospect is found in the Mezcala district, Guerrero, Mexico. The gold-bearing mineralization is associated to jasperoids that form a small lenticular body near the surface. The ore is related to a granodioritic intrusive with a skarn aureole with grossular formed on recrystallized limestones from the Morelos Formation. An argillic alteration zone located between the skarn and the recrystallized limestones contains small copper sulfide lenses, that predate the formation of Au-bearing jasperoids.

The formation of presently mineable skarns at the Mezcala district is related with adakite intrusions during the Paleocene. However, the area contains several skarn deposits associated with calc-alkaline intrusives. Most of these, such as La Joya, have a subeconomic character.

We performed a microthermometric study of the fluid inclusions contained in samples from (1) late-magmatic early-hydrothermal stringers in the granodiorite, (2) the argillic alteration zone and skarn, (3) jasperoids, and (4) recrystallized limestones. The fluid inclusions from late-magmatic stringers, jasperoids and recrystallized limestones are biphasic (liquid+vapor) at room temperature, whereas the fluid inclusions from the skarn and argillic alteration zones are multiphasic (liquid+NaCl+vapor).

The fluid inclusions in quartz from late-magmatic stringers in the granodiorite display calculated salinities between 15.5 and 17.3 wt. % NaCl equiv., and homogenization temperatures ( $T_h$ ) between 360 and 413 °C. The fluid inclusions in quartz from the skarn and argillic alteration zones display higher salinities, between 32 and 42 wt. % NaCl equiv., and  $T_h$  between 306 and 348 °C. The fluid inclusions in calcite from recrystallized limestones display salinities between 5 and 15 wt. % NaCl equiv., and  $T_h$  between 172 and 205 °C. Finally, the fluid inclusions in quartz from the gold-bearing jasperoids display the lowest salinities and  $T_h$  of the deposit, between 0.3 and 1 wt. % NaCl equiv., and between 160 and 170 °C, respectively.

We interpret that boiling occurred in the copper sulfide-rich zone, and early gold transport by chloride complexes, considered as “moderately” saline initial magmatic fluids. The brine diluted towards the surface in the jasperoid zone, allowing gold to precipitate. The characteristics of the initial mineralizing fluids would partially explain the relatively low gold content of the La Joya deposit, in contrast with the deposits associated to Paleocene adakitic magmas of the Mezcala district, formed by oxidizing and hypersaline initial mineralizing fluids.

*Key words:* skarn, gold, boiling, fluid inclusions, La Joya prospect, Mezcala District, Guerrero State, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

El prospecto de La Joya se encuentra en la parte occidental del distrito minero de Mezcala, municipio de Zumpango de Neri, en la parte central del Estado de Guerrero (Figura 1). El área se encuentra en la subprovincia de la cuenca del Río Balsas–Mezcala dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. En este distrito minero se localizan numerosos cuerpos mineralizados de tipo skarn y epitermal, que se encuentran actualmente en explotación o exploración por oro como, por ejemplo, los depósitos de Nukay, La Agüita, Mina Verde, Bermejil, San Luis, Los Filos, y otros.

La actividad minera en la región de Mezcala se inició durante la Época Colonial (Díaz-Salgado, 2000), durante la cual se explotaron minerales de plata y oro. Las primeras leyes de oro reportadas, de hasta 162 ppm Au, se remontan al año 1924. El oro se extrajo de bolsadas en cuerpos de óxidos de hierro. Los primeros estudios formales en la región sobre exploración, prospección y evaluación empezaron sólo desde la década de 1960. Hasta 1941 no se pudieron regularizar los envíos de mineral del distrito de

Mezcala a la fundición de la Compañía Metalúrgica Peñoles en Torreón (Coahuila), embarcándose en ese año aproximadamente 9,000 Tm de mineral con leyes de 25 ppm Au y 284 ppm Ag en promedio. Durante prácticamente todo el siglo XX, la producción del distrito ha sido continua. En la actualidad, la mina más importante del distrito de Mezcala es Nukay, con leyes promedio de 7 ppm Au en un cuerpo de óxidos de hierro, cuyo mineral es beneficiado en una planta de cianuración en Mezcala.

Los magmas adakíticos pertenecen al conjunto calcialcalino, con composiciones intermedias a ácidas, ricas en  $Al_2O_3$  y Sr, y pobres en tierras raras pesadas e Y (Defant y Drummond, 1990). Estas características geoquímicas sugieren que su formación deriva de la fusión parcial de corteza oceánica subducida (Defant y Drummond, 1990; Maury *et al.*, 1996). En el Distrito de Mezcala, algunos trabajos previos (Jones y González-Partida, 2001; González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b; Levresse y González-Partida, 2003; Levresse *et al.*, 2004) relacionan la formación de skarns económicamente productivos con la intrusión de adakitas. En la misma zona existen numerosos depósitos de tipo skarn asociados con intrusivos de carácter

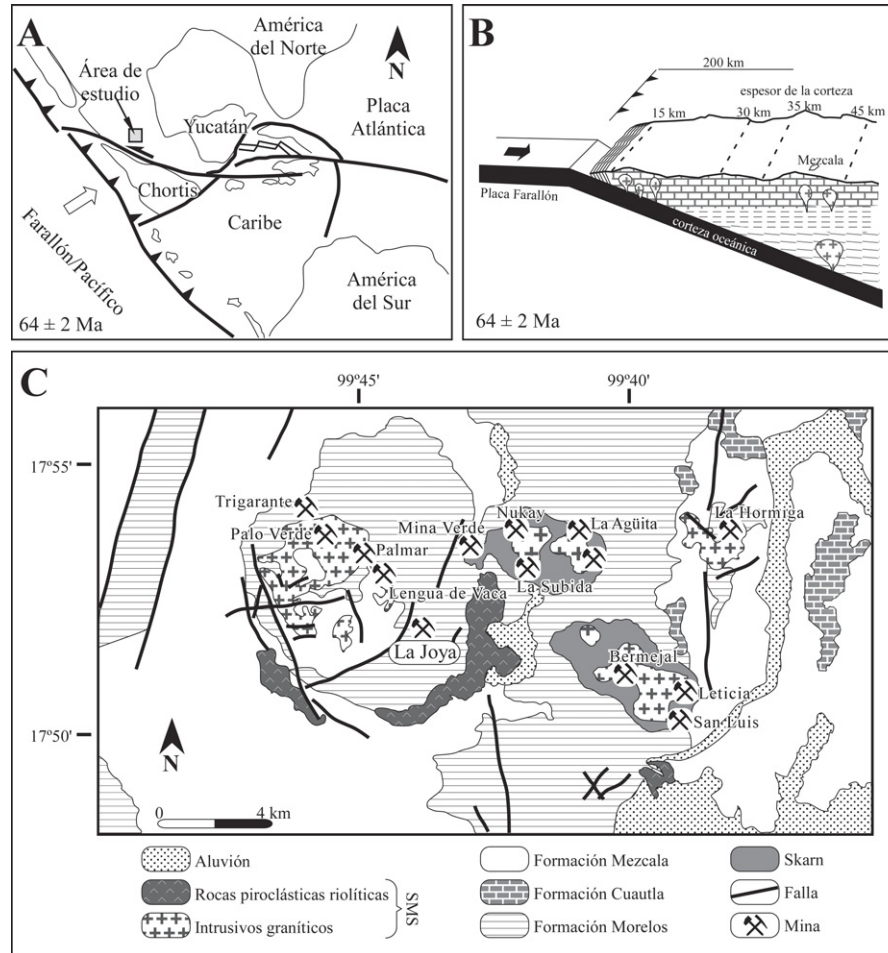


Figura 1. A: Contexto geotectónico entre las placas continentales de América del Norte y del Sur durante el Paleoceno, cuando se produjeron las mineralizaciones de skarn en el distrito minero de Mezcala, Guerrero (modificado de Meschede *et al.*, 1997). B: Diagrama de la ubicación geotectónica regional del distrito de Mezcala, durante la misma época, con indicación del espesor de la corteza. C: Mapa geológico del distrito de Mezcala, mostrando las principales minas y prospectos de la zona. SMS: Sierra Madre del Sur.

calcialcalino (de la Garza *et al.*, 1996; Jones y Jackson, 1999a, 1999b; Díaz-Salgado, 2000; Meza-Figueroa *et al.*, 2003), aunque la mayoría de estos depósitos no son objeto de explotación debido a su relativamente bajo contenido en oro. El depósito de La Joya, objeto del presente estudio, es uno de ellos. En el caso de depósitos epitermales y porfíricos, Thiéblemont *et al.* (1997) hallaron una relación preferencial, aunque no excluyente, entre la existencia de depósitos de importancia económica y la presencia de adakititas durante la formación de los mismos. Esta relación se determinó a escala global, de distrito y de depósito. Puesto que en los depósitos comprendidos en el distrito de Mezcala se ha determinado que los mayores contenidos en oro se encuentran en skarns directamente relacionados con intrusivos adakíticos, el objetivo de este trabajo es obtener criterios geoquímicos que permitan explicar las razones por las cuales, en un contexto espacial, temporal y geológico análogo, depósitos del mismo tipo pueden contener o no mineralizaciones auríferas de posible importancia económica.

## MARCO GEOLÓGICO

### Geología regional

Las rocas más antiguas que afloran en la zona de estudio conforman una secuencia sedimentaria calcárea y lutítica del Cretácico, perteneciente a las Formaciones Morelos, Cuautla y Mezcala, con una potencia de más de 2,000 m, (Fries, 1960). La Formación Morelos, de edad albiana-cenomaniana, consiste en un conjunto de calizas de plataforma y arrecifales, y anhidritas como base de la formación. Estas últimas sirvieron como niveles de despegue de calbagamientos durante la deformación laramídica. Los depósitos carbonatados de plataforma se establecieron durante una transgresión marina de larga duración. La Formación Cuautla corresponde a un cambio gradual de sedimentación de carbonatos a sedimentación siliciclástica. La formación Mezcala ha sido definida como una secuencia marina compuesta por areniscas, limolitas y lutitas calcáreas

con intercalaciones de conglomerados y estratos de caliza, con edades entre el Turoniano y el Maastrichtiano inferior. Ésta se ha subdividido en tres miembros, correspondientes a ambientes de plataforma abierta, prodelta, y pelágico (Cerca-Martínez, 2004).

Estas rocas fueron deformadas durante la orogenia Larámide, y fueron intruidas durante el Terciario por magmas calcialcalinos según un sistema de fallas y fracturas con dirección NW-SE (de la Garza *et al.*, 1996). Durante la evolución geológica del sur de México, entre el Cretácico Superior y el Paleoceno, se han documentado dos eventos tectónicos principales (Cerca-Martínez, 2004): 1) deformación progresiva por acortamiento dirigido hacia el ENE, que provocó el plegamiento y cabalgamiento de las secuencias mesozoicas de cobertera, relacionada con la orogenia Laramide; y 2) un conjunto de fallas de desplazamiento lateral.

En la zona de estudio, los cuerpos intrusivos con los que se relaciona la mineralización son de composición granodiorítica. El registro de las rocas magmáticas terciarias que forman la Sierra Madre del Sur abarca desde el Paleoceno hasta el Mioceno, constituyendo una amplia provincia magmática (Morán-Zenteno *et al.*, 1999). Estos autores señalan que dicha provincia se desarrolló en un periodo durante el cual los cambios en la geometría e interacción cinemática de la placa oceánica Farallón y la placa continental de Norteamérica fueron muy variables, al igual que las condiciones dinámicas de deformación de la corteza. Por otro lado, los datos geoquímicos de González-Partida *et al.* (2003a) ponen de manifiesto el carácter adakítico de los intrusivos actual e históricamente productivos del distrito minero de Mezcala. Los fechamientos en algunos cuerpos intrusivos de la zona (Jones y Jackson, 1999a, 1999b; Meza-Figueroa *et al.*, 2003; Levresse *et al.*, 2004) muestran edades entre 63.29 y 64.67 Ma para las adakitas. Estas edades concuerdan con las de los depósitos de Fe del suroeste de México, o Franja Ferrífera Costera (Pantoja-Alor, 1983; Morán-Zenteno *et al.*, 1999; Tritlla *et al.*, 2003), que están directamente asociados a la actividad tectonomagmática del Paleoceno, debido a la interacción de la placa Farallón y la placa de Norteamérica. En contraste, en el skarn de Buenavista de Cuéllar, asociado a intrusivos de composición calcialcalina, se obtuvieron edades de 35.9 y 33.1 Ma (Meza-Figueroa *et al.*, 2003), entre el Eoceno y el Oligoceno.

### Estructura del depósito de La Joya

El prospecto de La Joya está alineado con otras cuatro estructuras mineralizadas de la zona: los prospectos Lengua de Vaca, Palmar, Palo Verde y Trigarante (Figura 1), cuya potencialidad aurífera aún no ha sido evaluada completamente. En la Figura 2 se presenta el esquema geológico del prospecto de La Joya junto con un corte esquemático del cuerpo mineralizado, y en la Figura 3 se establece la

paragénesis mineral en las diferentes zonas de que consta el depósito. La granodiorita presenta una aureola de metamorfismo de contacto constituida principalmente por grosularia, cuarzo y calcita, con una zona externa con caliza recristalizada de la Formación Morelos. De la zona de skarn hacia el exterior del cuerpo intrusivo se presenta una zona de alteración argílica con vetillas de cuarzo y lentes con bornita, calcopirita, covellita, hematita y pirita (Figura 4), con menos de una tonelada métrica de Cu calculada en la porción reconocible del cuerpo. Los jasperoides auríferos se encuentran entre la zona de alteración y la caliza recristalizada, y presentan leyes entre 1 y 18 ppm Au, de 2 ppm Au en promedio. Sin embargo, dicho cuerpo no ha sido explorado mediante barrenación.

### MICROTHERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

Fueron analizadas 189 inclusiones fluidas, cuyos resultados microtermométricos se muestran en la Figura 5 y en la Tabla 1. Los análisis se realizaron en muestras de

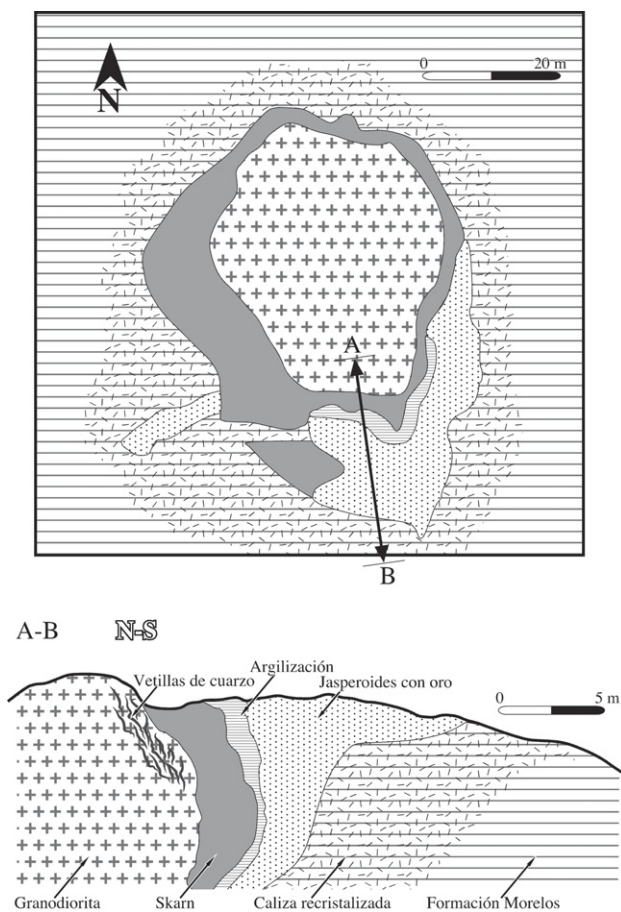


Figura 2. Esquema geológico local en el prospecto La Joya, mostrando la estructura y zonación del depósito.

	Vetillas	Skarn	Alteración argílica	Jasperoides
Cuarzo	████████████████████	████████████████████	████████████████████	████████████████████
Magnetita			████████████████████	
Hematita		████████████████████		
Grosularia		████████████████████		
Calcita		████████████████████		
Calcopirita		████████████████████	████████████████████	
Bornita			████████████████████	
Covellita			████████████████████	
Pirita				
Caolinita			████████████████████	
Illita-esmectita			████████████████████	
Ópalo				████████████████████
Calcedonia				████████████████████
Oro				████████████████████

Figura 3. Cuadro paragenético de la mineralización en el prospecto La Joya, según cada zona mineralizada del depósito.

(1) la zona de stockwork en el intrusivo, (2) la zona de skarn y alteración argílica con lentes de sulfuros de cobre, (3) la zona de caliza recrystalizada, y (4) la zona de jasperoides con valores anómalos de oro. En todos los casos se analizaron inclusiones fluidas contenidas en cuarzo, con la excepción de las muestras de la zona de caliza recrystalizada, en que se analizó calcita.

El análisis se realizó mediante un microscopio petrográfico de luz transmitida de hasta 1,000 aumentos, al que se le han adicionado una platina microtermométrica que permite el calentamiento de especímenes hasta los +650 °C, y un sistema de enfriamiento a base de nitrógeno líquido que baja la temperatura hasta -192 °C. Los análisis microtermométricos fueron realizados en una platina Chaixmecca, calibrada según los puntos de fusión de sustancias naturales y sintéticas, con una precisión de  $\pm 0.2$  °C para ensayos de baja temperatura y de  $\pm 2$  °C para ensayos de alta temperatura.

Previo al análisis microtermométrico se practicó un análisis petrográfico para discriminar las inclusiones fluidas primarias, secundarias y pseudosecundarias, de acuerdo con las recomendaciones de Roedder (1984), y Roedder y Bodnar (1997). En el presente estudio se analizaron inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias de cada una de las zonas que constituyen el depósito de La Joya. Las inclusiones pseudosecundarias reconocidas se presentan alineadas a lo largo de planos de fractura sellados por bandas de crecimiento posteriores. Los procesos de enfriamiento y calentamiento de las muestras se realizaron a una velocidad de 1 °C por minuto en temperaturas cercanas a los diversos cambios de fases registrados, a fin de permitir el equilibrio de las fases. Las salinidades se calcularon a partir de la temperatura de fusión del hielo ( $T_{m_i}$ ) y de la temperatura de solubilización de la halita ( $T_{s_h}$ ) mediante las ecuaciones

de Sourirajan y Kennedy (1962) y Bodnar (1992) para el sistema  $H_2O-NaCl$ . Durante los ensayos microtermométricos no se observó la fusión de clatratos.

Las inclusiones fluidas de La Joya son de diferentes tipos: 1) las relacionadas a las vetillas del stockwork en el intrusivo son bifásicas, constituidas por líquido+vapor (ver Figura 5D) y con grados de relleno (relación líquido/vapor) de entre 0.4 y 0.6; y 2) las inclusiones de la zona de skarn y de alteración argílica, que pueden ser de dos tipos, (a) polifásicas hipersalinas, constituidas por sólido+líquido+vapor, donde la fase sólida es un cubo de halita que ocupa entre el 15 y el 20% de volumen de las inclusiones, con 30–40% del volumen ocupado por la fase vapor (Figura 5E y 5F), o bien (b) bifásicas, constituidas por líquido+vapor, líquido dominante, con grados de relleno entre 0.5 y 0.7, y vapor+líquido, vapor dominante, con grados de relleno entre 0.2 y 0.3. En este último caso, el estudio petrográfico revela el coatrapamiento de las inclusiones hipersalinas y de las bifásicas ricas en vapor, pudiendo constituir una evidencia de fenómenos de ebullición. Este coatrapamiento se pone de manifiesto por la presencia de los dos tipos de inclusiones fluidas en una misma zona de crecimiento del cristal, en ausencia de evidencias de estrangulamiento. El tamaño de las inclusiones fluidas analizadas es generalmente de 10 a 52  $\mu m$ , y hasta 5  $\mu m$  de diámetro.

## Resultados

En las muestras de vetas del stockwork en el intrusivo se registraron salinidades entre 15.5 y 17.3% en peso NaCl equivalente y temperaturas de homogeneización a la fase líquida, entre 361 y 413 °C.

Las inclusiones fluidas de las zonas de skarn y de

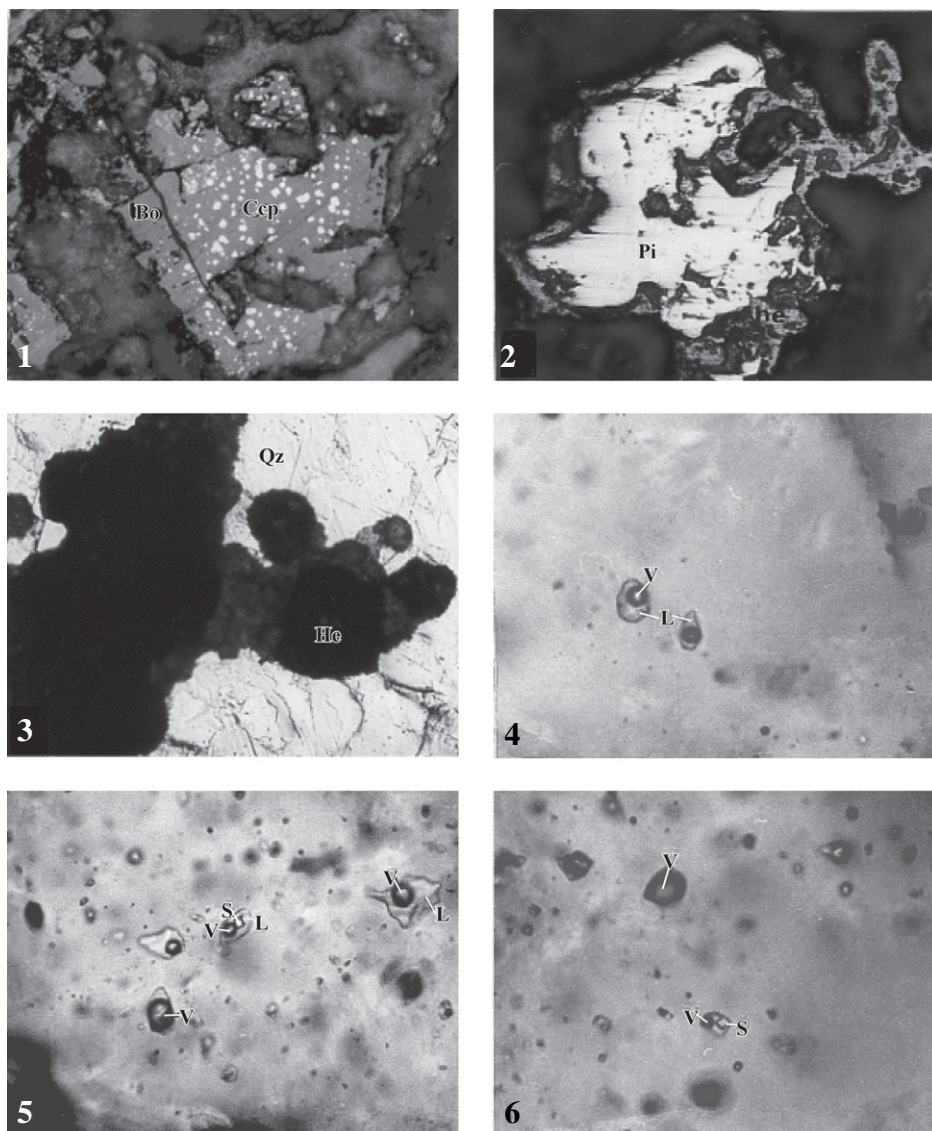


Figura 4. Fotomicrográficas de muestras del prospecto La Joya. 1–3: Asociaciones minerales en los lentes con sulfuros de cobre; 4: inclusiones fluidas en cuarzo de la zona de vetillas de origen magmático tardío; 5: inclusiones fluidas con salmueras hipersalinas (L+V+S) a temperatura ambiente en cuarzo de la zona de alteración argílica; 6: inclusiones fluidas bifásicas (V+L) coexistentes en la misma zona de crecimiento del cristal con inclusiones fluidas con salmueras hipersalinas (L+V+S), en cuarzo de la zona de alteración argílica. Bo: bornita; CCp: calcopirita; He: hematita; Pi: pirita; Qz: cuarzo; L: líquido acuoso; S: sólido, cristal hijo (halita); V: vapor.

alteración argílica se caracterizan por presentar altas salinidades, en el rango de 32 a 42% en peso NaCl equivalente, de acuerdo con las temperaturas de solubilización de halita, y con las temperaturas de homogeneización entre 306 y 348 °C. La secuencia de observación de eventos, fue de forma sistemática, en primer lugar, la solubilización de los cristales hijos de halita, y la posterior homogeneización a la fase líquida de la salmuera y de la burbuja de vapor. En la caliza recristalizada se registraron salinidades entre 5 y 15% en peso NaCl equivalente y temperaturas de homogeneización entre 172 y 205 °C. En la zona de jasperoides auríferos se registraron las salinidades y las

temperaturas de homogeneización más bajas del depósito, entre 0.3 y 1% en peso NaCl equivalente, y entre 160 y 170 °C, respectivamente.

Los resultados anteriores y su distribución en la correlación entre salinidad y temperatura de homogeneización (Figura 5) indican la existencia de, al menos, dos procesos principales de formación del depósito. En el primero, los fluidos con mayor temperatura y con salinidades “intermedias”, alrededor de 15% en peso NaCl equivalente, ebulleron a una temperatura alrededor de 350 °C, dando origen a salmueras hipersalinas a temperatura ambiente provocando, a su vez, la precipitación de calco-

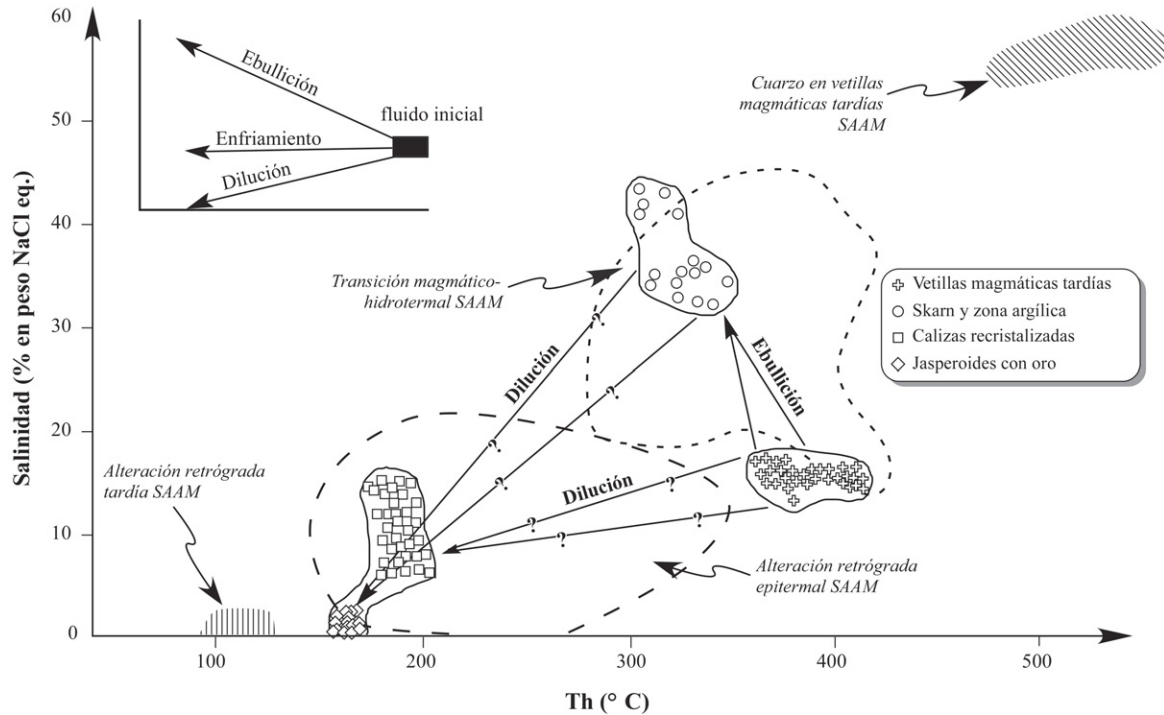


Figura 5. Diagrama de correlación entre la temperatura de homogeneización de inclusiones fluidas y su salinidad, obtenidas en las muestras de cuarzo y calcita analizadas en el prospecto La Joya, mostrando las posibles tendencias de evolución de los fluidos magmáticos iniciales (cuadro superior izquierdo), a partir de mecanismos de (1) enfriamiento, en que el fluido permanece isosalino a medida que la temperatura baja, proceso que no se ha reconocido en La Joya; (2) dilución por parte de aguas meteóricas, en que los fluidos iniciales se enfrían a la par que disminuye su salinidad; y (3) ebullición, en que aumenta drásticamente la salinidad de las salmueras debido al escape de vapor, y su temperatura disminuye debido a la descompresión. Las áreas delineadas corresponden a los datos obtenidos por González-Partida *et al.* (2003a), y Lévresse y González-Partida (2003) en diversos skarns ricos en Au asociados a adakititas en el distrito de Mezcala. SAAM: Skarns auríferos en adakititas de Mezcala.

pirita, bornita y covellita. Durante el segundo proceso, las salmueras se enfriaron hasta aproximadamente 160 °C por medio de una dilución de las mismas por aguas meteóricas, más frías y menos salinas. En consecuencia, se produjo la precipitación de sílice con óxidos de hierro (jasperoides) y oro nativo. Las inclusiones fluidas en calcita de las calizas recristalizadas muestran esta misma tendencia de dilución.

La distribución de los datos microtermométricos en la Figura 5 sugiere que los principales procesos de mineralización en el depósito de La Joya fueron ebullición en la zona con sulfuros de cobre, y una dilución tardía en la zona de jasperoides auríferos. En el primer mecanismo de precipitación mineral, es factible que los fluidos que entraron en ebullición fueran similares a los registrados en inclusiones fluidas del stockwork en el intrusivo, con lo cual éstos pueden considerarse como representativos de los fluidos primigenios de origen magmático. En el segundo mecanismo de precipitación mineral, los fluidos que se diluyeron pudieron ser salmueras de alta salinidad derivadas de la ebullición, o bien fluidos similares a los fluidos primigenios de origen magmático. En cualquier caso, la dilución de los fluidos se produjo mediante su mezcla con fluidos externos no salinos, posiblemente de origen meteórico superficial.

## TRANSPORTE Y DEPÓSITO DE METALES — DISCUSIÓN

En los sistemas hidrotermales y magmáticos, el transporte y precipitación del oro se explica comúnmente mediante la presencia de complejos tiosulfurados o clorurados (Gammons y Williams-Jones, 1997). El transporte del oro mediante complejos clorurados es importante en salmueras al límite de su saturación en sales cloruradas. Igualmente, el complejo  $\text{AuCl}_2^-$  domina en el transporte de oro a altas temperaturas ( $\geq 400^\circ\text{C}$ ) en ambientes de depósitos metálicos en pórfidos cupríferos o cuproauríferos (Gammons y Williams-Jones, 1997). En sistemas epitermales, en cambio, el transporte del oro se produce por lo general mediante complejos tiosulfurados (Benning y Seward, 1996), independientemente de la concentración en cloruros de las soluciones mineralizantes, con la excepción de soluciones ricas en  $\text{CO}_2$ .

El origen de otros metales, como el Cu, está fuertemente ligado a una desgasificación magmática que conlleva la formación de asociaciones de alteración ácida a profundidad (Arribas, 1995). El transporte del oro y de algunos metales base está controlado por el pH,  $m(\text{H}_2\text{S})$ ,  $f(\text{H}_2)$  y la temperatura (Henley, 1985; White, 1991;

Hedenquist *et al.*, 1994). En los niveles someros de los sistemas hidrotermales, en la zona de descarga y/o depósito, estos parámetros cambian muy rápidamente debido en gran parte a la ebullición, como una respuesta a la pérdida de presión y/o a la dilución de los fluidos ascendentes por aguas meteóricas (Hedenquist *et al.*, 1998). En un régimen hidrotermal canalizado, la presión y temperatura están en parte controladas por el comportamiento hidrológico regional y por las reacciones químicas debidas a la interacción de los fluidos hidrotermales con las rocas circundantes (Reed, 1997). La ebullición es uno de los procesos más efectivos para la precipitación de oro, independientemente de la temperatura del sistema (Henley, 1985; Cathles, 1991; Simmons y Christenson, 1994). La dilución de los fluidos hidrotermales ascendentes, con un descenso de temperatura asociado, puede ser también un importante proceso ligado a la precipitación del oro a partir de salmueras salinas (González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b). En depósitos auríferos, la precipitación del oro se da en etapas tardías debido a la interacción de dos tipos de fluidos con características físicoquímicas muy contrastadas. En el caso de los skarns, el oro tiende a concentrarse preferentemente en la fase retrógrada de su evolución (Meinert, 1983, 1985, 1989, 1992; Sillitoe, 1988; Theodore *et al.*, 1986). Esta característica también se observa sistemáticamente en los depósitos de skarn del distrito de Mezcala (Levresse y González-Partida, 2003).

Según el presente estudio, la mineralogía de alteración en La Joya, correspondiente a asociaciones del tipo argílico, indica la existencia durante la mineralización de un medio oxidante y ácido. Por otra parte, las salmueras analizadas en inclusiones fluidas de la zona de óxidos con oro implican la existencia de aguas meteóricas neutras que diluyeron una salmuera transportadora (hipersalina, derivada de la ebullición de un fluido de origen magmático), registrada en inclusiones fluidas en cuarzo de la zona de alteración argílica. En este trabajo interpretamos que los fluidos en inclusiones del stockwork en el intrusivo corresponden a porciones de los fluidos magmáticos iniciales, por analogía con vetas que presentan características similares en otros

depósitos del distrito de Mezcala (de la Garza *et al.*, 1996; Jones y Jackson, 1999a, 1999b; Díaz-Salgado, 2000; Jones y González-Partida, 2001; González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b; Levresse y González-Partida, 2003; Levresse *et al.*, 2004).

Por otro lado, en los depósitos de skarn asociados a adakitas del distrito de Mezcala, como Nukay, Los Filos o La Agüita, Jones y González-Partida (2001), González-Partida *et al.* (2003a, 2003b), y Levresse y González-Partida (2003) demostraron la existencia de unos fluidos iniciales oxidantes, hipersalinos y con capacidad de transportar el oro por medio de complejos clorurados. Esta situación es congruente con los estudios de Barnes (1979), Ruaya y Seward (1986) y Seward (1976, 1984, 1988), según los cuales el transporte de oro en forma de complejos clorurados es favorecido por fluidos oxidantes y de alta salinidad. Las altas temperaturas (~650 °C) y salinidades (40 al 60% en peso NaCl equivalente, con 10 al 15% KCl) de estos fluidos son congruentes con las relaciones teóricas del sistema NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O descrito por Fournier (1999), e indican profundidades de cristalización para el cuarzo beta de 2 km bajo régimen litostático (Figura 6). En La Joya, los fluidos tomados como parte del fluido magmático inicial tienen salinidades más bajas, o “intermedias” (15–17% en peso NaCl eq.), y son de menor temperatura (≥400 °C). En consecuencia, tales fluidos iniciales tendrían una menor capacidad para transportar oro, lo que podría explicar el bajo tonelaje de este prospecto, así como su baja concentración de sulfuros de cobre. Los skarns de Fe–Au del distrito de Mezcala presentan procesos de alteración hidrotermal progradante y retrógrada, en la que se encuentra la mineralización (González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b; Levresse *et al.*, 2004). Los magmas relacionados con este tipo de yacimientos en el distrito de Mezcala adquieren su carácter oxidante en la fase magmática tardía, previa a la mineralización, mostrando una firma geoquímica adakítica (González-Partida *et al.*, 2003a y 2003b).

Las rocas ígneas en el área de La Joya son de edad oligocena a miocena, de carácter calcialcalino, y están relacionadas con los eventos piroclásticos de la Sierra Madre

Tabla 1. Datos microtermométricos en inclusiones fluidas del prospecto La Joya, Distrito de Mezcala, Guerrero.

Mineralización	Mineral	n	T <sub>m<sub>i</sub></sub> (°C) <i>m / p / M</i>	T <sub>s<sub>h</sub></sub> (°C) <i>m / p / M</i>	Salinidad (% en peso NaCl eq.) <i>m / p / M</i>	Th (°C) <i>m / p / M</i>
Vetillas en el intrusivo (stockwork)	Qz	50	-13.6 / -13.0 / -11.5	—	15.4 / 16.9 / 17.4	360 / 375 / 413
Skarn y zona argílica	Qz	16	—	223 / 287 / 348	32 / 38 / 42	306 / 325 / 348
Calizas recristalizadas	Cc	93	-11.1 / -8.0 / -3.3	—	5.2 / 11.7 / 15.0	172 / 185 / 205
Jasperoides auríferos	Qz y Cc	30	-0.2 / -0.1 / -0.1	—	0.2 / 0.2 / 0.2	160 / 165 / 170

Abreviaciones. Cc: calcita, Qz: cuarzo, n: número de inclusiones fluidas analizadas, T<sub>m<sub>i</sub></sub>: temperatura de fusión del hielo, T<sub>s<sub>h</sub></sub>: temperatura de solubilización de la halita (cristal hijo), Th: temperatura de homogeneización, *m*: valor mínimo, *p*: valor promedio, *M*: valor máximo.



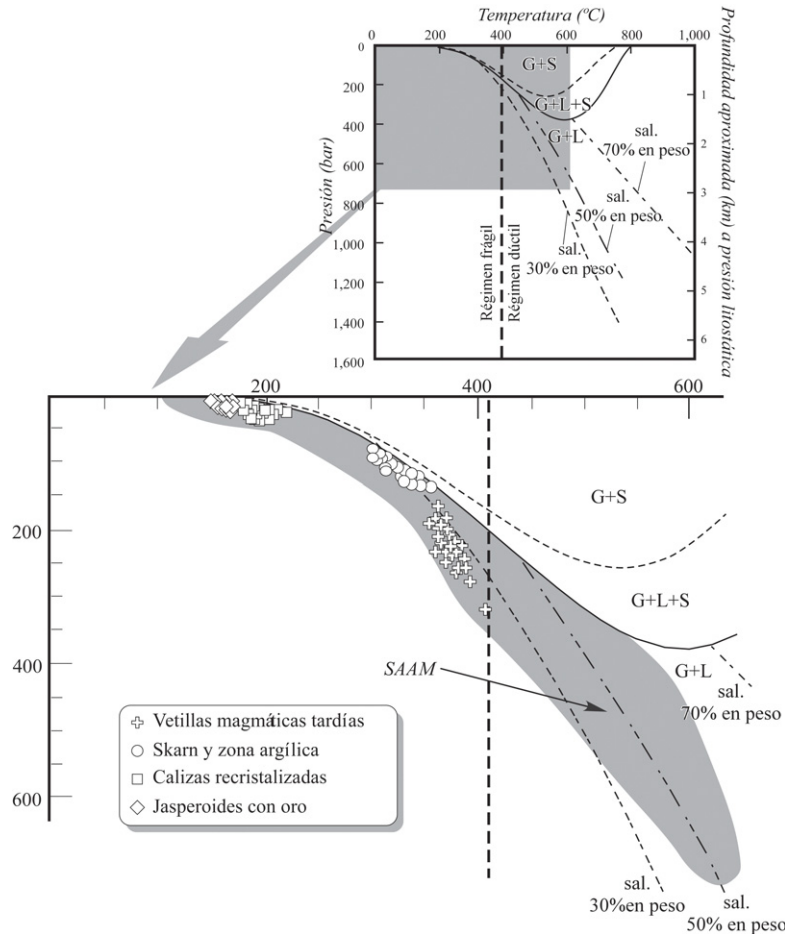


Figura 6. Diagrama de correlación temperatura-profundidad mostrando las relaciones de fases en el sistema agua-NaCl, a presión litostática, y líneas de isosalinidad (30, 50 y 70 wt.% NaCl equivalente), adaptado de Fournier (1999). Incluye los datos microtermométricos en inclusiones fluidas obtenidos en los depósitos de skarn de La Joya, representados en la ampliación. La zona sombreada en la ampliación corresponde a la envolvente de los datos microtermométricos en inclusiones fluidas obtenidos en skarns auríferos en adakititas del distrito de Mezcala (Levresse y González-Partida, 2003). G = gas, L = líquido, S = sal sólida, SAAM = skarns auríferos en adakititas de Mezcala.

del Sur (Morán-Zenteno *et al.*, 1999). Dado su carácter calcialcalino, en contraste con el carácter adakítico de la mayoría de depósitos económicos del distrito de Mezcala, es posible que esa sea una razón del carácter subeconómico de su mineralización metálica. Se ha apreciado la existencia de una conexión preferencial entre magmatismo adakítico y la presencia de grandes depósitos epitermales y porfíricos (Thiéblemont *et al.*, 1997). Puesto que el contexto de formación de skarns es el mismo que el de depósitos metalíferos en pórfidos y de depósitos epitermales, cabe esperar que exista una fuerte conexión entre skarns ricos en oro y magmatismo adakítico como, de hecho, se ha determinado en los depósitos ricos en oro de Mezcala (González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b; Levresse *et al.*, 2004). Cabe remarcar que ello no excluye la posibilidad de que existan mineralizaciones ricas en oro en skarns asociados a magmatismo calcialcalino, como La Joya. Ahora bien, las características químicas de los fluidos asociados a skarns derivados de magmatismo calcialcalino, según se

desprende de la comparación entre los datos de inclusiones fluidas de los depósitos de Nukay (González-Partida *et al.*, 2003a, 2003b) y de La Joya, son potencialmente menos eficientes para transportar oro que los asociados a skarns derivados de magmatismo adakítico. Sin embargo, el presente estudio no puede ser concluyente al respecto y es preciso seguir investigando en depósitos similares del distrito de Mezcala acerca de dicha posibilidad.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado mediante los proyectos DGAPA-PAPIIT INI107203 e IN122604, de la Universidad Nacional Autónoma de México, y mediante el proyecto CONACyT J32506-T. Agradecemos sendas revisiones críticas de este trabajo realizadas por Miguel Ángel Miranda-Gasca y Martín Valencia-Moreno, que han contribuido de forma muy importante a mejorarlo.

## REFERENCIAS

- Arribas, A. Jr., 1995, Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid, *in* Thompson, J.F.H. (ed.), *Magmas, Fluids and Ore Deposits: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, 23, 419–454.
- Barnes, H.L., 1979, Solubilities of ore minerals, *in* Barnes, H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: New York, John Wiley & Sons Interscience, 404–460.
- Benning, L.G., Seward, T.M., 1996, Hydrosulphide complexing of Au(I) in hydrothermal solutions from 150–400 °C and 500–1500 bar: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1849–1871.
- Bodnar, R.J., 1992, Revised equation and table for freezing-point depression of H<sub>2</sub>O-salt fluid inclusions: Fourth Biennial Pan-American Conference on Research on Fluid Inclusions, PACROFI IV, Lake Arrowhead, CA, May 21–25, Program and Abstracts, 14, 15.
- Cathles, L.M., 1991, The importance of vein selvaging in controlling the intensity and character of subsurface alteration in hydrothermal systems: *Economic Geology*, 86, 466–471.
- Cerca-Martínez, M., 2004, Deformación y magmatismo Cretácico tardío-Terciario temprano en la zona de la plataforma Guerrero-Morelos: México, D. F., Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 175 p.
- De la Garza, V., Téllez, R., Díaz, R., Hernández, A., 1996, Geology of the Bermejil iron-gold deposit Mezcala, Guerrero, México, *in* Coyner, A.R., Fahey, P.L. (eds.), *Geology and Ore Deposits of the American Cordillera: Geological Society of Nevada Symposium, Reno/Sparks, Nevada, April 1995, Proceedings*, 111, 1354–1368.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere: *Nature*, 347, 662–665.
- Díaz-Salgado, C., 2000, Caracterización petroectónica de los intrusivos relacionados a la mineralización del yacimiento Nukay, Mezcala, Guerrero: Taxco, Guerrero, Escuela Regional de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, tesis de licenciatura, 62 p.
- Fournier, R.O., 1999, Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment: *Economic Geology*, 94, 1193–1221.
- Fries, C. Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 60, 36 p.
- Gammons, C.H., Williams-Jones, A.E., 1997, Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment: *Economic Geology*, 92, 45–59.
- González-Partida, E., Levresse, G., Carrillo-Chávez, A., Cheilletz, A., Gasquet, D., Solorio-Munguía J., 2003a, (Au-Fe) skarn deposits of the Mezcala District, south-central México: adakite association of the mineralizing fluids: *International Geology Reviews*, 45, 20–34.
- González-Partida, E., Levresse, G., Carrillo-Chávez, A., Cheilletz, A., Gasquet, D., Jones, D., 2003b, Paleocene adakite-bearing Au-Fe intrusive rocks, Mezcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics: *Journal of Geochemical Exploration*, 80, 25–40.
- Hedenquist, J.W., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N.C., Giggenbach, W.F., Aoki, M., 1994, Geology, geochemistry, and origin of high-sulfidation Cu-Au mineralization in the Nansatsu District, Japan: *Economic Geology*, 89, 1–30.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. Jr., Reynolds, T.J., 1998, Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines: *Economic Geology*, 93, 373–404.
- Henley, R.W., 1985, The geothermal framework of epithermal deposits, *in* Berger, B.R., Bethke, P.M. (eds.), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems: Reviews in Economic Geology*, 2, 1–24.
- Jones, D.M., González-Partida, E., 2001, Evidence of magmatic fluid flux and recapture in mineralizing granodiorites of the Nukay Au-(Cu) skarn district, Gro., Mexico, *en* XXIV Convención Internacional Minera, Acapulco, Guerrero: México, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas, y Geólogos de México (A.I.M.M.G.M.), *Memorias Técnicas*, 77–80.
- Jones, D.M., Jackson, P.R., 1999a, Geologic setting of skarn-associated gold deposits of the Nukay District, Guerrero, Mexico, *en* XXIII Convención Nacional de la A.I.M.M.G.M., Acapulco, Guerrero: México, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas, y Geólogos de México (A.I.M.M.G.M.), *Memorias en CD*, 4 p.
- Jones, D.M., Jackson, P.R., 1999b, Geology and mineralization of the Los Filos gold deposit, Nukay District, Guerrero, Mexico, *en* XXIII Convención Nacional de la A.I.M.M.G.M., Acapulco, Guerrero: México, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas, y Geólogos de México (A.I.M.M.G.M.), *Memorias en CD*, 5 p.
- Levresse, G., González-Partida, E., 2003, Highly oxidised gold skarn fluids evolution in the Mexcala deposit, Guerrero, Mexico: *Journal of Geochemical Exploration*, 78–79, 649–652.
- Levresse, G., González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Tritlla, J., Camprubí, A., Cheilletz, A., Gasquet, D., Deloule, E., 2004, U/Pb dating and (C-O) stable isotope constraints on the source and evolution of the Mezcala Au-Fe skarn district, Guerrero, Mexico: *Mineralium Deposita*, 39, 301–312.
- Maury, R.C., Sajona, F.G., Pubellier, M., Bellon, H., Defant, M.J., 1996, Fusion de la croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes: L'exemple de Mindanao (Philippines): *Bulletin de la Société Géologique de la France*, 167, 579–590.
- Meinert, L.D., 1983, Variability of skarn deposits, guides to exploration, *in* Boardman, S.J. (ed.), *Revolution in the Earth Sciences: Dubuque, Iowa, Kendall-Hunt Publishing Co.*, 301–316.
- Meinert, L.D., 1985, Compositional variations of igneous rocks associated with skarn deposits chemical evidence for a genetic connections between petrogenesis and mineralization, *in* Thompson, J.F.H. (ed.), *Magmas, Fluids, and Ore Deposits: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, 23, 401–419.
- Meinert, L.D., 1989, Gold skarn deposits; geology and exploration criteria, *in* Groves, D., Keays, R., Ramsay, R. (eds.), *Proceedings of Gold 88: Economic Geology, Monograph*, 6, 537–552.
- Meinert, L.D., 1992, Skarns and Skarn Deposits: *Geoscience Canada*, 19, 145–162.
- Meschede, M., Frisch, W., Uwe, R.H., Ratschbacher, L., 1997, Stress transmission across an active plate boundary: an example from southern Mexico: *Tectonophysics*, 266, 81–100.
- Meza-Figueroa, D., Valencia-Moreno, M., Valencia, V.A., Ochoa-Landín, L., Pérez-Segura, E., Díaz-Salgado, C., 2003, Geochemistry and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of Laramide plutonic rocks associated with Fe-skarn and hydrothermal gold mineralization in northern Guerrero, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 205–217.
- Morán-Zenteno, D.J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M.S., Solís-Pichardo, G.N., 1999, Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 513–535.
- Pantoja-Alor, J., 1983, Geocronometría del magmatismo Cretácico-Terciario de la Sierra Madre del Sur: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 44, 1–20.
- Reed, M.H., 1997, Hydrothermal alteration and its relationships to ore fluid composition, *in* Barnes, H. L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: Wiley Interscience*, 3a. edición, 303–365.
- Roedder, E., 1984, Fluid Inclusions: *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 12, 644 p.
- Roedder, E., Bodnar, R.J., 1997, Fluid inclusions studies of hydrothermal ore deposits, *in* Barnes, H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: Wiley Interscience*, 3a. edición, 657–698.
- Ruaya, J.R., Seward, T.M., 1986, The stability of chlorozinc (II) complexes in hydrothermal solutions up to 350 °C: *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 50, 651–661.
- Seward, T.M., 1976, The stability of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350 °C: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 1329–1341.
- Seward, T.M., 1984, The transport and deposition of gold in hydrothermal systems, in Foster, R.P. (ed.), *Gold'82*: Rotterdam, A.A. Balkema, 753 p.
- Seward, T.M., 1988, The hydrothermal chemistry of gold and its implications for ore formation: boiling and conductive cooling as examples: *Economic Geology, Monographs*, 6, 398–404.
- Sillitoe, R.H., 1988, Gold deposits in Western Pacific island arcs: the magmatic connection: *Economic Geology, Monographs*, 6, 274–291.
- Simmons, S.F., Christenson, B.W., 1994, Origins of calcite in a boiling geothermal system: *American Journal of Science*, 294, 361–400.
- Sourirajan, S., Kennedy, G.C., 1962, The system H<sub>2</sub>O-NaCl at elevated temperature and pressures: *American Journal of Science*, 260, 115–141.
- Theodore, T.G., Howe, S.S., Blake, D.W., Wotruba, P.R., 1986, Geochemical and fluid zonation in the skarn environment at the Tomboy-Minnie gold deposits, Lander County, Nevada: *Journal of Geochemical Exploration*, 35, 99–128.
- Thiéblemont, D., Stein, G., Lescuyer, J.-L., 1997, Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite: *Comptes Rendus Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, 325, 103–109.
- Tritlla, J., Camprubí, A., Centeno-García, E., Corona-Esquivel, R., Iriando, A., Sánchez-Martínez, S., Gasca-Durán, A., Cienfuegos-Alvarado, E., Morales-Puente, P., 2003, Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 182–201.
- White, N.C., 1991, High sulfidation epithermal gold deposits: Characteristics and a model for their origin: *Geological Survey of Japan Report*, 277, 9–20.

Manuscrito recibido: Diciembre 1, 2003

Manuscrito corregido recibido: Abril 2, 2004

Manuscrito aceptado: Junio 28, 2004