



## Características Mineralógicas e Inclusiones Fluidas de las Esmeraldas del Municipio de San Antonio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia.

FERNANDO H. ROMERO ORDÓÑEZ

ORLANDO HERNÁNDEZ PARDO

*Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Santafé de Bogotá, Colombia*

ROMERO O., F.H. & HERNÁNDEZ P., O. (1999): Características Mineralógicas e Inclusiones Fluidas de las Esmeraldas del Municipio de San Antonio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 24, pgs. 149-158, 6 Figs., 4 Tablas, 2 láminas, Santafé de Bogotá.

### RESUMEN

En la parte central de la Cordillera Oriental, en el denominado Cinturón Esmeraldífero Occidental, territorio Vásquez - Yacopí, se encuentra el distrito minero de San Antonio de Yacopí. En este distrito ocurren mineralizaciones de esmeralda, dentro de rocas sedimentarias marinas, de edad cretácea, pertenecientes al denominado Grupo La Palma. Las características de emplazamiento de las mineralizaciones sugieren un control tectónico asociado a los sistemas de fallas que afectan las diferentes litologías aflorantes en el área. Las esmeraldas se encuentran en depósitos en forma de bolsas, nódulos y lentes frecuentemente asociados a vetas de calcita y brechas de falla, relacionadas con shales negros y rocas calcáreas.

Con el objeto de profundizar en el conocimiento de las características de las mineralizaciones y en el análisis de los depósitos esmeraldíferos del área de San Antonio de Yacopí, se realizaron estudios mineralógicos en varios cristales de esmeraldas, describiendo sus índices de refracción y características microtermométricas de las inclusiones fluidas en cristales de esmeraldas, lo que permitió definir las condiciones termobarométricas de su formación. Los estudios sugieren que las esmeraldas del Distrito Minero de San Antonio de Yacopí no presentan grandes variaciones de sus parámetros de celda unitaria comparados con aquellos de las esmeraldas de Coscuez, Muzo, Pacho y Chivor. Los resultados microtermométricos muestran que las temperaturas de cristalización están dentro de un mismo rango para las esmeraldas de todo el distrito minero, con valores entre 300°C y 350°C. Las temperaturas del punto eutéctico de las soluciones son bajas, como resultado de una mezcla compleja de iones disueltos en la fase acuosa, incluyendo K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Mg<sup>++</sup>, Al<sup>+3</sup>, entre otros. Las medidas termobarométricas en la época de formación han sido calculadas entre 900 y 1000 bares, lo que sugiere que las esmeraldas se formaron en niveles corticales a aproximadamente 800 m desde la superficie, similares a los propuestos para las esmeraldas de Muzo, Pacho, Coscuez y Chivor, a partir de un fluido mineralizante común, siendo las diferencias de composición atribuibles a fenómenos locales reinantes en el momento de la cristalización de la esmeralda.

*Palabras clave: Esmeralda, Inclusiones fluidas, Distrito Minero de San Antonio de Yacopí, Mineralogía, Colombia.*

### ABSTRACT

The San Antonio de Yacopí emerald district is located in the western emerald belt of the Cordillera Oriental, in the Vásquez - Yacopí territory. The emerald mineralizations of this district are found in lower cretaceous marine sedimentary rocks belonging to the stratigraphical unit recognized as La Palma Group. The emplacement characteristics of the mineralizations of the area suggest a tectonic control associated with regional and minor faults that are affecting the sedimentary sequence. The emeralds are found in veins, lenses and nodular deposits frequently associated with calcite veins, breccias, black shales and calcareous rocks.

The aim of this study is to extend the knowledge about the characteristics of the mineralizations and the analysis of the formation environment of the San Antonio de Yacopí emerald deposits. A mineralogical study was carried out, describing physical properties, such as refraction indexes of some emerald crystals and microthermometric properties of the fluid inclusion emerald crystals allowing the definition of thermobarometric conditions on the formation environment of the emerald deposits. Based on these studies it is possible to conclude that there are not remarkable differences in the cell parameters among

the San Antonio, Coscuez, Muzo and Chivor emerald districts. The microthermometric data show that the temperatures of formation are in the range from 300°C to 350°C, being normal in the general context of the western emerald belt. The eutectic temperatures are low, indicating the presence of a complex mixture of dissolved ions in the aqueous phase, including  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Cl^-$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+3}$ . The thermobarometric measurements indicate a range of values from 900 to 1000 bars, suggesting that the emerald deposits were formed at shallow crust levels, at approximately 800 m below the surface, closely associated with similar depths of formation assigned to other emerald localities including Muzo, Pacho, Coscuez and Chivor emerald districts. These deposits were formed from a unique mineralized fluid, being the small differences in composition attached to slightly local changes, related to local processes that were occurring at the moment of the emerald crystal formation.

**Key words:** Emerald, Fluid inclusion, San Antonio de Yacopí emerald district, Mineralogy, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los mayores productores de esmeraldas en el mundo, siendo esta gema altamente cotizada en los mercados internacionales. La mayor parte de la producción proviene de las minas de los municipios de Muzo, Coscuez, Peñas Blancas y Chivor, en el departamento de Boyacá, y de Gachalá y Ubalá, en el departamento de Cundinamarca. Estas zonas mineras han presentado un agotamiento drástico de sus recursos, lo que hace necesario extender la exploración hacia otros sectores dentro de las mismas regiones esmeraldíferas.

Se considera apropiado profundizar en el conocimiento de las características mineralógicas y análisis de los depósitos esmeraldíferos del área de San Antonio de Yacopí, para poder establecer condiciones del ambiente de formación de los depósitos del área y establecer las bases que orienten los programas de exploración geológica, geoquímica y geofísica de nuevas áreas de exploración y explotación de esmeraldas.

La prospección de esmeraldas es una labor complicada en razón de que aún no se han establecido patrones que permitan su exploración. Es por ello que los métodos convencionales de exploración para mineralizaciones de otro tipo no son aplicables en el caso de yacimientos berilíferos. La prospección de esmeraldas requiere de un amplio conocimiento de las características mineralógicas y de las propiedades físicas y químicas de las gemas en áreas mineralizadas y roca encajante, que permitan acertar en la selección de métodos integrales específicos de prospección geológica, geoquímica y geofísica, en los cuales se utilicen herramientas de bajo costo por unidad de área en los estudios regionales, y se seleccionen sitios promisorios de un reducido número de hectáreas, para realizar sobre ellos levantamientos topográficos detallados y muestreos densos de roca, utilizando herramientas de mediano a alto costo por unidad de área, dentro de una visión exploratoria coherente y funcional.

## LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El sector esmeraldífero objeto de estudio se ubica so-

bre la margen occidental de la Cordillera Oriental, en vecindad del municipio de San Antonio de Yacopí, dentro del denominado «Cinturón Esmeraldífero Occidental» en el territorio «Vásquez - Yacopí». Localmente el área se ubica a lo largo de las cuencas de drenaje de las quebradas La Mina y Piñuela. Los sitios conocidos de minería activa se ubican en las minas de Guadualito, La Glorieta, El Edén, Bellavista y Tapias, de los cuales se ha analizado el material proveniente de minería subterránea (Fig. 1).

El área de trabajo hace parte del cinturón esmeraldífero occidental, localizado en el flanco oeste de la Cordillera Oriental, el cual comprende los distritos de Muzo, Coscuez, Peñas Blancas y San Antonio de Yacopí, así como las manifestaciones de El Peñón, La Corona, La Calichona, Pénjamo, Aposentos y La Mina.

Las principales minas del cinturón occidental presentan varias similitudes, por lo cual varios autores les han asignado un origen común (HALL 1978; SCHWARTZ 1982; ORDÓÑEZ *et al.* 1994; CHEILLETZ *et al.* 1995; GIULIANI *et al.* 1997).

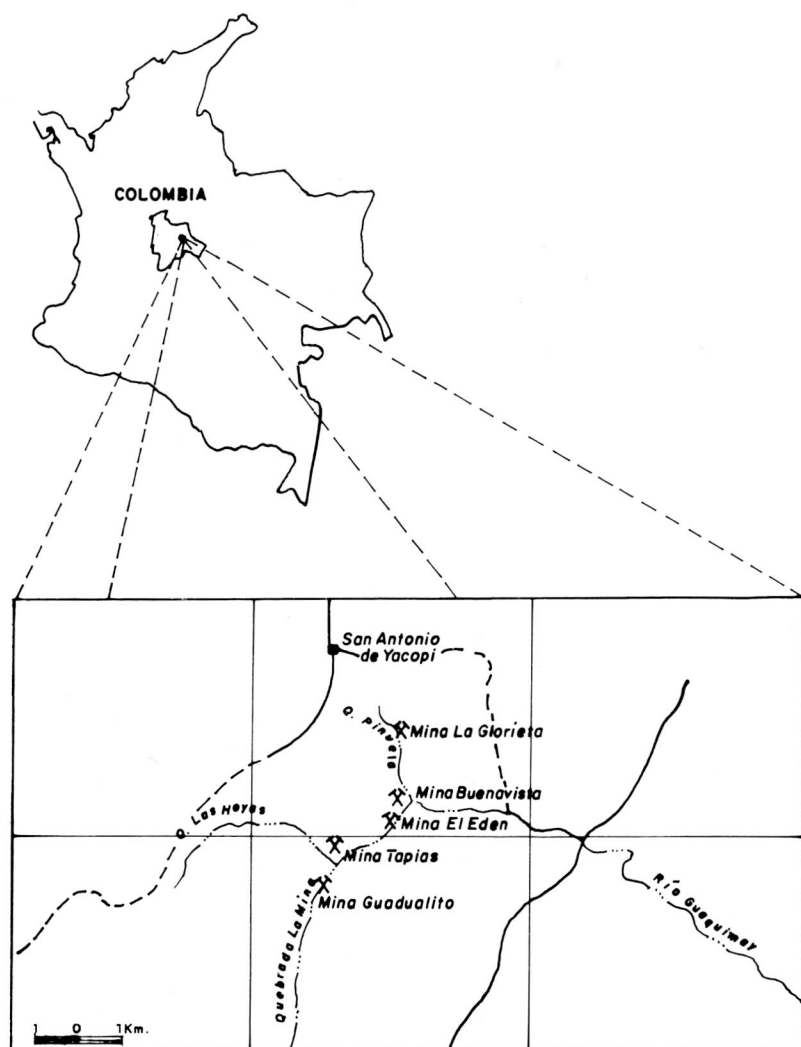
**TABLA 1**

**Parámetros unitarios medios de la celda unitaria de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí, comparados con las esmeraldas de Coscuez, Muzo, Pacho y Chivor, calculados a partir de estudios difractométricos. Los valores indicados muestran que no existe gran variación entre los parámetros de celda de estas esmeraldas.  $a_0$  y  $c_0$  representan los parámetros unitarios de los ejes cristalográficos  $a$  y  $c$  de la esmeralda.**

MINA	$a_0$ (Å)	$c_0$ (Å)	Volumen (Å <sup>3</sup> )
Yacopí	9,20767±0,05	9,17022±0,001	673,3024
Coscuez	9,20356±0,003	9,19192±0,008	674,2923
Muzo	9,19204±0,005	9,17466±0,001	671,4739
Pacho	9,19931±0,003	9,18268±0,008	672,9935
Chivor	9,20710±0,003	9,17432±0,01	673,3243

## GEOLOGÍA REGIONAL

En el área de San Antonio de Yacopí las esmeraldas se encuentran en zonas de brecha, asociadas a la Falla de La Mina, la cual se orienta con una dirección N25-30°E,



**Fig. 1. Mapa de localización del área esmeraldífera de San Antonio de Yacopí (Cundinamarca).**

en los sectores que interceptan fallas menores que presentan rumbos N60-70°W (Fig. 2). Las mineralizaciones se ubican dentro de lodolitas negras carbonosas, como roca encajante, estratigráficamente correlacionables con rocas del cretáceo inferior, correlacionables con el Grupo La Palma (RODRIGUEZ *et al.* 1994), el cual consiste de una secuencia de lutitas, limolitas y arcillolitas grises, claras a negras, muscovíticas, intercaladas con estratos delgados de areniscas arcillosas de grano fino, verdes oscuras, en capas gruesas y capas delgadas de arcillolitas calcáreas (Fig. 2).

### ASPECTOS MINERALÓGICOS

Las mineralizaciones esmeraldíferas de San Antonio de Yacopí ocurren en bolsones, nódulos y lentes, relacionados con venas de calcita y brechas de falla, en shales negros y rocas calcáreas. Entre los minerales asociados a la esmeralda se encuentran calcita, albita, caolín, pirita, cuarzo, dolomita, calcopirita, entre otros (Lámina 1). Es importante mencionar que tanto las esmeraldas como los minerales asociados en Yacopí y demás localidades esmeraldíferas colombianas, presentan Inclusiones fluidas (IF)

con el mismo formato (Lámina 2) y composición química semejante. La mayoría de esmeraldas tienen formas hexagonales, dihexagonales y bipiramidales, típicas de la clase 6/mmm, donde ocurren formas de prismas hexagonales, así como pinacoidales basales. En general, las esmeraldas de Yacopí presentan un clivaje imperfecto (0001), dureza de 7,5, peso específico entre 2,7 y 2,8 gr/cm<sup>3</sup> y lustre vítreo. Ópticamente se presentan como minerales uniáxicos de baja birrefringencia, carácter óptico negativo, con valores de  $w = 1.560 - 1.602$  y  $\epsilon = 1.557 - 1.599$ . Es importante observar que la mayoría de las esmeraldas estudiadas son de color verde claro, lo cual las torna gemológicamente de baja calidad. Los valores obtenidos de los parámetros de la celda unitaria muestran que no existe gran variación entre los datos obtenidos, para las esmeraldas de San Antonio de Yacopí, Chivor, Pacho, Muzo y Coscuez (Tabla 1).

Durante este trabajo se determinaron los índices de refracción de 5 esmeraldas de Muzo, 9 de San Antonio de Yacopí, 2 de Pacho, 4 de Coscuez y 6 de Chivor, utilizando el refractómetro gemológico del Departamento de Gemología de la Universidad de Sao Paulo (Brasil). Los valores son presentados en la Tabla 2, en la cual se muestra que la densidad de las esmeraldas varía muy poco entre las localidades. Cuando cambia, puede estar relacionada con los tipos de inclusiones cristalinas presentes en las gemas (GUBELIN 1953).

### DATOS MICROTERMOMÉTRICOS

Antes de discutir los resultados de estudios microtermométricos en las inclusiones fluidas (IF) de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí, debemos resaltar las dificultades en la observación de los cambios de fase, debidos a la alta salinidad de las IF (42-46 de KCl, mol %). La alta salinidad ocasiona que los fluidos per-

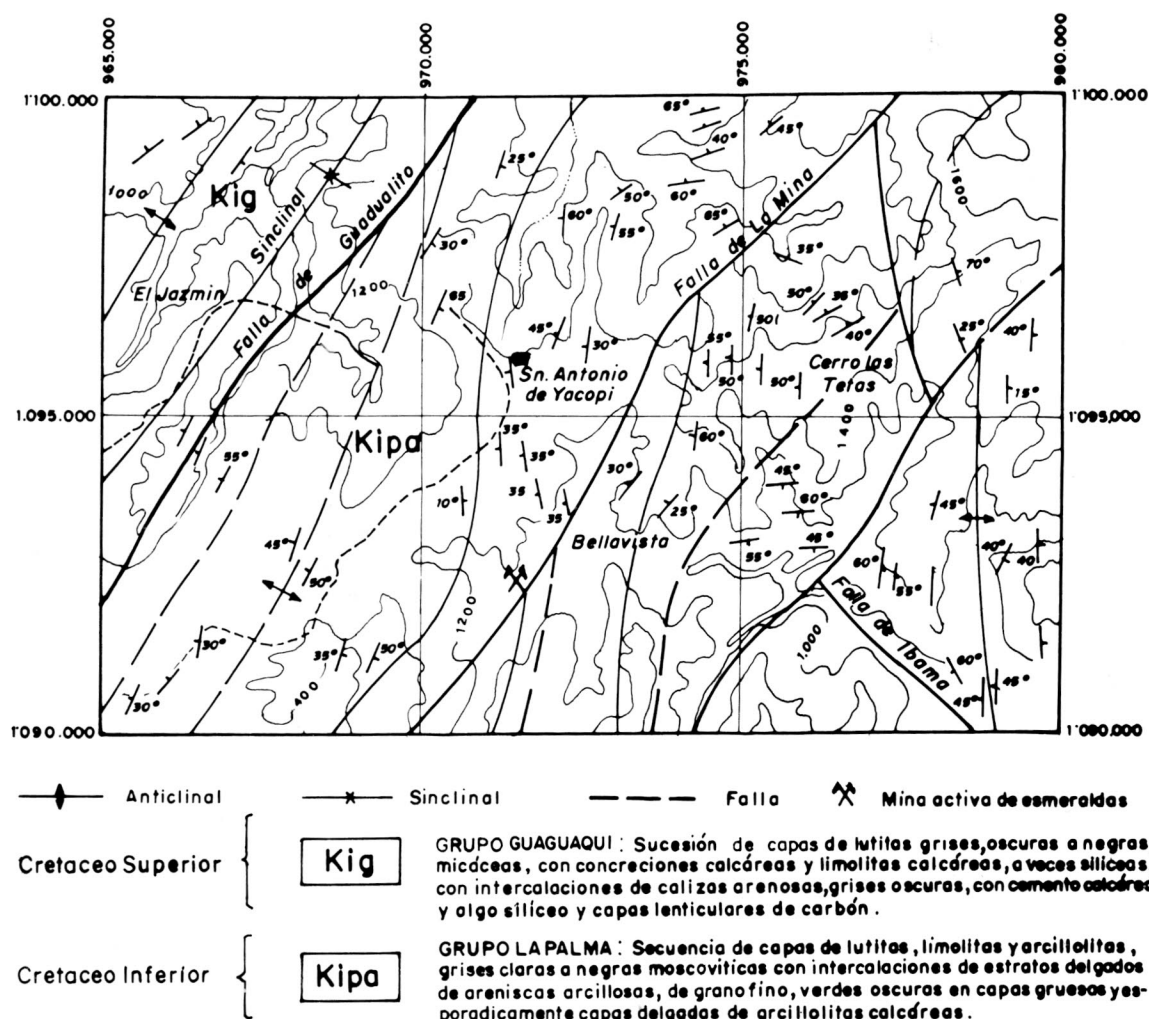


Fig. 2. Mapa geológico del área de San Antonio de Yacopí (Modificado de INGEOMINAS 1984).

manezcan en estado metaestable, en los enfriamientos rápidos, no llegando a sufrir congelamiento; aún cuando la muestra es llevada a temperaturas inferiores a  $-180^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, hubo necesidad de enfriar muy lentamente la inclusión, atenuando las dificultades de observación (ROEDDER 1984).

Algunas de las IF presentaron su fase gaseosa oscura, sugiriendo la presencia de otros componentes volátiles además del  $\text{CO}_2$ , los cuales no pudieron ser identificados por microtermometría. En tales casos las muestras fueron analizadas por espectroscopía micro-Raman, identificándose  $\text{N}_2$  junto al  $\text{CO}_2$ . El espectrómetro micro-Raman utilizado se encuentra localizado en el Instituto de Física de la Universidad Federal de Belo Horizonte (Brasil).

Se estudiaron 116 IF de 9 cristales de esmeraldas de

San Antonio de Yacopí, 6 cortados paralelamente y 3 perpendicularmente al eje cristalográfico «c». Los análisis fueron ejecutados en una platina Chaix-Meca tipo MTM85, conectada a un microscopio petrográfico marca Carl Zeiss, modelo MC63A. De manera general, los estudios de microtermometría mostraron la ocurrencia de IF compuestas por cantidades variables de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_{2(\text{v})}$  y soluciones acuosas salinas, además de la presencia de Silvita (KCl) como mineral de saturación (Lámina 2).

A continuación se discuten los datos microtermométricos, y en primer lugar los relacionados con los componentes volátiles.

### Componentes volátiles

TABLA 2

Cuadro comparativo que muestra los índices de refracción (nE y nO) y la densidad relativa (D) de las esmeraldas de Colombia, Austria, Australia, India y Rusia. Los valores de los índices y la densidad de las esmeraldas de Yacopí son relativamente más bajos que los valores referentes a las esmeraldas de las localidades usadas en la comparación.

Localidad	nE	nO	D	Referencia
Colombia				
Yacopí	1,569	1,579	2,704	Este estudio
Muzo	1,564	1,570	2,700	
Coscuez	1,578	1,584	2,609	
Pacho	1,570	1,576	2,700	
Chivor	1,565	1,571	2,730	
Austria				
Habachtal	1,584	1,591	2,704	Eppler (1973)
Australia				
Poona	1,572	1,577	2,675	Mumme (1982)
Brasil				
Sta Terezinha	1,584	1,592	2,711	Mendes (1989)
Itaberai	1,580	1,588	2,700	
India				
Rajasthan	1,580	1,588	2,746	Gubelin (1957)
Rusia				
Urales	1,580	1,588	2,740	Gubelin (1982)

El punto de fusión del  $\text{CO}_2$  ( $-56.6^\circ\text{C}$ ) es la temperatura de referencia, pues la presencia de dióxido de carbono es bastante común en las IF. Cuando la temperatura del  $\text{CO}_2$  es inferior a  $-56.6^\circ\text{C}$ , se sugiere la presencia de otros componentes volátiles, con temperaturas inferiores, dentro de la fase gaseosa de las IF. En las esmeraldas de Muzo, Coscuez, Pacho y Chivor, las temperaturas de fusión del  $\text{CO}_2$  presentaron una variación entre  $-58.2^\circ\text{C}$  y  $-56.6^\circ\text{C}$  (ORDÓÑEZ *et al.* 1992; ORDÓÑEZ *et al.* 1994). En el caso de los cristales de San Antonio de Yacopí no fue posible determinar la presencia de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ .

Como se mencionó anteriormente, las fases volátiles de estas IF se determinaron por espectrometría micro-Raman (WOPENGA & PASTERIS 1986), que mostró la presencia de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  (Fig. 3).

La Fig. 3 muestra las temperaturas de desaparición de la fase gaseosa global de las inclusiones. En este caso se indican las temperaturas entre  $300^\circ$  y  $350^\circ\text{C}$ . En todos los casos, la fase global homogeneizó para la fase líquida de la inclusión.

## Soluciones acuosas o salmueras

Después del congelamiento de los fluidos de las inclusiones, la depresión del punto de fusión del hielo en la solución es marcada por la fusión del primer cristal de hielo, siendo denominada temperatura del punto eutéctico (Te), la cual permite la determinación cualitativa de la composición química de la solución acuosa o salmuera (ROEDDER 1984).

Las temperaturas del punto eutéctico de las soluciones acuosas son datos importantes, pues permiten determinar los iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , etc.) disueltos en esta fase. Las Te muestran valores muy bajos (Fig. 4), tanto en el caso de las IF presentes en cristales cortados paralela como perpendicularmente al eje «c» del cristal de esmeralda. Su histograma de frecuencia muestra una distribución asimétrica, la cual puede explicarse por generaciones de IF con concentraciones diferentes de sal, o imprecisiones en la primera aparición del hielo, debido a las condiciones de metaestabilidad típicas de complejos de salmueras.

Esas bajas temperaturas sugieren la existencia de una mezcla compleja de iones disueltos en la fase líquida de las IF (ROEDDER 1984; KOZLOWSKI *et al.* 1988). Se sospecha que el  $\text{Ca}^{++}$  es el ion responsable por la extrema depresión de las Te (VANKO *et al.* 1988).

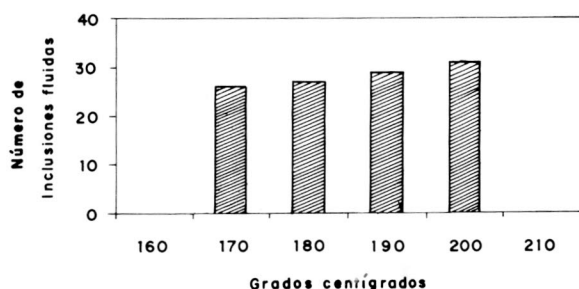
Se confirmó la presencia del ion  $\text{K}^+$ , por la existencia de Silvita como mineral de saturación (ORDÓÑEZ *et al.* 1994). Otros iones presentes son  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  determinados vía ICP. Los valores de las temperaturas de disolución de la sal ( $T_{\text{dsal}}$ ) de las inclusiones fluidas se muestran en la Fig. 5, en donde se aprecia una variación entre  $280^\circ\text{C}$  y  $340^\circ\text{C}$ .

Con base en los datos mostrados, se sugiere que los fluidos mineralizantes se pueden encajar apropiadamente dentro del sistema químico  $\text{H}_2\text{O} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{CaCl}_2 - \text{MgCl}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CO}_2 - \text{N}_2$ . Persisten aún muchas dudas que en futuras investigaciones podrán aportar más datos y ampliar la discusión sobre un sistema tan complejo. Este tipo de sistemas químicos, como el propuesto, solo puede ser analizado matemáticamente a través de un modelo polidimensional.

Para representar y analizar los datos microtermométricos de este caso, es necesario hacer ciertas simplificaciones que permitan delimitar los valores mínimos de salinidad, como la representación conjunta de iones de un comportamiento semejante como  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$  y  $\text{AlCl}_3$ . Así, un sistema más complejo puede ser representado de una manera más simple, como el sistema  $\text{NaCl} - \text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (investigado por BERGMAN & KUZNETSOVA 1959). Este sistema se utilizó para la determinación de la salinidad de las IF presentes en las esmeraldas de San Antonio de Yacopí, considerando la presencia predominante de Cal-



### TEMPERATURAS DE DESAPARICIÓN DE LA FASE GASEOSA GLOBAL



**Fig. 3. Histograma de frecuencia que muestra los valores de las temperaturas de desaparición de la fase gaseosa global en las inclusiones fluidas de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí.**

cita y Silvita como minerales de saturación. Para determinar la salinidad y composición química de la salmuera se estudiaron las IF primarias, de mayor tamaño, que no presentaron fenómenos de escape o estrangulamiento (Tablas 3 y 4). El enfriamiento fue lento, determinándose las temperaturas de fusión del hielo ( $T_f$  del hielo) y del punto eutéctico ( $T_e$ ). Las temperaturas de homogeneización de la silvita ( $T_{dsal}$ ) fueron determinadas en el ciclo de calentamiento a temperaturas más elevadas.

**TABLA 3**

**Caracterización química del fluido mineralizante de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí y su comparación con las gemas de Chivor, Coscuez, Muzo y Pacho. Se muestran los valores de temperatura de homogeneización del  $CO_2$  ( $ThCO_2$ ), densidad del  $CO_2$  ( $dCO_2$ ), disolución de la silvita ( $T_{dsal}$ ), disolución de la fase de vapor ( $T_{dgas}$ ), densidad del agua ( $dH_2O$ ) y concentración de la sal (%NaCl).**

MINA	Th	$dCO_2$	$T_{dsal}$	$T_{dgas}$	$dH_2O$	%NaCl
Chivor	21.8	0.704	355	205	1.223	42.3
Coscuez	—	—	334	200	1.203	40.9
Muzo	21.8	0.209	345	225	1.119	41.9
Pacho	21.4	0.206	316	178	1.10	—
Yacopí	—	—	305	190	1.193	38.5

Se debe resaltar que el sistema químico que representa la composición de estas IF muestra, algunas veces, transiciones de fases en forma metaestable, donde en ocasiones no fue posible determinar las temperaturas del punto de fusión del hielo, determinándose solamente en algunas IF las  $T_e$  y  $T_{dsal}$ . Sus valores se muestran en la Tabla 4.

Los valores de esta tabla se representan en el diagrama

ma composicional  $KCl - CaCl_2 - H_2O$  (Fig. 6). En esta figura se representa la altísima salinidad y la relación entre los iones monovalentes y polivalentes de estas IF.

### Discusión de los datos microtermométricos

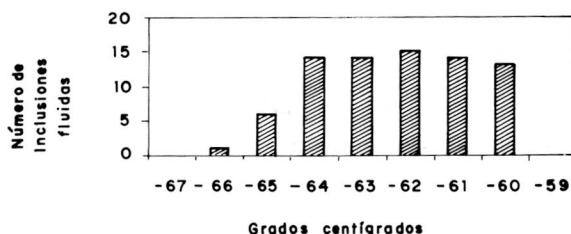
Los resultados microtermométricos muestran que todas las IF estudiadas presentaron un comportamiento más o menos semejante con respecto a los cambios de fases, tanto en el enfriamiento como en el calentamiento. Las proporciones volumétricas de las fases son constantes. Los mismos gases y minerales de saturación están presentes en la mayoría de las IF, originadas a partir de los fluidos mineralizantes, con algunas modificaciones debidas posiblemente a la interacción fluido - roca. Considerando estos factores, las temperaturas mencionadas son discutidas dentro de un mismo contexto para las esmeraldas de todo el distrito minero.

Las  $T_e$  de la solución presente en las IF son muy bajas, como resultado de una mezcla compleja de iones disueltos en la fase acuosa, incluyendo  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Cl^-$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+3}$ , entre otros.

Las IF poseen altas concentraciones de sal, principalmente de tipo Na-K con considerables concentraciones de Br,  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$  donde el  $Cl^-$  es el ion dominante. La temperatura determinada para estimar la presión reinante en la época de formación de las esmeraldas (900-1000 bars) se refiere a la desaparición de la fase gaseosa global y la temperatura de disolución de la sal (ORDÓÑEZ *et al.* 1992), considerando varias simplificaciones y empleando el modelo propuesto por SOLOVOVA *et al.* (1992).

Cuando comparamos las medidas termobarométricas de las IF en las esmeraldas de San Antonio de Yacopí con respecto a las de Muzo, Pacho, Coscuez y Chivor (ORDÓÑEZ *et al. op. cit.*) se observa una pequeña dispersión en las temperaturas de homogeneización y presiones máximas

### TEMPERATURA DEL PUNTO EUTÉCTICO DE LA FASE LÍQUIDA



**Fig. 4. Histograma de frecuencia que representa los valores de las temperaturas del punto eutéctico de la fase líquida de las inclusiones fluidas de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí.**

TABLA 4

Temperaturas del eutéctico de la fase líquida (Te), fusión del hielo (Tfg), desaparición de la fase gaseosa [TL-V(L)], disolución de la sal (Tdsal), concentración de Silvita y Calcita. Las concentraciones de NaCl - KCl calculadas por el sistema H<sub>2</sub>O - CaCl<sub>2</sub> - KCl (BERMAN & KUZNETSOVA 1959; ORDÓÑEZ *et al.* 1993).

Inclusión	Te	Tfg	TL-V(L)	Tdsal	%KCl	%CaCl <sub>2</sub>
Yacopí-1	-60	-20	185	290	46.5	10
Yacopí-2	-61	-19	184	300	48	9.5
Yacopí-3	-62	-33	200	310	48.6	9.4
Yacopí-4	-60	-30	182	313	45.6	13
Yacopí-5	-60	-34	180	282	45	14
Yacopí-6	-61	-32	210	310	45.5	14.5

de aprisionamiento, lo que podría sugerir que estas esmeraldas se formaron en niveles corticales muy semejantes, con un valor promedio aproximado de 1000 bares, representando una columna de sedimento tipo shale calcáreo de aproximadamente 800 metros de espesor (ORDÓÑEZ 1994a). Así mismo se demuestra que el fluido mineralizante fue el mismo, asignando las diferencias de composición atribuibles, posiblemente, a fenómenos locales reinantes en el momento de cristalización de la esmeralda.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten concluir que las esmeraldas de San Antonio de Yacopí presentan características mineralógicas similares a las de otros distritos mineros como Chivor, Muzo, Pacho y Coscuez.

Las esmeraldas fueron originadas a partir de un mismo fluido mineralizante, con temperaturas máximas entre 300-350°C y presiones mínimas de confinamiento entre 900 y 1000 bares, sugiriendo una cristalización en niveles

de la corteza cercanos a la superficie, en los primeros 800 m de profundidad.

El comportamiento microtermométrico y las fases presentes de iones disueltos en la parte líquida de las inclusiones fluidas permiten sugerir que el fluido mineralizante que generó las esmeraldas presentó iones disueltos en la fase acuosa, incluyendo K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Mg<sup>++</sup>, Al<sup>+3</sup>, entre otros, lo que es común para todas las localidades esmeraldíferas de Colombia.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la compañía Explotaciones Mineras de Yacopí, EXMIYA Ltda, empresa que donó las muestras de esmeraldas para realizar este trabajo y al profesor Doctor Schultz-Güttler por su valiosa colaboración en la interpretación del modelo geoquímico que permitió la definición química del fluido mineralizante.

## REFERENCIAS

- BERGMAN, A. & KUSNETSOVA, A. (1959): The solubility diagram for the ternary system H<sub>2</sub>O - KCl - CaCl<sub>2</sub> from the temperature of complete freezing to 300°C.- Russian Journal of Inorganic Chemistry, 4(1): 80-84.
- BOSSHART, G. (1991): Emeralds from Colombia (part 3).- The Journal of Gemmology, 22(8): 500 - 503.
- CHEILLETZ, A.; GIULIANI, G.; ZIMMERMANN, J. L. & RIBERO - ALTHOFF, A. (1995): Ages, geochemical signatures and origin of brazilian and colombian emerald deposits: A magmatic versus sedimentary model.- En: PASAVA, KRIVEK, ZAK (eds.): Mineral deposits, Rotterdam, Balkema, pp. 569-572.
- EPPLER, W.F. (1973): The origin of negative crystals in gemstones.- The Journal of Gemmology, 10(2): 49-56.
- GUBELIN, E. (1953): Inclusions as a mean of gemstone identification.- Los Angeles, guía, 220 p.
- \_\_\_\_\_. (1957): A contribution to the gemmology of inclusions.- The Journal of Gemmology, 6(1): 1-47.
- \_\_\_\_\_. (1982): Gemstones of Pakistan; emerald, ruby and spinel.- Gems & Gemmology, 18(3): 123-139.
- GIULIANI, G.; CHEILLETZ, A.; ZIMMERMANN, J.; RIBERO - ALTHOF, A.; FRANCE - LANORD, C. & FERAUD, G. (1997): Les gisements d'émeraude du Brésil: Genèse et typologie.- Chronique de la recherche minière, 526: 17-61.
- HALL, M. (1978): La Mineralogía y La Geoquímica de las Vetas Esmeraldíferas de Muzo (Boyacá).- Informe de Colciencias, s/n.
- INGEOMINAS (1984): Mapa Geológico, Plancha 189 - La Palma. Escala 1:100.000. Por Erasmo Rodríguez & Carlos Ulloa.
- KOZLOWSKI, A.; METZ, P. & ESTRADA, H. A. (1988): Emeralds from Somondoco, Colombia: Chemical composition, fluid inclusions and origin.- Neues Jahrbuch Mineralogie Abhandlungem, 159(1):23-49.

TEMPERATURAS DE DISOLUCIÓN  
DEL MINERAL DE SATURACIÓN

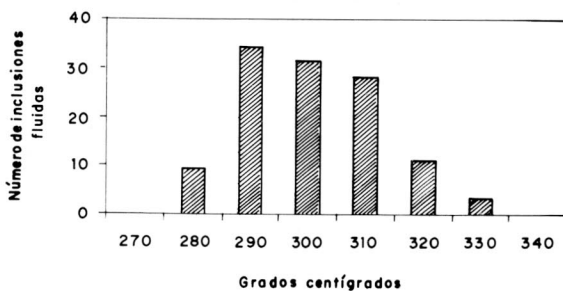
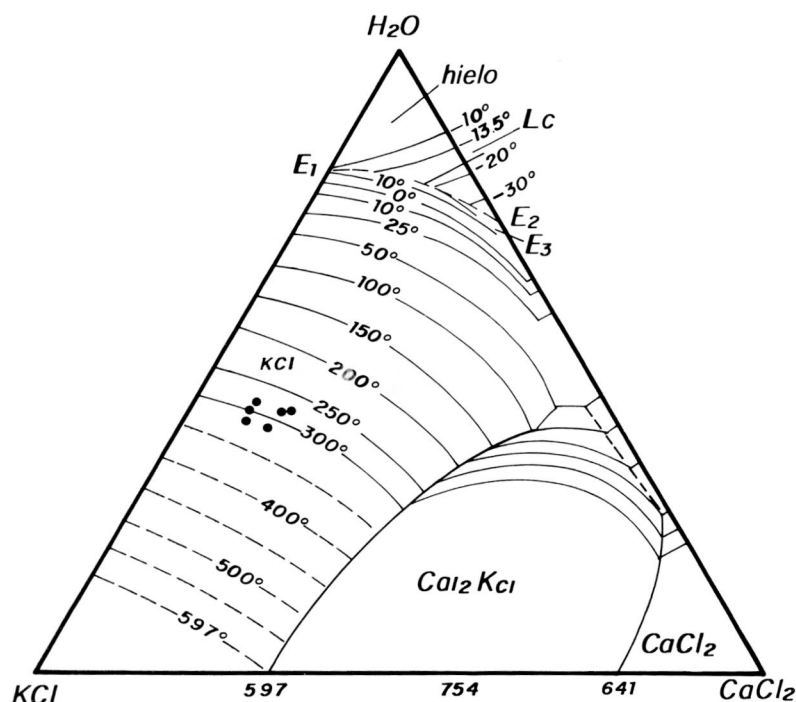


Fig. 5. Histograma de frecuencia que muestra las temperaturas de disolución del mineral de saturación (Sal) en las inclusiones fluidas de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí.



**Fig. 6. Diagrama composicional ( $H_2O$  -  $KCl$  -  $CaCl_2$ ) de las IF de las esmeraldas de San Antonio de Yacopí, donde se usan las temperaturas de desparición del hielo y homogeneización total de la inclusión.**

MENDES, J.C. (1989): Aspectos mineralógicos, geológicos y económicos de las esmeraldas de Santa Terezinha de Goias, Sao Paulo.- 163 p. (tesis de maestria, Instituto de Geociencias -USP).

MUMME, I. (1982): The Emerald.- Australia; Mumme publications / Port Hacking, N.S.W.

ORDOÑEZ, F.H.R.; BELLO, R.M.; SVISERO, D.P.; FUZIKAWA, K. & SCHULTZ-GÜTTER, R. (1992): Inclusiones fluidas en esmeraldas de

Muzo, Pacho e San Antonio de Yacopí, Colombia.- Boletín IG-USP. Publicacao Especial, 12:83-85.

ORDOÑEZ, F.H.R.; SCHULTZ-GÜTTER, R. & SVISERO, D.P. (1994a): Fluid inclusion data of colombian emeralds: Total homogenization by salt dissolution.- 16th general meeting, International Mineralogical Association, Pisa, Italy, P 310.

ORDOÑEZ, F.H.R.; ROCHA, B.E.; BELLO, R.M.; FUZIKAWA, K. & SVISERO, D.P. (1994b): Inclusiones cristalinicas e fases

sólidas asociadas as inclusiones fluidas em esmeraldas da Colombia.- Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 47 (2) 128-133.

ROEDDER, E. (1984): Fluid inclusions.- Reviews in Mineralogy, 12: 1-264.

RODRIGUEZ, M.E. & ULLOA, M. C. (1994): Mapa geológico de la plancha 189 - La Palma, escala 1:100.000.- INGEOMINAS, Santafé de Bogotá.

ROMERO, O. F.H.; BELLO, R. M.; SCHULTZ-GÜTTER, R.A. & SVISERO, D.P. (1994): Caracterizacão das inclusiones fluidas das esmeraldas colombianas.- En: Congresso Brasileiro de Geologia, 38. Camboriu, 1994. Resumos. Camboriu, SC, V.1. p 630-631.

SCHWARTZ, D. (1992): The chemical properties of colombian emeralds.- The Journal of Gemmology, 23(4): 225-233.

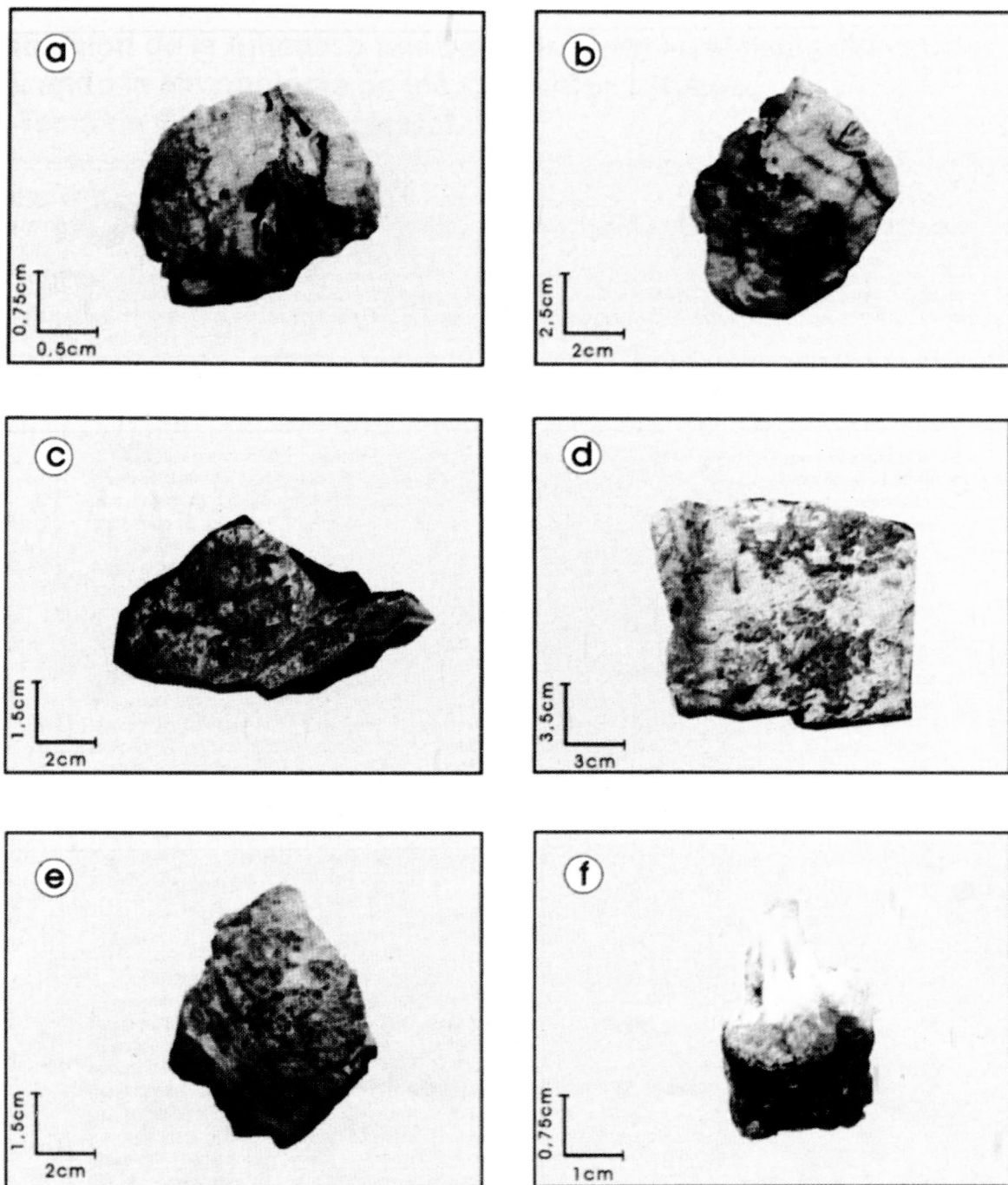
SOLOVOVA, I.; GIRNIS, A.; GRUZHOVA, A. & NAUMOV, B (1992): Magmatic Salt Inclusion in East Pamir Alkali Basalt Minerals.- Geochemistry International, 29(8): 64-74.

VANKO, A.D.; BODNAR, R. J. & STERNER, S. M. (1988): Synthetic fluid inclusion: VIII. Vapor - Saturated halite solubility in part of the system  $NaCl$  -  $CaCl_2$  -  $H_2O$  with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal system.- Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 2451-2456.

WOPENGA, B & PASTERIS, J.D. (1986): Limitation to quantitative analysis of fluid inclusions in geological samples by laser Raman.- Microprobe Spectroscopy, 40(2): 144-151.

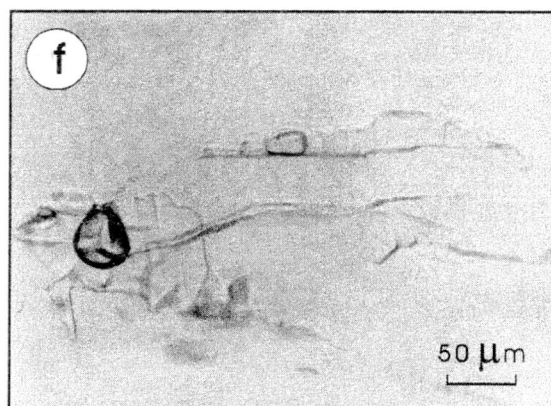
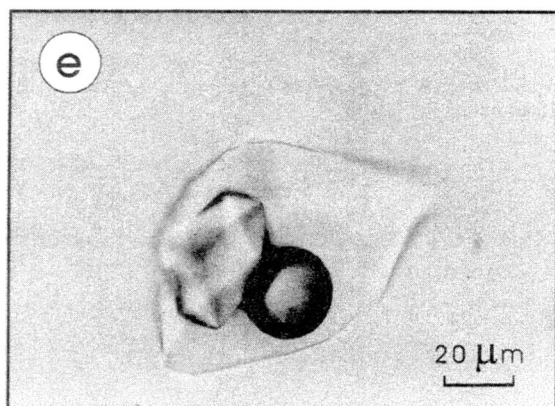
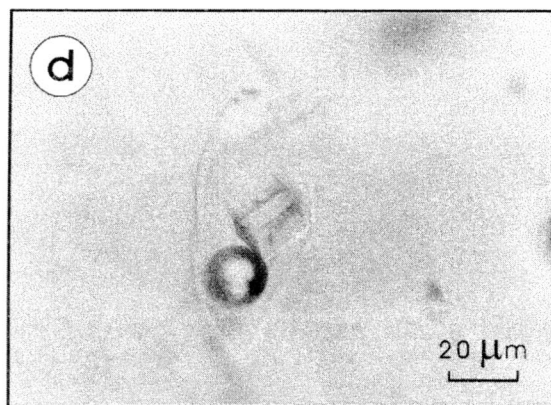
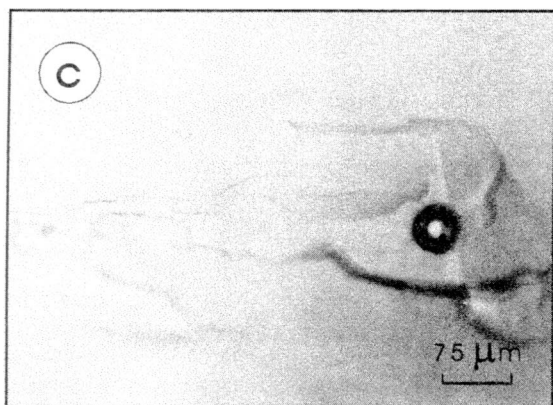
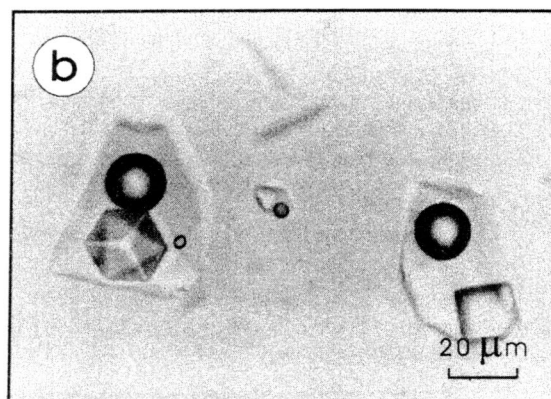
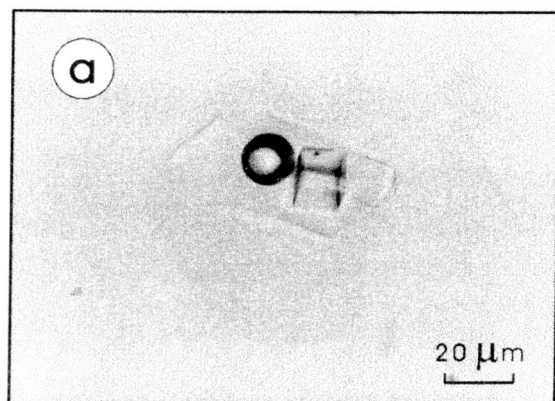
Manuscrito recibido, Junio de 1999





### LAMINA 1

Forma de ocurrencia de algunas esmeraldas colombianas y minerales asociados. a) y b) en lentes de contacto con el shale, junto con pirita, calcopirita y cuarzo. c) y d) en venas hidrotermales en contacto con el shale y asociadas con albita, calcita y cuarzo. e) y f) en nódulos, en contacto con arenisca, asociados con albita, dolomita y cuarzo.



PÁGINA 158

## LAMINA 2

Inclusiones fluidas orientadas paralelamente al eje cristalográfico "c" del mineral. a) Calcita. b) Fluorita. c) Euclasa. d) Esmeralda. e) Cuarzo. f) Parisita, compuestas principalmente por cantidades variables de  $\text{CO}_{2(l)}$ ,  $\text{CO}_{2(v)}$ ,  $\text{N}_{2(v)}$  y Halita como mineral de saturación.