

ESTUDIO DE LOS PALEOFLUIDOS EN LA FORMACIÓN SILGARÁ Y SU RELACIÓN CON PROCESOS DE DEFORMACIÓN. SECTOR ARATOCA-PESCADERO (SW DEL MACIZO DE SANTANDER).

Mantilla Figueroa, L. C.; Ordóñez Calderón, J. C.; Cepeda Espitia, S.; Ríos Reyes, C. A.

RESUMEN

La Formación Silgará que aflora en la franja Pescadero-Aratoca presenta una estructura termal definida por las zonas metamórficas de la silimanita, estaurolita-distena, granate y biotita. Una franja de aproximadamente 120 m de espesor, localizada en el límite de la zonas estaurolita-distena y granate, presenta una gran profusión de venas hidrotermales (boudinadas) paralelas a la esquistosidad regional. Este hecho, junto con otras estructuras de deformación (pliegues isoclinales recumbentes, etc.), sugieren la presencia de una importante banda de cizallamiento que favoreció la circulación de fluidos, desarrollada durante una etapa extensiva, temporalmente asociada a la exhumación de esta unidad metamórfica.

Los estudios microtermométricos en inclusiones fluidas (IF) en venas, principalmente de cuarzo, permiten identificar seis pulsos hidrotermales que afectaron a la Formación Silgará, durante su etapa retrógrada. Composicionalmente, estos paleofluidos pueden ser agrupados en acuoso-salinos ($H_2O+NaCl$) y complejos ($H_2O+NaCl+CO_2+CH_4+N_2+H_2S?$).

Palabras Clave: Metamorfismo, inclusiones fluidas, banda de cizallamiento, Formación Silgará.

ABSTRACT

The Silgará Formation that crops out in the Pescadero-Aratoca area presents a thermal structure defined by the metamorphic zones of the sillimanite, staurolite-distene, garnet and biotite. A band of approximately 120 m in width, located in the boundary between the staurolite-distene zone and garnet zone, presents a high amount of hydrothermal veins (boudinated) parallel to the regional schistosity. This fact, along with another deformation structures (isoclinal, recumbent folds, etc.), suggests the presence of an important shear band that favored the circulation of fluids, which was developed during an extensive stage, temporally associated to the exhumation of this metamorphic unit.

The microthermometric studies in fluid inclusions (IF) in veins, mainly composed by quartz, let to identify six hydrothermal events that affected the Silgará Formation, during its retrograde stage. Compositionally, these paleofluids can be gruped in aquose-salines ($H_2O+NaCl$) and complexes ($H_2O+NaCl+CO_2+CH_4+N_2+H_2S?$).

Keywords: Metamorphism, fluid inclusions, shear band, Silgará Formation.

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

El sector del Macizo de Santander que se ha estudiado en el presente trabajo, corresponde a una franja de rocas metamórficas de la Formación Silgará, que se extiende entre los municipios de Cepitá y el corregimiento de Pescadero (municipio de Piedecuesta) (FIGURA 1). En este sector, la Formación Silgará ha sido interpretada como una secuencia metamórfica de grado bajo a medio, con una edad que puede estar en el rango Precámbrico Superior a Ordovícico (Ward, *et al.*, 1969). La composición litológica de esta formación, puede dividirse en dos unidades: a) una unidad basal, compuesta mayoritariamente por cuarcitas con algunas intercalaciones de esquistos semipelíticos y lentes de anfibolitas y; b) una unidad superior, compuesta principalmente por esquistos, filitas y metalimolitas. La unidad basal, en sectores concretos del área, es cortada por diques máficos (diabasa) y por diques pegmatíticos. Estos últimos, muy propagados en la zona de contacto con el granito de Pescadero.

Las condiciones máximas de metamorfismo alcanzadas por estas rocas, corresponden a facies de esquistos verdes y anfibolita (Ward, *et al.*, 1969; Ríos, 1999).

La estructura termal actualmente establecida para la zona, se ha realizado principalmente a partir de la presencia o ausencia de minerales metamórficos índices (Ward *et al.*, 1969). No obstante, recientemente se han realizados estudios de mayor detalle, a partir de estudios de equilibrio mineral y de algunos datos puntuales de geotermobarometría (Ríos, 1999), lo cual ha permitido la identificación de las siguientes zonas metamórficas: silimanita, estaurólita-distena, granate y biotita. Esta secuencia zonal, muestra un descenso hacia el sur de las condiciones máximas de Presión y Temperatura alcanzadas durante el pico metamórfico (ver FIGURA 1).

Las venas que se observan en campo son principalmente de cuarzo. Según su disposición con relación a la esquistosidad regional (Sn), se dividen en venas de familia 1, paralelas a la Sn y familia 2,

las que cortan la Sn. En este contexto, el presente trabajo se centró principalmente en el estudio de los paleofluidos, a partir de análisis microtermométricos en IF en venas de cuarzo.

METODOLOGÍA

Una vez realizado un muestreo sistemático de las distintas familias estructurales de venas, se elaboraron láminas delgadas y doblemente pulidas, para análisis petrográficos y microtermométricos.

La caracterización microtermométrica de las IF, se realizó en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), utilizando una platina Calentadora/Refrigeradora tipo USGS, calibrada con patrones de inclusiones fluidas sintéticas suministradas por SYN FLINC, Inc. Los patrones utilizados y sus correspondientes temperaturas eutécticas fueron: H₂O (0.0°C), H₂O+K₂Cl (-10.7°C), H₂O+NaCl (-21.2°C) y H₂O+CO₂ (-56.6°C). La precisión en las mediciones es de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ para procesos de enfriamientos y $\pm 2^\circ\text{C}$, para procesos de calentamiento.

RESULTADOS

* Estructuras de Deformación

La zona de trabajo presenta varios tipos de estructuras de deformación. Por su relación con este estudio, destacamos las siguientes: a) Una esquistosidad regional (Sn), cuyos planos de anisotropía mantienen una tendencia de rumbo de N 75° W, y buzando al SE. Esta Sn, hacia la parte superior de la zona de la estaurólita-distena, contiene lentes de esquistos de 20x10cm, cuya litología es similar al resto de esquistos del medio. Estos lentes, presentan una esquistosidad interna, que es cortada por la Sn. b) Desarrollo de venas de cuarzo boudinadas, paralelas a la Sn (familia 1) muy abundantes en el límite entre las zonas estaurólita-distena y granate. c) Pliegues isoclinales recumbentes. d) Lineaciones con una dirección de estiramiento E-W. e) Pliegues sin raíz ó *rootless folds*, que como en los casos anteriores, parecen estar confinados al límite entre las dos zonas metamórficas mencionadas anteriormente.

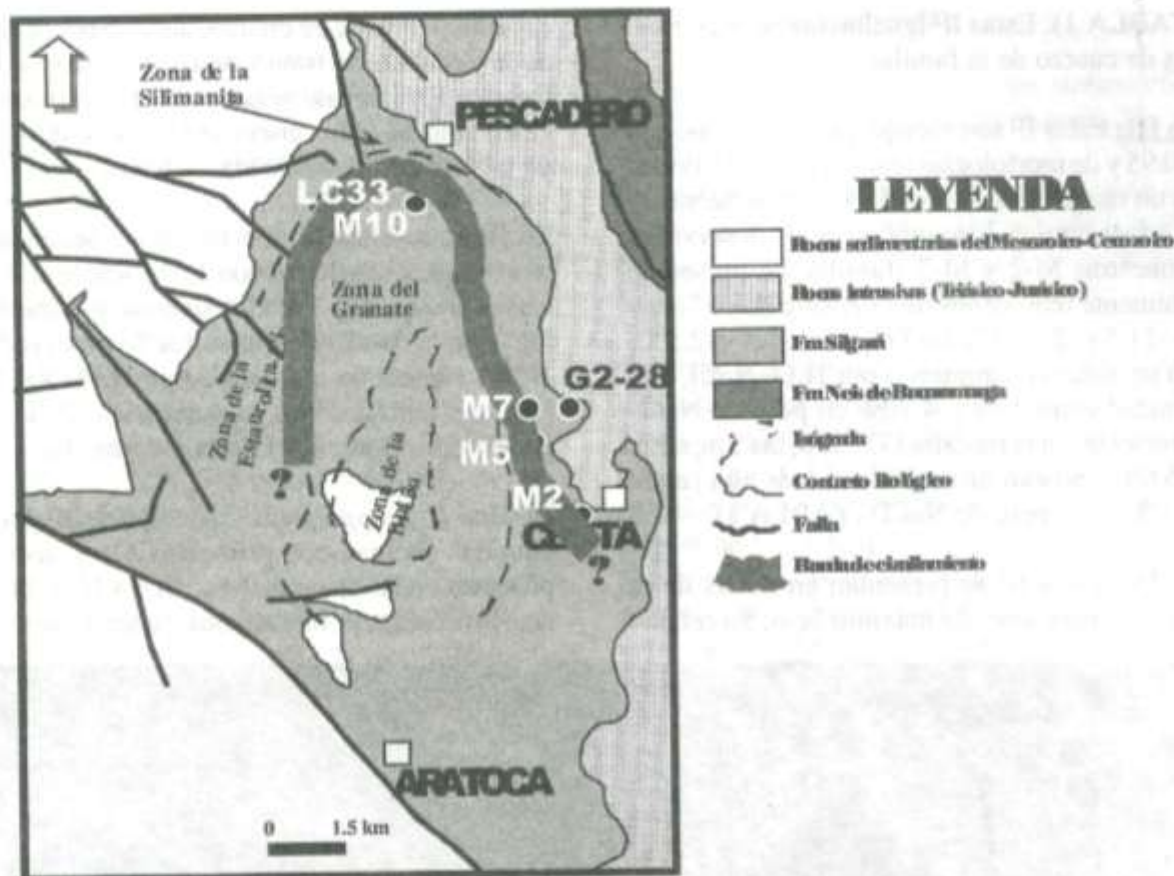


FIGURA 1. Mapa geológico del área de estudio (modificado de Ward et al., 1973), mostrando la localización de muestras con microtermometría.

* Estudio de IF

El estudio de IF se restringe mayoritariamente a venas de cuarzo presentes en las zonas metamórficas estaurolita-distena y granate. Ambas zonas metamórficas, tienen en común la presencia de distintas familias de IF, con un sistema químico compuesto principalmente de $H_2O+NaCl$ (Tipo I). Sin embargo, en la zona de la estaurolita-distena, se reconoce otro tipo de IF (Tipo II), que pueden ser referenciadas al sistema $H_2O+NaCl+CO_2+CH_4+(N_2+H_2S)?$.

IF en la zona de la estaurolita-distena

IF Tipo I (acuoso-salinas): Estas IF se subdividen en los siguientes subtipos, según sus características microtermométricas (TABLA 1).

Subtipo I: Estas IF son primarias, bifásicas, con un grado de relleno (F) de 0.5 y con morfologías regulares. Las temperaturas de homogenización (Th) tienen lugar a fase líquida entorno a los $300^\circ C$. La temperatura eutéctica (Te) de $-22^\circ C$ y la temperatura de fusión final del hielo (Tm_f) a $-3.6^\circ C$, sugieren una composición para el sistema de $H_2O+NaCl$, con un contenido en sales de 6.94% en peso de $NaCl$.

Este subtipo de IF fue reconocido en el borde de cristales de granate (Muestra M-7), localizados en el contacto con algunas venas de la familia 1.

Subtipo II: Estas IF son secundarias, bifásicas, con un F de 0.95 y de morfologías regulares. Las Th entorno a $180^\circ C$, tiene lugar siempre a fase líquida. La Te de $-22.8^\circ C$ y la Tm_f de $-2^\circ C$ sugieren, como en el caso anterior, una composición para el sistema de $H_2O+NaCl$, con un contenido de 3.71% en peso de

NaCl (TABLA 1). Estas IF igualmente se presentan en venas de cuarzo de la familia 1.

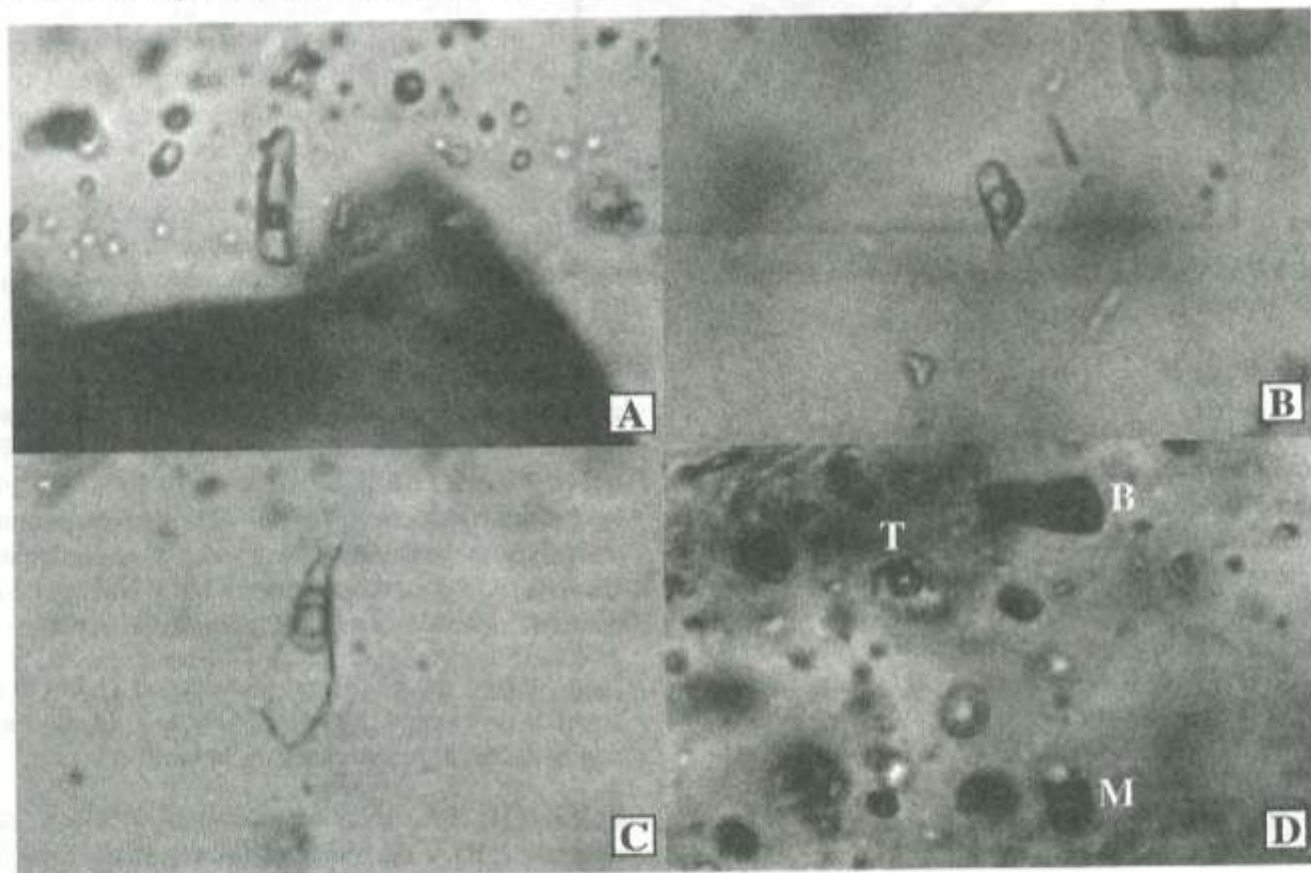
Subtipo III: Estas IF son secundarias, bifásicas, con un F de 0.95 y de morfologías regulares. Las Th tienen lugar en un rango entre 130 y 155°C, y homogenizan siempre a fase líquida. Este subtipo de IF, observadas en las muestras M-2 y M-7 (familia 1), presentan frecuentemente fenómenos de "necking down". Las Te entre -21.5 y -23.2°C y las Tm₁ entre -1.3 y -2.5°C, sugieren un sistema compuesto por H₂O+NaCl, con una salinidad entre 2.37 y 4.70% en peso de NaCl. Contrariamente, en la muestra G2-28-6, las Tm₁ entre -4.4 y -5.6°C, indican una salinidad más alta (entre 8.65 y 11.33% en peso de NaCl) (TABLA 1).

Subtipo IV: Estas IF se presentan en venas de la familia 2, con espesores de máximo 5cm. Su relleno

es principalmente de cuarzo, aunque hacia el interior de la vena, en un tramo de unos 2 cms. se observa fluorita. Este tipo de venas con fluorita (muestra G2-28-6) solo ha sido observado en un punto concreto de la zona de la estauroлита-distena.

En fluorita, estas IF son bifásicas, secundarias, de morfologías regulares, con F entorno a 0.9. Las Th varían entre 110 y 130°C, y su homogenización tiene lugar siempre a fase líquida. La Te observada solo a -49°C, sugiere un quimismo tipo H₂O+NaCl+CaCl₂ (ver más detalle de las características de este fluido en Mantilla et al., 2001 de la presente memoria).

IF Tipo II (complejas): A este tipo de IF pertenecen aquellas inclusiones primarias (?) y secundarias presentes en las muestras M-7, M-5 y M-2. Los planos que forman estas inclusiones pueden presentar una



intercalación de IF monofásicas (de vapor), bifásicas y trifásicas. Las relaciones líquido/vapor en estas últimas son muy variables (FIGURA 2D).

Las T_e observadas en las IF monofásicas y trifásicas varían entre -59.8 y -57.6°C . Estos valores están claramente por debajo del punto triple del CO_2 (-56.6°C), lo que indica la presencia de otro componente con un punto triple más bajo, tipo CH_4 . No se descarta adicionalmente la presencia de otros componentes volátiles tales como N_2 y H_2S .

Algunas IF bifásicas en estos mismos planos, presentan T_e de -22°C , las cuales solo pueden ser relacionadas al sistema $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$.

Las IF trifásicas (FIGURA 2C) y algunas bifásicas a temperatura ambiente presentan un comportamiento crioscópico, que reflejan procesos de mezcla en proporciones muy variadas de los dos tipos de fluidos anteriormente mencionados. Es decir, estas IF pueden presentar un quimismo de tipo $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CO}_2+\text{CH}_4+(\text{N}_2+\text{H}_2\text{S})$?

Las temperaturas de homogenización parcial ($T_{h_{\text{CO}_2}}$) y de homogenización total ($T_{h_{\text{T}}}$), entre $22-26.7^\circ\text{C}$ y $227-290^\circ\text{C}$ (a fase líquida y vapor), respectivamente, son evidencias de mezcla de fluidos.

IF en la zona del granate

Las venas estudiadas en esta zona metamórfica son las LC-33(familia 1) y la M-10 (familia 2).

En ambas muestras, las IF responden a un sistema químico acuoso-salino ($\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$). Estas IF, también denominadas de Tipo I, se subdividen en los siguientes subtipos (TABLA 1).

Subtipo I: Estas IF (FIGURA 2B) son primarias, bifásicas, con morfologías regulares y F de 0.4. Las T_h entre 345 y 355°C , tienen lugar en todos los casos a fase líquida. La salinidad del sistema no se pudo calcular, pero está claramente por debajo de 26.3% en peso de NaCl , ya que no presenta cristales de halita. Subtipo II: Estas IF son bifásicas, secundarias, con morfologías regulares y un F entre 0.7 y 0.8 . Las T_h entre 245 y 255°C , tienen lugar siempre a fase líquida.

Subtipo III: Estas IF (FIGURA 2A), presentan un comportamiento microtermométrico muy parecido a las IF del subtipo III en las muestras M-7 y M-2 de la zona de la estauroлита-distena. Su quimismo, al igual que en los casos anteriores, responde a un sistema compuesto por $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$, tal como lo indican sus T_e (-21 y -22°C). La salinidad de estas IF son menores a 2.19% en peso de NaCl .

TABLA 1. Datos microtermométricos de las IF bifásicas tipo I, en las zonas metamórficas de la estauroлита-distena y el granate.

ZONA	SISTEMA QUÍMICO	SUBTIPO	MUESTRA	TIPO DE IF	T_e $^\circ\text{C}$	T_{m1} $^\circ\text{C}$	T_h (\Rightarrow l) $^\circ\text{C}$	F	Wt% NaCl
ZONA DEL GRANATE	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	I	LC-33	Primarias	-21 -22	*	345-355	0,4	*
		II	LC-33	Secundarias	-22 (?)	*	245-255	0,7-0,8	*
		III	LC-33	Secundarias	-21 -22	-1,2	150	0,95	2,19
			M-10	Secundarias	-22	-0,8	130	0,95	1,44
ZONA DE LA ESTAUROLITA-DISTENA	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	I	M-7	Primarias	-22 (?)	-3,6	300	0,5	6,94
		II	M-7	Secundarias	-22,8	-2	180	0,95	3,71
		III	M-7	Secundarias	-21,5 (?)	-1,3	155	0,95	2,37
			M-2	Secundarias	-23,2	-2,5	155	0,95	4,70
			G2-28-6	Secundarias	-20,8	-4,4 -5,6	140	0,95	8,65 y 11,33
	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$	IV	G2-28-6	Secundarias	-49	-5,6	110-130	0,9	*

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La gran profusión de venas de cuarzo paralelas a la esquistosidad regional, en una franja de unos 120 m de espesor, localizada en el límite entre las zonas metamórficas de la estaurolita-distena y el granate, parece evidenciar una importante circulación de fluidos a través de esta franja. Relacionada espacialmente con esta, se presentan las estructuras de deformación arriba mencionadas (pliegues isoclinales recumbentes, pliegues sin raíz ó rootless folds, lineaciones en dirección E-W, etc). Estas estructuras de deformación, junto con el registro de actividad hidrotermal, principalmente de aquellos pulsos con temperaturas superiores a los 250-300°C (temperaturas sin corrección de profundidad), sugieren la presencia de una banda de intenso cizallamiento, desarrollada durante una etapa extensiva, favoreciendo la circulación de fluidos hidrotermales. Esta deformación debió tener lugar durante la etapa retrógrada (exhumación de las rocas). La dirección de las lineaciones en sentido E-W, puede estar evidenciando la dirección de colapso del paleo-orógeno, responsable del metamorfismo tipo Barroviense que caracteriza las rocas metamórficas del Silgará.

Por otra parte, las venas de la familia 1 contienen, casi en su totalidad, toda la variedad de IF, identificadas hasta hoy en el área. Contrariamente, las venas de la familia 2, solo contienen IF con Th por debajo de los 155°C (IF Tipo I, subtipos III y IV). Esto, puede entenderse como una evidencia de cambio en el ambiente de deformación, en donde las venas boudinadas de la familia 1, debieron formarse y evolucionar en ambientes dúctiles, mientras que aquellas de la familia 2, debieron formarse exclusivamente en ambientes frágiles.

La presencia de los fluidos tipo II (complejos), resulta muy llamativa para tareas de exploración, principalmente de mineralizaciones de oro. Considerando que en otros lugares del mundo, se han relacionado los fluidos de tipo acuoso-carbónicos de baja salinidad, con la formación de depósitos auríferos (Colvine, 1989; Phillips, 1993; Wilkinson *et al.*, 1999).

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan un profundo agradecimiento a la Dra. Alba G. Mesa, del ICP, por el apoyo prestado para la realización de los análisis microtermométricos.

CONCLUSIONES

La Formación Silgará, en la franja localizada entre Pescadero y Aratocha, contiene diversas familias de IF, que registran básicamente seis pulsos hidrotermales, que debieron tener lugar durante su historia de exhumación (etapa retrógrada).

Entre todos los paleofluidos identificados en este trabajo, el subtipo I (Th=345-355°C), representado en las IF de la zona del granate, parece ser el más antiguo de todos y el subtipo IV (Th = 110-130°C) de la zona de la estaurolita-distena, el más tardío.

El subtipo II de IF en la zona del granate (H₂O+NaCl), parece estar relacionado temporalmente con el Tipo II (IF complejas), de la zona de la estaurolita-distena, aunque en esta zona, estos fluidos de H₂O+NaCl se han mezclado con un fluido rico en CO₂.

El límite entre las zonas metamórficas de la estaurolita-distena y el granate, representa una banda de intenso cizallamiento, seguramente mayor a los 120m de espesor con los que se relaciona la gran propagación de venas de cuarzo. Esta banda de cizallamiento, desarrollada en ambientes extensivos, favoreció la circulación de fluidos hidrotermales.

REFERENCIAS

Colvine, A. C. (1989). An empirical model for the formation of Archean gold deposits: Products of final cratonization of Superior province, Canadá. *Economic Geology*, Monograph Vol.6, pp. 37-53.

Phillips, G. N. (1993). Metamorphic fluids and gold. *Mineralogical Magazine Society*, Vol. 57, pp. 364-374.

Ríos, C. A. (1999). Chemical Compositions of the Constituent Minerals and P-T Conditions of the low-grade Silgara Formation Metamorphic Rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. Master Tesis, Shimane University, Matsue (Japan), p. 207.

Wilkinson, J. J. et al. (1999). Gold remobilization by low-temperature brines: evidence from the Curraghinalt Gold deposit, Northern Ireland. *Economic Geology*, Vol. 94, pp. 289-296.

Ward, D. et al. (1969). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12. Ingeominas, Colombia.

Trabajo recibido: agosto 3 de 2001

Trabajo aceptado: septiembre 5 de 2001