

GEOCRONOLOGÍA ^{40}Ar - ^{39}Ar DE VENAS HIDROTERMALES EN ROCAS SEDIMENTARIAS DE LA FORMACIÓN PAJA (CRETÁCICO INFERIOR) AL SUR DEL DPTO. DE SANTANDER (CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA)

Mantilla, F. L.¹; Cordani, U. G.²; Onoe, A. T.²

RESUMEN

Los agregados de micas potásicas de relleno de venas que cortan lodolitas calcáreas orgánicas de la Formación Paja (Cretácico Inferior), aflorante al sur del Dpto. de Santander, registran el evento hidrotermal principal asociado a su formación con edad de aproximadamente 54 Ma, correspondiente al Eoceno temprano, tal como se deriva del análisis geocronológico ^{40}Ar - ^{39}Ar . Este evento hidrotermal, al parecer se relaciona temporal y espacialmente con la falla cabalgante El Guamito, la cual debió servir de canal de escape de fluidos migratorios profundos. En este contexto, el episodio hidrotermal-deformacional mencionado es un evento más dentro de la compleja historia geológica que tiene lugar con anterioridad al clímax de la orogenia pre-Andina en el Eoceno medio.

Palabras claves: Dpto. de Santander, geocronología ^{40}Ar - ^{39}Ar ; Eoceno, Formación Paja.

^{40}Ar - ^{39}Ar GEOCHRONOLOGY OF HYDROTHERMAL VEINS IN SEDIMENTARY ROCKS OF THE PAJA FORMATION (LOWER CRETACEOUS) SOUTHERN OF THE SANTANDER DEPARTMENT (CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA)

ABSTRACT

The K mica aggregates of vein filling, cutting through the organic calcareous mudstone of the Paja Formation (Lower Cretaceous) that crops out to the south of the Dpto. de Santander, register the main hydrothermal event associated to their formation. Their ^{40}Ar - ^{39}Ar age is about 54 Ma, corresponding to the early Eocene. Such hydrothermal event is related in time and space with The Guamito thrust fault, which may have served as channel for the escape of deep migratory fluids. In this context, the mentioned hydrothermal-deformation episode is an important additional event within the complex geological history that takes place prior to the clímax of the pre-Andean orogeny in the middle Eocene.

Key words: Dpto. de Santander, ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology, Eocene, Paja Formation.

¹ Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, Colombia (UIS). A. A. 678.
Correo electrónico: lcmantil@uis.edu.co

² Instituto de Geociencias, Universidad de São Paulo (USP), Brasil.

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio (FIGURA 1) se localiza en la Cordillera Oriental de Colombia, entre los municipios Bolívar, Vélez y Guavatá, al sur de la Provincia de Vélez, Dpto. de Santander.

La litología presente en este sector se corresponde con las descritas por Morales (1958) y Gómez (1976), entre otros, para las formaciones sedimentarias del Cretácico inferior Cumbre, Rosablanca, Paja y Tablazo (FIGURA 1). Estas unidades, consideradas material de relleno de la subcuenca Tablazo-Magdalena, se componen mayoritariamente de sedimentos siliciclásticos, carbonatos, lodolitas y margas, respectivamente, los cuales alcanzan un espesor de unos 1000 metros.

Recientemente, Mantilla *et al.* (2003a y b) reportan dos fallas cabalgantes de dirección aproximada N35E, denominadas Jabonera y el Guamito (FIGURA 1), las cuales al parecer sirvieron de canal de escape de fluidos calientes profundos. En este contexto, se formó una red de venas hidrotermales rellenas de calcita, agregados de mica verde, clorita, esfalerita y ocasionalmente pirobitumen brechificado y pirita. Estas venas, relacionadas espacialmente con la falla El Guamito, cortan perpendicularmente la estratificación de las rocas de la Formación Paja, la cual se compone en este sector mayoritariamente de lodolitas calcáreas muy orgánicas. Estas venas alcanzan un espesor de hasta 0.15 m y por lo general se confinan a una banda de unos 2 km. de ancha que sigue el trazo de la falla.

Una descripción más detallada sobre la geología del área de estudio se presenta en Mantilla *et al.* (2003a).

El objetivo del presente estudio es caracterizar la composición mineralógica y química de los agregados de mica verde y establecer la edad de su formación mediante geocronología ^{40}Ar - ^{39}Ar .

METODOLOGÍA

Los estudios mineralógicos del material de relleno de venas se realizaron utilizando un microscopio óptico NIKON, tipo Labophot-pol, de la Escuela de Geología de la UIS; un microscopio electrónico de barrido LEO-1450 VP, con sonda tipo EDAX DX Prime del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y; un difractor

Rigaku modelo D-MAX-IIIB de la Escuela de Química de la UIS. Para el análisis de la composición química de las micas verdes, se utilizó un espectrómetro ICP-MS marca Perkín Elmer ELAN 6000, del ICP.

Las dataciones ^{40}Ar - ^{39}Ar se llevaron a cabo en el Centro de Pesquisas Geocronológicas del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo (Brasil). Para tal fin, se utilizó un sistema de extracción y purificación automático, compuesto de: una columna óptica, donde se observa la extracción del gas de la muestra, a medida que se calienta por incrementos (*step heating*) mediante un láser iónico de Ar de 6W continuo (el cual emite ondas con longitudes en el rango 480-540 nm) y un sistema de purificación del gas de alto vacío, construido en acero limpio y equipado con trampas criogénicas y dos capturadores C-50 Fe-Ti-Zr SAES.

El espectrómetro de masas utilizado, tipo MAP-215-50, es un analizador electrostático sectorial de 50 mm 90°, de 15 cm. de radio y geometría extendida, equipado con una fuente tipo Nier.

Vasconcelos *et al.* (2002), presenta más detalladamente las características específicas de este laboratorio, en cuanto a su instrumentación, procedimiento analítico y calibración de los equipos.

RESULTADOS

Características del material analizado y su localización

Las venas hidrotermales anteriormente descritas (Ver FIGURAS 4a, b y c, en Mantilla *et al.*, 2003a), fueron estudiadas inicialmente con ayuda de microscopía óptica, con especial énfasis en sus agregados de mica verde, debido a su importancia en el presente trabajo. Este material se caracteriza, entre otros rasgos, por su anisotropía, bajo relieve y colores de interferencia variables de primer orden. El estudio de estos agregados mediante difracción de rayos X (DRX) permitió establecer la composición mineralógica de estos agregados, como formados mayoritariamente por moscovita, clorita rica en Fe y cuarzo.

Exploraciones al SEM de estos agregados micáceos, permitieron apreciar mejor la morfología hojosa típica de estos filosilicatos y corroborar la presencia de las

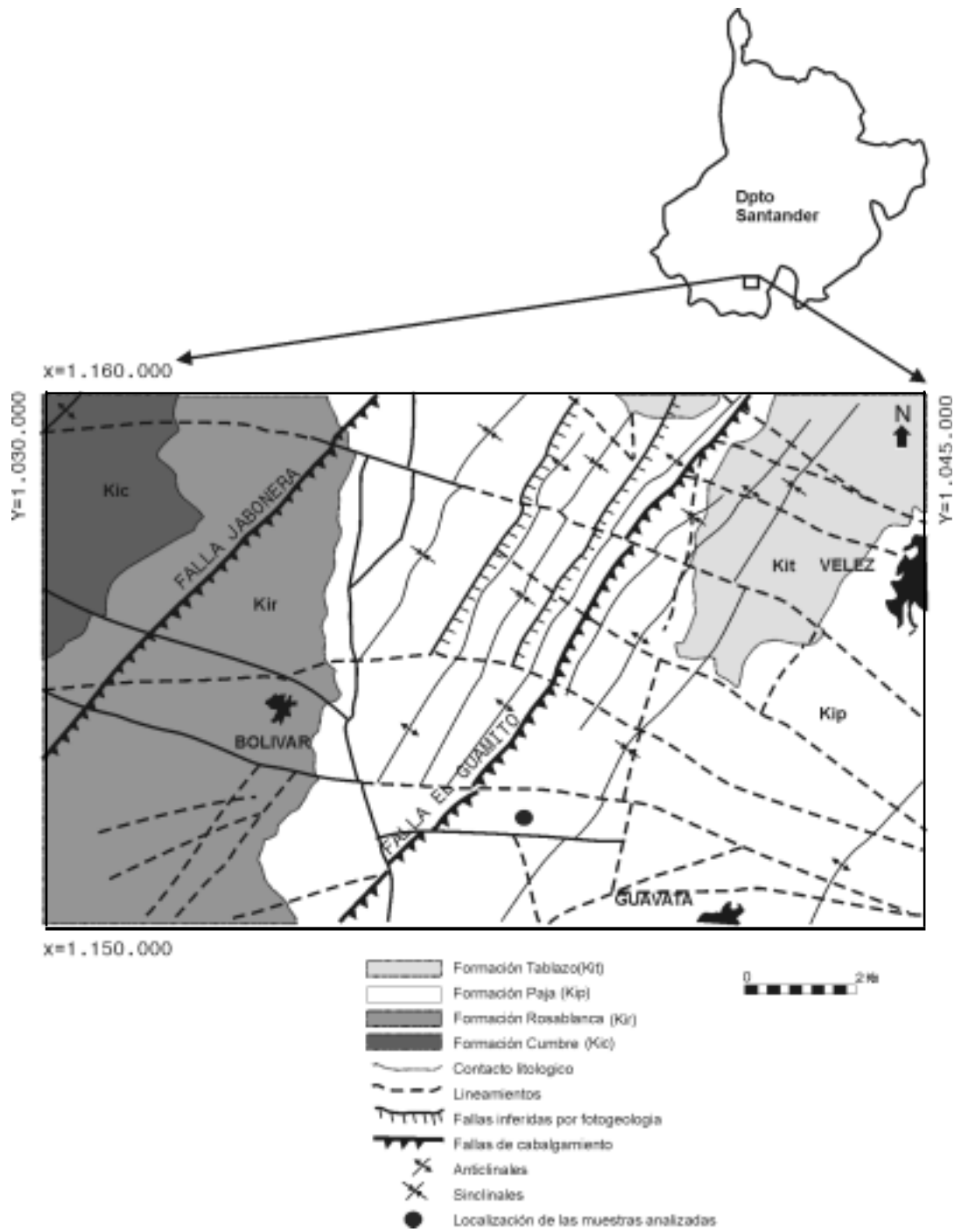


FIGURA 1. Localización del punto de toma de muestras, seleccionadas para análisis mediante geocronología ^{40}Ar - ^{39}Ar .

fases minerales identificadas previamente con DRX. La composición química promedia de estos agregados micáceos determinada con ayuda del microanalizador arrojó los siguientes valores (datos semicuantitativos en % en peso): $\text{MgO} = 2.22$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 40.46$; $\text{SiO}_2 = 54.46$ y $\text{K}_2\text{O} = 2.86$. El contenido máximo de K_2O , determinado por esta vía, alcanzó en algunos casos 5.5 % en peso.

Un análisis químico de este material (TABLA 1), mediante ICP-MS, mostró el alto contenido de V (6450 ppm) en estas micas, el cual parece ser el responsable del color verde manzana que presentan estos agregados. Los altos valores de calcio (1.43 % peso), se interpretan como debido a impurezas de calcita (paragenéticamente relacionada) en el material analizado. Igualmente resulta muy llamativo el alto contenido de Zn (1363 ppm), Na (1578 ppm) y Li (143 ppm).

La presencia de Na en la composición química de estos agregados podría estar indicando la existencia de fenómenos de sustitución de K_2O por Na_2O , lo que sería mineralógicamente equivalente a un proceso de paragonitización de la moscovita. No obstante, se requiere un estudio más detallado, debido a que los espectros de DRX realizados no muestran los picos de la moscovita con hombros que pudieran ser indicadores de la presencia de este tipo de intercrecimiento.

Por lo anterior, la única fase mineral con potasio presente en los agregados de mica verde es la moscovita. Este material por presentarse como un agregado muy fino, entre otras características, es denominado en este trabajo como una variedad tipo sericita

La presencia de esta fase mineral con potasio, en cantidades suficientes y fácil de separar manualmente, fue aprovechada para datar directamente la edad de su formación (paralelamente la edad del relleno de la vena) mediante el método ^{40}Ar - ^{39}Ar . La presencia de clorita y cuarzo junto a este material no representa ningún problema para esta tarea, debido a que estos minerales no contienen K.

Con este propósito, se dataron muestras del sector de la Quebrada la Trampa, localizada a unos 4 Km al NW del Municipio de Guavatá, en la Vereda Casiquito, en un punto donde existe un túnel abandonado (FIGURA 1).

TABLA 1. Composición química elemental de los agregados de mica potásica, analizados mediante ICP-MS.

Elemento	Unidad	Resultado
Si	%	52
Al	%	19.52
Mg	%	2.85
K	%	2.3
Ca	%	1.43
Li	ppm	143.07
Be	ppm	0.72
Cr	ppm	57
Mn	ppm	22.84
Na	ppm	1578
V	ppm	6450
Zn	ppm	1363
U	ppb	68.12

Dos muestras de agregados de mica verde, con aproximadamente 2.0 mm (LC-1 y JN-2), separados de las venas antes descritas, fueron utilizados para su correspondiente análisis geocronológico.

Geocronología Ar-Ar

Consideraciones previas

El método de datación de rocas ^{40}Ar - ^{39}Ar es una variable del método K-Ar, el cual se fundamenta en el proceso de desintegración del ^{40}K en ^{40}Ca y ^{40}Ar , y cuyo periodo de semi-desintegración es de aproximadamente 1250 Ma. Así, para los métodos K-Ar, y Ar-Ar, conocida la constante de desintegración y las cantidades precisas de los isótopos padre e hijo, es posible calcular la edad.

Para datar una muestra mediante ^{40}Ar - ^{39}Ar , esta debe ser irradiada en un reactor nuclear para transformar una proporción muy pequeña de átomos ^{39}K en ^{39}Ar , a través de la interacción con neutrones. Seguidamente, la muestra es calentada en un sistema de alto vacío, y el argón extraído en varias etapas sucesivas es purificado y analizado isotópicamente en un espectrómetro de masas. La relación ^{40}Ar - $^{39}\text{Ar}_K$ (El ^{40}Ar es el argón radiogénico y el $^{39}\text{Ar}_K$ es el ^{39}Ar producido del ^{39}K durante la irradiación), es proporcional a la relación ^{40}Ar - ^{40}K en la muestra y por lo tanto, es proporcional a la edad (Faure, 1986; Dickin, 1995; McDougall y Harrison, 1999, entre otros).

Las relaciones ^{40}Ar - ^{39}Ar obtenidas en cada fracción de gas extraído se proyectan en un diagrama

denominado 'espectro de edades' (Tipo FIGURAS 2 y 3). Cuando en estos diagramas las fracciones de gas quedan contiguas (donde no se detecta diferencia de edad entre estas, teniendo en cuenta el error experimental) y llegan a representar más del 50% del total de ^{40}Ar liberado de la muestra, en un nivel de confianza del 95%, se obtiene una *edad plateau* (Según Fleck *et al.*, 1977), la cual tiene normalmente un significado físico y también geológico.

Datos ^{40}Ar - ^{39}Ar

Los datos analíticos obtenidos para las distintas fracciones de argón se resumen en la TABLA 2 y los correspondientes espectros de edades se presentan en las FIGURAS 2 y 3. Cada una de las dos muestras (con números de laboratorio 1770 y 1771), fue sometida a tres determinaciones Ar-Ar independientes (01, 02 y 03), para verificar la posible concordancia de los resultados y para poder presentar una interpretación más segura. Además, había que tener en cuenta que el material analizado era heterogéneo, debido a que estaba formado por un agregado de granos muy pequeños de sericita, e incluía impurezas de clorita y posiblemente calcita. En ese tipo de material, durante la irradiación en el reactor, y por el tamaño de los granos, es probable que hayan existido movimientos de *recoil* de los átomos de argón 39, modificando las relaciones ^{40}Ar - ^{39}Ar medidas posteriormente en el espectrómetro.

En la TABLA 2 se verifica que los incrementos de temperatura fueron obtenidos con aumentos de potencia de la fuente láser entre 0.3-0.4 y 5.2 w, cuando en todos los casos hubo fusión total de las muestras. El volumen total de gas producido en los análisis fue del orden de 1×10^{-14} moles de argón 40, muy superior a los blancos del sistema.

De la observación de los espectros de edades (FIGURAS 2 y 3), se verifica que, con la sola excepción del análisis 1770-03, las etapas de alta temperatura presentaron relaciones ^{40}Ar - ^{39}Ar irregulares, posiblemente provocadas por los efectos *recoil* ya mencionados. Además, en las etapas de baja temperatura las edades aparentes resultaron normalmente inferiores a las demás, lo que puede ser un efecto de liberación de argón de materiales con menor retención, presentes como componentes de los agregados impuros de sericita.

Las edades aparentes obtenidas en las etapas consideradas irregulares no fueron tenidas en cuenta en los cálculos de edad, que corresponden a los de los ideogramas incluidos en las FIGURAS 2 y 3. Solamente las etapas que corresponden a *plateau* y también a *pseudo-plateau*, fueron incorporadas en los cálculos, y fueron indicadas tanto en los ideogramas, como en la TABLA 2.

De la muestra 1770 (LC-1) se extrajeron y analizaron diez fracciones de argón en cada una de las tres determinaciones realizadas. Los análisis 01 y 03 indicaron edades *plateau*, y el análisis 02 una edad *pseudo-plateau*. Los resultados fueron muy similares, y la edad ideograma final resultó ser de 54.4 ± 1.1 Ma. Es interesante verificar que también las edades integradas, considerando la totalidad de gas extraído de las muestras, fueron muy parecidas a las edades ideograma. Estas últimas serían equivalentes a edades K-Ar si se hubieran datado por este método.

Las tres muestras 1771 (JN-2) fueron sometidas igualmente a procesos de calentamiento incremental, donde se extrajeron y analizaron once fracciones de argón en el primer proceso, y ocho en cada uno de los dos procesos restantes. Los análisis 01 y 03 presentaron edades *plateau* parecidas con las de la muestra 1770, y el ideograma resultante, con 54.0 ± 1.3 Ma, fue concordante, dentro de los límites de error experimental. El espectro de edades de la muestra 02 presentó irregularidades mayores, y valores de edad aparente, incluso para la edad integrada, muy inferiores a las demás. Este análisis no fue considerado en las interpretaciones.

Los dos ideogramas elaborados para el conjunto de las anteriores secuencias de calentamiento incremental (FIGURAS 2 y 3), permitieron establecer una edad promedio de formación de estas sericitas de 54.2 ± 1.2 Ma. Esta edad se corresponde con un evento del inicio del Eoceno (Ypresiense), según la tabla del tiempo geológico del Servicio Geológico Americano.

Con esto puede concluirse que las sericitas estudiadas han sido formadas durante un evento hidrotermal importante que ha percolado las rocas sedimentarias de la Formación Paja, en el inicio del Eoceno hace aproximadamente 54 Ma. (Ypresiense).

Geocronología ⁴⁰Ar-³⁹Ar de venas hidrotermales
en rocas sedimentarias de la Formación Paja (Cretácico Inferior) al sur del Dpto. de Santander (Cordillera Oriental, Colombia)

TABLA 2. Datos analíticos de geocronología ⁴⁰Ar-³⁹Ar, obtenidos mediante el método de calentamiento incremental para las muestras LC-1 y JN-2.

Sample	Material	Lab#	Laser (W)	40/39	38/39	37/39	36/39	40 ³⁹	% Rad	Ar40 (moles)	Age (Ma)	± (Ma)
LC-1	sericita	1770-01A	0,3	7,63423	0,06126	0,72604	0,05788	-	-	1,03E-16	-	-
		1770-01B	0,6	10,21714	0,00839	0,00000	0,00093	9,94141	97,3	2,22E-15	48,0	0,9
		1770-01C	0,9	11,06151	0,01187	0,00000	-0,00060	11,23903	101,6	5,08E-15	54,2	0,4
		1770-01D	1,2	11,60172	0,01233	0,00235	0,00150	11,15857	96,2	5,02E-15	53,8	0,4
		1770-01E	1,6	12,30439	0,00677	0,00000	-0,00079	12,53576	101,9	1,29E-15	60,3	2,6
		1770-01F	2,0	11,65580	0,02474	0,02251	0,01489	7,25806	62,3	3,74E-16	35,2	4,5
		1770-01G	2,6	12,42453	0,00670	0,00000	-0,00069	12,62692	101,6	2,63E-15	60,8	0,8
		1770-01H	3,2	15,17918	-0,09334	0,00000	-0,07398	37,03149	244,0	8,12E-17	-	-
		1770-01I	4,2	15,50308	-0,23785	0,00000	-0,12902	53,61178	345,8	4,61E-17	-	-
		1770-01J	5,2	16,46489	-0,25615	0,00000	-0,12811	54,30305	329,8	3,92E-17	-	-
1770-02A	0,4	8,57840	-0,01027	0,00000	-0,01586	13,26164	154,6	3,36E-16	63,8	3,9		
1770-02B	0,7	9,92661	0,00813	0,00000	-0,00141	10,34318	104,2	3,33E-15	49,9	0,7		
1770-02C	1,0	10,57850	0,01199	0,00519	0,00068	10,37391	98,1	6,59E-15	50,1	0,3		
1770-02D	1,4	11,21735	0,01216	0,01193	0,00098	10,92911	97,4	1,11E-14	52,7	0,3		
1770-02E	1,8	11,59696	0,01150	0,01587	0,00117	11,25190	97,0	7,65E-15	54,3	0,3		
1770-02F	2,4	11,90286	0,00771	0,01151	-0,00159	12,37313	104,0	1,93E-15	59,6	1,2		
1770-02G	3,0	12,03616	0,01115	0,00831	0,00037	11,92545	99,1	5,12E-15	57,5	0,6		
1770-02H	3,8	12,96689	0,02076	0,00000	0,00534	11,38858	87,8	5,98E-16	54,9	3,7		
1770-02I	4,6	13,82412	-0,04137	0,00000	-0,03733	24,85010	-	8,98E-17	-	-		
1770-02J	5,2	11,96623	0,06379	0,45294	0,01563	7,38768	61,7	5,84E-17	-	-		
1770-03A	0,4	6,56534	18,42333	0,00000	-4,07692	1212,757	-	-	-	-		
1770-03B	0,7	0,28809	0,64622	4,94312	0,79038	-	-	-	-	-		
1770-03C	1,0	10,91611	-1,57728	0,00000	-2,15403	647,341	-	-	4,17E-18	-		
1770-03D	1,3	9,62654	-0,05172	0,03916	0,03685	-	-	-	4,60E-17	-		
1770-03E	1,9	9,02204	0,02723	0,37705	0,02481	1,71997	19,1	3,96E-16	8,4	3,5		
1770-03F	2,8	10,41991	0,01148	0,00000	-0,00012	10,45453	100,3	3,63E-15	50,5	0,5		
1770-03G	3,8	11,09735	0,01216	0,02993	0,00215	10,46528	94,3	6,30E-15	50,5	0,4		
1770-03H	5,2	11,67134	0,01230	0,00203	0,00055	11,50957	98,6	1,76E-14	55,5	0,2		
1770-03I	3,0	12,19389	0,01283	0,02867	0,00178	11,66982	95,7	7,22E-15	56,2	0,4		
1770-03J	6,0	37,69704	0,67199	11,42308	0,79600	-	-	-	4,35E-17	-		

TABLA 2. Continuación

Sample	Material	Lab#	Laser (W)	40/39	38/39	37/39	36/39	40*/39	% Rad	Ar40 (mols)	Age (Ma)	± (Ma)
JN-2	sefícita	1771-01A	0,3	8,53742	0,02921	0,41197	0,01144	5,19072	60,8	1,12E-16	25,2	11,8
		1771-01B	0,6	10,36174	0,00959	0,00000	-0,00129	10,74309	103,7	1,99E-15	51,8	0,9
		1771-01C	0,9	11,16133	0,00937	0,00000	-0,00033	11,25764	100,9	3,59E-15	54,3	0,6
		1771-01D	1,2	11,22163	0,01050	0,09996	-0,00032	11,32387	100,9	5,97E-15	54,6	0,4
		1771-01E	1,6	11,90456	0,01029	0,01483	-0,00096	12,18948	102,4	4,77E-15	58,7	0,5
		1771-01F	2,0	12,22073	0,00379	0,00000	-0,01429	16,44330	134,6	5,68E-16	78,7	3,4
		1771-01G	2,5	12,26969	0,00391	0,00000	-0,00591	14,01449	114,2	1,29E-15	67,3	1,4
		1771-01H	3,2	13,12625	0,00378	0,06348	-0,00850	15,64144	119,2	3,06E-16	75,0	6,2
		1771-01I	3,9	14,94675	-0,26722	0,00000	-0,15518	60,78199	-	5,49E-17	-	-
		1771-01J	4,7	13,13034	-0,10206	0,00000	-0,07020	33,86469	-	2,06E-17	-	-
		1771-01K	5,2	16,61057	-0,42588	0,00000	-0,34549	118,6725	-	3,94E-17	-	-
		1771-02A	0,4	8,44667	0,03030	0,30306	0,03133	-	-	2,97E-16	-	-
		1771-02B	0,7	9,42341	0,01435	0,05757	0,00300	8,54054	90,6	3,04E-15	41,3	0,5
		1771-02C	1,0	10,60193	0,01194	0,00936	0,00070	10,39378	98,0	5,38E-15	50,2	0,3
		1771-02D	1,3	11,14775	0,01416	0,06568	0,00386	10,01072	89,8	3,86E-15	48,4	0,5
		1771-02E	1,7	11,56441	0,00785	0,00000	-0,00124	11,92856	103,2	1,19E-15	57,5	1,6
		1771-02F	2,8	12,14510	0,00976	0,00000	0,00000	12,14365	100,0	2,64E-15	58,5	1,0
		1771-02G	3,8	12,80430	0,07294	0,63470	0,10124	-	-	6,13E-17	-	-
		1771-02H	5,2	11,31030	0,06871	2,33857	0,04937	-	-	2,72E-17	-	-
		1771-03A	0,4	9,56752	0,01331	0,00000	-0,00064	9,75745	102,0	2,68E-16	47,1	5,6
		1771-03B	0,7	10,70284	0,01111	0,00047	0,00023	10,63359	99,4	2,96E-15	51,3	0,7
		1771-03C	1,0	11,32049	0,01147	0,00524	0,00115	10,98075	97,0	5,33E-15	53,0	0,4
		1771-03D	1,3	11,95154	0,01143	0,00000	0,00155	11,49163	96,2	5,22E-15	55,4	0,4
		1771-03E	1,7	12,89713	0,01721	0,14180	0,01210	9,33186	72,4	9,41E-16	45,1	2,3
		1771-03F	2,8	12,52299	0,01330	0,01091	0,00073	12,30807	98,3	2,72E-15	59,3	0,8
		1771-03G	3,8	12,25427	0,07436	0,00000	0,04892	-	-	8,51E-17	-	-
		1771-03H	5,2	10,62722	0,13939	1,03468	0,12631	-	-	5,80E-17	-	-

Implicaciones regionales

Con el propósito de contextualizar las edades ^{40}Ar - ^{39}Ar correspondientes al Eoceno temprano, a continuación se describen algunos aspectos del ambiente geológico de esta época, los cuales han sido documentados fundamentalmente a partir del análisis del registro sedimentario e ígneo.

Según Villamil (1999), la posición del eje central de la depositación sobre la corteza continental de Colombia ha migrado del oeste al este desde el Cretácico tardío al Oligoceno, siendo cada vez menor el espacio disponible para la acomodación de sedimentos. En este sentido, señala el autor que el eje central de la deposición durante el Eoceno Temprano se localizaba a lo largo del actual piedemonte oriental de la Cordillera Oriental, en un espacio para la acomodación de sedimentos más restringido. Esta tendencia culminó con el desarrollo de una incorformidad (hiato) regional en el Eoceno medio, que marca el clímax de la orogenia pre-Andina.

El registro sedimentario correspondiente a la deposición que debía estar teniendo lugar durante el Eoceno temprano involucra parcial o totalmente: a) La Formación Hoyon, aflorante en el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental; b) Formación Bogotá, aflorante en la parte central de la Cordillera Oriental; c) Socha Superior, parte norte de la Cordillera Oriental; d) Formación La Paz, en el valle inferior del Magdalena y; e) Formación Mirador, en el sector del Catatumbo. El material de estas unidades es por lo general de tipo siliciclástico de grano grueso y su deposición tuvo lugar en los espacios cada vez más restringidos que fueron quedando de la cuenca tipo *foreland*, formada al este de la Cordillera Central a consecuencia del levantamiento progresivo de esta última (van der Hammen, 1961; Cooper *et al.*, 1995; Pulham *et al.*, 1997; Villamil, 1999; Branquet *et al.*, 2002).

La actividad ígnea del Eoceno temprano se manifiesta en el emplazamiento de plutones postectónicos de composición tonalítica a granodiorítica de edad entre 50 y 56 Ma, localizados sobre el flanco oriental y parte del occidental de la Cordillera Central, denominados el Batolito de El Bosque, los stocks El Hatillo y Florencia, complejo ígneo de Córdoba y Stock de Manizales (Restrepo, 1982).

En términos del ambiente tectónico, el Eoceno temprano es considerado una época en la que tiene

lugar: a) la aproximación de los Nappes del Caribe (futuro Nappes Lara), los cuales empezaron a cargar la cuenca del Maracaibo (Villamil, 1999); b) el levantamiento y la exhumación progresiva de la Cordillera Central, y; c) la formación de cabalgamientos de vergencia oeste y de plegamientos en el Magdalena (Taboada *et al.*, 2000).

En resumen, el evento hidrotermal principal asociado a la formación de las sericitas estudiadas es un episodio más de la compleja historia geológica (entre el Maastricense y el Eoceno medio) que se registra con anterioridad al clímax de la orogenia pre-Andina (Eoceno medio). Por consiguiente, los presentes autores consideran que este episodio hidrotermal es otro tipo de respuesta a la deformación que se deriva de los procesos de acreción de terrenos oceánicos que configuraron la actual Cordillera Occidental, imponiendo esta última un estilo de evolución geológica para las Cordilleras Central y Oriental, tal como se documenta en Case *et al.* (1990), Casero *et al.* (1997), Restrepo-Pace *et al.* (1998), Aleman y Ramos (2000) y Branquet *et al.* (2002), entre otros.

Hay varios episodios hidrotermales reportados en la Cordillera Oriental entre finales del Cretácico (Maastricense o Campaniano tardío) y el Mioceno medio (Cheilletz *et al.*, 1994 y 1995; Giuliani *et al.*, 1995; Romero y Schultz, 2000; Mathur *et al.*, 2003 y; el presente trabajo). Se sugiere que estos procesos sean todos asociados por relaciones causa-efecto, visto que parecen ser muy recurrentes en el registro sedimentario que paralelamente va teniendo lugar en los depósitos o hiatos correspondientes a lo que Branquet *et al.* (2002) denominan *foreland sequences*. Esto, debido a la estrecha relación que tienen los episodios de escape de fluidos profundos y la deformación progresiva.

CONCLUSIONES

A lo largo de la falla El Guamito, en el sector de la Provincia de Vélez, se presentan venas hidrotermales rellenas mayoritariamente de calcita + agregados de mica potásica + esfalerita \pm pirobitumen brechificado \pm piritita. Las dataciones ^{40}Ar - ^{39}Ar de agregados con predominancia de sericita permitió determinar la edad del evento hidrotermal principal asociado a su formación, con edad de aproximadamente 54 Ma, correspondiente al Eoceno temprano.

Run 1770 / LC-1 / Sericita

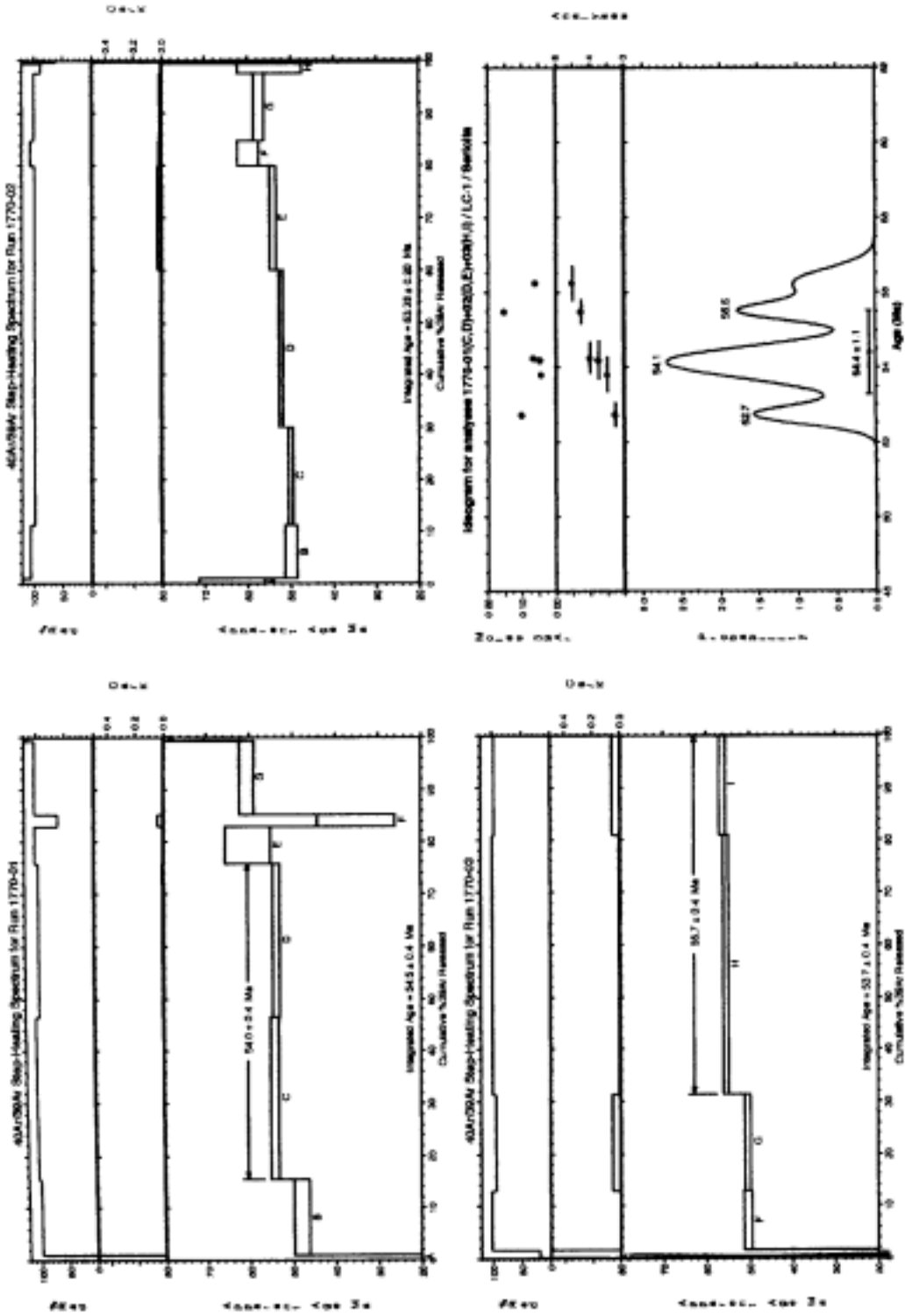


FIGURA 2. Espectros de edades ^{40}Ar - ^{39}Ar para la muestra LC-1.

Run 1771 / JN-2 / Sericita

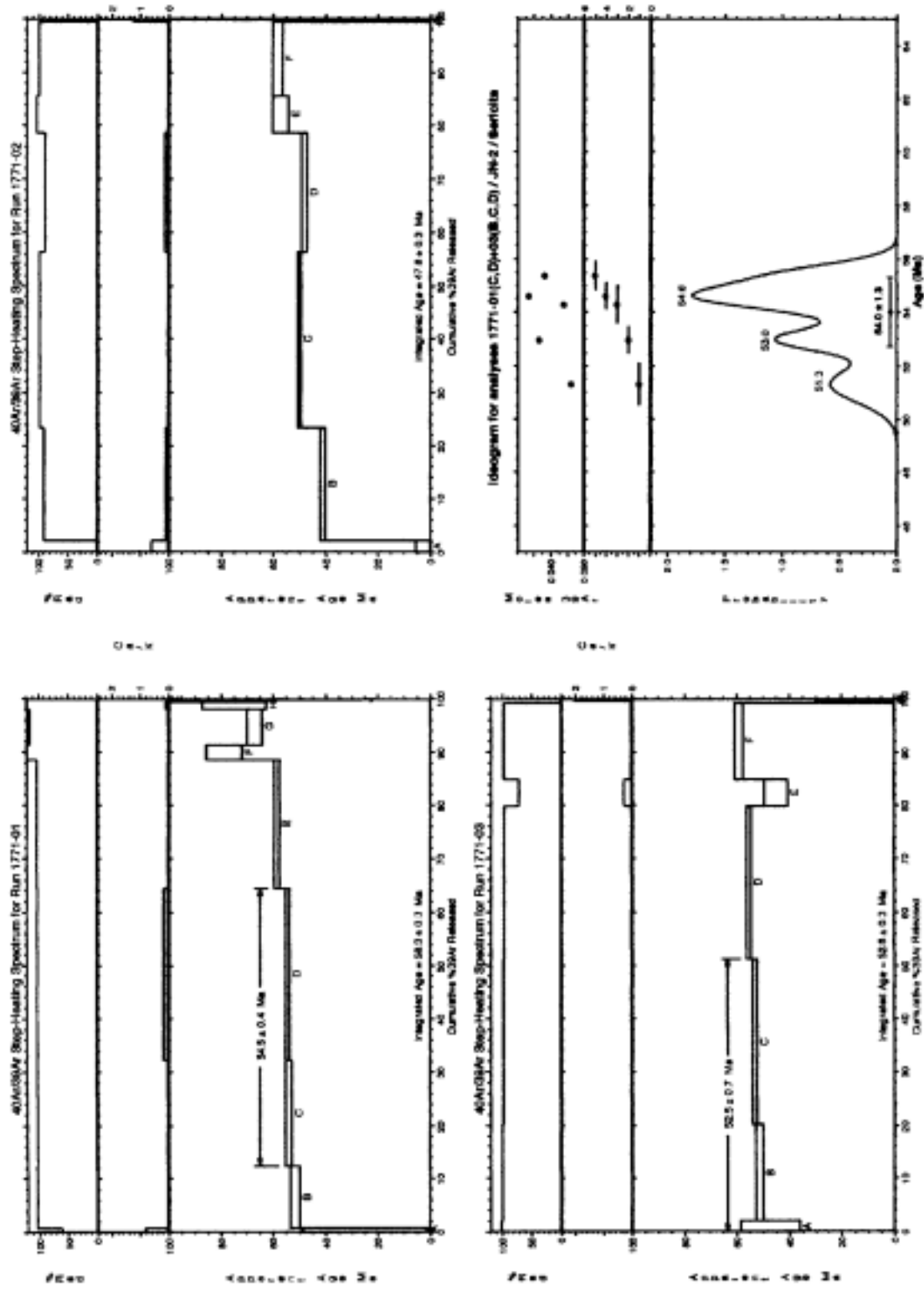


FIGURA 3. Espectros de edades ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar para la muestra JN-2.

La relación espacial entre las venas con agregados mica verde y la falla cabalgante El Guamito indica una estrecha relación entre deformación y escape de fluidos profundos. Este episodio hidrotermal-deformacional se interpreta como una respuesta a los eventos compresivos que desde el Maastricense (finales del Cretácico) afectaron la corteza continental de Colombia y que culminaron con la orogenia pre-Andina en el Eoceno medio, a consecuencia del levantamiento progresivo de la ancentral Cordillera Central. A su vez, esta última estaría conectada en causa-efecto con las colisiones y acreciones sucesivas derivadas de la interacción del borde noroeste de Sur América y las placas oceánicas Farallón y Caribe.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan un profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS), al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología 'Francisco José de Caldas' COLCIENCIAS y a la Empresa Nacional Minera Ltda MINERCOL, entidades que auspiciaron el desarrollo de este trabajo a través del proyecto de Investigación 1102-06-10940.

A los estudiantes de la Escuela de Geología de la UIS que realizaron la práctica de Campo I en el sector objeto del presente estudio, por ese entusiasmo que alimenta el amor y el compromiso con la Geología.

Asimismo, a todos los miembros del Centro de Pesquisas Geocronológicas del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Pablo (Brasil), por su colaboración con los análisis de geocronología.

REFERENCIAS

Aleman, A., Ramos, V. (2000). Northern Andes. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz F. A., Campos, D. A., (Eds): Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, pp. 453-480.

Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P., Baby, P., Laumonier, B., Giuliani, G., (2002). Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guateque-Medina area), Colombia. *Journal of South America Earth Sciences* 15, pp. 391-407.

Case, J. E., Shagam, R., Giegengack, R. F. (1990). geology of the northern Andes: an overview. *Geological Society of America Bulletin* 76, pp. 567-589.

Casero, P. Salel, J., Rossato, A. (1997). Multidisciplinary correlative evidences for polyphase geological evolution of the foot-hills of the Cordillera Oriental (Colombia), paper presented at the VI simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las cuencas sub-andinas. ACGGP, Cartagena. Colombia.

Cooper, M. B., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *A.A.P.G. Bulletin*. Vol. 79 N° 10, pp. 1421-1443.

Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G., Rodriguez, C. T. (1994). Time-Pressure and Temperature Constraints on the Formation of Colombian Emeralds: An ⁴⁰Ar/³⁹Ar Laser microprobe and Fluid Inclusion Study. *Economic Geology*, Vol. 89, pp. 361-380.

Cheilletz, A., Giuliani, G., Zimmermann, Ribeiro-Althoff, A., (1995). Ages, geochemical signatures and origin of Brazilian and Colombian emerald deposits: a magmatic versus sedimentary model. *Mineral Deposits*, Pašava, Kribek and Zak (eds), Rotterdam. pp. 569-572.

Dickin, A. P. (1995). Radiogenic isotope Geology. Cambridge University Press. U.K., 490p.

Faure, G. (1986). Principles of Isotope Geology (Segunda edición), Edit. John Wiley & Sons. 589p.

Fleck, R. J., Sutter, J. F., Elliot, D. H. (1977). Interpretation of discordant ⁴⁰Ar/³⁹Ar age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, pp. 15-32.

Giuliani, G., Cheilletz, A., Rueda, F., Féraud, G., France-Lanord, Ch. (1995). The genesis of Colombian emerald deposits: An unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. *Mineral Deposits*, Pasava, Kribek and Zak eds.

Gómez, J.A. (1977). Fotogeología de la zona Barbosa-Landázuri. *Boletín de Geología UIS*, Vol. 11, N° 25, pp. 99-106.

- Mantilla Figueroa, L. C., Cruz G. L.; Colegial G. J. (2003a). Introducción a la geología del sector Vélez-Bolívar-Guavatá (Dpto. de Santander, Colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. *Boletín de Geología UIS*, Vol. 25, No. 40.
- Mantilla Figueroa, L. C.; Nolasco García, T. (2003b). Significado de la foliación tectónica en rocas del Cretácico Inferior al sur de la provincia de Vélez (Dpto. de Santander, Colombia). *Memorias del IX Congreso Colombiano de Geología*. Medellín Julio de 2003.
- Mathur, R., Ruiz, J., Herb, P., Hahn, L., Burgath, P. (2003). Re-Os isotopes applied to epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 15, pp. 815-821.
- McDougall, I., Harrison, T. M. (1999). *Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method*. Oxford Univ. Press. 259 p.
- Morales, L. C. (1958). General geology and oil occurrence of the middle Magdalena Valley, Colombia. *Habitat of oil symp.* Tulsa. AAPG, pp. 641-645.
- Pulham, A. J., Mitchell, A., MacDonald, D., Daly, C. (1997). Reservoir modeling in Cusiana field, Llanos Foothills, Eastern Cordillera: Characterization of deeply-buried, low porosity reservoir. *Proceedings, VI Simposio Bolivariano, Exploración petrolera en las cuencas subandinas, Cartagena, Colombia, septiembre 1997*, Vol. 1, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, pp. 198-216.
- Restrepo, J. J. (1982). *Compilación de edades radiométricas de Colombia, Departamentos Andinos hasta 1982*. *Boletín de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 7-8, pp. 201-247.
- Restrepo-Pace, P. A., Colmenares, F., Higuera, C., Mayorga, M. (1998). Fold and Thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia: style, kinematics and timing constrains derived from seismic data and detailed surface mapping. *AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil, November 1998, Abstracts*, pp. 92-93.
- Romero O. F., Schultz-Güttler, R. A. (2000). Geoquímica del Rubidio-Estroncio y edad de las esmeraldas Colombianas. *Geología Colombiana* No. 25, pp. 221-239.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental Deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19, Nº 5, pp. 787-813.
- Van der Hammen. (1961). Late Cretaceous and Tertiary stratigraphy and tectogenesis of Colombian Andes. *Geologie en Mijnbouw*, 40-e Jaargang, pp. 181-188.
- Vasconcelos, P. M., Onoe, A. T., Kawashita, K., Soares, A., Texeira, W. (2002). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology at the Instituto de Geociencias, USP: Instrumentation, analytical procedures, and calibration. *Anais Acad Bras Cien.*, 74 (2), pp. 297-342.
- Villamil, T. (1999). Campanian-Miocene tectonostratigraphy, decenter evolution and basin development of Colombia and Western Venezuela. *Paleogeog. Paleoclim. Paleoecolog.*, 153, pp. 239-275.

Trabajo recibido: Marzo 9 de 2004
Trabajo aceptado: Septiembre 6 de 2004