



## Los Neises Miloníticos asociados al Batolito Antioqueño y al Complejo Cajamarca, Departamento de Antioquia, Colombia\*

MARGARET MERCADO

Grupo de Investigación en Estratigrafía.

Cra 38A # 61-21 Apto 301

Email: margaretmw@yahoo.com

MERCADO, M. (2005): Los Neises Miloníticos asociados al Batolito Antioqueño y al Complejo Cajamarca, Departamento de Antioquia, Colombia.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 29, pp. 59-72, 5 Figs., Bogotá.

### RESUMEN

En el Departamento de Antioquia, Colombia, neises miloníticos previamente denominados neises intrusivos, intrusivos néisicos o intrusivos néisicos sintectónicos se presentan junto a fallas que afectan el Batolito Antioqueño, de composición entre granodiorita, tonalita, cuarzdiorita y cuarzomonzonita, y al Complejo Cajamarca y otras unidades con metamorfismo de bajo a mediano y a alto grado. Entre otras, junto a las fallas Espíritu Santo, La Concha, Liberia, Cocorná, hay neises miloníticos que tienen, en general, la misma composición del batolito; se distinguen protomilonitas y milonitas (augen) con recristalización y neomineralización.

La no identificación de rocas de falla suele llevar a interpretaciones erróneas de la historia geológica de la zona.

Los neises miloníticos se habrían formado como consecuencia de la actividad tectónica a lo largo de las fallas que han tenido tanto movimientos inversos como de traslación probablemente desde fines del Cretácico, y que han expuesto el batolito y las rocas metamórficas, ambos de probable edad precámbrica.

La edad precámbrica del Batolito Antioqueño y de un sinnúmero de cuerpos intrusivos asignados desde el Paleozoico hasta el Cenozoico está documentada por las edades radiométricas diferentes a K/Ar y por la presencia de halos con fuerte pleocroísmo alrededor de circones en biotitas, entre otros. Las edades K/Ar documentan diferentes eventos posteriores al Precámbrico y la edad del levantamiento del batolito y demás intrusivos por procesos orogénicos. La edad precámbrica de las rocas metamórficas se presume debido a que las rocas determinadas con fósiles como paleozoicas, aun las ordovícicas, sólo presentan metamorfismo de bajo grado.

Palabras Clave: Antioquia, Colombia, complejo Cajamarca, batolito Antioqueño, Neises Miloníticos.

### ABSTRACT

In the Antioquia Department, Colombia, mylonitic gneisses previously called intrusive gneisses, gneissic intrusives or syntectonic gneissic intrusives crop out next to faults which affect the Antioquian Batholith of granodiorite, tonalite, quartzdiorite and quartzmonzonite composition, and the Cajamarca Complex and other metamorphic rocks of low to medium and to high grade metamorphism. Besides next to others, next to the Espíritu Santo, La Concha, Liberia, and Cocorná faults, mylonitic gneisses have, in general, the same composition of the Antioquian Batholith; there are protomylonites and mylonites (augen) with recrystallization and neomineralization.

Not identification of fault rocks leads to erroneous interpretation of the geological history of the area.

The mylonitic gneisses would have formed as a consequence of the tectonic activity along the faults which have had thrust and translation movements probably since the end of the Cretaceous, and which have exposed the batholith and the metamorphic rocks, both probably of Precambrian age.

The Precambrian age of the Antioquian Batholith and of a number of intrusive bodies assigned up to now from the Paleozoic to the Cenozoic is based on radiometric ages different from the K/Ar determinations and by strong pleochroic halos around zircons in biotites. The K/Ar ages document different events occurred after the Precambrian and the age of the exhumation of the batholith and the other intrusives because of orogenic processes. The metamorphic rocks are supposed to be of Precambrian age because Paleozoic fossiliferous rocks, even from the Ordovician, only are of very low metamorphic grade.

Key words: Antioquia, Colombia, Cajamarca complex, Antioquian batholith, Mylonitic gneisses.

## INTRODUCCIÓN

MENTE ET MALLEO (mente y martillo) es el lema de los geólogos. Los datos obtenidos mediante determinaciones físicas y químicas para desentrañar la historia de la Tierra son correctos, pero ¿qué significan? Todos los datos deben ser analizados e interpretados para obtener un resultado final creíble. Cada observación objetiva, cada descripción objetiva, corresponde a datos válidos; un resultado que contradice un dato válido debe ser puesto en discusión; debe haber una explicación para una contradicción.

En la Cordillera Central de Colombia, en el Departamento de Antioquia, y según lo ha compilado González (2001), afloran el Batolito Antioqueño y varios stocks que intruyen rocas metamórficas; junto a fallas regionales y en estrecha relación con las rocas intrusivas se presentan neises que han sido interpretados como intrusivos. A estas rocas sobreyacen sedimentitas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas. El batolito se postula como una intrusión somera y de edad cretácica tardía por determinaciones radiométricas K/Ar; las metamorfitas se han asumido, algunas de alto grado, como precámbricas, otras de mediano y bajo grado como paleozoicas y cretácicas. Los “neises intrusivos” se han interpretado como de edad paleozoica.

Muchas dudas resultan de los datos obtenidos de los estudios sobre el Batolito Antioqueño y las unidades de roca asociadas a él, en particular los denominados “neises intrusivos”. No parece haber compatibilidad con las características del batolito y una supuesta intrusión somera. Las dataciones K/Ar, que dan edades mínimas, no corresponderían a edades de intrusión del batolito. No se comprende el mecanismo que resulte en los “intrusivos néisicos”. No se comprende la presencia de metamorfitas de mediano a alto grado de la misma edad o más jóvenes que sedimentitas paleozoicas con metamorfismo incipiente.

Con la información disponible, se intenta dar otra explicación a la génesis y a la edad de las unidades de roca expuestas en la zona central de Antioquia. En zonas de

importante actividad tectónica como es la esquina noroccidental de Suramérica, donde desde el Jurásico han interactuado dos placas, la Suramericana y la del Pacífico, y luego desde el Cenozoico una tercera, la del Caribe, el intenso fallamiento inverso y transcurrente para acomodar el territorio a la doble y luego triple convergencia debió producir rocas con metamorfismo dinámico a lo largo de las fallas. El posterior levantamiento de la Cordillera de los Andes, de más de 10.000 metros sólo a partir del Mioceno, expuso en superficie las rocas que a profundidad estuvieron sometidas a condiciones de presión y temperatura que permitieron, junto a las fallas, la formación de rocas de falla de la zona dúctil, así como el escape de argón producto de la desintegración del potasio a temperaturas más altas que las críticas para la retención del argón en minerales y en la roca total.

Y como resultado, se propone que los “neises intrusivos” corresponderían a neises miloníticos formados junto a fallas o megafallas inversas a lo largo de las cuales se ha elevado la Cordillera de Los Andes. Y que la edad tanto de las rocas metamórficas como de las graníticas que las intruyen sería precámbrica; que las edades radiométricas jóvenes reportarían edades de exhumación o resultados debidos a pérdida de argón.

Es importante aproximarse con la mayor certeza al origen y a la edad de las rocas para desentrañar la evolución geológica de una determinada zona. No reconocer rocas de falla y no entender el significado de las dataciones radiométricas, en particular las K/Ar, llevan a interpretaciones erróneas de la historia geológica de una región.

Para sustentar la propuesta, se preparó un nuevo mapa de la zona central del Departamento de Antioquia donde aflora el Batolito Antioqueño y las rocas asociadas; se presenta la descripción de los cuerpos hecha por los autores originales y se destacan algunas características que permiten concluir su génesis y su edad; se presenta brevemente el mecanismo de formación de rocas de falla, el significado de edades radiométricas K/Ar, y, finalmente, la evolución geológica del área de acuerdo con la nueva interpretación de las rocas expuestas, su edad y su génesis.

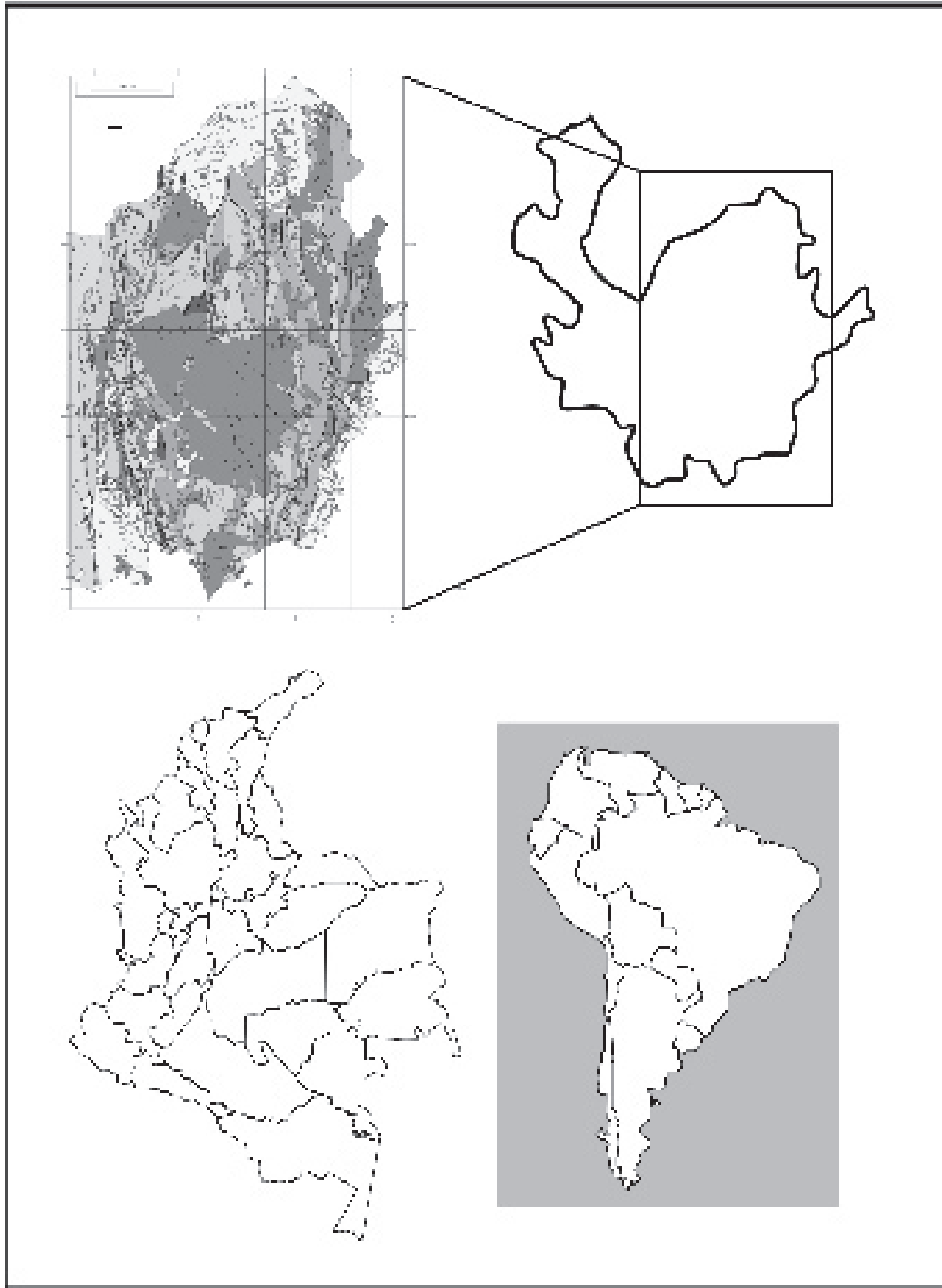


Fig. 1. Ubicación Batolito Antioqueño y rocas asociadas.

#### ANTECEDENTES

La autora del presente artículo no estudió geología en Colombia, por lo que no tiene prejuicios respecto de verdades asumidas como tales sin derecho a discusión. El avance de la ciencia se apoya en lo expresado por autores previos; mientras no se demuestre lo contrario, se considera que lo dicho es válido; pero se suele acomodar los

nuevos resultados para que calcen con lo que se asumía es lo correcto, pues sobre ello se ha construido una verdad. Hasta mediados del siglo XX, las rocas metamórficas de Colombia se asumían de edad precámbrica, o al menos muchas de ellas con certeza predevónicas. Cuando se comenzó a contar con dataciones radiométricas, en su mayoría K/Ar, los resultados llevaron a considerar algunas de ellas más jóvenes. Las rocas intrusivas encajadas en

las metamorfitas, que primero se consideraron precámbricas, y detritos de las cuales se han reportado en sedimentitas paleozoicas (Forero 1970), por determinaciones geocronológicas luego fueron asignadas al Mesozoico y hasta al Cenozoico (Tschanz et al. 1969). Los neises y otras rocas metamórficas esquistosas localizadas junto a fallas mayores, se confundieron con metamorfitas de origen regional, o se interpretaron como intrusivos.

En la Cordillera Central, en el Departamento de Antioquia, Colombia (Fig. 1), afloran neises asociados a rocas metamórficas de mediano a alto grado y a cuerpos graníticos. En menor proporción se presentan rocas básicas y ultrabásicas, sedimentarias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, y sedimentos recientes. La distribución y la descripción de estas unidades se resumen en la compilación de la geología del Departamento de Antioquia de González (2001). Algunos neises fueron descritos por Hall et al. (1972) como neises intrusivos sintectónicos y por Feininger et al. (1972) como neises intrusivos, y en el área afloran también otros cuerpos néisicos. Las rocas metamórficas se han agrupado en diferentes unidades, entre las que se describen granulitas, migmatitas, anfibolitas y esquistos. Los cuerpos graníticos son batolitos y stocks principalmente de composición intermedia a ácida, y hay menor cantidad de cuerpos intrusivos básicos.

### 3. METODOLOGÍA

A partir del mapa del Departamento de Antioquia (González 2001), en la zona correspondiente al Batolito Antioqueño y rocas de algún modo relacionadas, se reunieron las diferentes unidades de roca que al parecer de la autora son afines. El mapa geológico de la Fig. 2 es el resultado de reunir:

- 1.- Todas las rocas metamórficas de alto a mediano

y bajo grado en tres grupos: rocas metamórficas de alto grado de la unidad Granulitas y Migmatitas de El Retiro; anfibolitas del Complejo Puquí y Anfibolitas, en general, expuestas en diferentes sitios del área; esquistos de las unidades Complejo Cajamarca y Complejo Arquía.












2. Todos los intrusivos intermedios a ácidos, el Batolito Antioqueño\* (\*significa cuerpos en los que se ha descrito halos pleocróicos alrededor de circones en biotitas) y demás cuerpos granitoides, descritos en González (2001): Stock de Amagá\*, Stock de La Honda\*, Stock El Buey\*, Stock de Liborina\*, Batolito de Segovia\*, Batolito de Sonsón\*, Stock de Altavista, Stock al suroeste de Amalfi\*, Stocks de Santa Isabel\*, Stock de Yalí\*, Stock de Caracolí\*, Stock El Pescado\*, Batolito de Sabanalarga, Stock de Buriticá, Diorita de Heliconia, Batolito Quebrada Maní\*, Cúpula de La Unión\*, Batolito de Ovejas\*, Stock de Belmira\*, Stock de Tres Mundos\*, Stock de Aquitania\*, así como la Metatonalita de Puquí\*.

- 3.- Todos los neises: Neises Cuarzo Feldespáticos de San Lucas, Neis micáceo de Puquí, Neises Cuarzo Feldespáticos y Aluminicos del Complejo Cajamarca, y los Intrusivos Néisicos Sintectónicos: Samaná, Abejorral, Alto de Minas, Anorí, Cedeño, Horizontes, La Moreno, Liberia.

- 4.- Todas las rocas básicas y ultrabásicas. Ultramafitas de Romeral, Dunita de Medellín, Stock de Yarumal (gabro), Gabro de Altamira, y cuerpos menores no posibles de representar a la escala. La Diorita de Pueblito y el Gabro de Pueblito están incluidos entre los cuerpos graníticos.

- 5.- Todas las rocas sedimentarias paleozoicas, Formación La Cristalina, Metasedimentitas de Aquitania,

### LEYENDA

	<b>CENOZOICO</b>		<b>NEISES MILONÍTICOS</b>
	<b>CRETÁCICO MARINO</b>		<b>INTRUSIVOS PRECÁMBRICOS</b>
	<b>CRETÁCICO VOLCÁNICO</b>		<b>ROCAS BÁSICAS Y ULTRABÁSICAS</b>
	<b>JURÁSICO</b>		<b>COMPLEJOS CAJAMARCA Y ARQUÍA</b>
	<b>PALEOZOICO</b>		<b>ANFIBOLITAS</b>
			<b>METAMORFITAS DE ALTO GRADO</b>

Nota: Símbolos que aparecen en el mapa geológico no son significativos; lo válido son los colores de la leyenda.(Fig.2)

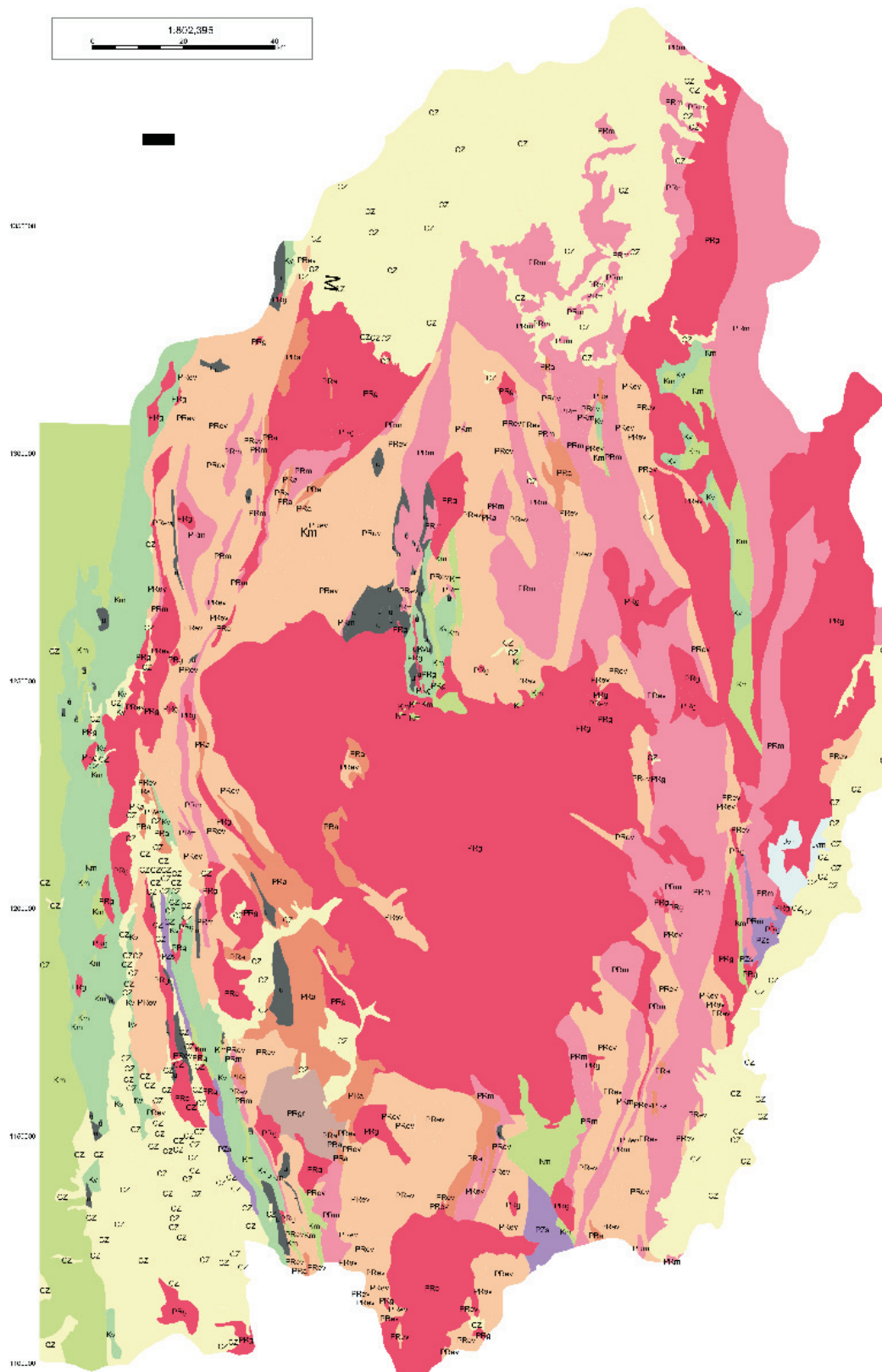


Fig. 2. Mapa geológico de la zona central del Departamento de Antioquia, Colombia. Modificado de González (2001).

Metasedimentitas de Sinifaná.

6.- Rocas volcánicas jurásicas

7.- Todas las rocas sedimentarias y volcánicas cretácicas.

8.- Y las rocas y los sedimentos del Cenozoico.

El nuevo mapa geológico del área muestra lo siguiente:

- Los intrusivos cortan sólo a las rocas metamórficas.
- En conjunto, las rocas metamórficas e intrusivas hacen parte de una franja norte sur limitada por fallas regionales (megafallas).
- Las rocas básicas y ultrabásicas tienen contactos tectónicos con las rocas adyacentes y hacen parte de la franja de metamorfitas e intrusivos referidos en el punto inmediatamente anterior.
- Las rocas néisicas se disponen a lo largo de las fallas en franjas largas y angostas.
- Las unidades paleozoicas tienen contactos tectónicos con las rocas adyacentes y, en general, se disponen en franjas limitadas por fallas.
- Las rocas cretácicas también son afloramientos angostos y alargados junto a las fallas.
- Las metamorfitas y los intrusivos sólo están cubiertos por unidades cenozoicas.

## UNIDADES DE ROCA

Del mapa obtenido del ejercicio expuesto de reunir las unidades afines, se exponen descripciones, características o comentarios significativos de las diferentes unidades de roca que contribuyen a apoyar la propuesta del presente artículo. Para mayor detalle, se sugiere recurrir a las fuentes que se citan en González (2001).

### Rocas metamórficas

Todas las unidades de rocas metamórficas se componen de rocas similares y en ellas sólo abundan relativamente más unos tipos que otros. Diferentes autores agrupan las rocas en diferentes unidades, de modo que suele ser arbitraria la separación de ellas. Todas las unidades presentan esquistos y anfibolitas, asociadas siempre con rocas néisicas, y ellas mismas también tienen características de efectos dinámicos. Cuarzitas y mármoles están intercalados con los esquistos.

La unidad Granulitas y Migmatitas de El Retiro, por ejemplo, también contiene esquistos y anfibolitas, y neises que serían miloníticos. Las migmatitas presentan, en la fracción granítica, biotita con inclusiones de circón con

halos pleocróicos fuertes. Se describe también texturas como augen, que se desarrollan en rocas de falla. Y las abundantes pertitas significan que el feldespato potásico es microclina.

Las rocas metamórficas son de bajo a mediano y a alto grado: esquistos, anfibolitas, granulitas. Las condiciones de presión y temperatura para la formación de estas rocas comprenden de 4 a 8 kbar y de 200 a 700°C, respectivamente, lo que significa que se formaron entre 10 y 30 km de profundidad (Fig. 3).

Las Granulitas y Migmatitas de El Retiro, y las Anfibolitas de Puquí han sido asignadas al Precámbrico; algunas anfibolitas también; en cambio, el Complejo Cajamarca se ha considerado paleozoico, y el Complejo Arquía, del Cretácico. En este trabajo, se propone que todas las rocas metamórficas sean del Precámbrico. En Colombia, según varias referencias citadas en INGEOMINAS (1997), las rocas paleontológicamente con certeza del Paleozoico no presentan metamorfismo o éste es de muy bajo grado. Así mismo, las rocas asignadas con certeza al Precámbrico son metamorfitas de mediano a alto grado.

Dentro del área que se trata, las rocas paleozoicas son secuencias sedimentarias con metamorfismo incipiente, y con fósiles del Ordovícico: la Formación La Cristalina, que sobreyace rocas precámbricas, y las Metasedimentitas de Aquitania; las Metasedimentitas de Sinifaná no son fosilíferas, pero se las correlaciona tentativamente con las rocas del Ordovícico por su bajo grado de metamorfismo, pero su metamorfismo puede interpretarse como más intenso que de muy bajo grado y, por estar intruido por el Stock de Amagá, es más posible que haga parte de las metamorfitas precámbricas.

### Batolito Antioqueño

El Batolito Antioqueño fue definido por Botero en la década de 1940; él y otros autores lo caracterizaron (González & Londoño 2003). El cuerpo batolítico principal y los cuerpos satélites intruyen a las metamorfitas que alcanzaron metamorfismo de bajo a mediano y alto grado. Estas unidades están cubiertas sólo por sedimentos aluviales del Cuaternario. Rocas cretácicas marinas fosilíferas afloran en franjas en contacto tectónico; el metamorfismo de contacto sobre rocas cretácicas, atribuidas al Batolito Antioqueño, probablemente se debe a intrusivos que hacen parte de las franjas con rocas cretácicas, y no parte del batolito.

Las siguientes características del Batolito Antioqueño se exponen en el trabajo de Feininger & Botero (1982).

- Composición uniforme de todo el cuerpo de cuarzodiorita o granodiorita de grano medio a grueso, masivo, hipidiomórfico granular, de textura sal y pimienta.

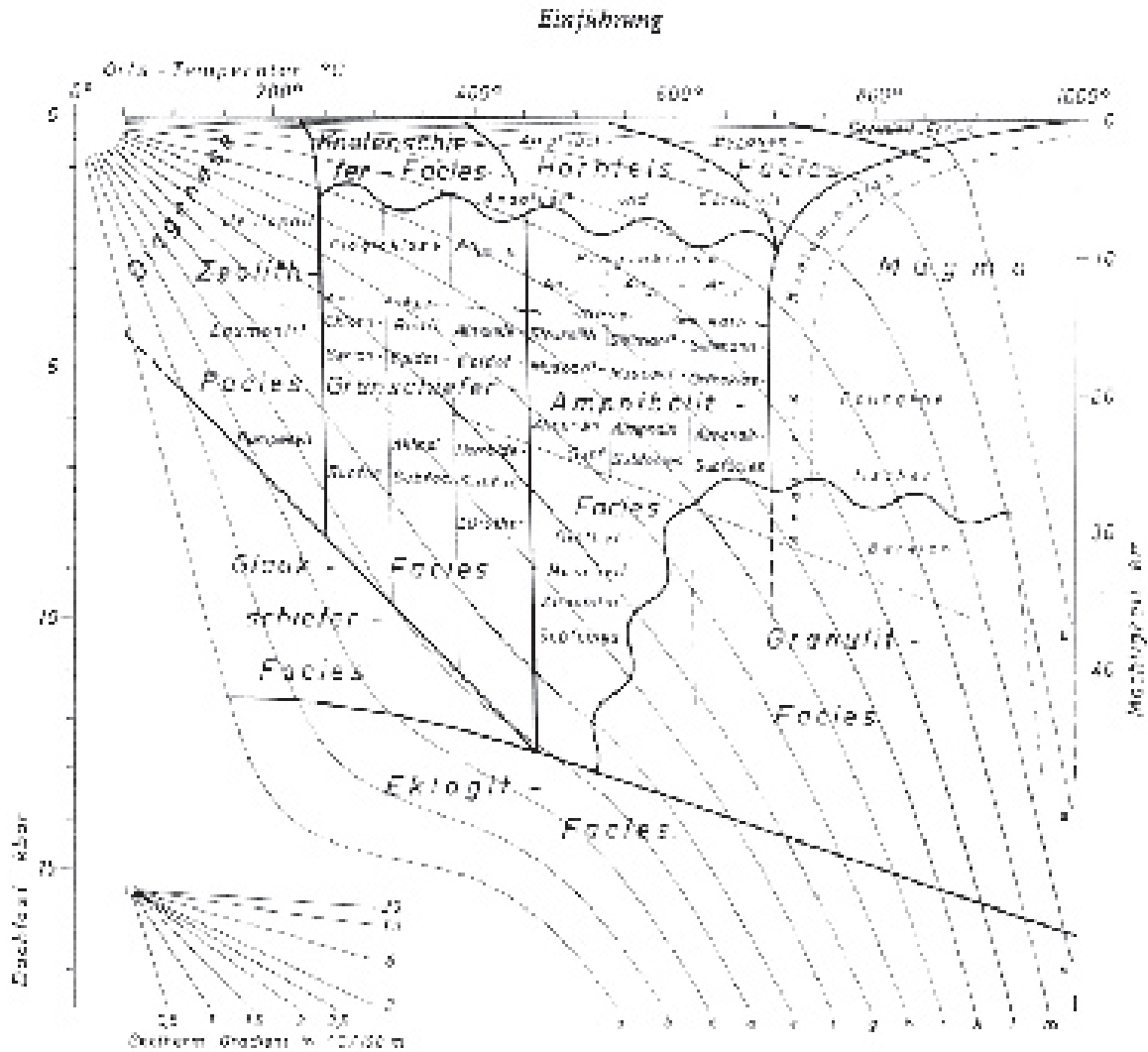


Fig. 3. Sector de condiciones de formación de las metamorfitas, que coincide con el sector de intrusión del Batolito Antioqueño. Facies metamórficas tomado de Tröger (1969). Palabras de traducción difícil del idioma alemán: Mächtigkeit (espesor), Schiefer (esquistos), Grünchiefer (esquistos verdes), Knotnschiefer (esquistos moteados), Glaukschiefer (esquistos de glaucofana), Palingenetischer Bereich (dominio de anatexis), Dachlast (presión confinante), und (y).

- Plagioclasa, promedio 48,4% (de 25,3 a 68,7), subhedral a euhedral, maclado, generalmente fresco, zonación normal, oscilatoria, fuerte, débil o ausente, inclusiones de hornblenda y clinopiroxeno en el centro. En rocas de falla, parches de plagioclasa son remplazados por feldespato potásico.
- Cuarzo, promedio 23,9% (de 12,5 a 42,0), limpio, anhedral, 80% de las muestras con extinción ondulatoria.
- Feldespato potásico, promedio 6,7% (de 0,0 a 32,1), no maclado, anhedral, ópticamente continuo como relleno de extensos espacios entre granos euhedrales de plagioclasa, biotita y hornblenda, a veces desarrollo débil de micropertita, siempre fresco, aun en rocas muy alteradas.

- Hornblenda, promedio 9,3% (de 0,0 a 27,7), prismas subhedral a euhedrales, pleocroico, a veces pardo anaranjado, cuyos análisis químicos arrojan valores de contenidos algo superiores de  $TiO_2$ , así como de la relación  $Fe_2O_3/FeO$  (que también es válida para las biotitas titaníferas, según Tröger, 1969), núcleos decolorados por clinopiroxenos convertidos en anfíboles que liberan cuarzo.
- Biotita, promedio 9,3% (de 0,0 a 28,8), subhedral a euhedral, pleocroismo fuerte, y pardo rojizo cuando coexiste con hornblenda de mayor contenido de titanio, más cloritizado que hornblenda. Dicen que en la mitad de las

biotitas hay alteraciones incoloras a amarillento pálidas, de relieve moderadamente alto y baja birrefringencia en lentes que abren y doblan el clivaje (001).

- Los minerales accesorios son apatita, magnetita, circón, y menor cantidad de esfena, epidota, piritita, calcita, alanita y prehnita. El circón, en prismas subhedrales a anhedrales, cuando incluido en biotita, característicamente está “in” acompañado (sic) de halos pleocroicos.

- Distribuidos en todo el batolito, independiente de cercanía o lejanía de los contactos, hay gabarros esféricos, lenticulares, con formas de huso, de 5 a 50 cm de largo, de grano fino, masivos, de tono oscuro, de la misma composición del batolito, excepto cuarzo.

- Facies félsicas, representadas por cinco cuerpos, muy alteradas, de granodiorita o cuarzo monzonita leucocrática, de grano medio a grueso, hipidiomórfico a xenomórfico, de tono claro, se componen de: cuarzo sin extinción ondulosa; plagioclasa tipo oligoclasa que grada a andesina sódica, zonada y maclada, con mirmequitas en el contacto con feldespato potásico; feldespato potásico en granos compactos anhedrales a diferencia de aquellos de las facies normales en donde rellena espacios, micropertítico y con macla de enrejado (microclina), bordes de albita. Biotita como único mineral máfico, parcialmente cloritizado, con inclusiones de circones rodeados de fuertes halos pleocroicos. Menor cantidad de accesorios. Frecuentemente hay granate y moscovita, no conocidos en la facies normal.

- Facies gabroicas están representadas por siete cuerpos cuyos contactos con el batolito no se observan.

- Hay un número de stocks, la mayoría petrográficamente muy diferentes al batolito, y algunos prácticamente iguales a la facies normal del batolito; éstos se consideran cosanguíneos con él.

- Diques, los hay como apófisis en las rocas encajantes y como diques que cortan el batolito mismo. Los diques en rocas no calcáreas (Complejo Cajamarca) tienen composiciones similares al batolito. Los diques en las rocas calcáreas (del Cretácico Inferior y Superior) no tienen composiciones similares al batolito (por lo que el batolito no estaría intruyendo estas rocas).

- La mayoría de los diques se suponen por presencia de rodados de composiciones diferentes al batolito.

#### 4.2.1 Interpretación de algunas características petrográficas del Batolito Antioqueño

El cuarzo se presenta con extinción ondulatoria. Sometido a esfuerzos, el cuarzo se fractura internamente, lo que se evidencia en extinción ondulosa. Este rasgo nunca se pierde; se requiere fusión y posterior recristalización para tener cuarzo de extinción continua. Esto significa que las rocas fueron sometidas a esfuerzos importantes.

La microclina es un feldespato potásico triclinico casi puro, con los tetraedros de Al y Si completamente ordenados, que cristaliza desde 300 a 500°C y a presiones de unos 5 kbar, que corresponde a profundidades de 15 a 20 km. La presencia de microclina apunta a la intrusión en niveles similares a los en que se producen rocas metamórficas de mediano a alto grado (Fig. 3). Granitoides resultado de intrusiones someras presentan ortoclasa; vulcanitas presentan sanidina. La sanidina es monoclinica de tetraedros de Al y Si totalmente desordenados, y la ortoclasa es monoclinica de tetraedros de ordenamiento intermedio entre los otros dos feldespatos potásicos.

Las pertitas se forman por la disolución de feldespato sódico en la microclina al bajar la temperatura de 300°C. La ortoclasa no tiene pertitas; puede presentar micropertitas por disolución al bajar la temperatura de 660°C. Los feldespatos potásicos de alta temperatura muestran textura criptopertítica sólo observable por rayos X. En granitoides, las pertitas no se convierten en microclina, como se sugiere en algunas descripciones de los cuerpos intrusivos asociados al Batolito Antioqueño.

La plagioclasa es fresca. Esta característica del mineral más abundante de la roca permite que la roca sea resistente a la erosión, y que se destaque topográficamente. En general, los intrusivos antiguos son muy resistentes a la erosión y hacen parte de macizos de altitud. El Batolito Antioqueño alcanza más de 3.000 msnm.

El titanio es un elemento litófilo e incompatible con el manto, debido a sus características atómicas, de modo que migró a la corteza desde principios de la diferenciación de la Tierra.

El  $Ti^{+4}$  tiene radio iónico 0,64 Å. El  $Ti^{+3}$ , radio iónico 0,69 Å. La  $Si^{+4}$  tiene radio iónico 0,41 Å, de modo que titanio no puede remplazar a sílice en los silicatos. El  $Fe^{+3}$  tiene radio iónico 0,64. El  $Al^{+3}$  tiene radio iónico 0,50 Å. El  $Ti^{+3}$  puede remplazar  $Fe^{+3}$  ó  $Al^{+3}$ .

Como el  $Ti^{+4}$  no puede remplazar  $Si^{+4}$ , en rocas básicas este ion forma óxidos propios (rutilo:  $Ti^{+4}O_2$ ) o en combinación con hierro: ilmenita ( $Fe^{+2}Ti^{+4}O_3$ ) y titanomagnetita:  $Fe^{+2}(Ti^{+4}, Fe^{+3})_2O_4$ .

A medida que avanza la diferenciación magmática, a mayor disponibilidad de titanio, tanto  $Ti^{+4}$  como  $Ti^{+3}$ , más posibilidades de su introducción en los minerales formadores de roca. A mayor cociente  $Fe^{+3}/Fe^{+2}$ , mayor cantidad de Ti en un determinado mineral. Así se presenta  $Ti^{+3}$  en anfíboles: kaersutita, titanohornblenda o anfíbol basáltico; en biotita, donde aumenta el tono rojizo. En magmatitas, el rutilo ( $Ti^{+4}O_2$ ) es producto de desmezcla o cloritización de biotita con contenido de titanio. También forma el silicato esfena o titanita:  $Ca^{+2}Ti^{+4}SiO_5$ . El cuarzo azul en granitos néisicos es debido a inclusiones de titanio (rutilo, sagenita, titanita).



Halos pleocróicos. Circón, monazita, xenotima, ortita (alanita), titanita (esfena) y wolframita, a veces apatito o rutilo, como inclusiones en biotita, tienen halos pleocróicos causados por emisiones de partículas a por desintegración de U o Th contenido en esos minerales. Rocas postríasicas, si acaso, sólo tienen halos embrionarios. Sólo uraninita, un potente emisor de rayos  $\alpha$ , produce halos pleocróicos en rocas postríasicas. Halos pleocróicos fuertes ocurren en rocas inalteradas del Paleozoico y del Precámbrico. A temperaturas  $>500^{\circ}\text{C}$  desaparecen completamente los halos (Tröger 1969, Faure 1986).

Los halos pleocróicos fuertes descritos en las biotitas alrededor de circones indican edad anterior al Cámbrico.

Los stocks y otros batolitos que afloran en el área que ocupa el Batolito Antioqueño, las rocas metamórficas y los neises, son similares al batolito en composición, características petrográficas y relaciones de contacto.

Se describen algunos cuerpos de rocas cretácicas fosilíferas dispuestas en franjas largas y angostas de dirección aproximada norte sur, algunas de las cuales, además de los contactos de falla laterales, presentan, dentro de las franjas, contactos intrusivos con metamorfismo de contacto. Éste ha sido atribuido al Batolito Antioqueño, pero considerando que los diques en las rocas cretácicas son diferentes en composición a los diques que intruyen a las rocas metamórficas asociadas al Batolito Antioqueño, es más probable que las rocas sedimentarias cretácicas estén intruidas por magmatitas más jóvenes que afloran junto con ellas en las franjas. Se requiere estudios de campo más detallados, debido a que se han distinguido muchos cuerpos en algunas áreas más accesibles y se caracterizan otros cuerpos con muy poca información. Para el Batolito Antioqueño se describen diferentes facies, algunas de las cuales son menos resistentes a la erosión; es probable que éstas correspondan a intrusivos más jóvenes, pues los intrusivos precámbricos asociados con las rocas metamórficas son muy resistentes a la erosión y se destacan topográficamente. Lo que se ha considerado el Batolito Antioqueño con seguridad incluye porciones o cuerpos antiguos, precámbricos, y cuerpos más jóvenes que pueden ser tanto intrusivos como aflorantes junto a fallas inversas.

De lo expuesto, en este artículo se propone que el Batolito Antioqueño intruyó a profundidades de 15 a 20 km, no a profundidades someras que pudieran afectar rocas sedimentarias cretácicas. Además, las dimensiones del batolito no son propias de magmatitas de intrusión somera, inclusive, los grandes volúmenes sugieren que se haya formado a partir de anatexis a mayores profundidades y que el magma formado haya migrado a niveles algo menos profundos; hay que recordar la presencia de migmatitas asociadas a las rocas metamórficas de mayor grado. El batolito intruye a las metamorfitas; apófisis y diques en

ellas son de composición del batolito (los diques en rocas cretácicas NO son de composición del batolito). Se ha descrito metamorfismo de contacto en las metamorfitas del Complejo Cajamarca. Los neises de la misma composición del batolito y que gradan a éste, como se explicará enseguida, serían neises miloníticos desarrollados a lo largo de las fallas regionales a lo largo de las cuales se ha elevado el basamento. Estos neises arrojan hasta edades precámbricas.

Antes de presentar la discusión acerca de la edad del Batolito Antioqueño, se explica brevemente el significado de las dataciones radiométricas K/Ar. Las edades radiométricas K/Ar entregan edades mínimas. Las edades K/Ar se basan en la desintegración del potasio para producir argón, un gas noble que no forma compuestos y que queda atrapado en la estructura cristalina o en la roca total. A temperaturas por sobre los  $300^{\circ}\text{C}$  el argón no puede ser retenido por los minerales ni por la roca y migra hacia la superficie hasta llegar eventualmente a la atmósfera. De acuerdo con temperaturas críticas para diferentes minerales que contienen potasio, se determina la edad mínima desde un momento de enfriamiento, o un momento de recalentamiento. Para un cuerpo magmático, pueden indicar edades de enfriamiento, de cristalización de un cuerpo magmático si éste ha cristalizado a niveles superiores de la corteza en donde las temperaturas por la gradiente geotérmica no superen los  $300^{\circ}\text{C}$ , lo cual ocurre por sobre unos 15 a 10 km de profundidad. Si el cuerpo magmático ha cristalizado y enfriado a mayor profundidad, y, por lo tanto, a mayores temperaturas por el gradiente térmico, las edades radiométricas K/Ar indican el momento de exhumación por sobre una profundidad de 15 a 10 km. También reportan eventos que involucran aumento de temperatura en las zonas superiores de la corteza.

La edad cretácica hasta ahora atribuida al batolito se ha basado tanto en dataciones K/Ar del cuerpo mismo, como de cuerpos a los que intruye; las edades K/Ar son edades mínimas. También se asumía que intruía rocas cretácicas, lo cual no se comparte en este artículo de acuerdo con lo discutido. Algunas dataciones Rb/Sr sin interpretar son del Paleozoico (Faure 1978). Dada su estrecha relación con las metamorfitas que se asignan acá al Precámbrico, por la presencia de halos pleocróicos fuertes alrededor de circones en las biotitas, las que también se describen en las Migmatitas de El Retiro, y por la estrecha relación con los "neises intrusivos" que se han atribuido al Paleozoico, pero que reportan edades hasta precámbricas, en este artículo se asigna el Batolito Antioqueño al Precámbrico.

Como las edades K/Ar recopiladas por Feininger & Botero (1982) para el Batolito Antioqueño no son muy dispersas, y corresponden también a muestras de un stock y de una facies félsica, y considerando los más de 10.000 metros de elevación de la Cordillera Central, fácilmente

pueden interpretarse como edades de exhumación, es decir, reportarían la edad del inicio del levantamiento del batolito hacia profundidades menores de unos 10 a 15 km.

Neises miloníticos

Milonitas

Antes de describir los “neises intrusivos” de Hall et al. (1972) y Feininger et al. (1972), y para comprender las descripciones que ellos hacen, se expone lo siguiente. Las rocas en las profundidades de la Corteza están sometidas a la presión litostática y a la gradiente geotérmica. Como las rocas no son compresibles, al verse sometidas adicionalmente a presiones de convergencia de placas, esa presión se resuelve en deformaciones y aumento de temperatura; primero se producen modificaciones a nivel de los cristales de la roca, y cuando las transformaciones de flujo plástico interno de cristales no son capaces de absorber la presión lateral, se generan falla inversas a lo largo de las cuales se elevan bloques y en el continente crecen montañas por orogénesis. En la zona dúctil, el aumento de temperatura puede alcanzar valores que producen transformaciones metamórficas y hasta funden parcialmente las rocas para producir migmatitas, anatexia parcial. Las figs. 4 y 5 de Snoke et al. (1998) muestran los campos de formación de los diferentes tipos de rocas de falla.

Según Snoke et al. (1998), de 10 a 15 km de profundidad la deformación es frágil a semifrágil. La presión confinante no es suficiente para inhibir apertura de fracturas. La temperatura no es suficiente para activar procesos termales competitivos. La mayoría de las rocas ya tienen abundantes microfracturas, vacíos y otros defectos. Las fallas suelen aprovechar debilidades preexistentes. A profundidades someras se produce brecha de falla inconsolidada de grano fino. A profundidades algo mayores se producen cataclasis cohesivas (consolidadas, coherentes, ligadas). Ambas de fragmentos angulares de todos los tamaños. Estos procesos se producen a temperaturas de hasta 250 a 350°C.

En la corteza media a inferior, a temperaturas superiores a los 300°C, está la zona de deformación dúctil, donde se presentan esfuerzos continuos en el tiempo y de distribución homogénea. En esta zona se producen milonitas mediante los mecanismos de deformación de “arrastre por dislocación” y “cristaloplásticos”. El resultado son rocas bandeadas, porfiroblásticas como resultado de la combinación de esfuerzos que tienden a dislocar y de recuperación por recristalización. Los minerales recristalizados en estas condiciones tienen orientaciones cristalográficas preferentes que se pueden observar ópticamente; aún si hay rotación de minerales, la recuperación por recristalización permite que se mantenga esta orientación preferente.

A profundidades intermedias y a no muy altas temperaturas, hay “arrastre o reptación por difusión” acompañado de “deslizamiento de contacto entre granos”, que ocurre a nivel de átomos. Hay transferencia de material átomo por átomo para cambio en la forma de los minerales para acomodarse al esfuerzo, y la roca mantiene un volumen constante sin producción de espacios vacíos, ya que el deslizamiento entre los diferentes minerales no es por fricción mecánica. Esto es más efectivo en rocas de grano fino, lo cual implica deslizamiento de los contactos para que no haya traslape de minerales ni queden vacíos; en estos casos no existen orientaciones cristalográficas preferentes.

Se requiere mayores temperaturas absolutas para comportamiento cristaloplástico en rocas intermedias a máficas y ultramáficas, que en rocas cuarzofeldespáticas, y en zonas de bajo flujo calórico (cratones antiguos), se observa ruptura sísmica en la corteza inferior, e incluso en el Manto superior (Snocke et al. 1998).

Más allá de la zona dúctil, el aumento de la temperatura puede alcanzar valores que producen transformaciones metamórficas y fusión parcial para producir migmatitas, anatexia o magma.

Fallas y megafallas

Las fallas o sistemas de falla que limitan los bloques que constituyen los ramales de la Cordillera de los Andes han tenido desplazamientos verticales de muchos miles de metros. La Falla Santa Marta - Bucaramanga, 12.000 m de desplazamiento vertical desde Mioceno tardío (Tschanz et al. 1974). La Falla Oca, por lo menos 8.000 m (Mercado 2003). La Cordillera Oriental se ha elevado mínimo 13.000 m (Fabre 1984). La Cordillera Occidental, de 4.000 m de altura, ha debido elevarse mínimo 8.000 m, sin tener en cuenta la intensa erosión debido al clima imperante en el pasado geológico reciente, si rocas que la constituyen se depositaron a unos 4.000 m de profundidad en el océano.

¿En qué sitio de la Cordillera de Los Andes no habría fallas y, por lo tanto, rocas de fallas? Toda esta cordillera es un enjambre de fallas y las rocas necesariamente deben mostrar el fenómeno.

Rocas de falla, esquistos dinámicos, han sido reconocidos en algunos sitios de Colombia asociados al basamento precámbrico: en Santander (Gloria Rodríguez, comunicación escrita), en la Alta Guajira (Mercado 2003).

En general, asociada a las fallas hay gran actividad sísmica, pues a lo largo de ellas intervienen rocas de composición intermedia a básica, pero las fallas que controlan el bloque del que hace parte el Batolito Antioqueño son asísmicas; el deslizamiento a lo largo de los planos de estas fallas profundas es estable como se esperaría debido a la fricción entre rocas cuarzo feldespáticas.

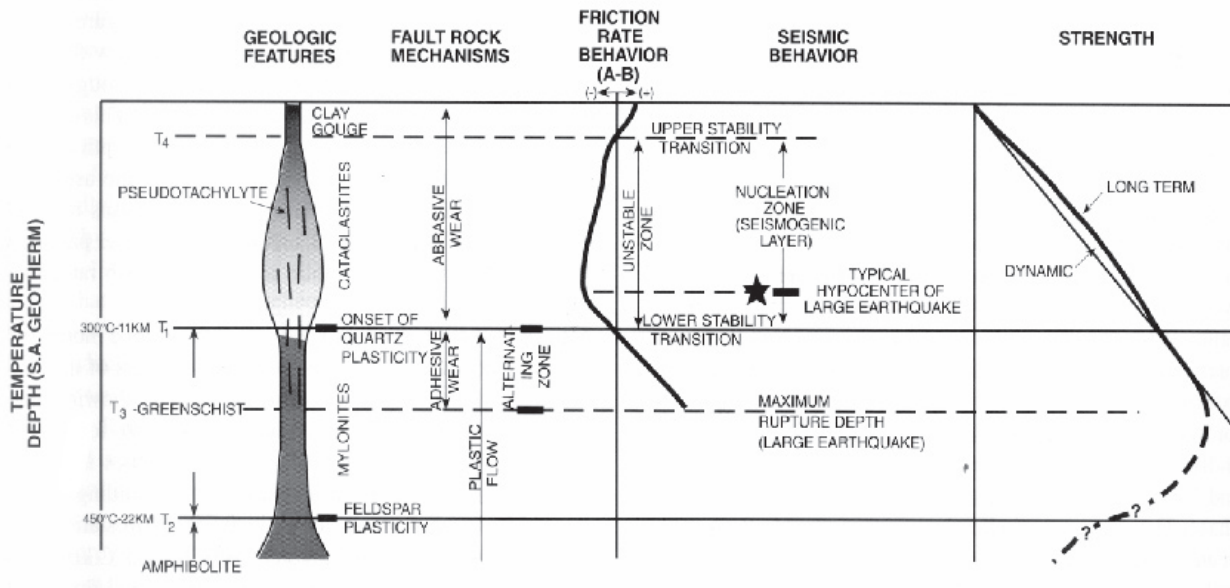


Fig. 4. Modelo sinóptico de zona de falla. Tomado de Snocke et al. (1998)

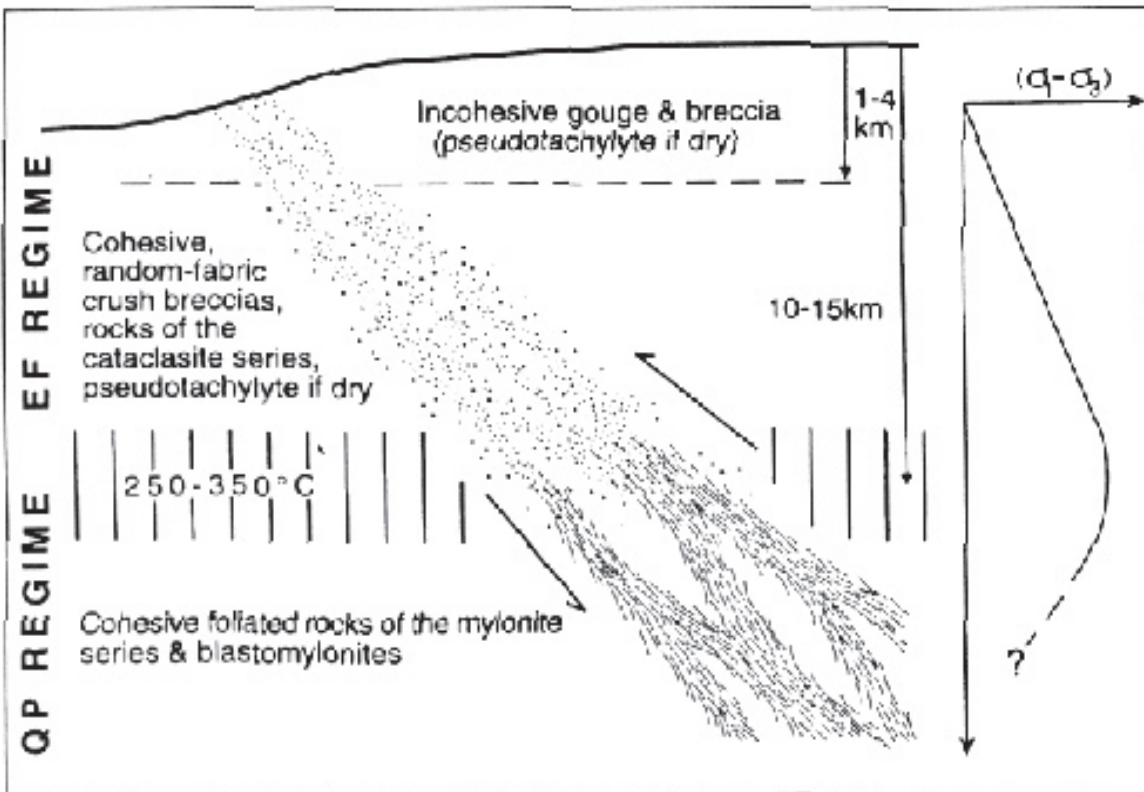


Fig. 5. Zonas de deformación de rocas de falla en zonas de cizalla. Tomado de Snocke et al. (1998)

#### “Neises intrusivos”

Los neises de Hall et al. (1972, p. 19-22), neises feldespáticos (sur de Toledo a b-3 y 9 km a 600-800 m de ancho), augen neis (24 km x 1-3 km; 22 km x 300-1.000 m) y neises cataclásticos al sur de Ituango (23 km x 250-600 m) (del Grupo Valdivia), son todos cuerpos muy angostos y muy alargados a lo largo de fallas. Las descripciones son típicas de rocas de falla. Se tienen evidencias de metamorfismo retrógrado, que seguramente se debe a levantamiento, a descompresión confinante.

Los neises intrusivos sintectónicos de Hall et al. (1972, p.40-44), neis porfiroblástico-adamelítico (55 km x 9 km máximo), neis tonalítico cataclástico (forma de cuña estrecha) y neis porfiroblástico (15 km x 400 m), son también cuerpos angostos y alargados, están junto a fallas mayores y sus descripciones también son de rocas de falla. El feldespato potásico enigmático, por presentarse en megacrístales que invaden y rellenan todo el campo, ellos no saben interpretarlo, pero se puede interpretar como cristalización por efectos de recrystalización en zona de deformación dúctil en rocas de falla.

Neises intrusivos de Feininger et al. (1972, p.74-78), tres (3) cuerpos: oeste; central (30 km x menos de 3 km); este (más de 60 km x menos de 1 km). Contienen también megacrístales de feldespato potásico, circón con halos pleocroicos en las biotitas. Se atribuye la deformación “posiblemente” a protoclasis, pero se describe textura de mortero. Se dice que la roca encajante son migmatitas. Que no se conoce sitios donde corten a las rocas cretácicas. En detalle, la descripción de los neises por Feininger et al. (1972), dice textualmente que son “fino a grueso-granular y de casi masivo a esquistoso; los minerales esenciales son plagioclasa (generalmente oligoclasa), cuarzo, microclina, biotita y moscovita. Gran parte de la plagioclasa se encuentra en megacrístales subhedrales a anhedrales, redondeados, de 5 a 20 mm de ancho dándole al neis un aspecto porfirítico” y presentan una fotografía donde se observa claramente la textura. Se expresa que “la composición de la roca varía entre cuarzodiorita y cuarzo monzonita”. Luego, indican que los neises intrusivos muestran deformación y atribuyen esto “posiblemente como resultado de protoclasis” que “se manifiesta por la extinción ondulatoria del cuarzo y las micas flexionadas” y que “la plagioclasa está doblada y microfallada y se ha desarrollado una textura de mortero alrededor de los granos de cuarzo y microclina”. También refieren que uno de los cuerpos néisicos “es el más cizallado y parte de las rocas finogranulares y esquistosas con planos de foliación de lustre sedoso están rodeados por lentes de rocas de grano más grueso y menos cizallados dándole al conjunto una textura augen”. Enseguida describen que “los neises intrusivos tienen textura metamórfica en sección delgada

y solamente en unos pocos afloramientos parecen rocas ígneas”, pero que “las evidencias de un origen intrusivo son muchas.” El análisis de este texto indica claramente que se trata de neises miloníticos formados a partir de las rocas del Batolito Antioqueño; las estructuras de flujo dan la textura néisica, las plagioclasas como megacrístales redondeados dan la textura augen, las rocas finogranulares y esquistosas son milonitas sometidas a efectos dinámicos más intensos.

El cuerpo Neis de Samaná (González 2003), es un buen ejemplo representativo de los neises en general. Se describe, entre otros, que los neises gradan de rocas con foliación que va desapareciendo hasta presentar texturas netamente ígneas.

Según (Hall et al. 1972), la edad de los neises es estratigráficamente precretácica y radiométricamente pretriásica. Feininger et al. (1972) indican que la edad de los “neises intrusivos” no se conoce con certeza, que son más jóvenes que las metamorfitas y más antiguos que el Batolito Antioqueño, y probablemente más antiguos que las rocas del Albiano - Aptiano, ya que no se conoce sitio donde las corten. Las edades radiométricas recopiladas por González (2001) para diferentes cuerpos néisicos abarcan edades desde 1.531+330 hasta 88 + 12 Ma, y aunque la mayoría caen en el Precámbrico, en esa compilación se asigna estos neises al Paleozoico. Acá se considera que los neises son de la misma edad de las rocas intrusivas, es decir, del Precámbrico, pues los neises serían miloníticos a partir de las rocas de Batolito Antioqueño y demás cuerpos magmáticos relacionados a él. También se observa halos pleocroicos alrededor de circónes en biotitas.

#### HISTORIA GEOLÓGICA

Al postular una edad precámbrica para el basamento de las cordilleras Central y Oriental, la historia geológica y la evolución de estas zonas necesariamente es muy diferente a la aceptada tradicionalmente; no se participa acá de la idea de terrenos alóctonos, ni de eventos magmáticos jurásicos y cretácicos de las magnitudes que se han sugerido, ni eventos fanerozoicos que produjeran rocas metamórficas. Se postula que los terrenos en Colombia son autóctonos, a excepción de la Cordillera Occidental y la Serranía de Baudó; que las megafallas limitan porciones que por las sucesivas orogenias del Paleógeno y luego la Orogenia Andina, han emergido desde profundidad.

Durante el Proterozoico el actual territorio colombiano, en la zona de la Orinoquia y la Amazonia, y el basamento de las cordilleras Oriental y Central, sufría procesos que contribuían al crecimiento continental alrededor del Escudo de La Guayana. Sucesivos eventos de conformación continental, erosión, levantamiento, subsidencia, orogé-

nesis, intrusiones, volcanismo, llevó a que hacia finales del Precámbrico la porción del continente que hace parte de Colombia fuera una plataforma continental - marina de basamento metamórfico e ígneo, con porciones de rocas básicas y ultrabásicas.

Durante el Paleozóico se depositaron sobre la plataforma secuencias sedimentarias relativamente delgadas que nunca sufrieron más que un leve metamorfismo.

Durante la apertura del Atlántico durante el Jurásico, esta zona también habría sufrido procesos de "rifting" que no progresaron, pero que alcanzaron a depositar secuencias volcanoclásticas sobre secuencias triásicas continentales; y probablemente hacia el océano, el freno de la deriva oceánica debido a ese "rifting" habría resultado en una gran acumulación de material volcánico en la dorsal, que luego migró hacia el continente y más tarde, hacia el Paleoceno, se adosó a él para constituir la Cordillera Occidental.

La zona occidental de la placa suramericana constituyó una plataforma en subsidencia en la que se mantuvo un ambiente marino hasta fines del Cretácico, con acumulación de secuencias marinas que pudieron alcanzar 10.000 m de espesor en el extremo occidental, que se acuñaba hacia el oriente; en la Amazonia, cerca al borde de la cordillera el espesor disminuye a 1.300 m (Núñez 2003).

La sedimentación marina cesó hacia el Paleoceno, cuando se adosó la Cordillera Occidental al continente y una nueva zona de subducción se creó más al oeste. Repetidos pulsos orogénicos iniciados hacia finales del Cretácico alzaron sucesivamente el borde occidental de Colombia a lo largo de extensas y profundas megafallas, junto a las cuales se produjeron rocas de falla; a profundidad, en la zona dúctil, se alcanzaron condiciones para la formación de neises miloníticos. La edad del comienzo de este alzamiento está documentada por las edades K/Ar del Cretácico tardío del Batolito Antioqueño. Rocas que se encontraban a grandes profundidades dentro de la corteza fueron expuestas a la erosión en relativo corto tiempo. Las secuencias sedimentarias cretácicas, de unos 10.000 m de espesor, y, a veces, las triásicas y jurásicas, dispuestas sobre el basamento metamórfico y granítico se erodaron o fueron involucradas a lo largo de las fallas y afectadas por metamorfismo dinámico. Ocurrieron diferentes pulsos orogénicos separados por episodios de intensa erosión y peneplanización. El levantamiento total sobrepasa con creces los 13.000 metros en la Cordillera Central en el área que se trata.

La Cordillera de Los Andes es un enjambre de fallas que afectan a todas las rocas. En la zona andina ¿qué rocas podrían no estar afectadas por metamorfismo dinámico? No reconocerlas lleva a interpretaciones erróneas de la historia geológica de una zona.

## REFERENCIAS

- FABRE, A. (1984): La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario.- *Geol. Norandina*, 8:49-61; 21-27. Bogotá.
- FAURE, G. (1986): *Principles of Isotope Geology*.- John Wiley & Sons, 2a ed. 589 p. New York.
- \_\_\_\_\_ (1978): Estudio geocronológico por el método Rb/Sr de los batolitos de la Cordillera Central. Segunda parte del informe anual 1977 de la misión Colombia.- *Minatone Colombia*, inéd., 12 p. Bogotá.
- FEININGER, T. & BOTERO, G. (1982): The Antioquian Batholith, Colombia.- *INGEOMINAS, Publ. Esp.*, 12:1-50. Bogotá.
- FEININGER, T.; BARRERO, D. & CASTRO, N. (1972): Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona II-B).- *INGEOMINAS, Bol. Geol.*, 20(2):1-173. Bogotá.
- FORERO, A. (1970): Estratigrafía del Precretácico en el flanco occidental de la Serranía de Perijá.- *U. Nal., Geol. Col.*, (7):7-78. Bogotá.
- GONZÁLEZ, H. (2001): Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria explicativa y mapa.- *INGEOMINAS*, 240 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_ (2003): Neis de Samaná. Catálogo de Unidades Litoestratigráficas de Colombia.- *INGEOMINAS*, 19 p. Bogotá.
- GONZÁLEZ, H. & LONDOÑO, A. C. (2003): Batolito Antioqueño. Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia.- *INGEOMINAS*, 16 p. Bogotá.
- HALL, R.; ÁLVAREZ, J.; RICO, H. & VÁSQUEZ, H. (1972): Geología de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-A). *Ingeominas, Bol. Geol.*, 20(1):1-85. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1997): Mapa Atlas Geológico Digital de Colombia. Versión 1.0.- *Memoria Técnica*. 252 p.
- MERCADO, M. (2003): Geología del Departamento de La Guajira. Escala 1:250.000. Memoria explicativa y mapa.- *INGEOMINAS*, 90 p. Bogotá.
- NÚÑEZ, A. (2003): Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila Narño y Putumayo. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa, 263 p.- *INGEOMINAS*. Bogotá.

- SNOCKE, A. W.; TULLIS, J. & TODD, V. R. (1998): Fault-related rocks. A photographic Atlas.- Princeton University Press, 617 p. New Jersey.
- TRÖGER, W. E. (1969): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Teil 2 Textband, 822 p. Mit Beiträge von Hans Ulrich Bambauer, Otto Braitsch, Franz Taborszky und Hans Dieter Trochim.- E. Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung. Stuttgart.
- TSCHANZ, C. M.; JIMENO, A. & CRUZ, J. (1969): Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area. Preliminary report. Escala 1:200.000.- Ingeominas, Informe 1829, 288 p. Bogotá.
- TSCHANZ, C.; MARVIN, R.; CRUZ, J.; MEHNERT, H. & CEBULA, G. (1974): Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia.- Geol. Soc. Am. Bull., 85(2):273-284.

Manuscrito recibido, Junio de 2004; aceptado, Noviembre de 2004

\* El resumen de este trabajo fue aceptado al IX Congreso Colombiano de Geología celebrado en Medellín, Colombia, entre el 30 de julio y el 1 de agosto de 2003. Debido a que la autora no se inscribió al evento, el poster no fue expuesto. Los interesados en conocer el poster pueden solicitarlo a la autora al correo electrónico: [margaretmw@yahoo.com](mailto:margaretmw@yahoo.com).