

Petrography, geochemistry and geochronology of metamorphic rocks outcropping in San Francisco Putumayo and the Palermo-San Luis road associated with the La Cocha - River Tellez and Aleluya complexes

Gilberto Zapata García ^a, Gabriel Rodríguez García ^a & María Isabel Arango Mejía ^a

^a Servicio Geológico Colombiano sede Medellín, Colombia. gzapata@sgc.gov.co, grodriguez@sgc.gov.co, Isabelara84@hotmail.com

Received: June 24th, 2016. Received in revised form: November 3rd, 2016. Accepted: December 20th, 2016.

Abstract

The La Cocha – Río Tellez Migmatitic Complex includes a set of metamorphic rocks, mainly migmatites, schists, gneisses and amphibolites, that lie in faulted contact with the Cuarzomonzonita de Sombrerillo Unit and cretaceous sedimentary rocks. The 163.6 ± 4.7 Ma U-Pb age in zircon is assumed as the age of metamorphism of the La Cocha-Río Tellez Migmatitic Complex, it was obtained in a quartz-feldspar schist that outcrops in the municipality of San Francisco-Putumayo; the ages of 194.4 ± 2.0 Ma, 218.8 Ma and 229.8 Ma correspond to inherited ages. The Aleluya Complex encompasses marbles, meta-sandstones, quartzites, and migmatites. U-Pb ages in zircon obtained for two granulite samples collected on the Palermo-San Luis (Huila) road, are separated into three populations of data with ages: 169.1 ± 2.7 Ma age of crystallization and inherited ages of 194.6 $\pm$ 3.2 Ma, 212.5, 218.6 and 235.5 Ma.

Keywords: La Cocha - Río Tellez Migmatitic Complex; Aleluya Complex Cordillera Central de Colombia.

Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Tellez y Aleluya

Resumen

El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Tellez comprende un conjunto de rocas metamórficas: migmatitas, esquistos, neises y anfibolitas, en contacto fallado con la Cuarzomonzonita de Sombrerillo y rocas sedimentarias cretácicas. Se asume como la edad del metamorfismo del Complejo Migmatítico La Cocha-Río Tellez la edad U-Pb en circones de 163.6 ± 4.7 Ma, obtenida en un esquistos cuarzo feldespático que aflora en el municipio de San Francisco-Putumayo, las edades de 194.4 ± 2.0 Ma, 218.8 Ma y 229.8 Ma, corresponden a edades heredadas. El Complejo Aleluya: mármoles, metaareniscas, cuarcitas y migmatitas. Las edades U-Pb de dos muestras de granulitas colectadas sobre la vía Palermo-San Luis (Huila), se separan en tres poblaciones de datos con edades: 169.1 ± 2.7 Ma edad de cristalización, edades heredadas de 194.6 $\pm$ 3.2 Ma, 212.5, 218.6 y 235.5 Ma. Los dos complejos están limitados por fallas asociadas a los sistemas de Chusma y Algeciras, zona de convergencia de los terrenos Chibcha y Tahamí.

Palabras clave: Complejo Migmatítico La Cocha - Río Tellez; Complejo Aleluya, Cordillera Central de Colombia.

1. Introducción

Trabajos adelantados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante la ejecución del proyecto

Magmatismo Jurásico del Valle Superior del Magdalena (VSM) y la cuenca del Putumayo, se fecharon rocas metamórficas asociadas a los complejos Aleluya y La Cocha-Río Tellez, localizados geográficamente sobre el borde

How to cite: Zapata García, G., Rodríguez García, G. & Arango Mejía, M.I. Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha – Río Tellez y Aleluya Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 47-64, 2017.

oriental de la Cordillera Central de Colombia. Los nuevos datos indican edades más jóvenes que las asignadas en los mapas geológicos y publicaciones anteriores, donde ambas unidades habían sido consideradas de edad precámbrica.

Este estudio presenta la interpretación de los datos geocronológicos de tres muestras datadas por el método U/Pb en circones y la descripción petrográfica y litogeoquímica de las rocas fechadas, así como la discusión de la información dentro del contexto geológico regional.

2. Marco geológico regional

El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez fue descrito por [17] Ponce (1979) bajo el nombre de Complejo Migmatítico de Nariño, al referirse a los afloramientos expuestos en el flanco oeste de la Cordillera Centro Oriental, en el páramo de Los Alisales y en los ríos Téllez, San Francisco, Chingual, Sucio y San Pedro, este último cerca al valle de Sibundoy. El mismo [17] Ponce (1979) diferenció el Neis de La Cocha, expuesto en los alrededores de la laguna del mismo nombre. Posteriormente, [10] Murcia & Cepeda (1983) agruparon las dos unidades, y emplearon el término Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, para designar las rocas metamórficas y granitos de anatexis que afloran en las proximidades de la laguna de La Cocha y el río Téllez, este complejo comprende un conjunto de rocas metamórficas, principalmente migmatitas, esquistos, neises y anfíbolitas, junto con rocas de aspecto granitoide afectadas por blastesis, con estructuras migmatíticas [13] Núñez, 2003. Esta unidad aflora como ventanas o techos colgantes en el lado oriental del Valle de Sibundoy, está en contacto fallado con la Cuarzomonzonita de Sombrerillo de edad jurásica (Bajociano al Pleiensbaciano [17] Rodríguez *et al.*, 2015, [2] Bermúdez *et al.*, 2016) y con rocas sedimentarias cretácicas, se encuentra parcialmente cubierto por lavas y piroclastos de edad neógena-cuaternaria y depósitos de vertiente cuaternarios, Fig. 1.

El Complejo Aleluya agrupa mármoles, metareniscas, cuarcitas, migmatitas y rocas ígneas que intruyen las rocas metamórficas sin relación ordenada y difícil de separar cartográficamente [4] Ferreira *et al.* (2002). [5] Fuquen y Núñez (1989) y [4] Ferreira *et al.* (2002) consideraron la edad de estas rocas como proterozoica. La unidad se encuentra intruida, por la Cuarzomonzodiorita de Páez (Fig. 1.) que arrojó edades jurásicas entre 180 Ma y 193 Ma ([25] Zapata *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista regional, los dos complejos se localizan en posición estructural similar, asociados a bloques de granitos jurásicos y rocas volcánicas de la Formación Saldaña, limitados por fallas regionales asociadas a sistemas relacionados con las fallas de Chusma y Algeciras. Se localizan en la zona de convergencia de los terrenos Chibcha y Tahamí, definidos por [24] Toussaint y Restrepo (1976), cuyo límite se ha considerado la Falla de Chusma.

El Terreno Chibcha, en el área de estudio, está conformado por un basamento de rocas metamórficas de alto grado, precámbricas del evento Nickeriense (Grupo Garzón, neises de Mancagua y Guapotón y Migmatitas de Las Minas), unidades sedimentarias paleozoicas (Formación El Hígado, Sedimentitas de La Jagua, Areniscas de La Batalla), granitos

Pérmicos (Granito de La Plata), mientras el Terreno Tahamí está constituido por rocas metamórficas de medio a bajo grado, de edades pérmicas y triásicas (Complejo Cajamarca).

2.1. Descripción geológica

En el sitio de muestreo, el Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, está representado por rocas metamórficas faneríticas de tamaño fino a media con estructura esquistosa, constituidas por bandas de color blanco compuestas por cuarzo y plagioclasa, intercaladas con bandas de color gris oscuro, conformadas por hornblenda y biotita, Fig. 2A. La muestra 900798 presenta textura granolepidoblástica con bandas granoblástica (Fig. 3), se clasificada como esquistos de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate, Tabla 1. También se encuentran rocas de aspecto masivo con textura granoblástica, granofels de plagioclasa, feldespato, cuarzo y hornblenda, muestras 900797 (Fig. 2B) y 900799. El protolito de los granofels corresponde a rocas ígneas de composición granodiorita-cuarzomonzodiorita.

La plagioclasa del esquistos es oligoclasa (An28) y en los granofels es oligoclasa hasta andesina (An40), se presenta en cristales subidioblásticos a idioblásticos incoloros limpios a levemente empolvados por alteración a minerales de arcilla y sericita, inequigranular con tamaños entre 0.1 y 0.8 mm en el esquistos y ≤ 2.5 mm en el granofels, con maclas de albita, albita-Carlsbad y periclina, relieve n>bálsamo. Se observan mirmequitas en algunos bordes de contacto con los feldespatos.

El feldespato potásico es microclina, en cristales subidioblásticos incoloros con maclas polisintéticas de microclina, relieve n<bálsamo, color de interferencia gris del primer orden, en los bordes de contacto con plagioclasa se observan mirmequitas. El tamaño en los esquistos es ≤ 0.3 mm; en los granofels es inequigranular con tamaño ≤ 1.5 mm subidioblástico a idioblástico, maclas polisintéticas de microclina con inclusiones de cuarzo, plagioclasa y hornblenda, pertitas en forma de cordones y mirmequitas.

El cuarzo es inequigranoblástico xenoblástico, en el esquistos con tamaño entre 0.1 y 0.5 mm y en los granofels ≤ 2.5 mm, con bordes irregulares a poligonales, relieve bajo, color de interferencia gris del primer orden, extinción ondulada y forma mosaicos granoblásticos, Fig. 3.

La biotita, en láminas xenoblásticas a subidioblásticas de color pardo claro con pleocroísmo a pardo rojizo, tamaño ≤ 0.6 mm, en los granofels hasta de 3.5 mm, relieve moderado, exfoliación en una dirección, el máximo color de interferencia verde del segundo orden, extinción paralela. Parcialmente alterada a clorita y magnetita. Algunas láminas están levemente dobladas.

La hornblenda se encuentra en los granofels, es parda y verde con pleocroísmo a verde oliva, cristales xenoblásticos a idioblásticos con algunas maclas dobles, clivaje en dirección paralela al eje largo, relieve moderado, inclusiones de biotita, apatito y plagioclasa, color de interferencia azul del segundo orden. Ángulo de extinción 14° . Simplectitas de biotita. En los bordes presenta alteración a epidota con birrefringencia más alta.

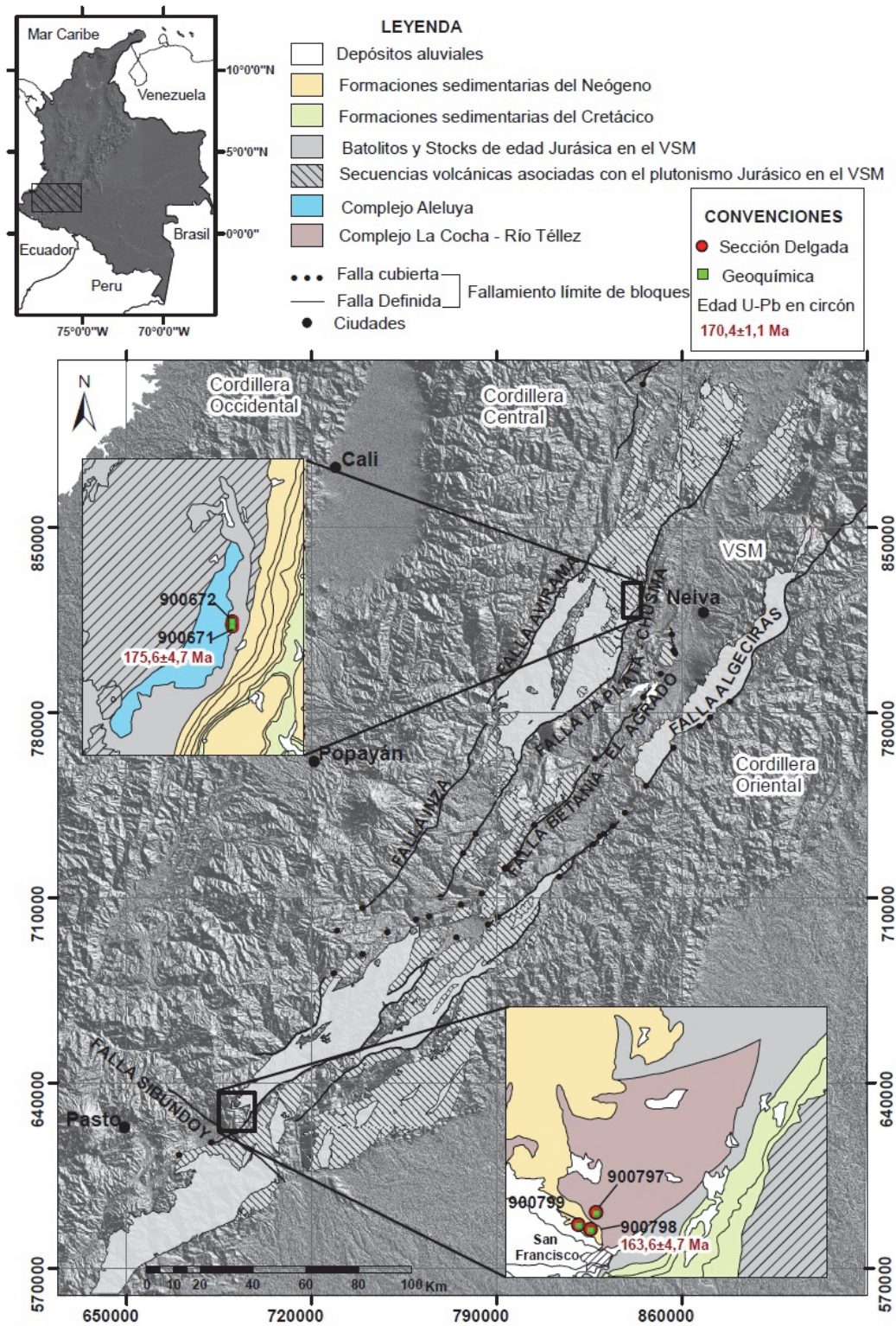


Figura 1. Localización de los complejos Aleluya y La Cocha – Río Téllez.
Fuente: Los autores.

B

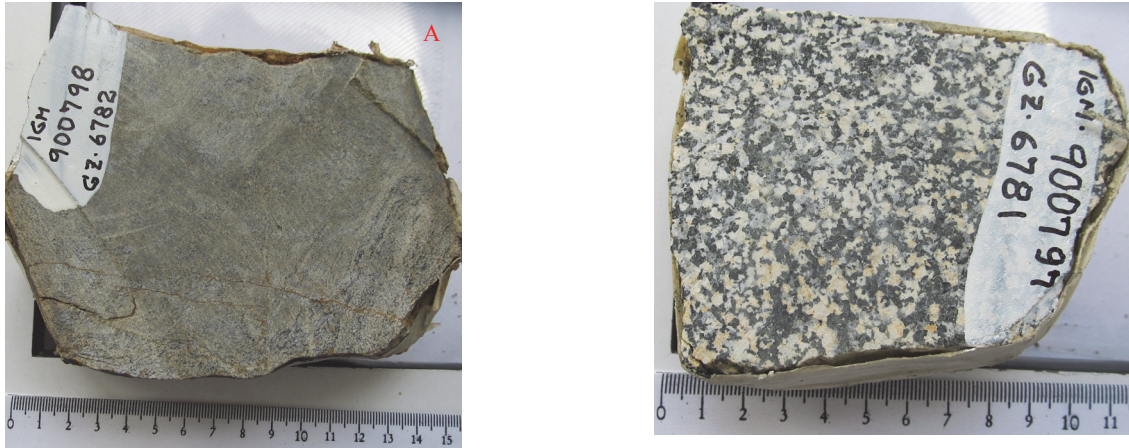


Figura 2. Aspecto macroscópico de las muestras 900798 (esquisto) y 900797 (granofels).
Fuente: Los autores

Tabla 1.

Análisis modal de las muestras el Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez y del Complejo Aleluya.

IGM	N	W	Qtz	Pl	Kfs	Hbl	Bt	Grt	Ms	Op	Ttn	Ap	Zrn	Clasificación Petrográfica
900797	623608	689117	12.99	31.17	9.09	34.52	1				2.6	TR		Granofels de Pl-Qtz-Kfs, Hbl
900798	622790	688841	33.4	31.17	23.9		8.7	2.59	0.4	TR			TR	Esquisto de Qtz-Pl-Kfs, Bt con Grt.
900799	623014	688274	13.92	50	7.59	8.23	18.35					TR	TR	Granofels de Pl-Qtz-Hbl
*900671	823861	843820	15.4	74.6	1.2	7.7	TR			0.5	0.6	0.1	TR	Granofels de Pl-Qtz-Hbl
*900672	824348	843798	38.4	16.7	32.5		12.4			TR		TR	TR	Granofels de Qtz-Kfs-Pl-Bt

* Muestras del Complejo Aleluya.

Fuente: Los autores

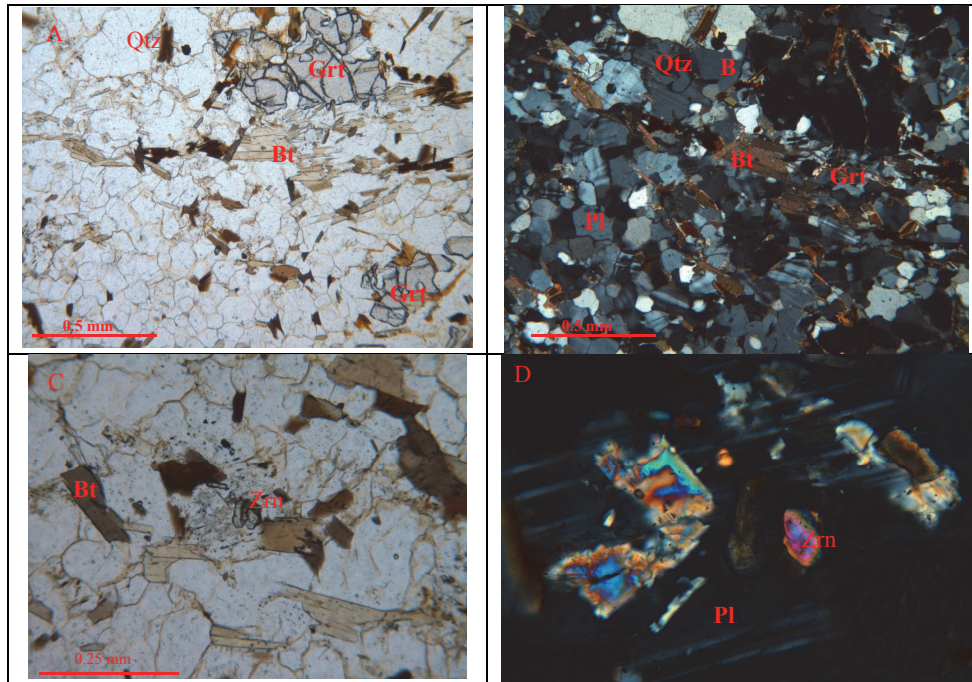


Figura 3. GZ-6782 (900798). Esquisto de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate. Escala gráfica, aumento 4x. A y C) Nicols paralelos. B y D) Nicols cruzados. Textura granolepidoblástica. Compuesta, por plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz), feldespato potásico y biotita (Bt), con granate (Grt). C) Nicols paralelos objetivo 10X circosnes tamaño 83 μ m. D) Nicols cruzados, objetivo 25X.

Fuente: Los autores

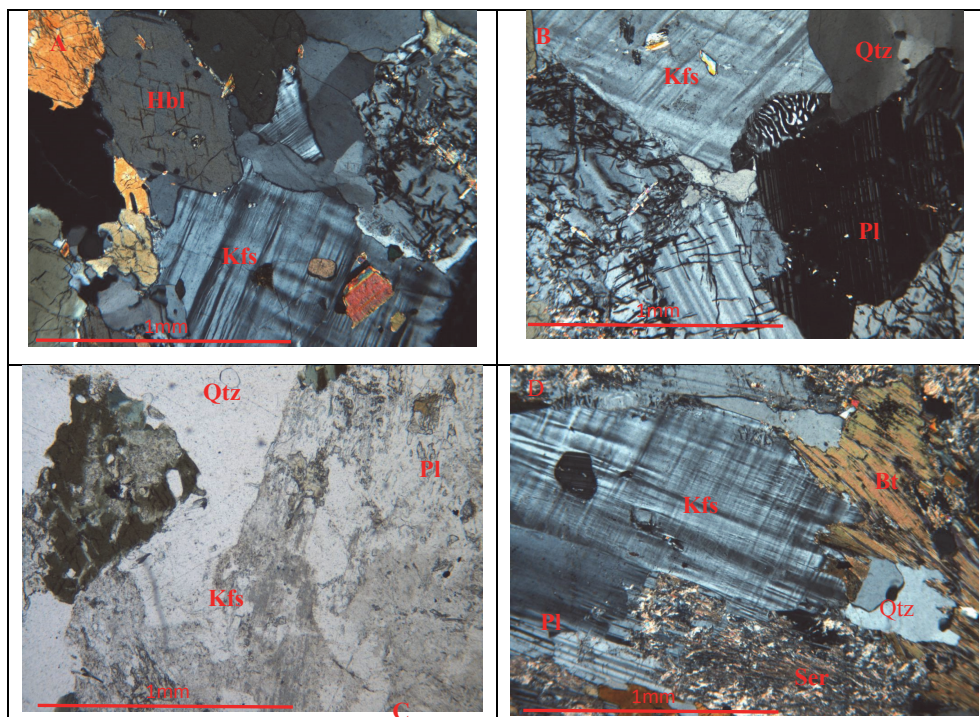


Figura 4. Aspecto microscópico de los granofels del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez. A y B) IGM 900797. C y D) IGM 900799. Textura granoblástica y mirmequítica. Compuesta, por plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz), feldespato potásico (Kfs), hornblenda (Hbl) y biotita (Bt). Fuente: Los autores

Como minerales accesorios encontramos clinopiroxeno, granate en cristales incoloros, xenoblásticos con relieve alto, tamaño ≤ 0.6 mm, Fig. 3A y Fig. 3B. Circón, microcristales subidioblásticos con relieve alto y birrefringencia del tercer orden, Fig. 3C y Fig. 3D; apatito, epidota. Opacos en cristales subidioblásticos diseminados. Se observan trazas de moscovita, incolora subidioblástica, con relieve moderado, color de interferencia verde del segundo orden y extinción paralela.

Las muestras de migmatitas del Complejo Aleluya se colectaron sobre la vía Palermo-San Luis, muestras GR-6596 y GR-6597, cerca al contacto con la Cuarzomonzodiorita de Páez. Macroscópicamente la roca GR-6596 (IGM 900671) es de color crema moteada de verde, fanerítica de grano fino a medio, con textura granoblástica, constituida por feldespatos, cuarzo y hornblenda, sin orientación mineral, Fig. 5A; la muestra GR-6597 (IGM 900672) es de color blanco moteada de negro, con orientación de los minerales, estructura bandeada, fanerítica de grano fino a medio, con textura granolepidoblástica y está constituida por cuarzo, feldespatos y biotita, Fig. 5B.

El análisis petrográfico de las dos (2) rocas muestra que son cristaloblásticas con texturas granoblástica y grano lepidoblástica, están constituidas por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y hornblenda como minerales principales; con titanita, opacos, circón y apatito como minerales accesorios, Tabla 1 y Fig. 6.

La plagioclasa es andesina en cristales xenoblásticos a subidioblásticos con contornos lobulados, inequigranoblásticos, en contactos triples poligonales con cuarzo y feldespato, con maclas mal desarrolladas según la ley de albita, en algunos

cristales las maclas acunadas, el relieve mayor al del bálsamo ($n > b$), con inclusiones a manera de gotas de cuarzo (cuarzo drop like) y biotita. Siguiendo el método de Michel-Levy en macla de albita y albita-carlsbad se obtuvo un An_{33} , levemente empolvado por alteración a arcilla y sericita, tiene inclusiones de hornblenda, cuarzo y circón, Fig. 6.

El cuarzo se encuentra en cristales xenoblásticos inequigranoblásticos de formas lobuladas a subredondeadas, algunos en contactos triples poligonales, también como gotas incluidas en plagioclasa, limpio con extinción plana a levemente ondulada, contiene inclusiones de polvo a manera de líneas.

El feldespato alcalino corresponde a microclina, en cristales xenoblásticos inequigranulares incoloros, limpios, algunos sin maclas o con maclas mal desarrolladas de microclina, pueden o no tener desmezclas pertíticas en filoncillos, se presentan entre la red de cristales de cuarzo y plagioclasa, con relieve menor al del bálsamo ($n < b$).

La hornblenda solo se encontró en la muestra GR-6596 (IGM-900671), en cristales xenoblásticos intergranulares con crecimiento blástico en atolón, generalmente de menor tamaño que la plagioclasa y el cuarzo, de color verde con un pleocroísmo X: amarillo pálido, Y: verde, Z: verde oliva, el ángulo de extinción es de 17° , algunos cristales poiquiloblásticos con inclusiones subredondeadas de cuarzo y plagioclasa, color de birrefringencia amarillo del primer orden, Fig. 6^a.

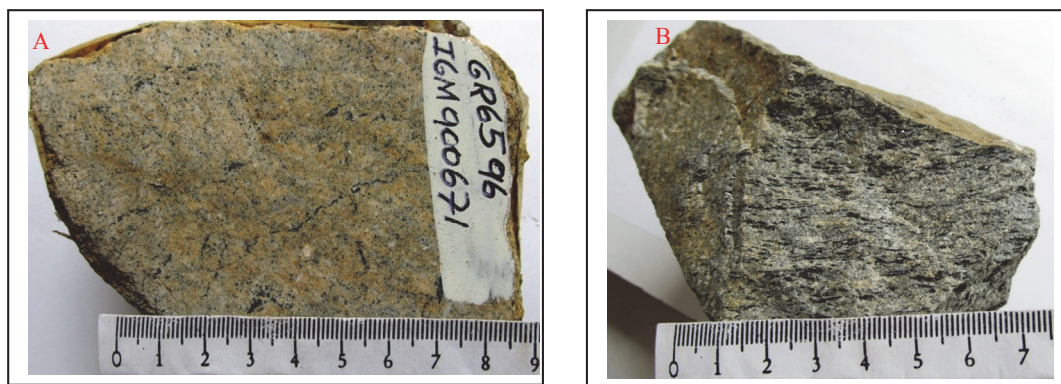


Figura 5. A) Aspecto macroscópico de las muestras GR-6596 (IGM 900671). B) GR-6597 (IGM 900672).
Fuente: Los autores

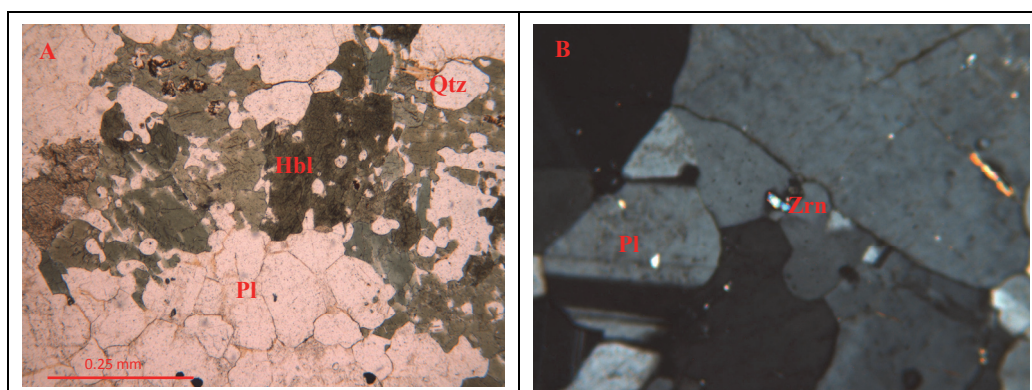


Figura 6. A) Aspecto microscópico de la muestra GR-6596 (IGM-900671). A) Nicols paralelos. Granofels de Pl-Qtz y Hbl. Escala gráfica, objetivo 4x. Cristales xenoblásticos de plagioclase (Pl), cuarzo (Qtz) y hornblenda (Hbl). B) Nicols cruzados, objetivo 10x cristal de circón (Zrn), tamaño 34 μm .
Fuente: Los autores

En la muestra GR-6597 (IGM-900672), la biotita ocurre en láminas orientadas idioblásticas a subidioblásticas, pueden formar bandas delgadas intercaladas con las bandas de feldespato-cuarzo, de color pardo con un pleocroísmo X. amarillo pálido Y=Z: pardo, extinción en arce moteado, presentan inclusiones de circón con halo pleocroico, así como opacos en los bordes de contacto entre cristales y apatitos finos, Fig. 7.

Entre los minerales accesorio se destacan los opacos que son de tamaño menor a 0.15 mm, disseminados en la roca, intergranulares y xenomórficos, algunos con inclusiones de apatitos y en los bordes con titanita. La titanita se encuentra en cristales finos xenomórficos con relieve alto, el color de interferencia es rosado del tercer orden. También se encuentra apatito junto a los opacos e incluido en biotita, en cristales incoloros, idiomórficos a subidiomórficos de relieve alto; el circón en microcristales finos xenomórficos, incluidos en la biotita, de formas subredondeadas a ovaladas, Fig. 6B y Fig. 7B).

3. Metodología analítica

En esta investigación se realizaron actividades de compilación de información, control de campo, muestreo para geoquímica y geocronología, elaboración de secciones delgadas y análisis petrográfico de muestras recolectadas y de muestras de proyectos anteriores que reposan en los laboratorios del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Los análisis químicos se hicieron en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano sede Bogotá. Para los óxidos mayores se utilizó el método de fluorescencia de rayos X, incluyendo los elementos trazas V, Mo, Nb, Ta, W, Zr y Hf y para el resto de elementos traza y tierras raras se utilizó el equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Para la interpretación de los óxidos mayores se hizo el recalcu teniendo en cuenta los valores de LOI (perdidas por ignición).

La separación de minerales densos se realizó en el laboratorio químico del Servicio Geológico Colombiano sede

Medellín, utilizando separación hidrodinámica, magnética y por último el montaje de los circones.

Los análisis geocronológicos se realizaron en el laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla con la siguiente metodología: las concentraciones de U y Th fueron calculadas empleando un círculo estándar externo de acuerdo a [14] Paton *et al.* (2010). Las incertidumbres de sigma 2 propagadas se lograron según [14] Paton *et al.* (2010). Las proporciones $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, edades y errores se calcularon según [16] Petrus y Kamber (2012). Los puntos analizados son de 23 micrómetros, utilizando un protocolo de análisis modificado de [21] Solari *et al.* (2010). Los datos fueron medidos empleando un *Thermo X series QICPMS* acoplado a un *Resonetics*, estación de trabajo láser excimer Resolución M050. Se realizó un análisis estadístico con el fin de mejorar el rango de confiabilidad de la edad proporcionada por el laboratorio, teniendo en cuenta la relación $[(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$, eliminando los datos de circones con valores discordantes que estuvieran, en general, por encima de 15%. Los gráficos de concordia e histogramas se elaboraron en el software de Isoplot/Ex vers. 4.15 [8] Ludwig, 2008.

Dataciones complementarias U-Pb se realizaron en el laboratorio de Laser Ablación del Servicio Geológico Colombiano que cuenta con un equipo de ablación laser Photon Machines, láser exímero de 193 μm y Espectrómetro ICP-Masas Element 2, se utilizaron como patrones de referencia Plesovice, 91500 y M. Dromedry los puntos analizados o de ablación son de 20 micrones y la reducción de datos se realizó utilizando el programa Iolite IGROpro y un espectrómetro de masas, se utilizó como tiempos de integración para la línea base 0 s - 38 s y para las muestras y patrones de referencia 32.5 s - 8 s, tiempos que concuerdan con el tiempo de corrida de los análisis. Los Isótopos utilizados para la integración manual ^{238}U , Pb^{206} y Pb^{204} . Los resultados finales y anexos, corresponden a la media de los datos obtenidos luego de aplicar una discriminación de datos a 2 desviaciones estándar. El procesamiento se lleva a cabo con las rutinas de Isoplot V3.5 y la corrección por plomo común se realiza de acuerdo con el modelo de evolución

según [22] Stacey & Krammers (1975). Se eliminaron los datos de circones con valores discordantes que estuvieran por encima de 10% o 15% según la muestra.

4. Geoquímica

Los análisis químicos de las muestras GZ-6782 de esquisto de Qtz, Kfs, Bt con Grt, GZ-6781 y GZ-6783 de granofels del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez, se realizó en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano sede Bogotá. Para los óxidos mayores se utilizó el método de fluorescencia de rayos X, incluyendo los elementos trazas V, Mo, Nb, Ta, W, Zr y Hf y para el resto de elementos traza y tierras raras se utilizó el equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Para la interpretación de los óxidos mayores se recalcularon los valores teniendo en cuenta perdidas por ignición (LOI) de 1.05%.

4.1. Óxidos mayores

Los resultados del laboratorio para óxidos mayores, elementos traza y tierras raras se presentan en la Tabla 2. El mayor valor de SiO_2 se presenta en el esquisto (70.55%), el contenido de álcalis 6.8%) y $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, bajo TiO_2 (<0,5 %). Los granofels con protolito ígneo tienen valores similares de SiO_2 cercanos a 55%, contenido de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ entre 4.5 y 5.8, $\text{TiO}_2 < 1$.

El diagrama ACF de [7] Hutchison, 1974 modificado de Winkler, 1967 es apropiado para discriminar los distintos tipos de protolitos litológicos de rocas metamórficas, los óxidos Al_2O_3 , CaO y $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ están expresados en proporciones molares. En este diagrama la muestra GZ-6782 se ubica en el campo composicional de las rocas pelíticas por el alto contenido de Al_2O_3 , recalculado para el diagrama a 68.7%, ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) de 5.28% y CaO de 0.46%, Fig. 8; concuerda con la descripción petrográfica en la cual se consideró el protolito como sedimentario con granate y moscovita.

La relación álcalis/ SiO_2 de las muestras de granofels está indicando que el protolito corresponde a rocas intermedias de composición diorítica, subalcalinas.

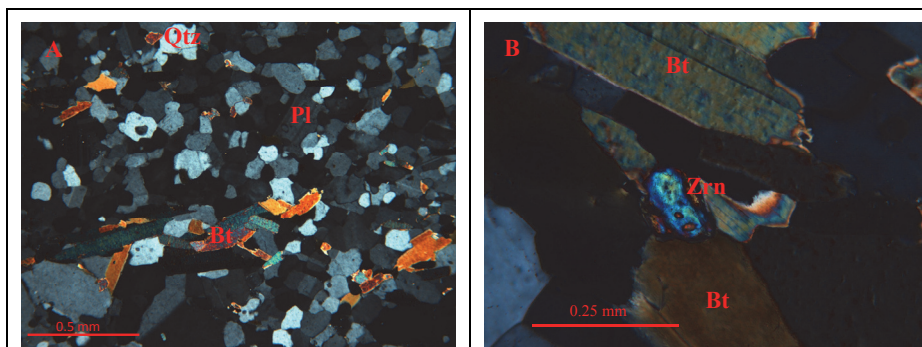


Figura 7. Aspecto microscópico de la muestra IGM-900672 (GR-6597). A) Nícoles cruzados. Granofels de Pl-Qtz y Hbl. Escala gráfica, objetivo 4x. Cristales xenoblásticos de plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz) y biotita (Bt). B) Nícoles cruzados, objetivo 25x cristal de circon (Zrn), tamaño 167 μm .

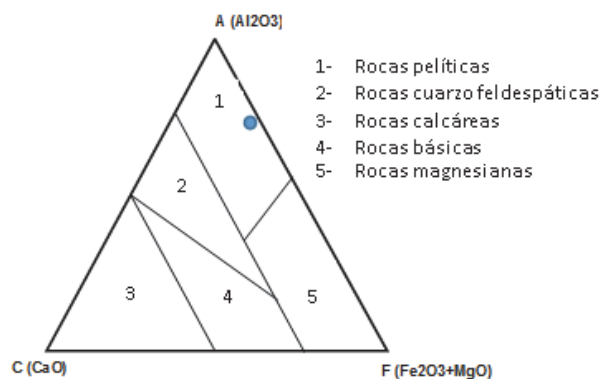
Fuente: Los autores

Tabla 2.

Contenidos de óxidos mayores de las muestras del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez.

IGM	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	FeO	LOI
900797	55.17	0.78	13.90	6.59	4.71	1.23	6.63	2.09	2.44	0.42	3.92	2.11
900798	69.44	0.37	12.47	4.57	0.65	1.58	0.44	2.38	4.41	0.07	2.56	1.05
900799	55.64	0.95	15.43	6.79	3.11	1.10	4.63	2.77	3.09	0.25	4.48	1.76

Fuente: Los autores

Figura 8. Diagrama ACF (Al₂O₃, CaO y Fe₂O₃+MgO) Wincler (1967), modificado por Hutchison (1974) para la muestra GZ-6782.

Fuente: Los autores

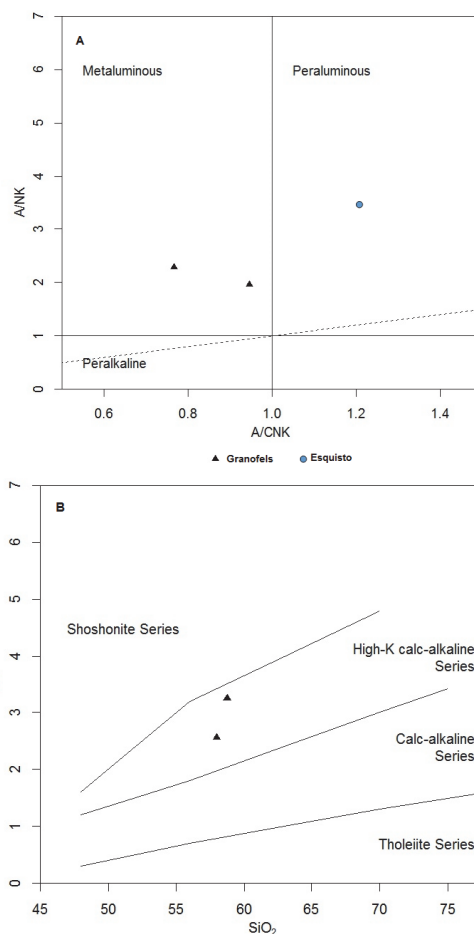
En el diagrama de alcalinidad-aluminosidad de [20] Shand (1943), la muestra GZ-6782 presenta un índice de saturación en alúmina [$Al_2O_3 > (CaO + Na_2O + K_2O)$], con $A/CNK > 1$, campo de rocas peraluminosas, Fig. 9A; la roca contiene minerales ricos en aluminio como plagioclasa, feldespato, biotita, moscovita y granate. Por el contrario las muestras GZ-6781 y GZ-6783 de granofels, se ubican en el campo de las rocas metaluminosas con $A/CNK < 1$.

En el diagrama de [15] Peccerillo & Taylor, 1971 (K_2O/SiO_2) las rocas granofélsicas del del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez se ubican en el campo de las series calcoalcalinas altas en K, Fig. 9B.

4.2. Elementos traza y tierras raras

Los resultados de los análisis de elementos traza y tierras raras para las tres rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez se presentan en la Tabla 3.

En el diagrama de elementos de las tierras raras (REE) normalizado al condrito según [11] Nakamura (1974), las muestras de granofels presentan concentraciones de tierras raras con valores inferiores a 100 veces el valor del condrito, con enriquecimiento en tierras raras livianas (LREE) con un patrón homogéneo que se va empobreciendo progresivamente hacia las tierras raras pesadas (HREE) hasta valores cercanos a 10 veces el valor del condrito con una pendiente negativa suave que se aplanan en las tierras raras pesadas, Fig. 10A.

Figura 9. Rocas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez. A) Diagrama de alcalinidad-aluminosidad (Shand, 1943. B) Diagrama K_2O Vs SiO_2 (Peccerillo & Taylor, 1971).

Fuente: Los autores

En el diagrama NMORB [23] (Sun & McDonough, 1989) para los granofels en la Fig. 10B se observan líneas con varios picos positivos y negativos que revelan empobrecimiento de los elementos inmóviles Nb, La, Ce, P y Ti y anomalías positivas para Ba, K, Pb y menos marcadas para Nd y Sm. Se destaca la muestra de granofels IGM 900799 (GZ-6783) por los mayores contenidos de elementos traza, pero con valores cercanos en la mayoría de los elementos, con respecto a la otra muestra, difiere en una anomalía negativa más pronunciada para P y una positiva para Y.

Las relaciones para rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez de LaN/YbN , LaN/SmN ,

Tabla 3.

Elementos traza y tierras raras de las muestras del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez.

Elementos traza y tierras raras de las muestras del Complejo Magmático La Ciénega, Río Toluca.														
IGM	Li	Be	Sc	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	
900797	7.74	2.92	44.30	158.00	29.90	1295.82	28.83	40.53	15.37	83.69	17.87	47.94	484.83	
900798	11.13	1.89	13.32	15.80	16.82	1496.07	9.81	2.23	14.00	191.11	18.16	150.76	166.59	
900799	16.58	2.99	29.80	137.30	61.46	955.42	27.53	19.82	51.62	104.36	20.99	120.26	408.15	
IGM	Y	Cd	In	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
900797	16.73	0.18	0.05	0.63	1290.32	32.32	61.87	7.59	28.03	6.36	2.51	5.94	0.83	
900798	26.76	0.37	0.03	1.19	1770.85	39.86	85.45	11.83	44.24	10.57	2.98	8.82	1.20	
900799	79.94	0.16	0.06	2.26	1137.43	34.88	72.45	9.54	38.26	8.90	2.59	8.00	1.23	
IGM	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Tl	Pb	Th	U	Nb	Hf	W	Zr
900797	4.03	0.74	2.15	0.28	1.91	0.31	0.21	8.84	5.51	1.12	4.60	< 8	14.00	109.60
900798	5.73	1.13	3.72	0.55	3.84	0.61	1.10	176.22	9.15	1.17	15.80	14.20	31.70	443.10
900799	6.65	1.33	4.03	0.54	3.48	0.51	0.53	13.15	6.14	1.42	9.30	8.40	25.70	327.70

Fuente: Los autores

SmN/YbN, CeN/YbN, CeN/SmN, EuN/YbN y Eu/Eu* con valores normalizados se presentan en la Tabla 4, en ella se observa la afinidad de las dos muestras de granofels y el contraste de los valores con la muestra de esquisto (900797), confirmando la distinta procedencia. Las dos muestras de granofels tienen una relación (Eu/Eu*<1) y debido a su protolito ígneo, pueden asociarse con un origen de afinidad continental, procedentes de la fusión parcial de la corteza donde los residuos de estos fundidos fueron ricos en plagioclasa, reteniendo el Eu en la corteza inferior y generando un patrón empobrecido en Eu en la corteza superior. Las relaciones Eu/Eu*<1 y LaN/SmN>2 evidencian un enriquecimiento de tierras raras ligeras con relación a las HREE en las dos muestras de granofels, Tabla 4.

Las relaciones para rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez de LaN/YbN, LaN/SmN, SmN/YbN, CeN/YbN, CeN/SmN, EuN/YbN y Eu/Eu* con valores normalizados se presentan en la Tabla 4, en ella se observa la afinidad de las dos muestras de granofels y el contraste de los valores con la muestra de esquisto (900797), confirmando la distinta procedencia. Las dos muestras de granofels tienen una relación (Eu/Eu*<1) y debido a su protolito ígneo, pueden asociarse con un origen de afinidad continental, procedentes de la fusión parcial de la corteza donde los residuos de estos fundidos fueron ricos en plagioclasa, reteniendo el Eu en la corteza inferior y generando un patrón empobrecido en Eu en la corteza superior. Las relaciones Eu/Eu*<1 y LaN/SmN>2 evidencian un enriquecimiento de tierras raras ligeras con relación a las HREE en las dos muestras de granofels, Tabla 4.

A las muestras GZ-6782 y GR-6597 se les realizó análisis de ICP-MS que permitió determinar la abundancia de elementos traza en cada uno de los circones de las dos muestras, Tabla 5, los valores de REE se normalizaron a condrito [23] (McDonough & Sun, 1995) y se calcularon las relaciones Pm* y Tm* para cada uno de ellos. En la Fig. 11 se observa un comportamiento homogéneo con una química similar para la mayoría de los circones, sugiriendo que provienen de una misma fuente.

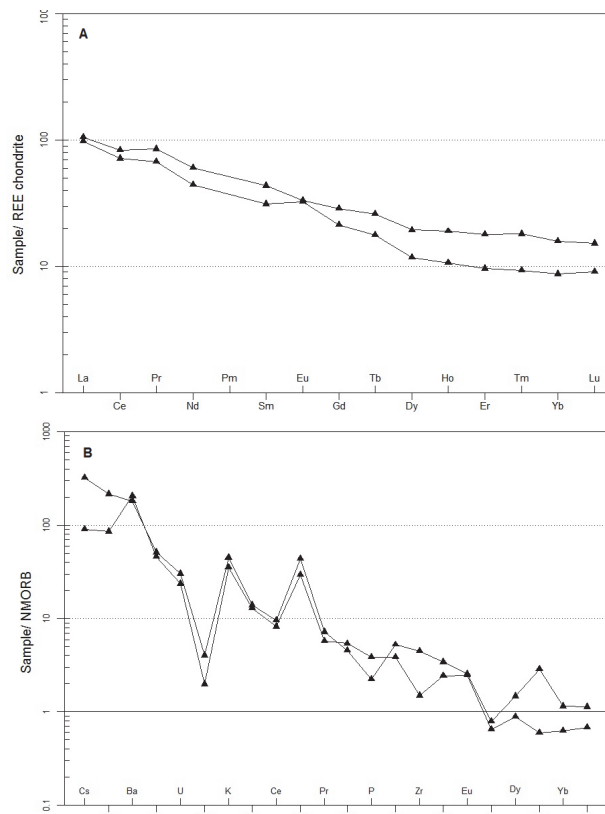


Figura 10. A) Diagrama de REE normalizado respecto al condrito (Nakamura, 1974). B) Diagrama normalizado a NMORB (Sun & McDonough, 1989).

Fuente: Los autores

Dos de los circones están enriquecidos con valores mayores a 100 veces el condrito en tierras raras livianas (LREE), uno para la muestra GR-6597, circón (083 en la Tabla 5) ígneo con edad de 198 Ma, y otro para la muestra GZ-6782 (218 en la Tabla 5), ígneo con edad de 196.8 Ma. Posiblemente estos dos circones cristalizaron junto a otro mineral enriquecido en los elementos de las LREE como el apatito.

Los circones de ambas muestras tienen un patrón con pendientes positivas hacia las HREE, se observa en todos los

Tabla 4.

Relaciones normalizadas para La, Ce, Sm, Eu e Yb en rocas del Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez (Nakamura, 1974 norm. factors)

IGM	LaN/YbN	LaN/SmN	SmN/YbN	CeN/YbN	CeN/SmN	EuN/YbN	Eu/Eu*
*900797	11.28	3.13	3.61	8.24	2.28	3.75	1.26
900798	6.92	2.32	2.98	5.66	1.9	2.22	0.95
900799	6.68	2.41	2.77	5.29	1.91	2.13	0.94

*muestra de esquistos

Fuente: Los autores

Tabla 5.

Contenidos normalizados de elementos traza y tierras raras en circones en las muestras GZ-6782 y GR-6597.

GZ-6782	La	Ce	Pr	Nd	Pm*	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm*	Yb	Lu
Zircon-201	0.22	6.57	2.1	7.26	18	44.59	9.41	190	421.1	796.8	1435.9	2281.3	3313.8	4813.7	6418.7
Zircon-203	0.43	22.01	3.66	9.39	21.6	49.46	18.8	187	364	642.7	1166.7	1762.5	2431.1	3353.4	4434.96
Zircon-205	0.21	36.92	1.63	5.73	15.6	42.3	15.8	242	505.8	929.7	1641	2561.3	3493.1	4764	6243.9
Zircon-208	0.69	11.63	1.67	3.06	7.18	16.82	8.92	92.1	193.4	362.6	684.43	1100.6	1563.5	2221.1	3047.56
Zircon-209	0.33	18.27	3.19	12.7	32.9	85.14	35	345	626	1106	1906.6	2856.3	3919.6	5378.9	7085.37
Zircon-210		32.35	4.54	18	44.7	110.8	54.2	519	939.1	1626	2743.6	4106.3	5448.6	7229.8	9495.93
Zircon-211		90.86	1.53	8.4	24.2	69.59	16.7	357	782.6	1402	2441.4	3668.8	4935.5	6639.8	8426.83
Zircon-212		28.87	0.92	4.2	12.2	35.54	14.6	177	376.7	674.8	1230.8	1906.3	2591	3521.7	4569.11
Zircon-213		28.34	0.64	3.74	10.7	30.41	10.9	171	355.1	654.9	1172.2	1850	2536.2	3477	4560.98
Zircon-214		9.98	0.31	1.66	5.43	17.7	8.7	80.2	167	313.8	560.99	936.25	1326.3	1878.9	2585.37
Zircon-216		9.95	0.83	2.98	8.34	23.38	12.2	105	218.8	411	752.75	1220	1719.1	2422.4	3300.81
Zircon-217	0.04	8.71	0.2	1.23	3.78	11.69	5.74	61.5	152.6	265.5	500.37	805.63	1158.3	1665.2	2239.84
Zircon-218	146	259.4	143.3	164	192	223.7	41.2	644	1136	1939	3315	4950	6584.1	8757.8	11178.9
Zircon-219	0.97	24.47	2.06	4.46	12.9	37.3	19.4	167	337.4	586.6	1045.8	1616.3	2188.3	2962.7	3943.09
Zircon-220	0.02	10.28	0.15	1.75	5.33	16.22	6.86	78.2	163.7	298.4	562.64	924.38	1290.8	1802.5	2496.75
Zircon-221		13.88	1.05	4.53	12.1	32.5	18.5	167	315.8	576	1062.3	1670	2335.8	3267.1	4540.65
Zircon-222	2.78	15.5	5.06	9.19	20.2	44.39	15.5	182	366.5	642.7	1161.2	1810	2447.9	3310.6	4455.28
Zircon-223		32.33	0.89	4.31	12.2	34.39	12.4	195	392.8	706.9	1227.1	1893.8	2571.1	3490.7	4581.3
Zircon-224		21.21	1.23	5.3	13.1	32.23	12.1	168	331	630.9	1120.9	1766.3	2417.7	3309.3	4410.57
Zircon-225	0.07	16.26	1	4.84	12.6	33.04	19.2	172	351	627.2	1141	1807.5	2467.4	3368.3	4552.85
Zircon-227	0.09	52.5	1.34	6.48	18.7	54.12	18.1	285	573.4	1025	1853.5	2853.8	3856.4	5211.2	6617.89
Zircon-228		12.94	0.61	2.39	6.85	19.66	7.69	109	221.3	405.3	730.77	1178.1	1652.1	2316.8	3113.82
Zircon-229	1.56	44.96	4.63	10.3	25.5	62.97	22.7	287	573.7	1022	1793	2768.8	3732.3	5031.1	6528.46
Zircon-230	0.01	13.54	0.86	3.52	9.04	23.18	8.63	107	219.7	416.3	779.49	1245.6	1760.7	2488.8	3426.83
GR-6597	La	Ce	Pr	Nd	Pm*	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm*	Yb	Lu
Zircon_073	0.08	6.41	0.23	1.46	2.64	4.75	0.68	17.1	7.17	98.74	45.5	256.97	425.14	703.36	6758.65
Zircon_075	0.14	7.42	0.11	2.05	2.71	3.58	1	22.7	8.97	117.5	51.92	260.69	394.32	596.44	5063.29
Zircon_077	0.42	15.54	0.22	3.53	4.31	5.27	1.26	32.1	13.04	167	71.62	362.11	545.04	820.39	7047.05
Zircon_078	0.06	7.95	0.48	3.09	4.01	5.19	1.94	35.4	14.11	198.4	85.35	462.64	768.13	1275.4	11787.3
Zircon_079	0.41	9.22	0.24	3.08	3.16	3.24	1.21	20.4	8.07	115.1	53.1	283.38	445.73	701.09	6210.91
Zircon_082	0.33	7.28	0.16	3.14	3.62	4.17	1.24	27.6	10.81	148.5	64	338.19	524.34	812.96	7546.29
Zircon_083	29	118.1	13.02	68	44.9	29.64	2.61	78.3	24.51	292.7	117.37	566.99	838.5	1240	10921.7
Zircon_084	0.24	5.49	0.33	1.48	1.84	2.3	0.57	16.3	5.93	80.15	36.63	196.21	326.2	542.29	5014.26
Zircon_085	0.12	8.59	0.08	2.28	2.3	2.32	1.14	22.3	7.93	109.8	47.46	244.75	370.93	562.16	5039.68
Zircon_087	0.5	12.87	1.04	12.7	12.2	11.77	0.97	55	19.07	232.8	94.5	477.96	712.64	1062.6	9141.96
Zircon_088	0.24	18.37	0.22	2.11	3.01	4.29	1.27	40.1	16.51	223.9	98.1	515.07	791.23	1215.5	11072.9
Zircon_090	0.22	8.38	0.31	2.18	2.76	3.48	0.96	23.8	8.52	122.9	54.09	276.44	430.97	671.87	5913.15
Zircon_094	0.79	12.85	0.59	3.19	3.22	3.25	0.95	18.8	6.78	94.32	40.42	207.52	315.07	478.36	4164.92
Zircon_097	1.1	33.23	1.03	7.79	8.33	8.9	0.76	41	18.92	284.9	136.09	805.48	1384.5	2379.7	23878.8
Zircon_098	0.14	7.02	0.24	3.04	4.45	6.51	1.36	27	10.69	141.6	62.98	335.45	542.52	877.42	8193.42
Zircon_099	0.24	2.59	0.21	1.45	1.9	2.49	1.01	13.6	5.61	88.96	40.84	231.71	412.83	735.51	7048.2

Fuente: Los autores

circones una deflexión del europio que es interpretada como producto de fraccionamiento magmático, con una tendencia hacia las rocas félsicas [1] (Belousova *et al.*, 2002), que se incorpora como Eu^{2+} en la cristalización de plagioclasa, reduciendo el contenido en el magma residual [6] Hoskin & Schaltegger (2003). Las dos muestras presentan rasgos similares con fuerte anomalía positiva en Ce que indica

cristalización en las primeras fases de fraccionamiento magmático [12] Nardi *et al.* (2013), y leve en Sm. Se observa decaimiento además del Eu en Pr, la pendiente entre Gd y Lu es ascendente, Fig. 11. Las anomalías menos marcadas para los elementos mencionados se presentan en el circón 099 de la muestra GR-6597 en la Tabla 5.

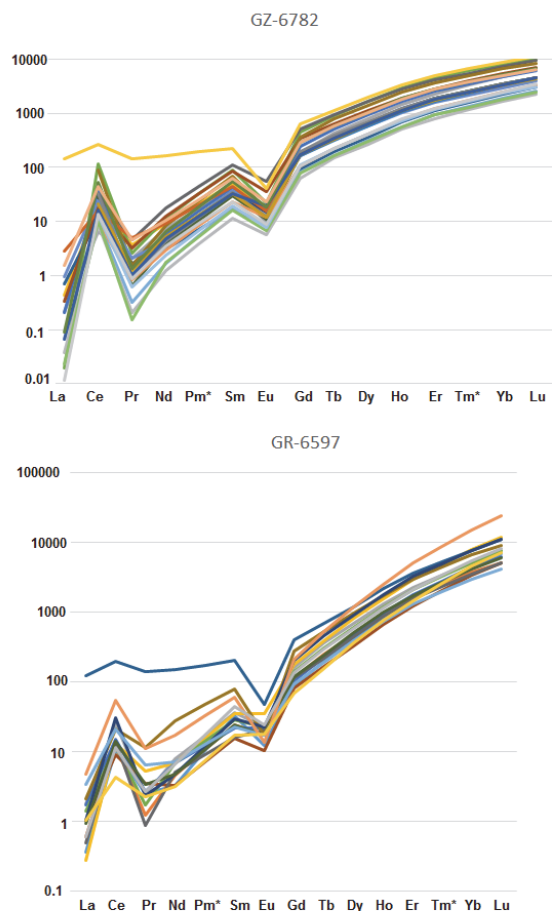


Figura 11. Diagrama REE (McDonough & Sun, 1995), para los circones de las muestras GZ-6782 y GR-6597.

Fuente: Los autores

4. Geocronología

4.1. Complejo Migmatítico de La Cocha – Río Téllez

De esta unidad se realizaron dos dataciones por el método U-Pb en circones sobre muestras tomadas del mismo afloramiento. El primer fechamiento se hizo a partir de un concentrado de circones obtenido de un saprolito (GZ-6782); la datación fue hecha en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano, por el Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronología (GIANG-SGC), mediante el método *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS).

Un segundo análisis geocronológico se adelantó a partir de la muestra de roca GZ-6782dup (900798) que corresponde a un esquisto de Qtz-Pl-Kfs-Bt con granate, mediante trituración de la roca y concentración de circones. Éstos se analizaron en el laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el método *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS).

De la muestra de saprolito se extrajeron 42 circones y de la roca GZ-6782dup se obtuvieron 55 circones, a estas muestras se le realizó un análisis estadístico para mejorar el rango de confiabilidad de la edad, para ello se tuvo en cuenta la relación $[(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$ y se eliminaron los datos con valores discordantes >10%, la muestra de saprolito se redujo a $n=36$ y la de roca GZ-6782dup a $n=25$ circones. El gráfico de concordia e histogramas se elaboraron en el *software de Isoplot/Ex vers. 4.15* [12] Ludwig (2008).

Ambas muestras tienen circones de forma y tamaño comparable: se presentan como cristales euhedrales a subhedrales, de diversos tamaños entre 40 y 450 μm , predominando los prismáticos en el rango entre 50 y 80 micras; de color amarillo pálido a rosado pálido, algunos incoloros y pueden tener inclusiones. En las imágenes de catodoluminiscencia (CL), algunos circones son homogéneos y otros zonados sin claros sobre crecimientos metamórficos, otros presentan núcleos más oscuros, que podrían interpretarse como xenocristales o bien como zonas empobrecidas en tierras raras, Fig. 12.

La muestra GZ-6781, localizada aproximadamente a 1 km de GZ-6782, corresponde a un granofels del Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez. Contiene circones inequigranulares, euhedrales a subhedrales de forma prismática corta y alargada, con tamaños entre 50 y 900 micras, predominan los tamaños entre 200 y 500 μm , Fig. 13, circones de incoloros a amarillo pálido, algunos presentan zonación; fracturas abundantes, rellenas por óxidos de color pardo.

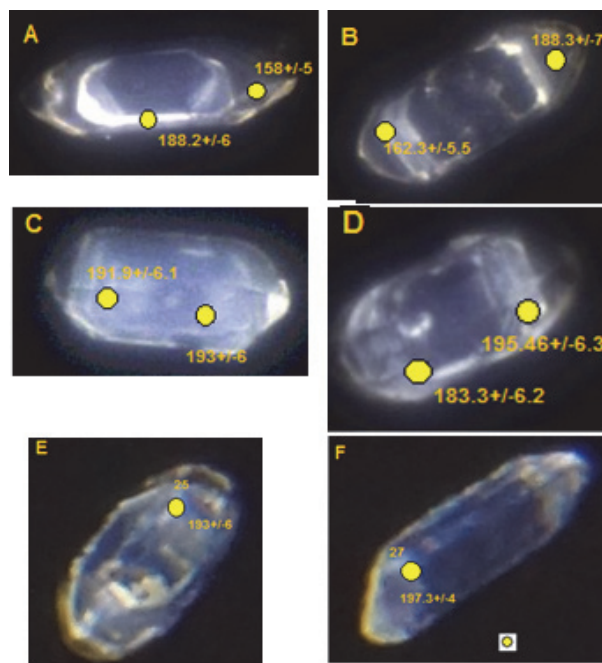


Figura 12. Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GZ-6782 saprolito (A, B, C, D) y GZ-6782Dup (E, F). A y B circones con bordes metamórficos de sobre crecimiento y núcleos heredados.

Fuente: Los autores

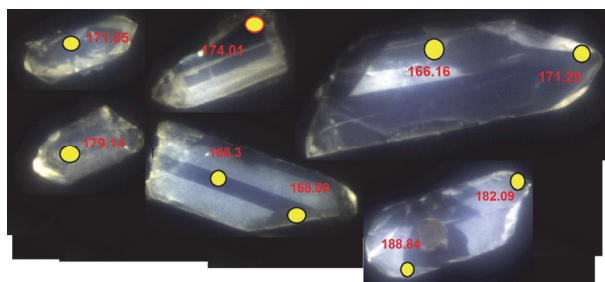


Figura 13. Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GZ-6781.

Fuente: Los autores

En la Fig. 14 se presentan los diagramas de probabilidades de edades en circones de las muestras GZ-6782 de saprolito y roca. La relación Th/U de los circones de la muestra GZ-6782 (saprolito), varía entre 0.014 y 0.983, en cuatro circones la relación Th/U <0.1, Fig. 15, se asocia con circones metamórficos (Rubatto, 2002). Los puntos de ablación están

localizados en los bordes de los cristales, en zonas de sobre crecimiento metamórfico que presentan edades entre 158 y 165 Ma, con una edad promedio ponderada de 163.6 ± 4.7 Ma, que se interpretan como la posible edad del metamorfismo, Fig. 15 y Tabla 5. La segunda población tiene valores de Th/U por encima de 0.1 y presenta edades entre 176 y 205 Ma con edad promedio de 189.4 ± 2.35 Ma, que se interpreta como una probable edad ígnea heredada, Fig. 15B; además, presenta un xenocristal que arrojó una edad de 587 Ma (neo proterozoico). La roca GZ-6782dup los circones tienen relaciones Th/U entre 0.12 y 1.22, la mayoría cercanas a 1, tres de ellas con valores >1, Fig. 15B), valores que sugieren que se trata de circones ígneos, arrojó una edad promedio ponderada de 194.4 ± 2.0 Ma que correspondería a la edad de los circones ígneos en la roca, Fig. 16E y 16F y Tabla 6; además presenta dos edades heredadas de 218.8 Ma y 229.8 Ma (Triásico). No se obtuvo ningún dato que mostrara la edad de metamorfismo.

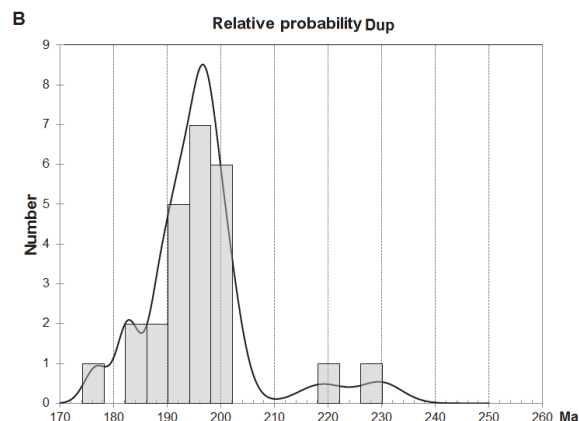
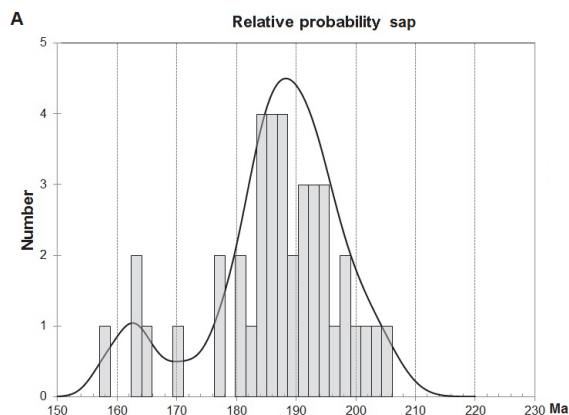
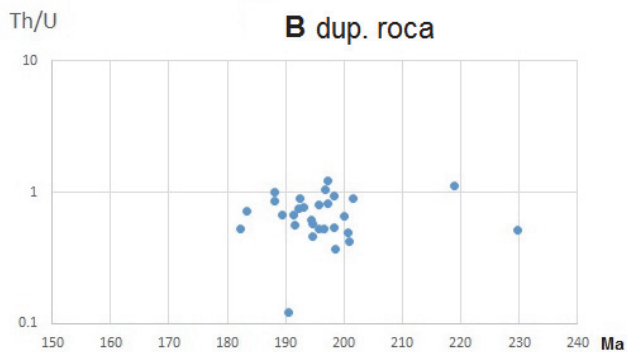
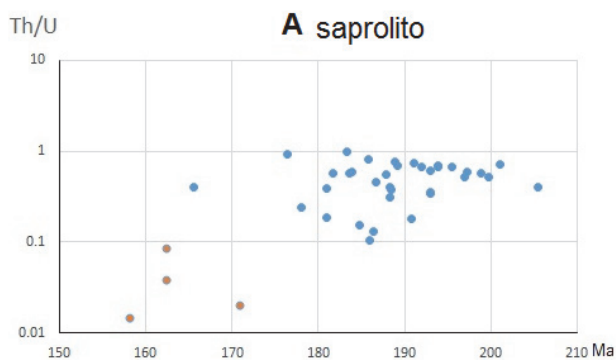


Figura 14. Diagrama de probabilidad en circones. A) Muestra GZ-6782 y B) GZ-6782 Dup, Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores



● Circones metamórficos, relaciones Th/U <0.1

Figura 15. Relaciones Th/U vs edad en los circones de las muestras A) GZ-6782 saprolito y B) GZ-6782Dup roca, Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores

Tabla 6.

Resultados de geocronología en el esquisito de Qtz, Kfs, Bt con Grt en la vereda El Diamante, municipio de San Francisco, Putumayo.

IGM	N Campo	N	W	Localización	Clasificación	Edad U/Pb (Ma)	
	GZ-6782 saprolito	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquisto de Qtz, Kfs, Bt	163.6±4.7	J ₂ Calloviano
	GZ-6782 saprolito	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquisto de Qtz, Kfs, Bt	189.4±2.3*	J ₁ Sinemuriano
900798	GZ-6782dup	622789	688854	Vereda el Diamante	Esquisto de Qtz, Kfs, Bt con Grt.	194.4±2.0*	J ₁ Pliensbachiano

Sombreado edad metamórfica * Edades ígneas heredadas

Fuente: Los autores.

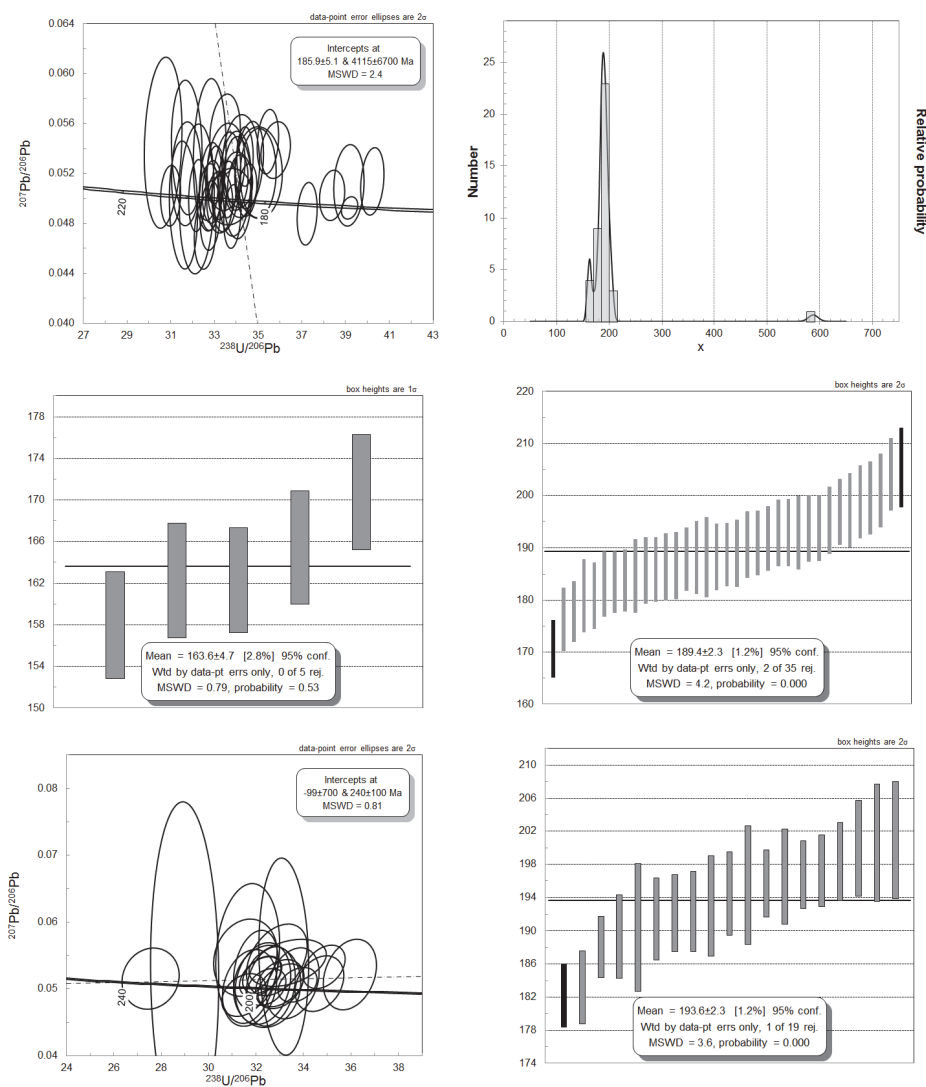


Figura 16. Diagramas de concordia Tera Wasserburg y cálculo de la edad media ponderada para la muestra GZ-6782 (A, B, C, D) y GZ-6782dup (E, F), tomada en el Complejo La Cocha-Río Téllez.

Fuente: Los autores

4.2. Complejo Aleluya

De esta unidad se realizaron dos dataciones en el laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por el método U/Pb en circones, sobre las muestras de roca GR-6596 y GR-6597 clasificadas petrográficamente como granofels.

De la muestra GR-6596 (900671) se extrajeron 35 circones y de la GR-6797 se obtuvieron 41 circones, después

del análisis estadístico para mejorar el rango de confiabilidad de la edad relacionada por el laboratorio, según la relación $[(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})-(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})/^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$ se eliminaron los datos con valores discordantes >10%, la muestra GR-6596 se redujo a 35 y la GR-6797 a 21 circones. El gráfico de concordia y histogramas se elaboraron en el software de Isoplot/Ex vers. 4.15 [8] Ludwig (2008).

Los circones de la muestra GR-6596 son euhedrales a subhedrales, la mayoría euhedrales; predominando los

prismáticos cortos; algunos con formas redondeadas, la mayoría incoloros. La ablación en esta muestra GR-6596 se hizo en el límite entre el núcleo zonado y los bordes, Fig. 17A.

Los circones de la muestra GR-6597 son prismáticos alargados, euhedrales a subhedrales, con tamaño $\leq 100 \mu\text{m}$, varios de ellos fragmentados; los puntos de ablación se hicieron hacia los núcleos en los cristales, Fig. 17B.

La relación Th/U en los circones de la muestra GR-6596, varían entre 0.214 y 1.559, seis de ellas con valores >1 (Figura 18 A). La relación Th/U en la muestra GR-6596, varía entre 0.154 y 2.443, tres de ellas con valores >1 , Fig. 18B. Las edades de los circones de la muestra GR-6596, Fig. 19A y 19C proyectan tres grupos de datos, el más joven entre 166.6 y 172.4 Ma (4 muestras) con edad promedio de 169.1 ± 2.7 Ma, Fig. 19B y una relación Th/U ≤ 0.48 , se interpreta como la probable edad de cristalización de la roca, otro grupo de cinco datos presentan edades entre 179.5 y 185.5 Ma con edad promedio de 181.9 ± 2.7 Ma, Tabla 5 y la mayoría de los resultados (25 muestras) se encuentran entre 191.8 y 207.5 Ma con promedio de 197.8 ± 1.6 Ma, Fig. 19D que se interpretan como edades heredadas.

Los circones de la muestra GR-6597 son prismáticos alargados, euhedrales a subhedrales, con tamaño $\leq 100 \mu\text{m}$, varios de ellos fragmentados; los puntos de ablación se hicieron hacia los núcleos en los cristales, Fig. 17B.

La relación Th/U en los circones de la muestra GR-6596, varían entre 0.214 y 1.559, seis de ellas con valores >1

(Figura 18 A). La relación Th/U en la muestra GR-6596, varía entre 0.154 y 2.443, tres de ellas con valores >1 , Fig. 18B. Las edades de los circones de la muestra GR-6596, Fig. 19A y 19C, proyectan tres grupos de datos, el más joven entre 166.6 y 172.4 Ma (4 muestras) con edad promedio de 169.1 ± 2.7 Ma, Fig. 19B y una relación Th/U ≤ 0.48 , se interpreta como la probable edad de cristalización de la roca, otro grupo de cinco datos presentan edades entre 179.5 y 185.5 Ma con edad promedio de 181.9 ± 2.7 Ma, Tabla 5 y la mayoría de los resultados (25 muestras) se encuentran entre 191.8 y 207.5 Ma con promedio de 197.8 ± 1.6 Ma, Fig. 19D que se interpretan como edades heredadas.

Las edades de los circones de la muestra GR-6597 oscilan entre 169.8 y 235.5 Ma, en el diagrama de concordia Tera Wasserburg y gráfico de probabilidad relativa, Fig. 19E y 19C, se observan tres poblaciones de datos, una compuesta por cinco datos con edad promedio 175.6 ± 4.7 Ma con MSWD 1.6, Fig. 19F, la cual se interpreta como la posible edad de cristalización de la roca; otra con la mayoría de los análisis realizados entre 187.4 y 202.3 Ma, con edad promedio de 194.6 ± 3.2 Ma con MSWD 2.6, Fig. 19H y Tabla 7. El tercer grupo corresponde a los tres circones más antiguos que presentan edades heredadas entre 212.5 y 218.6 Ma, con una edad promedio ponderada de 216.7 ± 4.6 n=3 y MSWD= 0.62 y un circón heredado de 235.5 Ma.

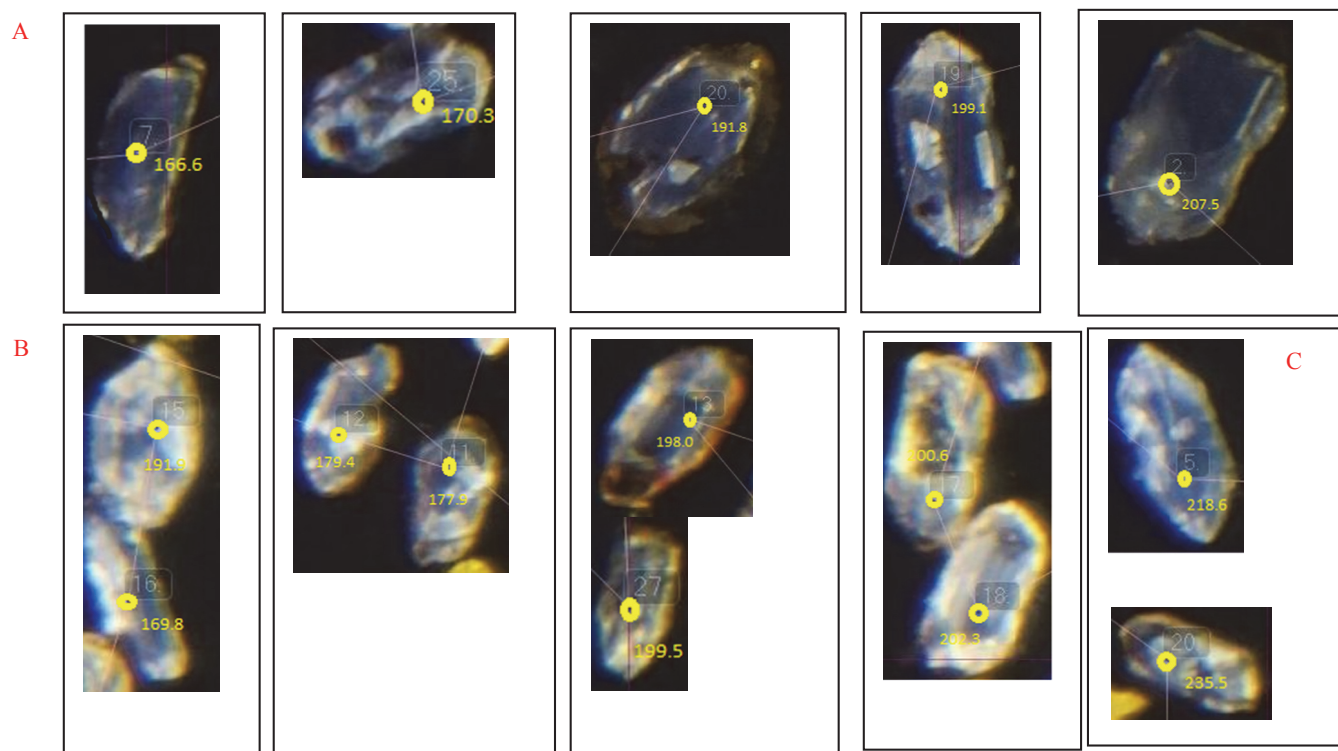


Figura 17. A) Imágenes de catodoluminiscencia de circones de las muestras GR-6596. B) GR-6597. C) circones heredados en GR-6597.

Fuente: Los autores

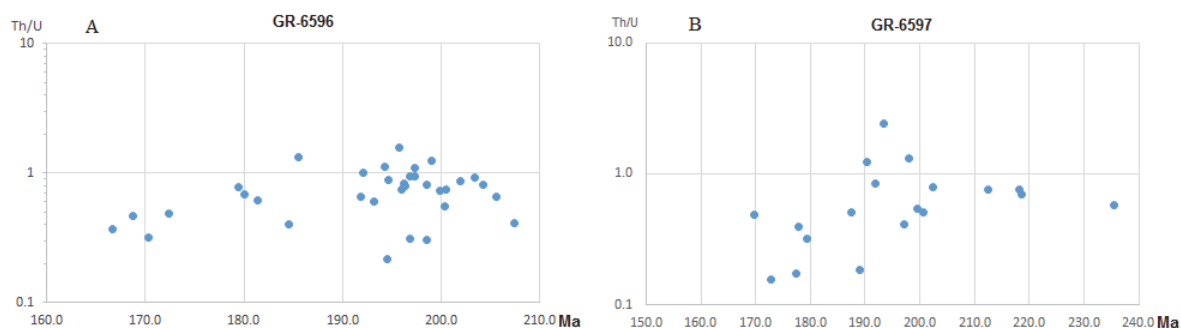


Figura 18. Relaciones edad en Ma vs Th/U en ppm1 en los circones. A) Para GR-6596. B) Para la muestra GR-6597.

Fuente: Los autores

Tabla 7.

Resultados de geocronología de las muestras de granofels GR-6596 y GR-6597 del Complejo Aleluya en la Plancha 323.

IGM	N Campo	N	W	Localización	Clasificación	Edad UPb (Ma)	Piso
900671	GR-6596	823861	843820	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl- Bt	197.8±2.5	J ₁ Hettangiano
900671	GR-6596	823861	843820	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl- Bt	169.1±2.7	J ₂ Bajociano
900672	GR-6597	824348	843798	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl-Bt-Hbl	194.6±3.2	J ₁ Sinemuriano
900672	GR-6597	824348	843798	Vía San Luis	Granofels de Qtz-Pl-Bt-Hbl	175.6±4.7	J ₂ Aaleniano

Fuente: Los autores

5. Conclusiones y discusión

Las características macro y microscópicas de rocas del Complejo La Cocha-Río Téllez indican que la muestra GZ-6782 se formó a partir de un protolito de roca pelítica y desarrolló textura granolepidoblástica debida a metamorfismo regional dinamo térmico. Las muestras GZ-6781 y GZ-6783 corresponden a granofels con protolito de roca plutónica diorítica.

Para las muestras GR-6596 y GR-6597 del Complejo Aleluya, el protolito corresponde a una roca cuarzo-feldespática ígnea.

Los minerales metamórficos que conforman estas rocas son: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, biotita, hornblenda, moscovita, granate, esfena y apatito. La paragénesis de GZ-6782 es cuarzo-plagioclasa-feldespato-biotita y granate, para las muestras GZ-6781 y GZ-6783 es -plagioclasa- cuarzo-feldespato- hornblenda y para las muestras GR-6596 y GR-6597 es cuarzo-plagioclasa-hornblenda-biotita-epidota-titanita, en facies anfibolita.

A los circones de las muestras GZ-6782 y GR-6597 se les realizó análisis de ICP-MS, tienen un patrón de pendientes positivas hacia las HREE, con una deflexión del europio, las dos muestras presentan fuerte anomalía positiva en Ce y leve en Sm. Se observa decaimiento en Pr, la pendiente entre Gd y Lu es ascendente.

La muestra GZ-6782 presenta una edad promedio de 163.6 ± 4.7 Ma, que se asume como la edad del metamorfismo del Complejo La Cocha - Río Téllez, con relación $Th/U < 0.1$ en cuatro circones. La segunda población, arrojó una edad promedio ponderada de 189.4 ± 2.3 Ma con relación $Th/U > 0.1$ y cercana a uno (1), se interpreta como edad de cristalización de la roca. La muestra GZ-6782dup arrojó una edad de 194.4 ± 2.0 Ma, con relación Th/U entre 0,1 y 1, que se interpreta como edad de

cristalización de la roca, además, presenta dos circones con edades triásicas heredadas de 218.8 Ma y 229.8 Ma. El Complejo Migmatítico La Cocha - Río Téllez fue considerado en la literatura geológica colombiana de edad precámbrica, edad basada únicamente en correlación litológica con rocas del Grupo Garzón. Dos edades obtenidas en este trabajo de un saprolito y a partir de roca del mismo afloramiento, sugieren una edad de metamorfismo de 163.6 ± 4.7 Ma y edades de cristalización ígnea de 189.4 ± 2.3 y 193.6 ± 2.3 Ma.

Las edades U-Pb en circones obtenidas en rocas metamórficas clasificadas como granofels, relacionados al Complejo Aleluya y localizadas en el contacto con la Cuarzomonzodiorita de Páez (muestras GR-6596 y GR-6597), presentan para la muestra GR-6596 tres poblaciones de datos: la edad más joven ponderada es de 169.1 ± 2.7 Ma, $n=4$ $MSWD=0.85$, la segunda población dio una edad promedio de 181.9 ± 2.7 Ma, $n=5$ y una tercera población con edad promedio de 197.8 ± 2.5 Ma. Para la muestra GR-6597, el grupo de circones con fechamiento más joven arrojó una edad promedio de 175.6 ± 4.7 Ma; una segunda población dio una edad promedio de 194.6 ± 3.2 Ma y edades heredadas de 212.5, 218.6 y 235.5 Ma. Todas las edades en circones mostraron relación Th/U cercana a 1 que se asocia a circones ígneos.

Al comparar las edades obtenidas en las dos muestras de granofels, localizadas dentro de la zona de contacto entre la Cuarzomonzodiorita de Páez y el Complejo Aleluya y teniendo en cuenta las edades U/Pb reportadas para la Cuarzomonzodiorita de Páez [25] Zapata et al. (2015) y las edades de los pulsos magmáticos jurásicos en el Valle Superior del Magdalena [18] Rodríguez et al. (2015), se aprecia que hay correspondencia entre las edades encontradas en los granofels y las edades de los pulsos del magmatismo jurásico del VSM.

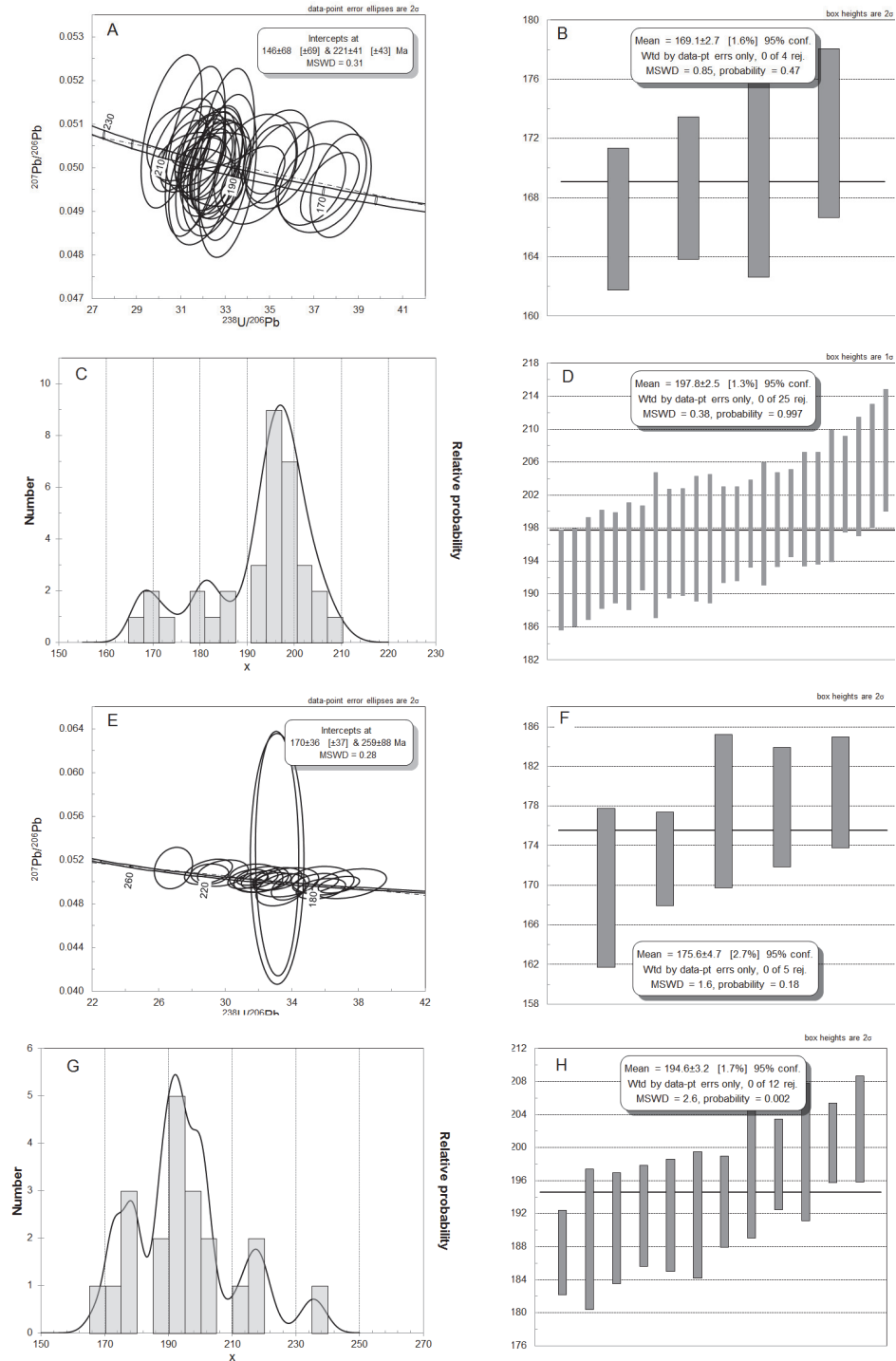


Figura 19. , B, C, D) Diagramas concordia, gráfico de probabilidades y cálculo de la de la edad media y desviación estándar para las edades U-Pb de la muestra GR-6596. E, F, G, H) para la de la muestra GR-6597.

Fuente: Los autores

Los mármoles, metareniscas y cuarcitas del Complejo Aleluya se encuentran intruidos por rocas la Cuarzomonzodiorita de Páez [25] Zapata et al. (2015). La edad mínima del Complejo Aleluya por relaciones

estratigráficas debe ser anterior a 193 ± 1.4 Ma, edad U-Pb más antigua encontrada en la Cuarzomonzodiorita de Páez. La edad ígnea obtenida en este trabajo en rocas migmatíticas (granofels) que aparecen como parte del Complejo Aleluya,

son más jóvenes que las de la Cuarzomonzodiorita de Páez y las edades heredadas son comparables, por tal razón, las rocas migmatíticas deben ser consideradas aparte del Complejo Aleluya y separadas de la Cuarzomonzodiorita de Páez.

Las edades ígneas jurásicas en muestras asociadas a los complejos Aleluya y La Cocha – Río Téllez son comparables, así como edades heredadas triásicas obtenidas en algunos circones. No se obtuvieron edades metamórficas en las muestras de granofels migmatíticos asociados al Complejo Aleluya, pero no se descarta la posibilidad de que tenga edades metamórficas similares a los esquistos del Complejo La Cocha – Río Téllez, que arrojaron una edad metamórfica alrededor de 163 Ma.

Las edades jurásicas metamórficas encontradas en rocas relacionadas al Complejo La Cocha - Río Téllez, utilizando el método U/Pb en circones, son ligeramente anteriores a las reportadas por [3] Blanco-Quintero et al. (2014) en anfibolitas deformadas y esquistos pelíticos con granate obtenidas en la vía Ibagué – Cajamarca, en posición geotectónica similar y que arrojaron edades Ar-Ar entre 147 y 158 Ma, pudiendo ser correlacionables entre sí y representarían bloques metamórficos de edad Jurásico superior, diferentes al basamento Permo Triásico del Complejo Cajamarca, acrecionados y localizados al oriente de éste.

Referencias

- [1] Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S. Y. and Fisher, N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 pp. 602-622, 2002.
- [2] Bermúdez J.G., Zapata G., Rodríguez, G. y Arango M.I., Catálogo de Unidades Litoestratigráficas de Colombia: Cuarzomonzonita de Sombrierillo, Cordillera Central, Huila-Putumayo, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano. 2016, 61 P.
- [3] Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A., Toro, L.M., Moreno, M., Ruiz, E.C., Vinasco, C.J., Cardona, A., Lázaro, C. and Morata, D., Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56(15), pp. 1852-1872, 2014.
- [4] Ferreira, P., Núñez, A., Rodríguez, M.A., Memoria explicativa levantamiento geológico de la Plancha 323 Neiva. Escala 1:100.000, Bogotá, Ingeominas, 2002, 100 P
- [5] Fuquen, J.A. y Núñez, A., Mapa geológico generalizado del departamento del huila. geología, recursos minerales y amenazas geológicas.- Esc. 1:400.000, Santafé de Bogotá, Ingeominas, 1989.
- [6] Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, U., The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, pp. 27-62. 2003.
- [7] Hutchison, C.S., *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*, John Wiley & Sons, 1974, 527 P.
- [8] Ludwig, K., Isoplot version 4.15: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4, 2008.
- [9] McDonough, W.F. and Sun, S.S., The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, pp. 223-253, 1995.
- [10] Murcia, A. y Cepeda, H., Estudio geológico del Complejo Migmatítico de La Cocha-río Téllez, Popayán, Ingeominas, informe interno. 1983, 15 P.
- [11] Nakamura, N., Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38 pp. 757-775, 1974.
- [12] Nardi, L.V.S., Formoso, M.L.L., Müller, I.F., Fontana, E., Jarvis, K. and Lamarão, C., Zircon/rock partition coefficients of REEs, Y, Th, U, Nb, and Ta in granitic rocks: Uses for provenance and mineral exploration purposes. *Chemical Geology*, 335, pp. 1-7, 2013.
- [13] Núñez, A., Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. Memoria explicativa, escala 1:100.000, Bogotá Ingeominas, 263 P. 2003.
- [14] Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A., and Maas, R. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11(3), 36 P, 2010.
- [15] Peccerillo A. and Taylor, T.S., Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1) pp. 63-81, 1976.
- [16] Petrus, J.A., and Kamber, B.S., VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb Geochronology Data Reduction: *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3) pp. 247-270, 2012.
- [17] Ponce, A., Anotaciones sobre geología de la parte SE del departamento de Nariño, Bogotá Ingeominas, 1979, inf. 1769, 53 P.
- [18] Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G. y Bermúdez, J.G., Caracterización magmática del Jurásico del Valle Superior del Magdalena y Cuenca Putumayo, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, 2015, 395 P.
- [19] Rubatto, D., Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb age and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, pp. 123-138, 2002.
- [20] Shand, S.J., *Eruptive Rocks. their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite*, New York, John Wiley & Sons, 1943, 444 P.
- [21] Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O. and Tanner, M., U-Pb Zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy, *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34, pp. 5-18, 2010.
- [22] Stacey, J.S. and Kramers, J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a 2-Stage model, *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2), pp. 207-221, 1975.
- [23] Sun, S.S. and McDonough, W.F., Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Sanders, A.D., Norry, M.J. (Eds.). *Magmatism in oceanic basins*. Geological Society of London, Special Publication, (42) pp. 313-345, 1989.
- [24] Toussaint, J.F y Restrepo, J.J., Modelos orogénicos de tectónica de placas en los Andes Colombianos, *Revista Boletín Ciencias de la Tierra*, 1, pp. 1-47. 1976.
- [25] Zapata G., Rodríguez, G., Arango M.I. y Bermúdez, J.G., Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia: Cuarzomonzodiorita de Páez – Cordillera Central, Cauca-Huila, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, 2015, 52 P.

G. Zapata García, recibió el título de Ing. Geólogo de Minas en 1977 en el Instituto de Exploración Geológica de Moscú (URSS), Esp. en Planeación Urbano-Regional de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Ha trabajado durante 38 años en el Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano, desarrollando labores de cartografía regional principalmente en las cordilleras Occidental y Central, actualmente es Profesional Especializado del Servicio Geológico Colombiano y participa en el Grupo de Estudios Geológicos Especiales sede Medellín.
ORCID: 0000-0002-4961-587X

G. Rodríguez García, se graduó como Ing. Geólogo en 1987 en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, posteriormente realizó estudios de especialización en la Escuela de Minas de París en 1995 y se

especializó en Evaluación Técnico – Económica de Proyectos Mineros, ha trabajado durante 28 años en el Ingeominas hoy Servicio Geológico Colombiano, donde se ha desempeñado como jefe de cartografía de la sede regional del Ibagué, Coordinador de proyectos y grupos de trabajo de cartografía regional y exploración y evaluación de yacimientos, y actualmente coordina la sede Medellín y el Grupo de Estudios Geológicos Especiales del Servicio Geológico Colombiano. Ha sido profesor de Geología de Colombia, Geología de Campo I y Geología física en la Universidad EAFIT, desempeño el cargo de Director de Geología del Grupo Argos, tiene más de 100 publicaciones correspondientes a mapas geológicos – memorias y artículos científicos en geología.

ORCID: 0000-0003-1422-3523

M.I. Arango Mejía, Geóloga egresada de la Universidad de Caldas en el año 2008 y Esp. en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad San Buenaventura en el año 2016, desempeñó actividades en el Grupo de Estudios Geológicos Especiales del Servicio Geológico Colombiano, proyectos sísmicos, cartografía regional y actualmente en proyectos ambientales.

ORCID: 0000-0002-4296-9798