


# Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia

Ana María Correa-Martínez<sup>1\*</sup>; Gabriel Rodríguez<sup>1</sup>; María Isabel Arango<sup>1,2</sup>; Gilberto Zapata-García<sup>1</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019002> 

**Forma de citar:** Correa-Martínez, A.M., Rodríguez, G., Arango, M.I., y Zapata-García, G. (2019). Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 29-54. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019002.

## RESUMEN

Las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, consisten de lavas desde andesíticas hasta riolíticas y de tobas vítreas, líticas y cristalinas respectivamente. También hay diques y cuerpos hipoabisales principalmente andesíticos. Geoquímicamente las rocas volcánicas y piroclásticas exhiben semejanzas químicas, son de la serie calco-alcalina y presentan anomalías negativas de Nb, P y Ti y positivas de Pb, que sugieren una génesis relacionada con subducción. Los resultados geocronológicos por el método U-Pb en circón arrojaron edades de  $192,4 \pm 2,2$  Ma en una lava de andesita basáltica,  $184,9 \pm 2,0$  Ma en una lava andesítica y  $175,9 \pm 1,1$  Ma en una lava riolítica, las cuales indican la ocurrencia de eventos volcánicos en la Formación Noreán desde el Jurásico Inferior hasta el Medio. Las herencias encontradas en los circones sugieren que el arco volcánico se emplazó en un basamento Meso-Neoproterozoico. La Formación Noreán representa un magmatismo de arco continental y es correlacionable con la Formación Saldaña y con las Vulcanitas de Pitalito del Valle Superior del Magdalena, con las unidades volcánicas jurásicas de la Sierra Nevada de Santa Marta y con la Formación La Quinta de la Serranía de Perijá.

**Palabras clave:** Jurásico Inferior a Medio; geocronología U-Pb; rocas volcano-sedimentarias; Valle Medio del Magdalena; Serranía de San Lucas.

## Petrography, geochemistry and U-Pb geochronology of volcanic and pyroclastic rocks of the Noreán Formation in the NW of the Santander Massif, Colombia

## ABSTRACT

The volcanic and pyroclastic rocks of the Norean Formation located to the NW of the Santander Massif, are composed by lavas that range from andesitic to rhyolitic, together with glass, lithic and crystal tuffs. Mainly andesitic dikes and hypabyssal bodies are also present. Geochemically, the volcanic and pyroclastic rocks exhibit chemical similarities, belong to the calc-alkaline series and have negative anomalies of Nb, P and Ti and a positive anomaly of Pb, suggesting a subduction-related genesis. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology resulted in ages of  $192.4 \pm 2.2$  Ma in a basaltic andesite,  $184.9 \pm 2.0$  Ma in an andesitic lava and  $175.9 \pm 1.1$  Ma in a rhyolitic lava, indicating the occurrence of volcanic events in this section of the Noreán Formation from the Lower to the Middle Jurassic. Zircon inheritance suggests that the volcanic arc was emplaced in a Meso-Neoproterozoic basement. The Noreán Formation represents a continental arc magmatism, and can be correlated with the Saldaña Formation and the Pitalito Volcanites of the Upper Magdalena Valley, with Jurassic volcanic units of the Sierra Nevada de Santa Marta and with La Quinta Formation in the Serranía de Perijá.

**Keywords:** Middle-Lower Jurassic; U-Pb geochronology; volcano-sedimentary rocks; Middle Magdalena Valley; San Lucas Ridge.

<sup>1</sup> Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Colombia. (\*) [anmcorreama@unal.edu.co](mailto:anmcorreama@unal.edu.co); [grodriguez@sgc.gov.co](mailto:grodriguez@sgc.gov.co), [isabelara84@hotmail.com](mailto:isabelara84@hotmail.com); [gilbertozapatag@yahoo.com](mailto:gilbertozapatag@yahoo.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Secuencias volcano-sedimentarias sub-aéreas de edad jurásica se encuentran en los Andes Colombianos y afloran en los valles Superior y Medio del Magdalena, en la Cordillera Oriental, la Serranía de San Lucas, la Serranía de Perijá, la Sierra Nevada de Santa Marta y en La Guajira (Bürgl, 1964; Mojica y Dorado, 1987; Mojica y Kammer, 1995). Algunas de estas tienen continuidad al

NE en Venezuela y al sur en Ecuador (Mojica *et al.*, 1996). La Formación Noreán fue definida por Clavijo (1995a, 1995b) en dos bloques localizados a ambos costados del Valle Medio del Magdalena (FIGURA 1), que corresponden a los afloramientos de la Serranía de San Lucas (región occidental) y del NW del Macizo de Santander (región oriental). A esta Formación le han asignado una edad Jurásico Inferior a Medio (Clavijo, 1995a; INGEOMINAS-UIS, 2006a; Leal-Mejía, 2011; González *et al.*, 2015a).

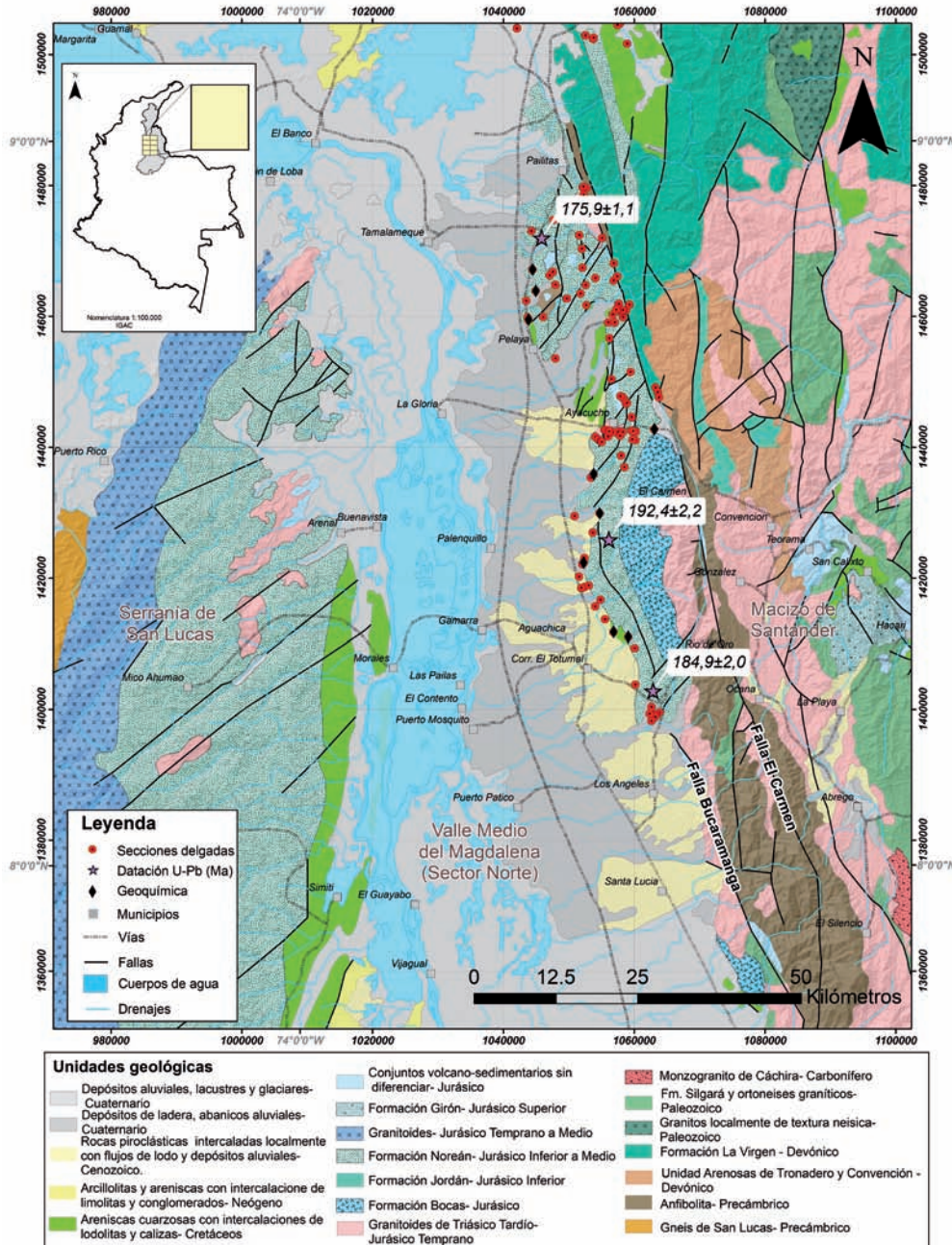


FIGURA 1. Mapa geológico generalizado de la Formación Noreán. Ubicación de secciones delgadas, muestras con litogeoquímica y dataciones radiométricas U-Pb en círculo, analizadas en la región oriental. Modificado de: Clavijo *et al.* (1992), Royero *et al.* (1994), INGEOMINAS-UIS (2006b) y INGEOMINAS (2002a, 2002b). Nombres de fallas según: Velandia *et al.* (2017).

Los estudios petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de las rocas volcánicas (lavas y piroclásticas) y diques de la Formación Noreán, al NW del Macizo de Santander se llevaron a cabo como parte del proyecto Magmatismo Jurásico de Colombia realizado por el Grupo de Estudios Geológicos Especiales de Medellín del Servicio Geológico Colombiano. En este artículo se presentan nuevos resultados obtenidos en dicha investigación, con los cuales se interpretan las principales características geológicas del vulcanismo que originó la Formación Noreán, el intervalo de tiempo de la actividad volcánica y se plantean algunas correlaciones entre esta Formación y otras a nivel regional.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

En el costado NW del Macizo de Santander en la Cordillera Oriental, el basamento asociado con la Falla Bucaramanga y la Falla El Carmen en los alrededores de Ocaña, está compuesto por anfibolitas, gneises anfibólicos, migmatitas, granulitas máficas y félsicas y granofelsas con olivino (González *et al.*, 2017), tradicionalmente consideradas como parte del Gneis de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973; Restrepo-Pace, 1995; Restrepo-Pace *et al.*, 1997; García y Ríos, 1999), con edades reportadas del Precámbrico (Goldsmith *et al.*, 1971; Restrepo-Pace *et al.*, 1997). Hacen parte también del basamento unidades metamórficas, ígneas y sedimentarias del Paleozoico como los Esquistos de Silgará (Mantilla-Figueroa *et al.*, 2016), los Ortogneises y granitoides ordovícicos (Ward *et al.*, 1973; Van der Lelij *et al.*, 2016), la Unidad Metasedimentaria de La Virgen (Royero *et al.*, 1994; Royero, 1996) o Formación La Virgen (INGEOMINAS-UIS, 2006c), las unidades Arenosa de Tronadero y Arenosa Lutítica de Convención (Daconte y Salinas, 1980). Emplazados en el basamento se hallan plutones del límite Triásico Superior–Jurásico Inferior (Ward *et al.*, 1973; Van der Lelij *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2017). Suprayaciendo parte de estas unidades se encuentran la Formación Bocas (Clavijo, 1995a) del Jurásico Inferior, la Formación Noreán del Jurásico Inferior a Medio (Clavijo, 1995a) y la Unidad Conglomerática de Arenal del Jurásico Superior (Clavijo, 1995a).

En la Serranía de San Lucas el basamento metamórfico corresponde al Gneis de San Lucas compuesto por gneises, migmatitas, anfibolitas y granulitas (Bogotá y Aluja, 1981), Precámbrico (Ordóñez-Carmona *et al.*, 2009; INGEOMINAS-UIS, 2006c; Cuadros, 2012) y en una menor extensión a la Unidad Metamórfica de Pinillos que es paleozoica (INGEOMINAS-UIS, 2006d). Sobre este de manera discordante o fallada se

encuentran la Formación Sudán (Geyer, 1969; 1982; INGEOMINAS-UIS, 2006d) del Triásico Superior, la Formación Morrocoyal del Jurásico Inferior (Geyer, 1982) y los conjuntos volcanosedimentarios de la Formación Noreán (Clavijo, 1995a). Intruyendo al basamento y parte de las formaciones mencionadas está el Batolito de Norosí (Bogotá y Aluja, 1981) del Jurásico Inferior (Ordóñez-Carmona *et al.*, 2009; Leal-Mejía, 2011).

Tanto en el flanco NW de Macizo de Santander y la Serranía de San Lucas, como en el Valle Medio del Magdalena hay secuencias sedimentarias del Cretácico (Formación Tablazo, Simití, La Luna) al Eoceno Temprano, y depósitos sedimentarios del Neógeno (Clavijo *et al.*, 2008). En el Sector Norte del Valle Medio del Magdalena la Formación Noreán constituye el basamento pre-Cretácico (Sarmiento *et al.*, 2015) de las secuencias sedimentarias cretácicas, algunas productoras de petróleo.

## ANTECEDENTES DE LA FORMACIÓN NOREÁN

La Formación Noreán fue definida de manera informal como Unidad Volcanoclástica de Noreán por Clavijo (1995a) y de manera formal como Formación Noreán por Clavijo (1995b). Al NW del Macizo de Santander la secuencia fue cartografiada por Clavijo *et al.* (1992) y Royero *et al.* (1994) como Unidad Volcanoclástica de Noreán y como Formación Jordán por Daconte y Salinas (1980). En la Serranía de San Lucas la unidad fue delimitada por Kassem y Arango (1977) y estudiada por Bogotá y Aluja (1981). INGEOMINAS-UIS (2006a, 2006c, 2006d, 2006e) la llaman Formación Noreán, mientras que González *et al.* (2015a, 2015b, 2015c, 2015d) la denominan Complejo Volcánico de Noreán.

La Formación Noreán fue descrita en los alrededores del caserío de Noreán, de donde deriva su nombre, en el sur del Departamento del Cesar. La localidad tipo se ubica en la carretera Buturama-Bombeadero (Clavijo, 1995a). La unidad corresponde a una sucesión potente de rocas volcano-sedimentarias aflorantes, desde seudoestratificada a bien estratificada, con interdigitaciones comunes entre los conjuntos litológicos (Royero, 1996).

Al NW del Macizo de Santander, la Formación Noreán suprayace en continuidad estratigráfica a la Formación Bocas e infrayace en discontinuidad a la Formación Tablazo (Clavijo, 1995a) y en algunos

lugares se encuentra en contacto fallado con el Gneis de Bucaramanga, con la Formación La Virgen y con las formaciones Tablazo y La Luna (Royero, 1996). En esta región Clavijo (1995a) dividió la Formación Noreán en cuatro conjuntos: clástico-piroclástico (Jncp), piroclástico-epiclástico (Jnpe), efusivo dacítico (Jned) e hipoabisal andesítico (Jnha); mientras que Royero (1996) la dividió en seis conjuntos: Piroclástico Epiclástico (Jnpe), Efusivo Esferulítico (Jnee), Piroclástico y Efusivo Dacítico (Jnpe), Efusivo Dacítico (Jned), Efusivo Riolítico (Jner) e Hipoabisal Andesítico (Jnha).

En la Serranía de San Lucas, la Formación Noreán es suprayacida de manera discordante por la Formación Tablazo y por la Unidad Conglomerática de Arenal (Clavijo, 1995a) y de manera local, suprayace concordante a la Formación Morrocoyal (INGEOMINAS-UIS, 2006c, 2006d). En esta región, la Formación Noreán exhibe contactos en partes fallados y en otras discordantes, con el Batolito de Norosí y la Formación Sudán y discordantes con el Gneis de San Lucas (González *et al.*, 2015a). La Formación en la Serranía de San Lucas fue dividida en cuatro conjuntos: efusivo de conducto, piroclástico-epiclástico, efusivo piroclástico dacítico e hipoabisal andesítico (Clavijo, 1995a).

La edad de la Formación Noreán es Jurásico Inferior a Medio según Clavijo (1995a), Royero (1996) e INGEOMINAS-UIS (2006d, 2006e). Los dos primeros autores establecieron ese rango de edades basados en relaciones estratigráficas, mientras que los últimos lo hicieron según edades K-Ar en roca total de  $194 \pm 6$  Ma y Rb-Sr en roca total de  $161 \pm 27$  Ma. Leal-Mejía (2011) obtuvo edades U-Pb en circón de  $201,6 \pm 3,6$  y  $196,1 \pm 4,4$  Ma y para González *et al.* (2015a) la unidad es del Jurásico Inferior de acuerdo con edades U-Pb en circón entre  $194 \pm 2,3$  Ma y  $189 \pm 3,3$  Ma y Lu-Hf entre 197 y 187 Ma.

Esta unidad se ha interpretado como el registro de un importante evento volcánico principalmente de tipo explosivo, cuyo material se depositó en una cuenca de tipo graben en parte inundada por un mar somero, en parte drenada por ríos y lagos, en lo que hoy corresponde al Valle Medio del Magdalena y Cesar (Clavijo, 1995a). Las rocas se derivaron por cristalización fraccionada de un magma basáltico calco-alcálido relacionado a un ambiente de arco (González *et al.*, 2015a).

La Formación Noreán ha sido correlacionada en el Macizo de Santander con la Formación Jordán (Clavijo, 1995a) y según INGEOMINAS-UIS (2006d) con las rocas volcano-sedimentarias del mal llamado Complejo Intrusivo-Extrusivo (Daconte y Salinas,

1980). En la Serranía de San Lucas, Clavijo (1995a) plantea semejanzas de la Formación Noreán con las “capas rojas” en la quebrada La Mojana (Geyer, 1982) y con una secuencia en la quebrada Yanacué (Bogotá y Aluja, 1981). Según INGEOMINAS-UIS (2006d) en esta región la Formación Noreán se correlaciona con el Conjunto Volcánico de Santa Rosa (Bogotá y Aluja, 1981) y de acuerdo con González *et al.* (2015a) con la Formación Morrocoyal. En la Sierra Nevada de Santa Marta y en el Valle del Río Cesar, Clavijo (1995a) sugiere una correlación de la unidad con la Formación Guatapurí (Tschanz *et al.*, 1969), con los conjuntos ignimbríticos de Caja de Ahorros, La Paila y La Piña (Tschanz *et al.*, 1969) y en la Serranía del Perijá con la Formación La Quinta (Maze, 1984). González *et al.* (2015a) proponen también correlación con las formaciones Corual y Los Indios en la Sierra Nevada de Santa Marta y la Formación Rancho Grande (Tschanz *et al.*, 1974) en la Península de La Guajira. En el Valle Superior del Magdalena ha sido correlacionada por varios autores con la Formación Saldaña (Cediel *et al.*, 1981).

## MÉTODOS DE TRABAJO

Para el desarrollo de la investigación se hizo un muestreo regional en las unidades volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander en las planchas geológicas 55, 65, 66, 75, 76 y 86 a escala 1:100.000 del INGEOMINAS. En lo correspondiente a petrografía se recopilaron los análisis petrográficos realizados en proyectos de cartografía del Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS) y se reanalizaron 124 secciones delgadas. Se elaboraron en Bogotá 15 secciones delgadas a muestras colectadas en el presente estudio, que fueron analizadas en el Laboratorio de Petrografía del Servicio Geológico Colombiano en la Regional Medellín.

Los análisis geoquímicos de trece muestras se hicieron en el laboratorio de Geoquímica Analítica del Servicio Geológico Colombiano, sede Bogotá. Los óxidos mayores y elementos menores se analizaron con un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X, Panalytical AXIOS Mineral; los primeros se cuantificaron a partir de muestras fundidas con metaborato y tetraborato de litio, mientras que los segundos en muestras prensadas. Para el análisis de elementos traza, se usó un espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado, ICP-MS, Perkin Elmer NEXION.

Los diagramas petrográficos y geoquímicos se obtuvieron usando el *software* GCDkit de Janoušek *et al.* (2006).

Dos rocas volcánicas intermedias y una volcánica ácida se dataron por el método U-Pb mediante ablación laser unido a espectrometría de masas de acoplamiento inductivo a plasma (siglas en inglés LA-ICP-MS) en circón. Los circones fueron concentrados en el laboratorio químico del Servicio Geológico Colombiano sede Medellín, utilizando separación hidrodinámica y magnética. Los circones se seleccionaron manualmente con la ayuda de lupa binocular en el Laboratorio de Petrografía de la sede Medellín. De los montajes de granos de circón se adquirieron imágenes de catodoluminiscencia (CL) por medio de luminoscopios.

Los análisis isotópicos de dos muestras (TCR-400 y LMC-095) se llevaron a cabo en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano, siguiendo los procedimientos descritos en Peña-Urueña *et al.* (2018). Los análisis se realizaron en un equipo de ablación Photon Machines con un láser Excimer de 193 nm, acoplado a un espectrómetro de masas tipo Element 2. Los isótopos utilizados para la integración manual son  $^{238}\text{U}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{204}\text{Pb}$ . Como patrones de referencia se usaron: Plešovice (Sláma *et al.*, 2008), FC-1 (Coyner *et al.*, 2004), Zircon 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995; Wiedenbeck *et al.*, 2004) y Mount Dromedary (Renne *et al.*, 1998). Los puntos analizados en los circones fueron de 30 micrones de diámetro. La reducción de datos se realizó mediante el programa Iolite v2.5<sup>®</sup> en IGORPro6.3.6.4<sup>®</sup> (Paton *et al.*, 2010; Hellstrom *et al.*, 2008). La corrección por plomo común se realizó de acuerdo con el modelo de evolución según Stacey y Kramers (1975). Los resultados finales corresponden a la media de los datos obtenidos luego de aplicar una discriminación de datos a 2 desviaciones estándar.

Una muestra (TCR-405) fue datada en el laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Juriquilla, empleando un *Thermo X series QICPMS* acoplado a un *Resonetics*, estación de trabajo láser excimer Resolución M050. Los procedimientos y equipos se describen en detalle en Solari *et al.* (2010). Los puntos analizados fueron de 23 micrómetros. Las incertidumbres de 2 sigma propagadas se lograron según Paton *et al.* (2010). Las proporciones  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , edades y errores se calcularon según Petrus y Kamber (2012). Las concentraciones de U y Th fueron calculadas empleando un circón estándar externo de acuerdo a Paton *et al.* (2010).

Los cálculos de las edades y los gráficos geocronológicos se hicieron con el programa Isoplot V4.15 (Ludwig, 2012).

## RESULTADOS

### Petrografía

La Formación Noreán al NW del Macizo de Santander está compuesta principalmente por tobas donde predominan las vítreas (51 %) sobre las líticas (25 %) y las de cristales (24 %) y por lavas que varían en composición desde basálticas hasta riolíticas (FIGURA 2A), con predominio de andesitas (60 %), seguidas de latitas-riolitas (25 %) y de manera subordinada de basaltos (12 %) y dacitas (3 %). En menor proporción se encuentran rocas sedimentarias (lodolitas y limolitas), diques y cuerpos hipoabisales, estos últimos principalmente de composición andesítica. En este trabajo se presenta una descripción generalizada por litotipos de rocas volcánicas y piroclásticas y no se agrupan según los conjuntos de Clavijo (1995a). Para la clasificación de rocas volcánicas se siguió la propuesta por Streckeisen (1978). Para la clasificación de los cristales según los tamaños se usan rangos de tamaños, que corresponden a parámetros establecidos en los protocolos para descripciones petrográficas del Servicio Geológico Colombiano y son los siguientes: fenocristales  $\geq 2$  mm, microfenocristales entre 2 y 0,5 mm y microcristales  $< 0,5$  mm. La clasificación de las rocas piroclásticas según el tipo de componentes corresponde a la de Schmid (1981). Las tobas se clasifican de acuerdo a los contenidos de fragmentos de cristales, líticos y vidrio, en tobas de cristales, líticas y vítreas (FIGURA 2B) y combinaciones de estas así: tobas vítreo-cristalinas, tobas líticas-vítreas, etc.

### Características microscópicas de las rocas volcánicas

**Basaltos:** Los basaltos exhiben texturas principalmente porfídicas y algunas tienen textura microlítica fluidal. Estas rocas consisten de feno a microfenocristales de plagioclasa (12-63 %), anfíbol (0-32 %), clinopiroxeno (0-25 %), olivino serpentizado (0-18 %) y ocasionalmente ortopiroxeno, dispersos en una matriz, que puede ser micro a criptocristalina y vítrea. La falta de cristales de plagioclasa con cortes apropiados y la alteración de este mineral no permitieron determinar su composición por medios ópticos. Algunas muestras presentan amígdalas rellenas de clorita y epidota-clinozoisita y otras microvetillas rellenas por hematita y epidota-clinozoisita. Los minerales de alteración son sericita y saussurita en la plagioclasa, clorita en piroxenos y anfíboles, serpentina en ortopiroxeno y olivino y carbonatos y clorita en la matriz.

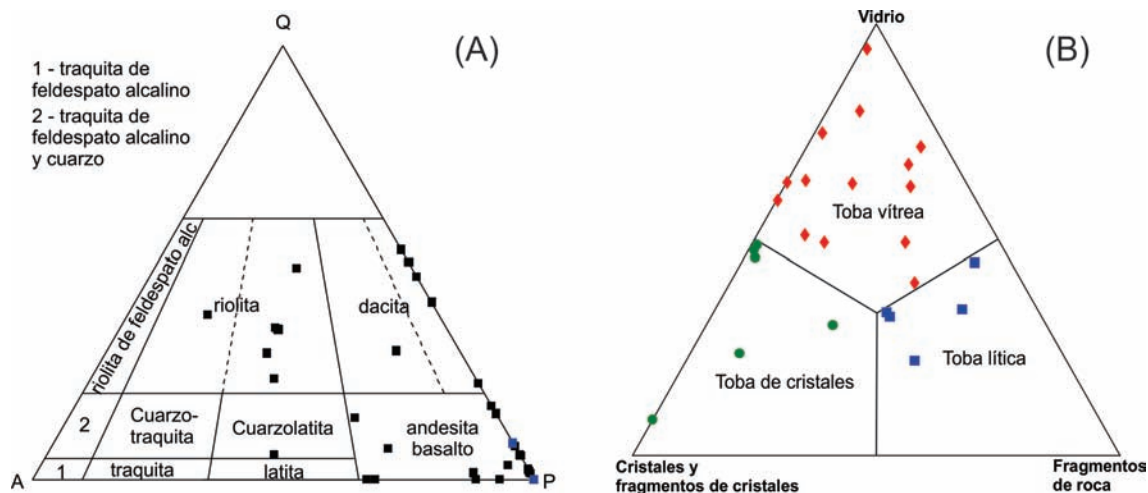


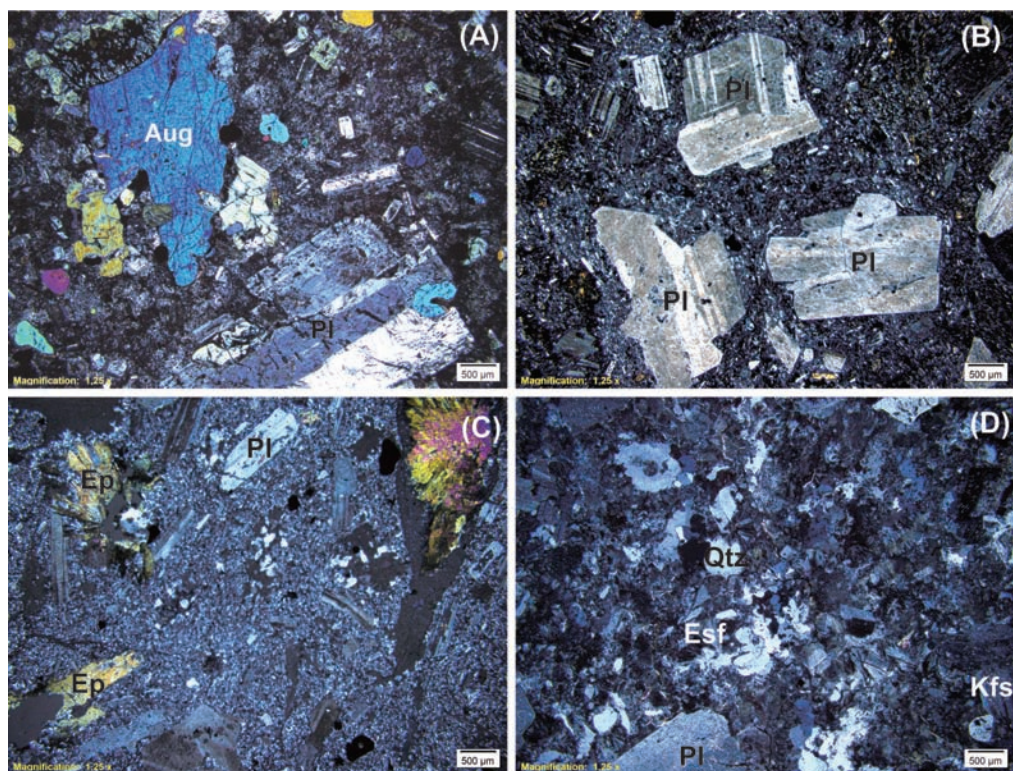
FIGURA 2. A. Diagrama de clasificación QAPF (sobresaturado en Si) para rocas volcánicas de Streckeisen (1978) de las lavas y diques de la Formación Noreán. Q=Cuarzo, A= Feldespato potásico y P= Plagioclasas ( $An_{100}-An_{05}$ ). Cuadros negros: lavas. Cuadros azules: diques. B. Diagrama de Schmid (1981) para clasificación de tobas de la Formación Noreán. Rombo rojo: tobas vítreas. Círculos verdes: tobas de cristales. Cuadros azules: tobas liticas.

**Andesitas:** Las andesitas (FIGURA 3A, 3B) exhiben texturas porfídica, holocristalina, hialocristalina y microlítica fluidal con matrices que pueden ser de textura hialocristalina, hialocristalina intersertal, fluidal y microcristalina seriada. En la matriz es común encontrar masas de clorita que corresponden a vidrio alterado y en ocasiones de palagonita. Otras texturas subordinadas son la microintersertal, glomeroporfídica, microporfídica con matriz felsítica y la vesicular. Los fenocristales y microfenocristales de las andesitas consisten principalmente de plagioclasa (11-88 %) y en menores cantidades clinopiroxeno (0-24 %), hornblenda (0-20 %), biotita (0-13 %) y ferromagnesianos alterados (0-5 %). Las andesitas pueden contener pequeñas cantidades de cuarzo y feldespato potásico, y los minerales accesorios son opacos, apatito, titanita y circón. En las andesitas basálticas el porcentaje de clinopiroxeno es superior al 4% y pueden presentar ortopiroxenos u olivinos alterados. La composición de la plagioclasa, determinada por el método Michel-Lévy, es variable entre  $An_{28}$  y  $An_{49}$ , siendo predominante la andesina ( $An_{32-38}$ ). En algunas muestras de andesita se aprecian amígdalas irregulares rellenas de cuarzo, clorita, calcita y epidota. Los minerales de alteración son sericita y saussurita en la plagioclasa, clorita en biotita, piroxenos y anfíboles, serpentina en ortopiroxeno y olivino y carbonatos y clorita en la matriz.

**Dacitas:** Las dacitas (FIGURA 3C) tienen textura holocristalina porfídica a microporfídica, con matriz desde microcristalina felsítica hasta criptocristalina.

Otras texturas son las seriadas y glomeroporfídicas. Los fenocristales a microfenocristales en las dacitas están representados en mayor cantidad por plagioclasa (9-40 %) y cuarzo (10-45 %) y en menor proporción por hornblenda (0-14 %) y biotita (0-8 %), con opacos, apatito y circón como minerales accesorios. La composición de la plagioclasa en las dacitas determinada por el método Michel-Lévy es relativamente homogénea entre  $An_{29}-An_{32}$  (oligoclasa-andesina). En algunas muestras es posible encontrar amígdalas rellenas por cuarzo o por epidota y clorita. Los minerales de alteración corresponden a sericita y arcillas en la plagioclasa y a clorita en la biotita.

**Latitas y riolitas:** Las latitas exhiben textura porfídica con matriz hialocristalina felsítica por desvitrificación del vidrio y en ocasiones traquítica. Algunas muestras también exhiben textura glomeroporfídica. Las riolitas (FIGURA 3D) además de las texturas porfídicas hialocristalinas, también presentan texturas esferulíticas y micrográficas. Los fenocristales y microfenocristales en estas rocas corresponden principalmente a plagioclasa (0-44%), feldespato potásico (0-42 %) y cuarzo (0-41 %), en algunas también hay biotita (0-7 %) y puede haber pequeñas cantidades de hornblenda y como minerales accesorios se encuentran apatito, circón y opacos. La plagioclasa según el método de Michel-Lévy tiene composición variable  $An_{11}-An_{36}$  (oligoclasa-andesina). Los principales minerales de alteración son sericita en plagioclasa, caolín en feldespato potásico, clorita en biotita.



**FIGURA 3.** Características petrográficas de las rocas volcánicas de la Formación Noreán. **A.** Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (Pl) y augita (Aug) en andesita porfídica - IGM-901034. **B.** Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa en matriz localmente fluidal en andesita porfídica - IGM-901006. **C.** Textura microporfídica con microfenocristales de plagioclasa en matriz felsítica y amígdalas rellenas de epidota (Ep) en dacita porfídica - IGM-401427. **D.** Textura porfídica y esferulítica con fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico (Kfs) y microfenocristales de cuarzo (Qtz) en riolita - IGM-401441. Abreviatura de los minerales según Whitney y Evans (2010).

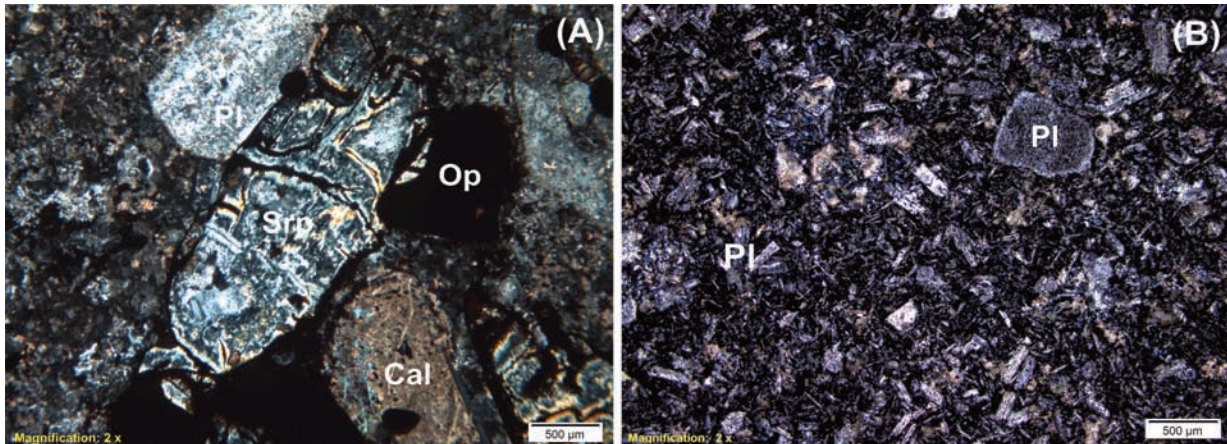
#### *Características microscópicas de diques*

Los diques analizados corresponden a las muestras IGM900987 (GZ-6862) e IGM901020 (MIA-664B), los cuales se clasifican como andesitas porfídicas. El primero con feno y microfenocristales de plagioclasa  $-An_{32}-$  (42 %) y un ferromagnesiano alterado que posiblemente era un ortopiroxeno (2,5 %) (FIGURA 4A) y amígdalas de calcita, en una matriz microcristalina felsítica y vítrea desvitrificada, con opacos muy finos diseminados. Como minerales accesorios se encuentran microcristales de apatito y opaco. En esta muestra los minerales de alteración son sericita y calcita en plagioclasa, serpentina, clorita y opacos en ortopiroxeno. El segundo dique con feno y microfenocristales de plagioclasa  $-An_{36}-$  (18 %) y esqueletos de hornblenda (1,5 %) y titanita accesoria en matriz microlítica y vítrea desvitrificada, con opacos muy finos diseminados (FIGURA 4B). Los minerales de alteración en la andesita IGM901020 son sericita y calcita en la plagioclasa, clorita, calcita y titanita en la hornblenda y clorita en el vidrio de la matriz.

#### *Características microscópicas de las rocas piroclásticas*

Las tobas en general son de colores violáceo, gris, verde y rojo. Están compuestas por fragmentos cristalinos de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y de manera subordinada biotita y hornblenda, con proporción variable de vidrio volcánico y fragmentos de rocas volcánicas; con tamaño de grano entre lapilli y ceniza gruesa. Las tobas exhiben texturas fragmentales, porfiríticas y menos frecuente perlíticas.

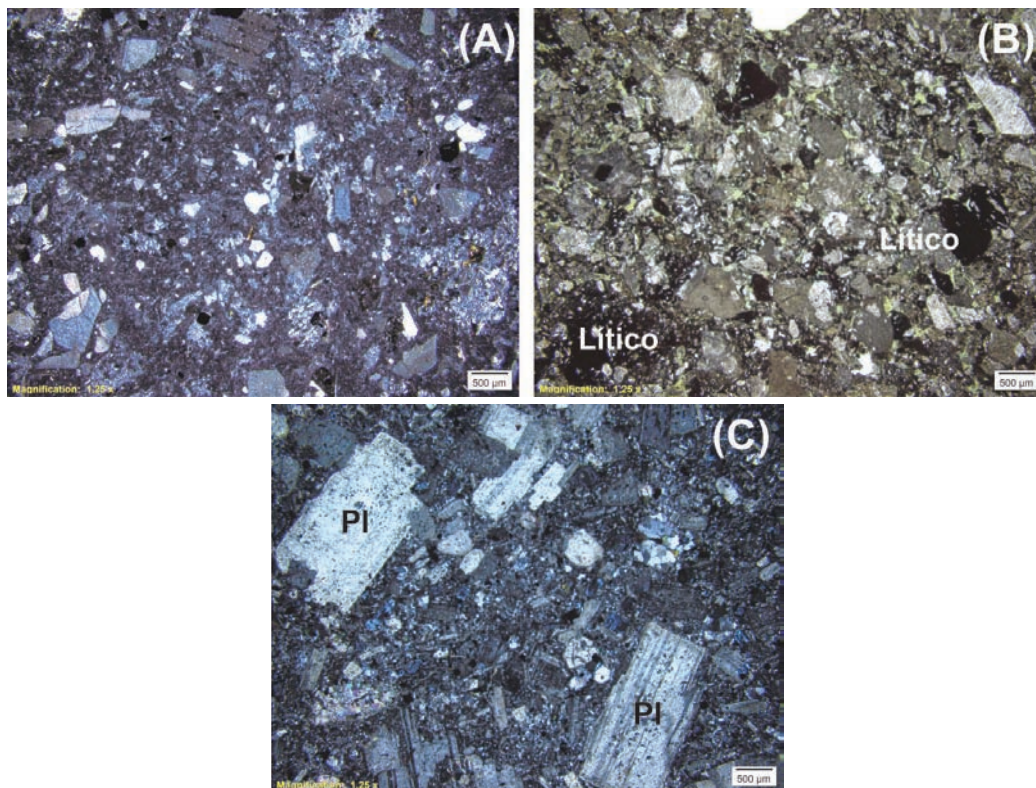
Tobas de vidrio: Las tobas de vidrio exhiben textura fragmental con cantidades menores y variables de fragmentos de cristales (FIGURA 5A) y de líticos. La matriz varía de vítrea a criptocristalina por desvitrificación. En algunas muestras la matriz consiste de fragmentos de *shards* desvitrificados. Es posible observar textura de flujo en la matriz. Los fragmentos de cristales son de plagioclasa, cuarzo, biotita, ceolitas, opacos y circón, mientras que los líticos son principalmente de rocas volcánicas basálticas a andesíticas y de manera subordinada de líticos accidentales.



**FIGURA 4.** Características petrográficas de diques de la Formación Noreán. **A.** Fenocristales de plagioclasa alterada a sericita y calcita y pseudomorfo de serpentina según ortopiroxeno en dique andesítico - IGM900887. **B.** Microfenocristales de plagioclasa en matriz microlítica y vítrea en dique andesítico - IGM-901020

**Tobas líticas:** Las tobas líticas (FIGURA 5B) exhiben textura fragmental, compuestas por fragmentos líticos, con proporciones variables de fragmentos de cristales, embebidos o flotando en una matriz que puede ser vítrea a microcristalina. El componente vítreo de la matriz comúnmente está desvitrificado y de manera esporádica alterado a palagonita. Los fragmentos líticos son principalmente juveniles de rocas volcánicas

como basaltos andesíticos, andesíticas y riolitas; tobas y en menor cantidad fragmentos accidentales de lodolitas y areniscas. Los fragmentos de cristales son principalmente de cuarzo, plagioclasa y opacos y en menor proporción biotita, feldespato potásico, apatito, circón, calcita y hornblenda. La roca presenta una estructura masiva no gradada, con orientación incipiente tanto de los piroclastos como de la matriz.



**FIGURA 5.** Características petrográficas de rocas piroclásticas de la Formación Noreán. **A.** IGM-901036 toba de vidrio con fragmentos de cristales en matriz vítrea desvitrificada. **B.** IGM-901023 toba lítica con fragmentos de líticos y cristales en matriz vítrea desvitrificada. **C.** IGM-900976 toba de cristales con fragmentos de cristales principalmente de plagioclasa en matriz vítrea desvitrificada.



TABLA 1. Resultados de óxidos mayores de lavas, diques y rocas piroclásticas de la Formación Noreán.

IGM	No. Campo	Latitud N	Longitud W	Clasificación petrográfica	Conjunto	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI
901006	LMC-095	8°18'54,24"	73°32'40,21"	Andesita porfídica	Jnep: Clástico-Piroclástico	65,38	0,65	14,64	6,41	1,92	2,05	6,6	0,62	0,264	0,57	1,3
901034	TCR-400	8°26'58,34"	73°34'16,09"	Andesita basáltica	Jnep: Clástico-Piroclástico	60,53	0,82	15,14	6,83	3,31	5,91	2,33	3,32	0,188	1,08	1,35
901038	TCR-405	8°52'0,41"	73°39'50,22"	Riolita	Jner: Efusivo-Riolítico	76,57	0,09	12,96	1,02	<0,10	0,12	3,86	4,83	<0,024	0,19	0,44
901040	TCR-410	8°47'35,92"	73°40'19,96"	Andesita porfídica	Jnha: Hipoabisal Andesítico	65,56	0,57	16,35	4,55	1,17	1,67	4,65	3,42	0,173	1,44	1,52
901021	MIA-668B	8°49'21,53"	73°40'36,14"	Andesita basáltica	Jner: Efusivo-Riolítico	49,81	1,00	17,05	9,58	5,3	6,65	3,31	2,42	0,409	1,99	3,86
901022	MIA-669A	8°45'12,55"	73°40'56,66"	Riolita	Jner: Efusivo-Riolítico	72,29	0,33	14,36	2,39	0,39	0,14	2,81	5,77	0,067	0,48	1,26
900987-	GZ-6862	8°14'26,05"	73°30'32,85"	Andesita porfídica	Formación Noreán sin diferenciar	60,63	1,02	15,23	5,84	1,15	4,12	3,62	4,32	0,309	0,69	3,5
901020-	MIA-664B	8°32'23,73"	73°35'32,27"	Andesita porfídica	Jnha: Hipoabisal Andesítico	53,07	1,35	15,91	8,69	4,7	4,55	3,6	2,3	0,567	1,14	4,9
900976+	GR-6747	8°29'9,37"	73°35'2,47"	Toba de cristales	Jnha: Hipoabisal Andesítico	57,99	0,84	16,57	7,28	3,32	3,15	5,09	2,3	0,253	0,94	2,94
901005+	LMC-094	8°19'18,55"	73°33'53,48"	Toba de cristales	Jned: Efusivo Dactílico	71,71	0,52	14,34	2,76	0,5	0,62	4,35	3,45	0,132	0,42	1,3
901035+	TCR-402	8°25'3,99"	73°36'23,49"	Toba de cristales	Jned: Efusivo Dactílico	50,16	0,84	15,26	8,74	1,47	8,96	6,84	0,53	0,358	1,15	6,59
901023+	MIA-675A	8°36'6,92"	73°30'28,27"	Toba lítica	Formación Noreán sin diferenciar	57,13	1,08	16,35	8,62	3,17	2,95	4,29	1,58	0,304	1,38	4,24
901019+	MIA-664A	8°32'23,73"	73°35'32,27"	Toba de vidrio	Jnpe: Piroclástico Epiclástico	61,83	0,78	13,05	7,8	3,39	3,3	4,2	1,55	0,149	0,78	3,67

-Dique. + Rocas piroclásticas. Los Conjuntos corresponden a los definidos por Clavijo (1995a) y Royero (1996). Formación Noreán sin diferenciar: no corresponden a ningún conjunto específico.

**TABLA 2.** Resultados de elementos traza en ppm de lavas, diques y rocas piroclásticas de la Formación Noreán.

IGM	901006	901034	901038	901040	901021	901022	900987-	901020-	900976+	901005+	901035+	901023+	901019+
No. Campo	LMC-095	TCR-400	TCR-405	TCR-410	MIA-668B	MIA-669A	GZ-6852	MIA-664B	GR-6747	LMC-094	TCR-402	MIA-675A	MIA-664A
Li	18,78	12,85	5,86	12,93	24,63	6,17	18,3	48,74	15,45	14,99	23,33	30,49	23,57
Be	1,6	0,97	1,37	1,67	1,39	2,62	1,4	2,07	1,09	1,6	0,92	1,23	1,38
Sc	20,96	23,7	3,25	10,87	37,05	6,32	15,5	17,39	20,5	12,42	19,02	30,96	25,97
V	176,2	142,7	3,48	50,5	232,7	31,7	104,7	137,7	136,7	43,5	96,5	139,9	157,3
Cr	52,11	84,53	1,09	3,66	53,81	5,73	20,3	128,33	27	5,65	5,52	30,68	72,91
Mn	442,6	838,1	145,51	1116,4	1544,8	370,9	539,6	883,8	726	328	890,9	1069,1	601,4
Co	20,33	33,27	11,07	18,2	38,81	12,53	19,8	30,15	22,57	12,09	31,23	30,4	27,91
Ni	14,89	27,85	1,55	6,05	18,41	3,75	11,8	51,83	12,14	2,65	33,28	12,11	27,69
Cu	20,17	76,81	4,35	6,84	77,41	24,46	36,2	89,09	14,2	17,58	15,4	9,38	12,62
Zn	55,43	89,24	25,12	97,95	111,99	39,87	81,2	144,81	83,94	44,29	58,09	122,37	68,82
Ga	14,5	18,42	19,43	18,62	20,76	17,24	19,6	20,29	19,07	15,54	15,39	20,25	14,96
As	4,66	3,98	1,81	3,75	9,96	3,23	5	2,46	2,93	3,68	21,32	4,26	3,38
Rb	7,83	97,16	156,95	91,23	68,42	229,37	132,5	41,31	41,72	72,48	6,05	44,79	34,26
Sr	284,95	303,59	56,37	414,91	995,73	142,33	285,1	586,1	420,74	234,78	598,18	331,55	451,08
Y	16,41	25,49	21,15	25,77	21,11	33,03	27,5	20,94	18,45	26,33	18,33	27,85	15,8
Cd	0,16	0,2	0,11	0,24	0,16	0,12	0,236	0,29	0,11	0,23	0,1	0,15	0,14
In	0,05	0,05	0,03	0,05	0,06	0,02	0,047	0,05	0,05	0,04	0,07	0,07	0,05
Cs	0,09	0,7	0,54	0,88	1,77	2,34	1,6	1,12	0,17	1,41	0,09	0,93	0,66
Ba	347,64	773,16	982,98	1349,13	1048,64	1097,97	1019	676,71	1050,12	2125,53	125,1	410,48	585,41
Tl	<0,01	0,34	0,83	0,36	0,31	0,83	0,456	0,23	0,2	0,29	0,05	0,25	0,07
Pb	9,48	8,9	2,21	8,56	6,25	16,46	13,2	6,92	7,95	5,77	9,75	6,94	10,35
Th	2,37	3,93	13,69	2,59	2,74	11,39	3,7	2,72	2,12	6,7	1,53	1,74	2,12
U	0,61	1,35	3,96	0,87	0,85	2,28	1,3	0,81	0,69	2,09	0,57	0,62	0,63
Zr	106,3	233,3	158,7	283,1	184,9	218,1	293,4	266,4	156,6	232	127	228,1	153,6
Nb	4	5,6	20	8,7	5,3	10,6	8,7	21,4	5,4	7,9	3,6	8,2	5,1
W	30,8	34,6	49,8	21,7	27,4	34,5	34,6	12,9	9,9	33,3	11,9	20,9	22,8

-Dique. + Rocas piroclásticas.

**Tobas de cristales:** Las tobas de cristales (FIGURA 5C) muestran textura volcanoclástica fragmental, en ocasiones volcanoclástica porfídica y holocristalina porfídica fragmental. Están compuestas por fragmentos de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, subordinados pueden aparecer biotita y hornblenda; como minerales accesorios se presentan circón, apatito, titanita y opacos. Con proporciones variables de líticos y vidrio. Los cristales se encuentran flotantes o empaquetados en una matriz que puede ser vítrea desvitrificada o alterada a clorita, criptocristalina felsítica y hialocristalina microlítica en una masa vítrea. En la matriz de algunas tobas se aprecian amígdalas, unas alargadas con bordes irregulares y otras subredondeadas rellenas de cuarzo o epidota. En general los fragmentos líticos de las tobas de cristales son juveniles, tales como fragmentos riolíticos, andesíticos traquíticos, felsíticos, de vulcanitas vítreas y de líticos reemplazados totalmente por calcita.

## Geoquímica

Se realizaron análisis químicos de seis muestras de lavas, dos diques y de cinco tobas. La distribución de las muestras analizadas se presenta en la FIGURA 1. Los resultados de elementos mayores, traza y de tierras raras (REE) se presentan en las siguientes tablas: TABLA 1, 2 y 3.

El análisis de las posibles alteraciones en las muestras arrojó que según el diagrama de Hughes (1972) las muestras con alteración sódica son las IGM901006 y 901035 y con alteración potásica son las IGM901022 y 901034 (FIGURA 6A). De acuerdo con el diagrama de Large *et al.* (2001) las muestras alteradas son las IGM901022, 901035, 901038 y 901040 (FIGURA 6B). La muestra 901035 exhibe una pérdida al fuego (LOI) muy elevada de 6,59%. Hay otras muestras que tiene LOI por encima de 2% y pueden haber

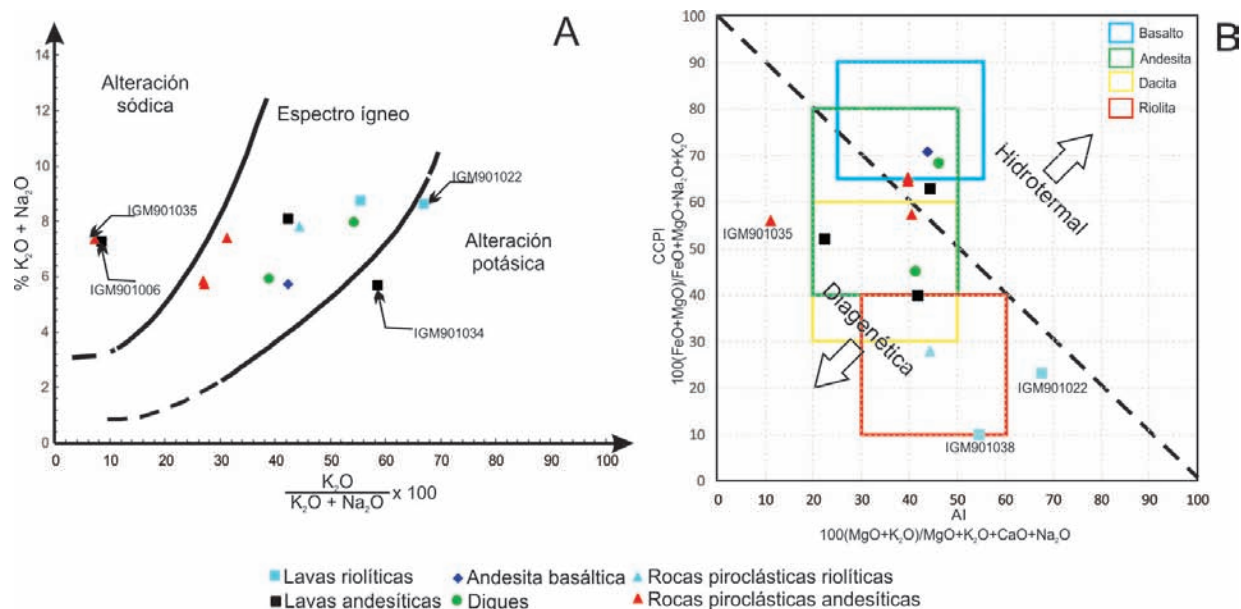
tenido algún grado de movilidad de sus elementos mayores, a pesar de que no aparezcan como alteradas en los diagramas de alteración antes presentados. Las muestras con LOI altos (TABLA 1) son: IGM901021, 900987 (calcita de alteración en amígdalas, matriz y

vetillas), 901020 (calcita por alteración de matriz y microfenocristales de plagioclasa), 900976 (calcita en venillas y como alteración de máficos), 901023 (vidrio alterado a palagonita) y 901019 (calcita en venillas y por alteración de máficos).

**TABLA 3.** Resultados de los elementos de las tierras raras (REE) en ppm lavas, diques y rocas piroclásticas de la Formación Noreán.

IGM	No. Campo	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	(La/Yb) <sub>N</sub>	Eu <sub>N</sub> /Eu*
901006	LMC-095	19	40	5	19	3,9	1,3	3,6	0,55	2,9	0,57	1,6	0,22	1,5	0,21	8,7	1,07
901034	TCR-400	20	46	5,7	22	5,3	1,3	5,4	0,81	4,9	0,99	3	0,42	2,8	0,41	4,8	0,73
901038	TCR-405	53	55	11	36	6,4	0,96	5,7	0,73	3,8	0,78	2,4	0,34	2,3	0,35	15,3	0,49
901040	TCR-410	40	75	9,6	36	7,6	1,9	7,1	1	5,3	1	2,9	0,38	2,5	0,34	10,8	0,81
901021	MIA-668B	32	72	9,3	37	7	2,3	5,8	0,8	3,9	0,76	2,2	0,28	1,8	0,26	11,7	1,12
901022	MIA-669A	83	102	18	68	10	1,9	9	1,2	5,1	0,97	2,9	0,38	2,5	0,37	22,4	0,61
900987-	GZ-6852	25	58	7,9	30	6,7	1,8	6,5	1	5,1	1	3,1	0,4	2,7	0,4	6,2	0,81
901020-	MIA-664B	30	66	8,2	33	6,4	2	5,5	0,78	3,8	0,73	2	0,26	1,6	0,24	12	1,01
900976+	GR-6747	21	46	6	23	5,1	1,7	4,8	0,71	3,7	0,74	2,1	0,28	1,7	0,24	8,2	1,09
901005+	LMC-094	23	40	7,2	29	5,7	1,9	5	0,81	4,3	0,86	2,6	0,38	2,5	0,4	6,1	1,09
901035+	TCR-402	18	40	5,1	21	5,2	1,6	4,9	0,72	3,9	0,76	2	0,26	1,6	0,21	7,6	0,95
901023+	MIA-675A	21	50	6,9	28	6,8	1,8	6	1	5,3	1	2,7	0,35	2,1	0,29	6,8	0,85
901019+	MIA-664A	14	32	4,3	16	3,8	1,2	3,3	0,54	2,8	0,56	1,6	0,22	1,4	0,22	6,7	1,07

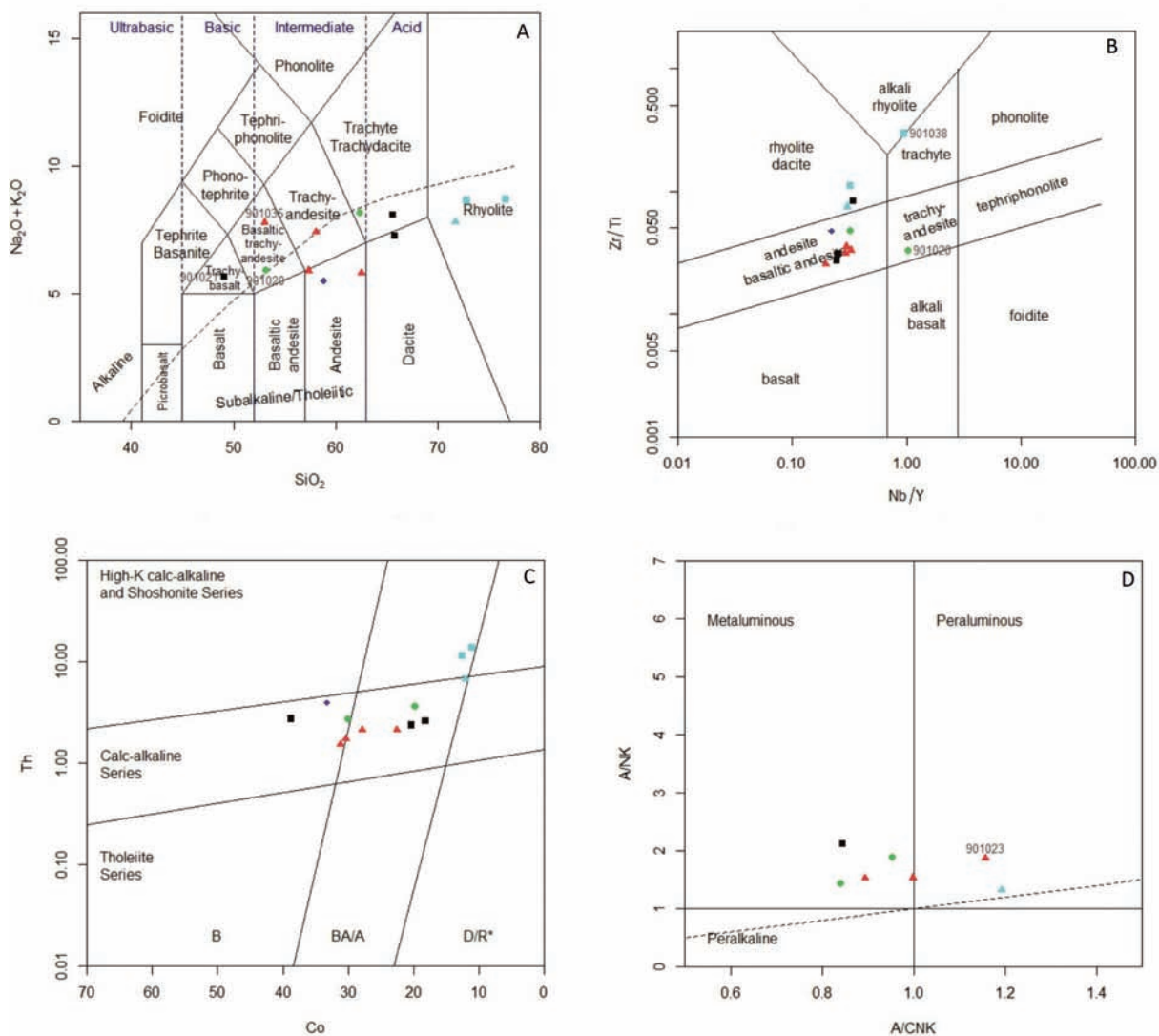
-Dique. + Rocas piroclásticas. N: valores normalizados al condrito:  $Eu_N/Eu^* = Eu_N / [(Sm_N) \cdot (Gd_N)]$



**FIGURA 6.** Muestras de la Formación Noréan en diagramas para identificar alteración. **A.** Hughes (1972). **B.** Large *et al.* (2001).

Las muestras tienen un carácter subalcalino (FIGURA 7A), tres grafican en el campo alcalino, pero es por efecto de movilidad de los álcalis debido a alteración. Dadas las evidencias de alteración en gran parte de las muestras, para la clasificación química se usan diagramas basados en elementos considerados inmóviles o menos móviles. La composición química predominante de las lavas es andesítica (FIGURA 7B) y existe alta concordancia entre la clasificación petrográfica y química de las rocas volcánicas. Las tobas tienen composiciones geoquímicas andesíticas y riolíticas y presentan características geoquímicas semejantes a las de las lavas. La mayor parte de

las muestras pertenecen a la serie calco-alcalina, mientras que las de composición riolítica son de las series calco-alcalina alta en K o shoshonítica (FIGURA 7C). En el diagrama de peraluminosidad (FIGURA 7D) solo se graficaron las muestras que no están alteradas según los diagramas de alteración. Se observa que las de composición andesítica tienen un carácter metaluminoso (FIGURA 7D), siendo que la alta peraluminosidad de la muestra IGM901023 no es un rasgo primario sino adquirido durante la palagonitización del vidrio volcánico. La toba de composición riolítica exhibe un carácter peraluminoso (FIGURA 7D).



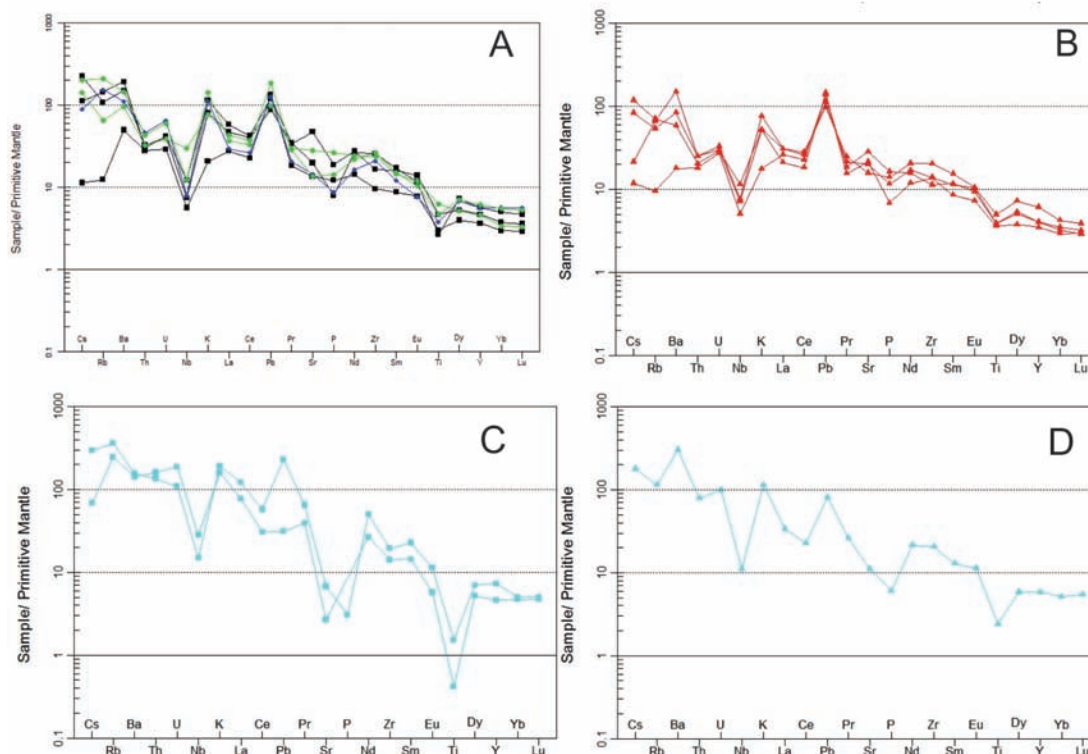
**FIGURA 7.** Diagramas de clasificación para las rocas de la Formación Noreán. **A.** Diagrama de Le Bas *et al.* (1986) de clasificación de rocas volcánicas y línea punteada de Irvine y Baragar (1971) que separa las series alcalina y subalcalina. **B.** Diagrama de clasificación de las rocas ígneas de Winchester y Floyd (1977) modificado por Pearce (1996). **C.** Diagrama de Hastie *et al.* (2007) para rocas volcánicas alteradas, para distinguir series subalcalinas. **D.** Diagrama de alcalinidad-aluminosidad (Shand, 1943) para las rocas de la Formación Noreán. Símbolos como en la FIGURA 6.

Las lavas andesíticas (IGM901021 y 901040) y riolíticas (IGM901022 y 901038) exhiben patrones multielementales semejantes (FIGURA 8A, 8C), con anomalías negativas de Nb, P y Ti y positiva de Pb, que son características relacionadas a ambientes de subducción. Las rocas piroclásticas de composición andesítica también exhiben patrones similares a los de las lavas (FIGURA 8B), indicando que son cogenéticas. Dos muestras de composición andesítica exhiben diferencias con las muestras descritas anteriormente. La lava andesítica IGM901006 tiene anomalías de Ti y P menos pronunciadas y posee contenidos más bajos de los elementos de radio iónico grande-LILE (Cs a U). El dique de andesita (IGM901020) muestra una anomalía de Nb muy tenue y no exhibe anomalías de P y Ti. La toba de composición riolítica también muestra anomalías negativas de Nb, P y Ti (FIGURA 8D).

En los diagramas REE los patrones de las lavas andesíticas son paralelos entre sí (FIGURA 9A), tienen pendiente negativa, con un enriquecimiento en REE livianas entre 60 y 100 veces el condrito, con relación La/Yb<sub>N</sub> entre 8,7 y 11,7 y sin anomalía importante de Eu (relaciones Eu/Eu\* alrededor de 1) o anomalía muy leve en el caso de la muestra IGM901040 (relación Eu/Eu\* de 0,81). El

patrón de REE de la andesita basáltica es subparalelo con los patrones de las lavas andesíticas, pero difiere de estos en que tiene menor pendiente con relación La/Yb<sub>N</sub> de 4,8; leve anomalía negativa de Eu (relación Eu/Eu\* de 0,73) y se cruza en los elementos de las tierras raras pesadas (HREE) con el patrón de la IGM901040. El patrón de REE del dique andesítico IGM900987 es paralelo con los de la mayor parte de las andesitas, mientras que el del dique IGM901020 difiere del anterior en tener una mayor pendiente, no presenta anomalía de Eu y cruza el patrón del otro dique en las tierras raras medianas. El patrón de REE de la muestra 901020 es semejante al de la andesita basáltica IGM901021.

Los patrones de REE de las tobas con composición andesítica (FIGURA 9B) son semejantes a los de las lavas andesíticas, pero con un menor enriquecimiento en REE livianas, con relación al condrito entre 45 y 65 veces (relación La/Yb<sub>N</sub> entre 6,7 a 8,2), también sin anomalía importante de Eu (relación Eu/Eu\* alrededor de 1) exceptuando una muestra la IGM901023 con leve anomalía negativa (Eu/Eu\* de 0,85). Estas similitudes sugieren que la fuente de las tobas andesíticas fue la misma de las lavas andesíticas.



**FIGURA 8.** Diagramas *spider* de elementos trazas normalizados a manto primitivo de Sun y McDonough (1989) para las rocas volcánicas de la Formación Noreán. **A.** Andesitas (cuadrados negros), andesita basáltica (rombo azul) y diques andesíticos (círculo verde). **B.** Tobas de composición andesítica. **C.** Riolitas. **D.** Toba de composición riolítica.

Los patrones de REE de las dos muestras de lavas riolíticas son paralelos (FIGURA 9C). Estas muestras están enriquecidas en los elementos de las tierras raras livianas (LREE) con relación al condrito entre 105 y 120 veces y son más enriquecidas en LREE respecto a las lavas andesíticas, pues tienen relación  $La/Yb_N$  de 15,3 y 22,4. Las lavas riolíticas exhiben anomalías negativas de Ce y Eu (relación  $Eu/Eu^*$  0,49 y 0,61) (FIGURA 9C), siendo que la primera puede sugerir el aporte de un componente sedimentario en la fuente o que fue modificada por la interacción de fluidos

debido a intemperismo o alteración hidrotermal en condiciones oxidantes, mientras que la anomalía de Eu indica fraccionamiento de plagioclasa.

El patrón de REE de una toba de composición riolítica (FIGURA 9D) es semejante al de las lavas riolíticas, aunque difiere de este en exhibir menor pendiente y en no presentar anomalía de Eu. Por la similitud en la anomalía de Ce y la tendencia a ser horizontal el patrón en los HREE, la fuente de la toba riolítica es similar al de las lavas riolíticas.

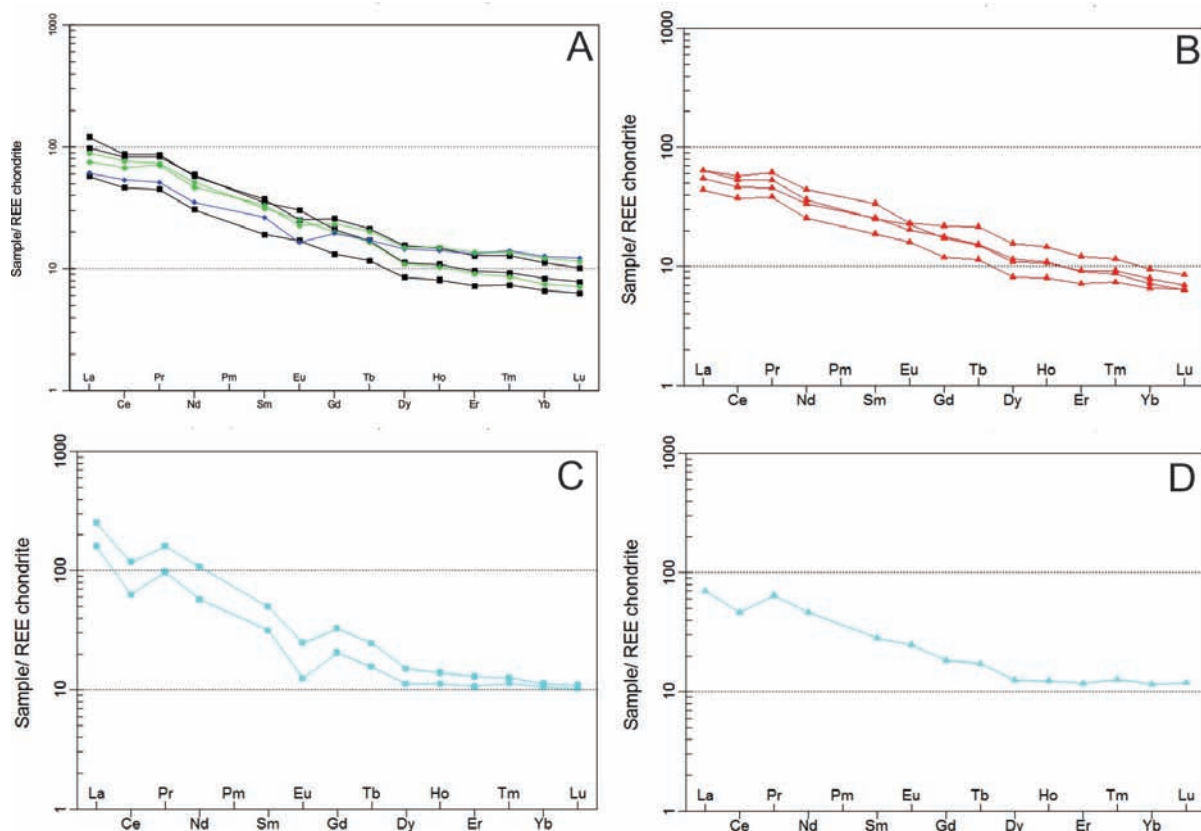


FIGURA 9. Diagramas *spider* de REE normalizados a valores del condrito de Nakamura (1974) para las rocas volcánicas de la Formación Noreán. **A.** Andesitas (cuadrados negros), andesita basáltica (rombo azul) y diques andesíticos (círculo verde). **B.** Tobas de composición andesítica. **C.** Riolitas. **D.** Toba de composición riolítica.

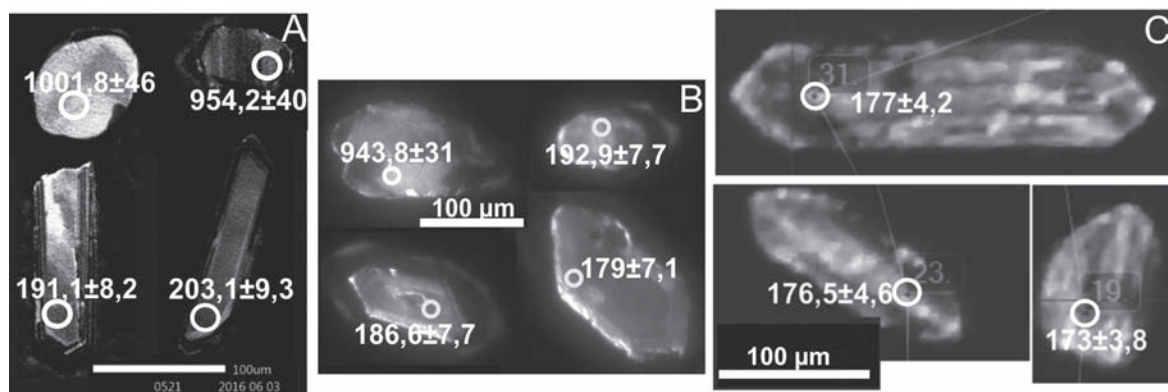
### Geocronología

La ubicación de las tres muestras de la Formación Noreán de las que se obtuvieron edades U-Pb en circón por LA-ICP-MS se puede visualizar en la FIGURA 1 y las coordenadas de las muestras y resumen de las edades de cada una están en la TABLA 4. Las edades reportadas menores a 800 Ma corresponden a las obtenidas a partir de la relación  $^{206}Pb/^{238}U$ , mientras que las mayores a 800 Ma son las arrojadas por la relación  $^{207}Pb/^{206}Pb$ .

La muestra TCR-400 corresponde a una andesita porfídica según clasificación petrográfica y a una andesita basáltica de acuerdo con la química. Los circones de esta muestra son prismáticos alargados, algunos aciculares, incoloros a rosado tenue, con tamaños de 70 a 100  $\mu m$  en su dimensión mayor. En imágenes de catodoluminiscencia (CL) muchos de los cristales tienen centros homogéneos y bordes con zonación oscilatoria (A). Hay una población menor de circones que tienden a ser equidimensionales (FIGURA 10A), de menor tamaño y fue en estos que se obtuvieron

**TABLA 4.** Resumen edades U-Pb por LA-ICP-MS en circón de muestras de la Formación Noreán, obtenidas en este estudio.

IGM	No. Campo	Latitud N	Longitud W	Clasificación	Conjunto	Edad U-Pb (Ma)	Edades heredadas (Ma)
901034	TCR-400	8°26'58,34"	73°34'16,09"	Andesita basáltica	Jncp	192,4 ± 2,2	1400 discordante, n=1; 1050, n=2; 1010, n=1
901006	LMC-095	8°18'54,24"	73°32'40,21"	Andesita	Jncp	184,9 ± 2,0	952 ± 75
901038	TCR-405	8°52'0,41"	73°39'50,22"	Riolita	Jner	175,9 ± 1,1	

**FIGURA 10.** Imágenes de catodoluminiscencia de circones analizados. **A.** TCR-400 (IGM-901034) andesita porfídica. **B.** LMC-095 (IGM-901006) andesita. **C.** TCR-405 (IGM-901038) riolita. Círculos indican lugares de ablación. Los números al lado de los círculos son las edades en millones de años.

las edades heredadas (FIGURA 10A). Se hicieron en total 40 ablaciones (TABLA 5) y no se consideraron en la interpretación los resultados con discordancias mayores 10 %. La edad promedio obtenida en circones de esta muestra es de  $192,4 \pm 2,2$  Ma a partir de 26 datos (FIGURA 11A, 11B), que se interpreta como edad de cristalización en el Sinemuriense. La relación Th/U de los circones jurásicos varía entre 0,7 y 2,5, acordes con las relaciones típicas de circones ígneos (Rubatto, 2002).

La muestra LMC-095 corresponde a una andesita. Los circones son euhedrales prismáticos cortos a subredondeados, con tamaño promedio de 100  $\mu\text{m}$ , son transparentes a ligeramente lilas y algunos presentan finas inclusiones. Por la mala calidad de las imágenes de CL (FIGURA 10B) no fue posible definir las texturas internas de los circones, aunque en algunas imágenes se insinúan zonaciones oscilatorias. Se analizaron 51 puntos (TABLA 6) y debido a la gran cantidad de datos discordantes en esta muestra se descartaron los resultados con discordancias mayores al 20 %. Se encontró una edad heredada de

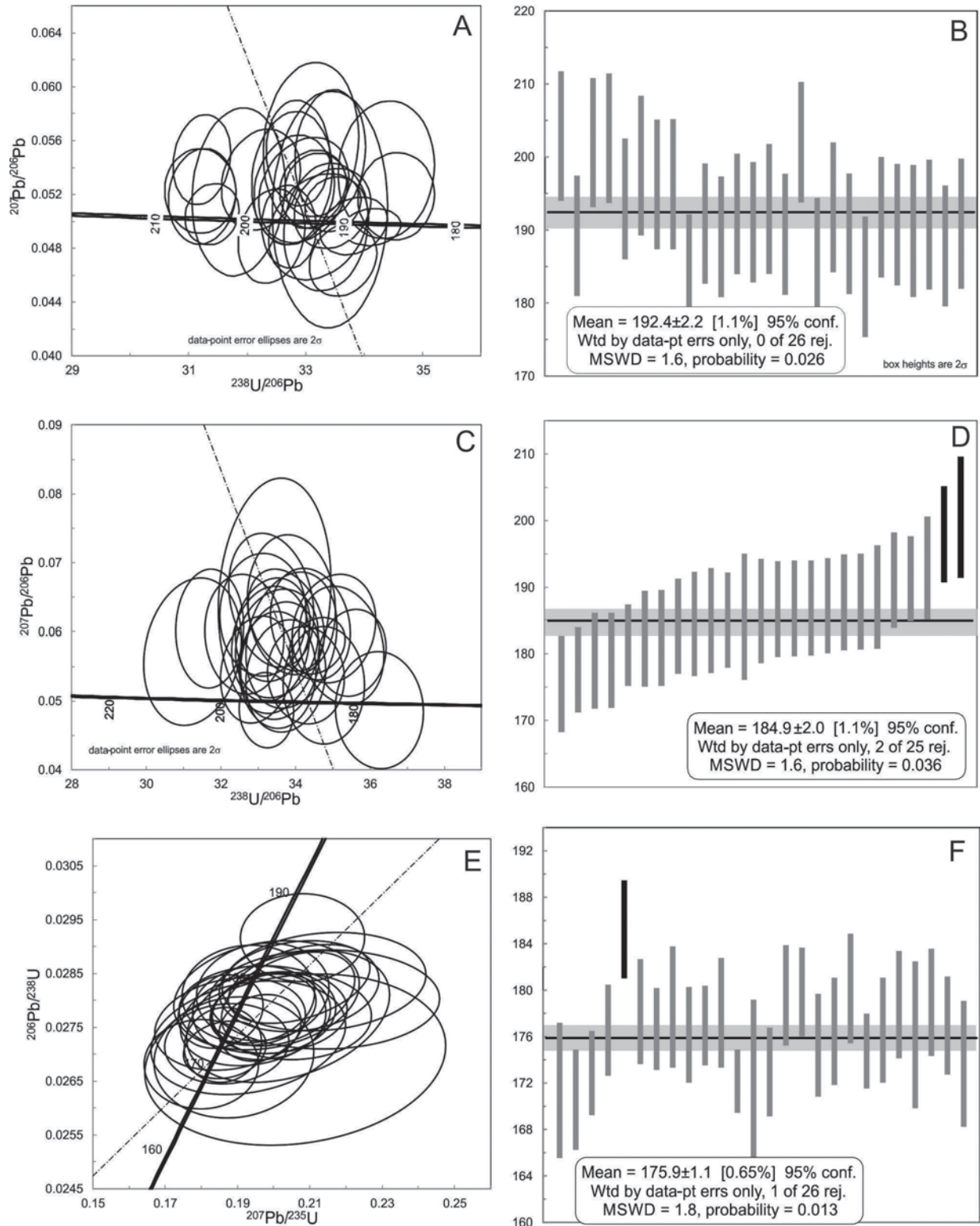
$944 \pm 31$  Ma. Veinticinco resultados arrojan una edad promedio de  $184,9 \pm 2,0$  Ma (FIGURA 11C, 11D), interpretada como la edad de cristalización de la roca en el Pliensbachiense. Los valores de la relación Th/U varían entre 0,5 y 1,6, casi todos dan próximo de 1 y son característicos de circones ígneos (Rubatto, 2002).

La muestra TCR-405 corresponde a una riolita, en la que los circones son cristales euhedrales a subhedrales, de formas prismáticas cortas y largas, también ovoidales, incoloros, algunos pardos, con tamaños entre 50 y 220 micrómetros, presentan pocas inclusiones. En CL (FIGURA 10C) se pueden observar zonaciones oscilatorias en algunos de ellos. Se hicieron ablaciones en 35 puntos (TABLA 7) y se interpretaron los resultados con discordancias inferiores a 10%. No se hallaron edades heredadas y a partir de un conjunto de datos concordantes (FIGURA 11E), se obtuvo una edad promedio de  $175,9 \pm 1,1$  Ma (FIGURA 11F), la cual se interpreta como la edad de cristalización de esta roca en el Toarciense. La relación Th/U varía entre 0,6 y 1,8, predominando los próximos de 1, valores que son típicos de circones ígneos (Rubatto, 2002).

**TABLA 5.** Resultados isotópicos U-Pb en circones de la muestra TCR-400.

Punto análisis TCR-400	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	Correlacion errores	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$
TCR_400_28	393,00	503,00	1,28	0,05110	0,00250	0,2070	0,0110	0,02895	0,00045	0,2515	183,67	8,21	188,90	9,00	250,00	96,00
TCR_400_12	364,00	916,00	2,52	0,05370	0,00420	0,2160	0,0170	0,02909	0,00057	0,1769	183,95	8,22	195,00	14,00	300,00	140,00
TCR_400_24	3720,00	6900,00	1,85	0,04960	0,00100	0,2002	0,0049	0,02930	0,00035	0,3799	186,21	8,20	185,30	4,10	171,00	44,00
TCR_400_36	611,00	1049,00	1,72	0,04970	0,00170	0,2025	0,0070	0,02957	0,00041	0,1620	187,89	8,21	186,60	5,80	191,00	69,00
TCR_400_21	1200,00	2640,00	2,20	0,04720	0,00230	0,1932	0,0089	0,02973	0,00042	0,1161	189,48	8,24	179,60	7,60	74,00	88,00
TCR_400_2	719,00	521,00	0,72	0,05210	0,00170	0,2112	0,0069	0,02988	0,00035	0,1911	189,28	8,18	195,50	5,70	274,00	66,00
TCR_400_27	462,00	469,00	1,02	0,05120	0,00260	0,2100	0,0100	0,02989	0,00048	0,1560	189,55	8,20	191,60	8,60	224,00	97,00
TCR_400_16	324,50	399,00	1,23	0,05370	0,00380	0,2270	0,0160	0,02992	0,00044	0,1000	189,15	8,21	206,00	13,00	360,00	140,00
TCR_400_33	83,90	128,00	1,53	0,05060	0,00730	0,2100	0,0300	0,02993	0,00072	0,1396	189,94	8,98	194,00	25,00	230,00	230,00
TCR_400_31	198,20	182,80	0,92	0,04860	0,00380	0,2050	0,0160	0,02999	0,00053	0,1000	190,79	8,25	189,00	13,00	170,00	140,00
TCR_400_34	259,00	195,20	0,75	0,05170	0,00300	0,2060	0,0130	0,03011	0,00063	0,0779	190,81	8,83	192,00	11,00	250,00	110,00
TCR_400_15	993,00	2394,00	2,41	0,05220	0,00190	0,2191	0,0082	0,03015	0,00039	0,2346	190,95	8,18	200,20	6,80	262,00	75,00
TCR_400_19	964,00	1891,00	1,96	0,05220	0,00240	0,2180	0,0100	0,03018	0,00043	0,2216	191,13	8,19	201,70	8,70	251,00	91,00
TCR_400_13	447,60	596,00	1,33	0,05570	0,00330	0,2360	0,0140	0,03023	0,00045	0,0700	190,61	8,17	215,00	11,00	410,00	110,00
TCR_400_37	95,50	155,10	1,62	0,05410	0,00490	0,2320	0,0210	0,03022	0,00061	0,1171	190,93	8,85	208,00	17,00	330,00	170,00
TCR_400_30	255,00	287,00	1,13	0,05350	0,00340	0,2190	0,0130	0,03034	0,00058	0,0790	191,83	8,20	202,00	11,00	310,00	120,00
TCR_400_18	522,00	850,00	1,63	0,05400	0,00330	0,2310	0,0140	0,03043	0,00041	0,2671	192,27	8,19	209,00	12,00	340,00	120,00
TCR_400_26	364,00	347,00	0,95	0,05180	0,00330	0,2200	0,0140	0,03049	0,00052	0,1427	193,17	8,83	200,00	11,00	230,00	110,00
TCR_400_20	377,30	449,00	1,19	0,05350	0,00410	0,2240	0,0170	0,03052	0,00052	0,1117	192,95	8,83	206,00	14,00	310,00	140,00
TCR_400_6	783,00	1220,00	1,56	0,04910	0,00240	0,2090	0,0110	0,03057	0,00036	0,2553	194,33	8,22	191,00	8,90	160,00	93,00
TCR_400_17	320,00	458,00	1,43	0,06000	0,00460	0,2570	0,0190	0,03066	0,00055	0,0242	192,26	8,78	231,00	15,00	510,00	150,00
TCR_400_10	619,00	1325,00	2,14	0,04810	0,00290	0,2080	0,0120	0,03085	0,00044	0,0656	196,33	8,86	190,00	10,00	140,00	110,00
TCR_400_9	442,00	577,00	1,31	0,05260	0,00320	0,2270	0,0130	0,03102	0,00053	0,1062	196,30	8,82	208,00	11,00	310,00	110,00
TCR_400_11	182,50	471,00	2,58	0,05950	0,00650	0,2550	0,0270	0,03098	0,00065	0,0446	194,37	8,86	231,00	21,00	510,00	190,00
TCR_400_7	178,20	315,00	1,77	0,05180	0,00520	0,2260	0,0220	0,03140	0,00064	0,1000	198,88	9,51	203,00	18,00	250,00	180,00
TCR_400_3	190,00	174,90	0,92	0,06340	0,00540	0,2730	0,0230	0,03177	0,00059	0,1322	198,30	9,39	241,00	19,00	600,00	170,00
TCR_400_22	1487,00	2900,00	1,95	0,05030	0,00180	0,2220	0,0083	0,03185	0,00038	0,1921	202,08	8,19	203,10	6,80	207,00	73,00
TCR_400_5	403,00	293,00	0,73	0,05240	0,00290	0,2290	0,0130	0,03202	0,00048	0,1803	202,62	8,82	209,00	11,00	270,00	110,00
TCR_400_4	385,70	456,10	1,18	0,05500	0,00280	0,2410	0,0120	0,03203	0,00041	0,0989	202,03	8,79	220,00	10,00	400,00	100,00
TCR_400_1	356,00	279,00	0,78	0,05220	0,00250	0,2310	0,0120	0,03206	0,00051	0,3127	202,92	8,81	212,10	9,70	286,00	97,00
TCR_400_8	260,00	545,00	2,10	0,07750	0,00620	0,3540	0,0290	0,03314	0,00066	0,1770	203,10	9,27	311,00	21,00	1070,00	160,00
TCR_400_38	167,30	122,50	0,73	0,11600	0,01400	0,5730	0,0840	0,03400	0,00110	0,8038	198,03	11,13	420,00	50,00	1400,00	240,00
TCR_400_39	659,00	416,00	0,63	0,06130	0,00220	0,5210	0,0390	0,06110	0,00420	0,9058	379,04	31,11	418,00	27,00	627,00	71,00
TCR_400_32	311,00	107,90	0,35	0,07330	0,00150	1,6100	0,0350	0,16000	0,00220	0,3647	954,21	40,46	974,00	14,00	1008,00	43,00
TCR_400_40	299,00	54,90	0,18	0,07460	0,00200	1,6630	0,0680	0,16290	0,00460	0,7745	969,43	47,83	991,00	26,00	1049,00	53,00
TCR_400_29	51,70	30,02	0,58	0,07590	0,00340	1,7550	0,0880	0,16880	0,00370	0,4352	1001,78	45,53	1023,00	32,00	1048,00	91,00
TCR_400_25	543,00	347,00	0,64	0,08870	0,00130	2,7180	0,0490	0,21970	0,00310	0,6133	1272,70	54,42	1355,00	13,00	1400,00	28,00





**FIGURA 11.** Resultados de las dataciones U-Pb en circón. **A.** Concordia Tera-Wasserburg de muestra TCR-400. **B.** Edad promedio de muestra TCR-400. **C.** Concordia Tera-Wasserburg de muestra LMC-095. **D.** Edad promedio de muestra LMC-095. **E.** Concordia Wetherill de muestra TCR-405. **F.** Edad promedio de muestra TCR-405. Barras negras verticales en D y F corresponden a valores rechazados por el *software* en el cálculo de la edad promedio.

TABLA 6. Resultados isotópicos U-Pb en circón de muestra LMC-095.

Punto análisis LMC-095	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Correlacion errores	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$
LMC_095_44	54,60	46,70	0,86	0,06190	0,00630	0,2330	0,0240	0,02679	0,00061	167,79	6,18	203,00	20,00	430,00	190,00
LMC_095_24	66,00	48,90	0,74	0,06350	0,00670	0,2440	0,0260	0,02698	0,00064	168,63	6,44	211,00	21,00	470,00	200,00
LMC_095_49	19,20	11,49	0,60	0,07400	0,01100	0,2770	0,0470	0,02733	0,00095	168,53	7,78	226,00	32,00	500,00	290,00
LMC_095_51	33,10	32,20	0,97	0,04850	0,00700	0,1850	0,0270	0,02758	0,00073	175,62	7,15	164,00	23,00	200,00	230,00
LMC_095_5	34,16	19,32	0,57	0,06660	0,00770	0,2560	0,0310	0,02783	0,00064	173,22	6,49	218,00	24,00	420,00	210,00
LMC_095_1	38,10	29,10	0,76	0,06770	0,00820	0,2630	0,0310	0,02815	0,00079	174,95	7,10	224,00	25,00	600,00	220,00
LMC_095_21	111,40	102,00	0,92	0,05520	0,00500	0,2210	0,0200	0,02815	0,00059	177,73	6,29	196,00	16,00	310,00	160,00
LMC_095_2	39,60	20,14	0,51	0,06810	0,00800	0,2640	0,0310	0,02834	0,00069	176,03	7,10	221,00	24,00	470,00	210,00
LMC_095_4	32,70	20,17	0,62	0,05570	0,00690	0,2270	0,0290	0,02838	0,00075	179,05	7,11	194,00	24,00	190,00	210,00
LMC_095_6	33,10	28,40	0,72	0,05990	0,00610	0,2380	0,0250	0,02854	0,00074	179,11	7,05	211,00	20,00	520,00	170,00
LMC_095_14	33,11	21,17	0,64	0,07050	0,00840	0,2760	0,0320	0,02881	0,00089	178,38	7,70	232,00	25,00	650,00	230,00
LMC_095_45	37,10	24,40	0,66	0,05090	0,00670	0,2070	0,0280	0,02876	0,00074	182,52	7,13	178,00	23,00	140,00	220,00
LMC_095_46	37,10	25,50	0,69	0,10700	0,01100	0,4450	0,0450	0,02883	0,00083	170,19	7,62	352,00	31,00	1530,00	200,00
LMC_095_7	115,00	78,70	0,68	0,05970	0,00320	0,2310	0,0130	0,02891	0,00051	181,45	6,03	212,00	11,00	510,00	110,00
LMC_095_3	27,40	16,33	0,60	0,09300	0,01000	0,3800	0,0440	0,02897	0,00092	174,21	7,66	296,00	30,00	1270,00	220,00
LMC_095_22	59,80	35,78	0,60	0,06000	0,00700	0,2450	0,0280	0,02907	0,00074	182,38	7,10	207,00	22,00	300,00	210,00
LMC_095_29	146,40	101,10	0,69	0,06360	0,00530	0,2510	0,0220	0,02916	0,00051	182,11	6,15	221,00	17,00	610,00	160,00
LMC_095_25	49,20	34,30	0,70	0,05440	0,00620	0,2160	0,0240	0,02917	0,00072	184,29	7,09	189,00	20,00	190,00	200,00
LMC_095_23	38,00	19,50	0,51	0,06190	0,00820	0,2600	0,0350	0,02950	0,00084	184,61	7,75	211,00	27,00	320,00	240,00
LMC_095_28	33,20	18,48	0,56	0,05970	0,00800	0,2390	0,0320	0,02950	0,00087	185,12	7,75	206,00	26,00	280,00	240,00
LMC_095_15	49,30	37,30	0,76	0,06290	0,00660	0,2520	0,0270	0,02963	0,00073	185,18	7,06	217,00	22,00	410,00	190,00
LMC_095_20	89,20	131,00	1,47	0,05610	0,00710	0,2190	0,0270	0,02964	0,00077	186,84	7,13	190,00	23,00	250,00	210,00
LMC_095_30	38,20	19,27	0,50	0,05890	0,00740	0,2290	0,0280	0,02976	0,00077	186,93	7,13	196,00	23,00	270,00	220,00
LMC_095_12	40,20	21,40	0,53	0,05680	0,00740	0,2240	0,0260	0,02983	0,00075	187,86	7,15	192,00	23,00	220,00	220,00
LMC_095_40	48,00	43,30	0,90	0,06100	0,00680	0,2400	0,0290	0,02985	0,00081	186,99	7,09	209,00	21,00	350,00	200,00
LMC_095_41	32,00	28,30	0,88	0,08100	0,00980	0,3250	0,0400	0,02987	0,00091	182,41	7,71	263,00	30,00	750,00	250,00
LMC_095_27	17,60	8,65	0,49	0,06200	0,01500	0,2690	0,0570	0,02990	0,00110	185,65	9,40	199,00	44,00	110,00	350,00
LMC_095_33	74,20	97,40	1,31	0,06200	0,00630	0,2490	0,0250	0,02994	0,00073	187,32	7,05	221,00	21,00	590,00	190,00
LMC_095_36	39,80	35,60	0,89	0,06610	0,00850	0,2670	0,0350	0,02998	0,00084	186,60	7,75	222,00	27,00	480,00	240,00
LMC_095_13	49,60	32,70	0,66	0,06090	0,00720	0,2410	0,0280	0,03000	0,00077	187,95	7,11	213,00	23,00	370,00	210,00
LMC_095_11	67,80	43,70	0,64	0,04900	0,00450	0,2020	0,0190	0,03010	0,00054	191,39	6,38	182,00	16,00	100,00	160,00
LMC_095_19	80,60	107,00	1,33	0,08080	0,00950	0,3330	0,0410	0,03011	0,00084	183,91	7,72	267,00	28,00	880,00	220,00
LMC_095_38	36,80	30,10	0,82	0,06260	0,00740	0,2600	0,0310	0,03018	0,00086	188,66	7,71	225,00	25,00	540,00	220,00
LMC_095_10	30,60	13,54	0,44	0,05630	0,00660	0,2280	0,0260	0,03034	0,00073	191,16	7,11	202,00	22,00	280,00	210,00
LMC_095_32	41,20	47,90	1,16	0,06960	0,00860	0,2690	0,0340	0,03035	0,00098	188,04	8,33	232,00	28,00	480,00	230,00
LMC_095_50	55,50	49,80	0,90	0,06750	0,00580	0,2870	0,0250	0,03036	0,00065	188,60	7,01	247,00	19,00	680,00	160,00
LMC_095_43	37,70	30,20	0,80	0,05660	0,00660	0,2520	0,0310	0,03064	0,00081	192,96	7,72	210,00	23,00	280,00	200,00
LMC_095_16	90,40	106,10	1,17	0,06700	0,00620	0,2780	0,0260	0,03068	0,00074	190,69	7,04	240,00	20,00	610,00	160,00
LMC_095_8	37,30	18,80	0,50	0,07350	0,00870	0,2930	0,0340	0,03069	0,00071	189,18	7,14	248,00	27,00	680,00	230,00
LMC_095_31	53,60	42,00	0,78	0,06510	0,00650	0,2760	0,0270	0,03109	0,00075	193,68	7,06	240,00	22,00	690,00	180,00
LMC_095_34	34,50	27,90	0,80	0,06930	0,00940	0,3080	0,0420	0,03128	0,00096	193,82	8,42	256,00	33,00	540,00	260,00
LMC_095_17	75,00	79,90	1,07	0,05890	0,00690	0,2630	0,0310	0,03155	0,00074	198,06	7,13	224,00	24,00	390,00	200,00
LMC_095_37	35,50	31,70	0,89	0,07350	0,00880	0,3290	0,0410	0,03177	0,00087	195,78	7,74	266,00	30,00	650,00	230,00
LMC_095_39	36,70	30,30	0,83	0,07690	0,00900	0,3310	0,0400	0,03190	0,00097	195,72	8,37	273,00	30,00	750,00	230,00
LMC_095_9	34,20	20,50	0,60	0,10900	0,01100	0,4960	0,0520	0,03194	0,00081	187,89	7,72	389,00	35,00	1500,00	210,00
LMC_095_42	25,80	13,00	0,50	0,05970	0,00930	0,2520	0,0380	0,03200	0,00110	200,66	9,05	215,00	31,00	260,00	260,00
LMC_095_26	33,00	17,28	0,52	0,11500	0,01300	0,5310	0,0690	0,03210	0,00100	187,31	9,05	398,00	43,00	1510,00	230,00
LMC_095_48	14,01	8,32	0,59	0,16200	0,02100	0,6820	0,0870	0,03230	0,00130	176,51	10,61	497,00	57,00	2030,00	290,00
LMC_095_18	85,20	112,00	1,31	0,07890	0,00860	0,3580	0,0410	0,03310	0,00077	202,49	7,72	277,00	24,00	730,00	180,00
LMC_095_47	12,88	7,60	0,59	0,18400	0,02400	0,8900	0,1200	0,03310	0,00150	175,11	11,78	601,00	66,00	2460,00	250,00
LMC_095_35	109,40	63,60	0,58	0,07230	0,00260	1,5150	0,0570	0,15800	0,00310	943,78	31,23	933,00	23,00	952,00	75,00

TABLA 7. Resultados isotópicos U-Pb en circones de la muestra TCR-405.

Punto análisis TCR-405	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ	Correlación errores	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th ±2σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ	Edad (Ma) ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ	Edad (Ma) ±2σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb ±2σ	Edad (Ma) ±2σ				
Zircon-160	87,7	58,9	0,7	0,013	0,486	0,047	0,0282	0,0012	0,049282	0,0151	0,0015	179,3	7,3	404	30	2030	160
Zircon-150	115	88,8	0,8	0,006	0,42	0,034	0,0285	0,0021	0,024809	0,0133	0,0012	181	1,3	361	27	1680	170
Zircon-184	245	408	1,7	0,078	0,281	0,03	0,02769	0,00071	0,11436	0,00956	0,00053	176	4,5	250	23	930	190
Zircon-155	354	375	1,1	0,0685	0,266	0,018	0,02809	0,00061	0,027214	0,00955	0,00051	179,6	3,8	238	14	840	140
Zircon-175	70	88,4	1,3	0,0632	0,087	0,031	0,0291	0,0013	0,11161	0,00962	0,00066	184,7	8,3	238	24	680	250
Zircon-181	51,6	31,7	0,6	0,059	0,015	0,023	0,0281	0,0013	0,064023	0,0098	0,0015	178,5	8,2	211	42	460	340
Zircon-157	181,7	301,6	1,7	0,0574	0,0053	0,0218	0,02647	0,00071	0,035974	0,00824	0,0004	168,4	4,5	199	16	510	190
Zircon-158	445	372	0,8	0,0562	0,0036	0,012	0,02797	0,00059	0,32786	0,00952	0,00047	177,8	3,7	201,1	9,9	450	140
Zircon-182	149,7	125,5	0,8	0,0551	0,005	0,019	0,02792	0,00099	0,0052242	0,00976	0,00058	171,5	6,2	200	14	380	190
Zircon-152	234,9	199,3	0,8	0,0474	0,0037	0,013	0,02682	0,00068	0,007489	0,00912	0,00049	170,6	4,3	167	11	90	150
Zircon-167	57,4	87,4	1,5	0,057	0,01	0,026	0,0269	0,0013	0,1621	0,00839	0,00052	171,2	8,0	186	28	310	310
Zircon-151	122,4	69,4	0,6	0,0508	0,0051	0,018	0,02694	0,00092	0,088405	0,00937	0,0006	171,4	5,8	175	14	220	190
Zircon-166	511	395	0,8	0,0496	0,0029	0,0093	0,02708	0,00044	0,16704	0,00866	0,00038	172,2	2,7	173,2	8	180	130
Zircon-153	563,4	363	0,6	0,05	0,0026	0,0087	0,02718	0,00057	0,069678	0,00925	0,00049	172,9	3,6	173	7,4	180	110
Zircon-168	168,6	120,6	0,7	0,0491	0,004	0,014	0,0272	0,00061	0,076253	0,00904	0,00049	173	3,8	173	12	170	180
Zircon-183	100,3	131,1	1,3	0,0521	0,0065	0,022	0,02731	0,00086	0,22941	0,00866	0,00048	173,7	5,4	177	19	240	250
Zircon-174	638	502	0,8	0,0516	0,0029	0,0092	0,02749	0,00051	0,17789	0,00871	0,00042	174,8	3,2	181,7	7,8	240	120
Zircon-171	137,5	116,5	0,8	0,0501	0,0045	0,017	0,02756	0,0007	0,19458	0,00885	0,00053	175,3	4,4	176	14	150	190
Zircon-163	203,9	158,7	0,8	0,0523	0,0047	0,0205	0,02771	0,00066	0,0668741	0,00957	0,00062	176,2	4,1	188	15	320	190
Zircon-178	163,6	172,3	1,1	0,0531	0,0059	0,0204	0,0277	0,001	0,33135	0,00884	0,00056	176,2	6,3	187	19	290	210
Zircon-172	207,9	247	1,2	0,0502	0,0045	0,017	0,02765	0,00071	0,21874	0,00892	0,00043	176,5	4,6	180	15	200	180
Zircon-154	250	179	0,7	0,0528	0,0037	0,014	0,02777	0,00062	0,1251	0,00892	0,00044	176,6	3,9	184	12	310	140
Zircon-176	156,2	114,6	0,7	0,0502	0,0042	0,015	0,02777	0,00071	0,005328	0,00846	0,00052	176,6	4,5	181	13	210	170
Zircon-161	520	317	0,6	0,0486	0,003	0,01854	0,02779	0,00056	0,16921	0,00888	0,0004	176,7	3,5	172,4	8,2	150	130
Zircon-164	298,8	298	1,0	0,0517	0,0036	0,019	0,02783	0,00054	0,25041	0,00868	0,0004	177	3,4	181,7	9,7	220	140
Zircon-180	199,3	356,8	1,8	0,0494	0,0048	0,019	0,02783	0,00067	0,0091127	0,00906	0,00041	177	4,2	181	16	180	210
Zircon-165	246,9	281	1,1	0,0558	0,0068	0,0214	0,02802	0,00075	0,014174	0,00884	0,00061	178,1	4,7	196	21	390	220
Zircon-159	135	114,9	0,9	0,0525	0,0045	0,015	0,02803	0,00071	0,41147	0,00857	0,00052	178,2	4,5	188	13	250	170
Zircon-162	160,9	91,1	0,6	0,0503	0,0053	0,021	0,0281	0,00083	0,21346	0,00977	0,00067	178,6	5,2	182	18	230	210
Zircon-177	135,7	171,1	1,3	0,0475	0,0046	0,015	0,02812	0,00074	0,041062	0,00918	0,00046	178,8	4,6	183	13	40	190
Zircon-179	124,2	80,6	0,6	0,049	0,0041	0,015	0,02816	0,00074	0,094097	0,00927	0,00063	179	4,6	182	12	190	170
Zircon-169	193,4	159,6	0,8	0,0529	0,0049	0,0207	0,02826	0,00069	0,15174	0,00909	0,00051	179,6	4,3	190	14	260	170
Zircon-170	400	276	0,7	0,0527	0,0038	0,0207	0,02831	0,0006	0,404	0,0091	0,00055	179,9	3,8	191	13	360	150
Zircon-173	120	99,2	0,8	0,0554	0,006	0,0214	0,02835	0,00075	0,13825	0,00942	0,00062	180,2	4,7	199	19	330	220
Zircon-156	291,8	217	0,7	0,0507	0,0038	0,014	0,02917	0,00067	0,0082468	0,00934	0,00052	183,3	4,2	192	12	260	150

## DISCUSIÓN

### Ambiente geotectónico

La presencia de andesitas y riolitas calco-alcalinas y las anomalías geoquímicas observadas en los diagramas multielementales (FIGURA 8) sugieren que las rocas de la Formación Noreán se generaron en ambientes relacionados con subducción. En el diagrama Nb/Yb vs Th/Yb (FIGURA 12), todas las rocas analizadas de la Formación Noreán grafican en el campo de las rocas volcánicas de arco y su posición en este diagrama sugiere interacción entre fluidos generados en la zona de subducción y aporte por fusión de la cuña del manto.

Interpretamos que las rocas volcánicas de esta Formación se generaron en arco de margen continental. Uno de los diques, la muestra IGM901020 exhibe características químicas diferentes a las otras andesitas. Se clasifica como una traqui-andesita, su patrón multielemental muestra apenas una leve anomalía de Nb y no exhibe anomalía de P y Ti, el patrón de REE es más inclinado que el del otro dique y cruza a este en las tierras raras medianas y no tiene anomalía de Eu. En el diagrama discriminante de ambientes esa muestra también grafica separada de las otras andesitas, sugiriendo que se formó en otro ambiente tectónico. De esta muestra no se conoce su edad, por lo que no es posible hacer más inferencias sobre su origen y si tiene relación o no con el vulcanismo jurásico.

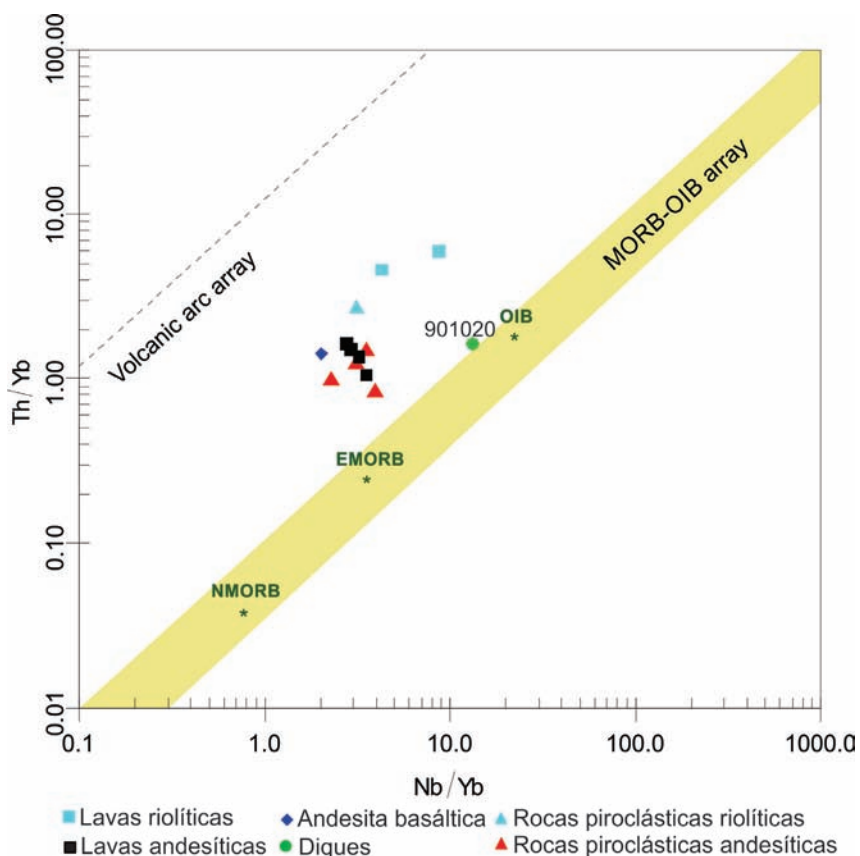


FIGURA 12. A. Diagrama Nb/Yb vs Th/Yb de Pearce (2008) para rocas de arco y rocas de corteza oceánica donde se muestran las rocas de la Formación Noreán.

### Edad

Los datos geocronológicos obtenidos en este trabajo indican que el vulcanismo de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander estuvo activo desde el Jurásico Inferior hasta el Jurásico Medio. El hecho de que las lavas basálticas sean más antiguas y las riolíticas más jóvenes podría sugerir que el

vulcanismo evolucionó desde básico-intermedio a félsico, sin embargo, se necesitan estudios con una cantidad representativa de análisis que permitan confirmar esta hipótesis. Las herencias encontradas en las dos muestras de andesitas son muy escasas, con una edad del Mesoproterozoico (~1400 Ma) levemente discordante y tres edades concordantes del límite entre el Meso y Neoproterozoico (~1050 y 950 Ma)

correspondientes con las del basamento metamórfico precámbrico. No se obtuvieron herencias del basamento Paleozoico, dominante hacia el oriente en el Macizo de Santander. Las edades ígneas coinciden con el rango propuesto por Clavijo (1995a) con base en relaciones estratigráficas, quien además planteó que el vulcanismo culminó con la emisión de lavas dacíticas y andesíticas y el emplazamiento de cuerpos hipoabisales andesíticos. La edad más antigua obtenida en esta investigación (ca. 192 Ma) es muy semejante a las edades presentadas por INGEOMINAS-UIS (2006d, 2006e), Leal-Mejía (2011) y González *et al.* (2015a) en la región occidental. La edad de ca. 185 Ma presentada aquí es próxima de edades reportadas por González *et al.* (2015a). En la región oriental hay registro geocronológico U-Pb en circón de actividad hasta el Jurásico Medio, que no se ha reportado en la región occidental, donde según González *et al.* (2015a) la unidad es del Jurásico Inferior. Sin embargo, es probable que en la región occidental también exista parte de la Formación Noreán del Jurásico Medio, como lo proponen INGEOMINAS-UIS (2006e) basados en una datación Rb-Sr.

### Correlaciones

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los presentados por INGEOMINAS-UIS (2006a, 2006c, 2006d, 2006e), Leal-Mejía (2011) y González *et al.* (2015a, 2015b, 2015c, 2015d) sobre la Formación Noreán en la Serranía de San Lucas, se concluye que las rocas de ambas ocurrencias son correlacionables petrográfica, geoquímica y geocronológicamente. Por otro lado, entre la Formación Noreán, la Formación Saldaña (Rodríguez *et al.*, 2016) y las Vulcanitas de Pitalito (Rodríguez *et al.*, 2016) existe muy buena correlación geocronológica, con la diferencia petrográfica de rocas más básicas en la Formación Noreán, por la ocurrencia de basaltos que no han sido identificados en las otras dos unidades. De acuerdo con las descripciones petrográficas disponibles en la literatura (Tschanz *et al.*, 1969; Maze, 1984) y con los datos geocronológicos preliminares inéditos U-Pb en circón obtenidos por los autores del presente trabajo, la Formación Noreán también es correlacionable con la Formación La Quinta en el norte de la Serranía de Perijá y con las siguientes unidades de la Sierra Nevada de Santa Marta: formaciones Gautapurí y Corual, Ignimbrita de Caja de Ahorros, Ignimbrita de La Paila, Ignimbrita de Los Clavos, Espilitas Triásicas, Pórfidos Queratófiros, Riodacita de Los Tábanos y Riolita de Golero.

### CONCLUSIONES

La Formación Noreán corresponde a una unidad volcanoclástica compuesta principalmente por material piroclástico representado por tobas vítreas, de cristales y líticas y por lavas que varían en composición desde andesitas basálticas hasta riolitas y en menor proporción por diques de composición andesítica. La clasificación geoquímica de las lavas y los diques en general es coincidente con su clasificación modal. Por otro lado, las tobas se clasifican químicamente como andesitas y riolitas.

Los resultados petrográficos y geoquímicos obtenidos en este estudio indican que las rocas volcánicas y piroclásticas se generaron en un ambiente relacionado con subducción, probablemente de margen continental.

Las herencias son escasas en las rocas de composición andesítica y corresponden a núcleos heredados principalmente del límite entre el Meso y Neoproterozoico, mientras que en las rocas de composición riolítica no se obtuvieron herencias. Las herencias sugieren que el emplazamiento del arco se dio en basamento del Precámbrico.

Las rocas analizadas indican por lo menos tres eventos volcánicos en el Jurásico. El primero en el Jurásico Inferior –Sinemuriense– alrededor de los 192 Ma registrado en una andesita basáltica. El segundo también en el Jurásico Inferior –Pliensbachiense– aproximadamente a los 185 Ma encontrado en una andesita. El tercer evento en el límite Jurásico Inferior–Medio –Toarciense– alrededor de los 175 Ma obtenido en una riolita.

El intervalo de edades U-Pb obtenidas confirma que la actividad del sistema vulcano-sedimentario que dio origen a la Formación Noreán tuvo actividad, por lo menos al NW del Macizo de Santander, estribación NW de la Cordillera Oriental, desde el Jurásico Inferior hasta el Jurásico Medio, tal como lo habían propuesto varios autores en décadas pasadas con base en relaciones estratigráficas.

La Formación Noreán es correlacionable en composición petrográfica y geoquímica y en edades con la Formación Saldaña y las Vulcanitas de Pitalito del Valle Superior del Magdalena. Petrográfica y geocronológicamente es correlacionable con las unidades volcánicas del Jurásico de la Sierra Nevada de Santa Marta y con la Formación La Quinta en la Serranía de Perijá.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Geológico Colombiano por la financiación del proyecto. A los laboratorios de Petrografía y Química del SGC por la elaboración de las secciones delgadas y los análisis químicos de las muestras, respectivamente. Al Laboratorio de Geocronología del SGC por las dataciones radiométricas U-Pb en circón de dos muestras. A los geólogos Lina María Cetina, José Gilberto Bermúdez y Tomás Correa, por el apoyo en el muestreo de campo. A los geólogos antes mencionados y a Juan Pablo Zapata, Ángela Viviana Rincón y Milton Obando por la realización de análisis petrográficos. A Tomás Correa por la traducción del resumen al *abstract* del artículo. A Juan Pablo Zapata por la elaboración de la figura del mapa geológico generalizado. Se agradece a los geólogos Jairo Clavijo y Julián Andrés López Isaza, evaluadores del manuscrito por sus valiosos aportes para el mejoramiento del artículo.

## REFERENCIAS

- Bogotá, J., y Aluja, J. (1981). Geología de la Serranía de San Lucas. *Geología Norandina*, 4, 49-56.
- Bürgl, H. (1964). El Jura-Triásico de Colombia. *Boletín Geológico*, 12(1-3), 5-31.
- Cediel, F., Mojica, J., y Macía, C. (1981). Las formaciones Luisa, Payandé y Saldaña sus columnas Estratigráficas Características. *Geología Norandina*, 3, 11-19.
- Clavijo, J. (1995a). Mapa Geológico de Colombia. Plancha 75 - Aguachica. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bucaramanga.
- Clavijo, J. (1995b). La Formación Noreán: Nueva evidencia de volcanismo explosivo en la paleocuenca del Magdalena (Colombia) y su relación con otras unidades del Jurásico norandino. *IX Congreso Latinoamericano de Geología*. Caracas, Venezuela.
- Clavijo, J., Barbosa, G., Camacho, J., Bernal, L., Royero, J.M., y Castro, E. (1992). Geología de la Plancha 75 - Aguachica. Escala 1:100.000. Mapa Geológico. INGEOMINAS, Bogotá.
- Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., y Pérez, A. (2008). Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, Norte del Valle Medio del Magdalena y Noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.
- Coyner, S.J., Kamenov, G.D., Mueller, P.A., Rao, V., and Foster, D.A. (2004). FC-1: a zircon reference standard for the determination of Hf isotopic compositions via laser ablation ICP-MS. *American Geophysical Union, Fall Meeting*. San Francisco, USA.
- Cuadros, F. (2012). Caracterização geoquímica e geocronológica do embasamento Mesoproterozóico da parte Norte da Serrania de San Lucas (Colômbia). Tesis de Maestría, Universidade de Brasília, Brasil.
- Daconte, R., y Salinas, R. (1980). Geología de las planchas 66 (Miraflores) y 76 (Ocaña). Departamento Norte de Santander. Memoria Explicativa escala 1:100.000. 116p. Bucaramanga.
- García, C., y Ríos, C. (1999). Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Colciencias-Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga). Informe final Proyecto de Investigación 1102-05-083-95. 191 p.
- Geyer, O. (1982). Comparaciones estratigráficas y faciales en el Triásico Norandino. *Geología Norandina*, 5, 27-31.
- Geyer, O.F. (1969). La fauna de amonitas del perfil típico de la Formación Morrocoyal (Liásico Inferior). *I Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá, Colombia.
- Goldsmith, R., Marvin, R.F., and Mehnert, H.H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750, D44-D49.
- González, H., Maya, M., Camacho, J., Cardona, O.D., y Vélez, W. (2015a). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano. Plancha 74-Guaranda. Servicio Geológico Colombiano.

- González, H., Maya, M., García, J.F., Gómez, J.P., Palacio, A.F., y Vélez, W. (2015b). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano. Plancha 95-Buenavista. Servicio Geológico Colombiano.
- González, H., Maya, M., Tabares, L.F., Palacio, A.F., Gómez, J.P., Montoya, A., y Vélez, W. (2015c). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano. Plancha 107-Cerro Azul. Servicio Geológico Colombiano.
- González, H., Maya, M., Tabares, L.F., Montoya, A., Palacio, A.F., Sánchez, C., Barajas, A., y Vélez, W. (2015d). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano. Plancha 118-San Francisco. Servicio Geológico Colombiano.
- González, D.A., López, J.A., y Zuluaga, C.A. (2017). Granulitas y granofelsas con olivino, aflorantes en los alrededores de Ocaña – Macizo de Santander. *XVI Congreso Colombiano de Geología y III Simposio de Exploradores. Geología, Sociedad y Territorio*. Santa Marta, Colombia.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F. (2007). Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341-2357. doi: 10.1093/petrology/egm062.
- Hellstrom, J., Paton, C., Woodhead, J.D., and Hergt, J.M. (2008). Iolite: software for spatially resolved LA-(quad and MC) ICP-MS analysis. In: P. Sylvester (Ed.). *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues* (pp. 343-348). Vancouver: Mineralogical Association of Canada.
- Hughes, C.J. (1972). Spilites, keratophyres and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, 109(6), 513-527. doi: 10.1017/S0016756800042795.
- INGEOMINAS. (2002a). Atlas Geológico Digital de Colombia Versión 1.1 Plancha 5-04. Escala 1: 500.000. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2002b). Atlas Geológico Digital de Colombia Versión 1.1 Plancha 5-06. Escala 1: 500.000. Bogotá.
- INGEOMINAS-UIS. (2006a). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). Aporte a su evolución geológica. Memoria explicativa de la Plancha 85 - Simití. INGEOMINAS.
- INGEOMINAS-UIS. (2006b). Geología de la Plancha 55 El Banco. Escala 1:100.000. Mapa Geológico. INGEOMINAS, Bogotá.
- INGEOMINAS-UIS. (2006c). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). Aporte a su evolución geológica. Memoria explicativa de la Plancha 55 - El Banco. INGEOMINAS.
- INGEOMINAS-UIS. (2006d). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). Aporte a su evolución geológica. Memoria explicativa de la Plancha 64 - Barranco de Loba. INGEOMINAS.
- INGEOMINAS-UIS. (2006e). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). Aporte a su evolución geológica. Memoria explicativa de la Plancha 96 - Bocas del Rosario. INGEOMINAS.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548.
- Janoušek, V., Farrow, C.M., and Erban, V. (2006). Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6), 1255-1259. doi: 10.1093/petrology/egl013.
- Kassem, T., y Arango, J.L. (1977). Mapa fotogeológico de la Serranía de San Lucas. Escala 1:500.000. INGEOMINAS.

- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., and Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745-750. doi: 10.1093/petrology/27.3.745.
- Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H., and Huston, D.L. (2001). The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96(5), 957-971. doi: 10.2113/gsecongeo.96.5.957.
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. PhD Thesis, Universitat de Barcelona, España.
- Ludwig, K.R. (2012). User's Manual for Isoplot 3.75-4.15. A Geochronological Toolkit Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication N°5, 75p.
- Mantilla-Figueroa, L.C., García-Ramírez, C.A., y Valencia, V.A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33-50. doi: 10.18273/revbol.v38n1-2016002.
- Maze, W. (1984). Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: Geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks. In: W. Bonini, R. Hargraves, R. Shagam (Ed.). *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics* (pp. 263-282). McLean: Geological Society of America, v. 162. doi: 10.1130/MEM162-p263.
- Mojica, J., y Dorado, J. (1987). El Jurásico anterior a los movimientos intermálmicos en los Andes colombianos. Parte A: Estratigrafía. En: W. Volkheimer (Ed.). *Bioestratigrafía de los sistemas regionales del Jurásico y Cretácico de América del Sur* (pp. 49-110). Mendoza: Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico, v. 1.
- Mojica, J., y Kammer, A. (1995). Eventos Jurásicos en Colombia. *Geología Colombiana*, 19, 165-172.
- Mojica, J., Kammer, A., y Ujueta, G. (1996). El Jurásico del sector noroccidental de Suramérica y guía de la excursión al Valle Superior del Magdalena (Nov. 1-4/95), regiones de Payandé y Prado, Departamento del Tolima, Colombia. *Geología Colombiana*, 21, 3-41.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775. doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5.
- Ordóñez-Carmona, O., Frantz, J.C., Chemale, F. y Londoño, C. (2009). Serranía de San Lucas: mineralizaciones auríferas, intrusiones de 1500 Ma, metamorfismo Grenville y magmatismo Jurásico. *XII Congreso Colombiano de Geología*. Paipa, Colombia.
- Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A., and Maas, R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3), 1-36. doi: 10.1029/2009GC002618.
- Pearce, J.A. (1996). A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In: D.A. Wyman (Ed.). *Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration* (pp. 79-113). Winnipeg: Geological Association of Canada. Short Course Notes v. 12.
- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4), 14-48. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- Peña-Urueña, M.L., Muñoz-Rocha, J.A., y Urueña, C.L. (2018). Laboratorio de Geocronología en el Servicio Geológico Colombiano: avances sobre datación U-Pb en circones mediante la técnica LA-ICP-MS. *Boletín Geológico*, 44, 39-56. INGEOMINAS.
- Petrus, J.A., and Kamber, B.S. (2012). VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3), 247-270. doi: 10.1111/j.1751-908X.2012.00158.x.
- Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L., and DePaolo, D.J. (1998).



- Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Chemical Geology*, 145(1-2), 117-152. doi: 10.1016/S0009-2541(97)00159-9.
- Restrepo-Pace, P. (1995). Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic date. PhD. Thesis, The University of Arizona, USA.
- Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G., and Cosca, M. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3-4), 427-441. 10.1016/S0012-821X(97)00091-5.
- Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., y Bermúdez, J.G. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia, Formación Saldaña. Cordilleras Central y Oriental Tolima, Huila, Cauca y Putumayo. Servicio Geológico Colombiano, 91 p. Medellín.
- Rodríguez, G., Zapata, G., Correa-Martínez, A.M., y Arango, M.I. (2017). Caracterización petrográfica, química y geocronológica del magmatismo Triásico-Jurásico del Macizo de Santander-Colombia. *XVI Congreso Colombiano de Geología y III Simposio de Exploradores, Geología, Sociedad y Territorio*. Santa Marta, Colombia.
- Royero, J.M. (1996). Geología de la Plancha 65, Tamalameque (Departamentos del Cesar y Bolívar). Memoria Explicativa. INGEOMINAS, 78p. Bucaramanga.
- Royero, J., Clavijo, J., Bernal, L., y Barbosa, G. (1994). Geología de la Plancha 65-Tamalameque. Escala 1:100.000. Mapa Geológico. INGEOMINAS. Bogotá.
- Rubatto, D. (2002). Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2), 123-138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2.
- Sarmiento, G., Puentes, J., y Sierra, C. (2015). Evolución geológica y estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 12, 51-82.
- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 9(1), 41-43.
- Shand, S.J. (1943). *Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorites*. New York: John Wiley & Sons.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., and Whitehouse, M.J. (2008). Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2), 1-35. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.11.005.
- Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O., and Tanner, M. (2010). U-Pb Zircon Geochronology with an Integrated LA-ICP-MS Microanalytical Workstation: Achievements in Precision and Accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1), 5-18. doi: 10.1111/j.1751-908X.2009.00027.x.
- Stacey, J.S., and Kramers, J.D. (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2), 207-221. doi: 10.1016/0012-821X(75)90088-6.
- Streckeisen, A. (1978). IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks: Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks; recommendation and suggestions. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, 134, 1-14.
- Sun, S.S., and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Sanders, M.J. Norry (Eds.). *Magmatism in oceanic basins* (pp. 313-345). Oxford: Geological Society of London, Special Publication, 42.
- Tschanz, C., Jimeno, A., and Cruz, J. (1969). Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area,

- Colombia. INGEOMINAS, informe interno No. 1829. Bogotá.
- Tschanz, C.M., Marvin, R.F., Cruz, B.J., Mehnert, H.H., and Cebula, G.T. (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia. *GSA Bulletin*, 85(2), 273-284. doi: 10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEO TSN>2.0.CO;2.
- Van der Lelij, R., Spikings, R., and Mora, A. (2016). Thermochronology and tectonics of the Mérida Andes and the Santander Massif, NW South America. *Lithos*, 248-251, 220-239. 10.1016/j.lithos.2016.01.006.
- Velandia, F., García, H., López, J., Bermúdez, M., Zuluaga, C., y Taboada, A. (2017). Modelo estructural del Macizo de Santander y zonas adyacentes. *XVI Congreso Colombiano de Geología y III Simposio de Exploradores, Geología, Sociedad y Territorio*. Santa Marta, Colombia.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, J., y Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-133.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185-187. doi: 10.2138/am.2010.3371.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J.C., and Spiegel, W. (1995). Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1), 1-23. doi: 10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x.
- Wiedenbeck, M., Hanchar, J.M., Peck, W.H., Sylvester, P., Valley, J., Whitehouse, M., Kronz, A., Morishita, Y., Nasdala, L., Fiebig, J., Franchi, I., Girard, J.P., Greenwood, R.C., Hinton, R., Kita, N., Mason, P.R.D., Norman, M., Ogasawara, M., Piccoli, P.M., Rhede, D., Satoh, H., Schulz-Dobrick, B., Skår, Ø., Spicuzza, M.J., Terada, K., Tindle, A., Togashi, S., Vennemann, T., Xie, Q., and Zheng, Y.F. (2004). Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1), 9-39. doi: 10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x.
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343. doi: 10.1016/0009-2541(77)90057-2.

---

Ana María Correa-Martínez  
ORCID: 0000-0002-5708-0350

Gabriel Rodríguez  
ORCID: 0000-0003-1422-3523

María Isabel Arango  
ORCID: 0000-0002-4296-9798

Gilberto Zapata-García  
ORCID 0000-0002-4961-587X

---

Trabajo recibido: marzo 23 de 2018  
Trabajo aceptado: agosto 13 de 2018