

Artículo original

Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia)

A new proposal on ages of the sedimentary record of Bocas and Jordan formations and their relationship with the development of the magmatic activity of the Santander Plutonic Group (Eastern Cordillera, Colombia)

✉ Carlos M. Alarcón*, ✉ Jairo Clavijo-Torres, ✉ Luis C. Mantilla-Figueroa,
✉ Juan Guillermo Rodríguez

Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia

Resumen

Los estudios del registro geológico del Jurásico en los Andes Septentrionales de Colombia apuntan a que en este lapso se desarrolló de forma simultánea la actividad magmática, el metamorfismo y la sedimentación en este sector de la corteza. En el Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia) han quedado registrados vestigios de esta actividad magmática cuyos remanentes actuales se reconocen en mayor medida por la presencia de cuerpos ígneos plutónicos (Grupo Plutónico de Santander). Los nuevos estudios paleontológicos en lodolitas de la Formación Bocas han permitido la identificación preliminar de las especies de conchostracos *Shipingia hebaozhaiensis*, *Euestheria buravasi* y *Laxitextella multireticulata* de una edad correspondiente al Triásico Tardío. La geocronología U/Pb en circones ígneos de una ignimbrita y una toba riolítica de la Formación Jordán indica edades de acumulación de $199,37 \pm 0,34$ Ma y $198,49 \pm 0,33$ Ma, lo que posibilita asignar su edad al Jurásico Temprano. Estos nuevos resultados sugieren que los registros de la actividad volcánica en la Formación Jordán son coetáneos con el desarrollo y la génesis del Grupo Plutónico de Santander (de edad ~202-195 Ma).

Palabras claves: Andes del norte; Macizo de Santander; Formación Jordán; Formación Bocas; Grupo Plutónico de Santander.

Abstract

The geological information of the Jurassic record in the Northern Andes of Colombia indicates that during this time, magmatic activity, metamorphism, and sedimentation developed simultaneously. In the Santander Massif (Eastern Cordillera of Colombia), vestiges of this magmatic activity can be recognized by the presence of igneous plutonic bodies (Santander Plutonic Group). New paleontological studies in rocks from the sedimentary record of the Bocas Formation allowed for preliminary identification of conchostracans species: *Shipingia hebaozhaiensis*, *Euestheria buravasi*, and *Laxitextella multireticulata* of the Late Triassic age. U/Pb geochronology in ignimbrite and rhyolitic tuff of the Jordan Formation yielded ages of 199.37 ± 0.34 Ma and 198.49 ± 0.33 Ma defining an Early Jurassic age for this unit. These results indicate that the lithological record of volcanic origin within the Jordan Formation is contemporary with the development and genesis of the Santander Plutonic Group (age ~ 202-195 Ma).

Keywords: Northern Andes; Santander Massif; Jordan Formation; Bocas Formation; Santander Plutonic Group.

Citación: Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>

Editor: Germán Alonso Bayona Chaparro

***Correspondencia:**

Carlos M. Alarcón;
cmag_1996@hotmail.com

Recibido: 10 de mayo de 2020

Aceptado: 20 de julio de 2020

Publicado: 5 diciembre de 2020



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El registro de los eventos geológicos del Triásico Tardío-Jurásico Temprano en el sistema orogénico de los Andes Septentrionales permite suponer una historia compleja en un escenario con desarrollo principalmente de plutonismo, actividad volcánica y sedimentación (Bayona, *et al.*, 2020). Varios modelos de desarrollo espacio-temporal del magmatismo y la sedimentación se han propuesto: 1) la formación de fisuras intracontinentales como resultado de un tectonismo extensivo que estuvo acompañado, a su vez, por actividad magmática (Mojica & Kammer, 1995; Cediél, *et al.*, 2003); 2) la migración lateral de arcos magmáticos generados en una zona de subducción (Cochrane, *et al.*, 2014; Spikings, *et al.*, 2015; Bustamante, *et al.*, 2017; Rodríguez, *et al.*, 2018); 3) la generación de arcos magmáticos y su posterior desplazamiento a lo largo de la margen occidental de Gondwana (Bayona, *et al.*, 2006; Bayona, *et al.*, 2010; Toussaint, 1995), o la acreción de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, *et al.*, 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona, *et al.* (2020), es importante reanudar los estudios paleontológicos y geocronológicos de los registros sedimentarios para mejorar su temporalidad, aunque sin dejar de lado las interpretaciones sedimentológicas de los ambientes de depósito.

Durante finales del Triásico Tardío e inicios del Jurásico Temprano en el Macizo de Santander se registró un evento magmático representado por rocas plutónicas (mayoritariamente localizadas al este de la falla de Bucaramanga) denominadas Grupo Plutónico de Santander (Ward, *et al.*, 1973). También hay registros sedimentarios interestratificados minoritariamente con rocas volcánicas y volcanoclásticas que representan la Formación Bocas (relacionada con el Pérmico y el Jurásico Temprano) y la Formación Jordán (relacionada con el Jurásico Temprano-Medio). Hoy sigue siendo tema de debate la temporalidad de estas dos unidades debido a la falta de datos geocronológicos y paleontológicos.

El objetivo de este trabajo fue hacer una síntesis y avanzar en el conocimiento de las formaciones Bocas y Jordán mediante un análisis bioestratigráfico y de geocronología U/Pb en circones de rocas volcánicas, con el fin de establecer la temporalidad tanto de las unidades como de sus registros de actividad volcánica.

Contexto geológico

Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edad situada en el Jurásico en los Andes del norte se encuentran expuestas en una franja de dirección NO-SE que se extiende desde Ecuador y Colombia hasta los límites con Venezuela (Mojica & Kammer, 1995; Spikings, *et al.*, 2015; Bayona, *et al.*, 2020). En los Andes colombianos las rocas ígneas plutónicas del Jurásico Inferior se dividen en dos cinturones subparalelos: el primero, ubicado en el Macizo de Santander, con edades comprendidas entre los 202 y 195 Ma (Mantilla, *et al.*, 2013; Van der Lelij, 2016); el segundo, desarrollado sobre la Cordillera Central, la Serranía de San Lucas y la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se estableció entre los 194 y 180 Ma (Leal-Mejía, 2011, Quandt, *et al.*, 2018; Leal-Mejía, *et al.*, 2019; Shaw, *et al.*, 2019). Los resultados de los datos geoquímicos de los intrusivos en los dos cinturones indican que hacían parte de arcos magmáticos relacionados con la subducción de la placa oceánica protopacífica debajo de la margen occidental de Gondwana (Sillitoe, *et al.*, 1982; Aspden, *et al.*, 1987; Dörr, *et al.*, 1995; Van der Lelij, 2016; Spikings, *et al.*, 2015; Zuluaga & López, 2019).

Como evidencia adicional del magmatismo del Jurásico Temprano, se encuentran espesas sucesiones de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composiciones intermedias y félsicas interestratificadas con rocas sedimentarias, que han quedado registradas en unidades del Valle Superior del Magdalena (Formación Saldaña) (Bayona, *et al.*, 1994; Mojica, *et al.*, 1996; Rodríguez, *et al.*, 2016), del Valle Medio del Magdalena (Formación

Noreán) (**Clavijo, et al.**, 2008; **Correa, et al.**, 2019), la Serranía de San Lucas (Formación Noreán) (**Clavijo, et al.**, 2008; **Leal-Mejía**, 2011), la Serranía de Perijá (Formación La Quinta) (**Maze**, 1984), las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (Formación Guatapurí) (**Tschanz, et al.**, 1974; **Quandt, et al.**, 2018) y la península de la Guajira (Riodacita de Ipapure-Cerro La Teta) (**Zuluaga, et al.**, 2015). Todas las unidades referenciadas comprenden edades entre 194 y 173 Ma.

Las rocas volcánicas del Jurásico Temprano están asociadas principalmente con unidades de ambientes continentales que se acumularon en cuencas extensionales (**Mojica, et al.**, 1996; **Sarmiento-Rojas, et al.**, 2006), aunque es posible que el registro sedimentario se haya iniciado a finales del Triásico, en depresiones tectónicas desarrolladas localmente (**Mojica & Kammer**, 1995).

En nuevas investigaciones se ha determinado la presencia de metabasitas y metapelitas de edad Jurásica dentro del Complejo Cajamarca en la Cordillera Central colombiana como resultado de un metamorfismo y deformación relacionada con la colisión de un terreno (**Blanco-Quintero, et al.**, 2014) y en una reciente publicación, **Zuluaga & López** (2019) mencionan el desarrollo de un evento metamórfico regional de baja presión en el Macizo de Santander.

Geología del macizo de Santander

El Macizo de Santander forma el margen suroeste del bloque de Maracaibo y es la continuación norte de la Cordillera Oriental de Colombia (**Cediel & Cáceres**, 2000; **Van der Lelij**, 2016; **Velandia, et al.**, 2020) donde esta se divide en dos para formar los Andes de Mérida en Venezuela y, al noreste, la Serranía de Perijá. Se han diferenciado tres unidades metamórficas del basamento cristalino del Macizo de Santander en la Cordillera Oriental colombiana, el Neis de Bucaramanga, los Esquistos del Silgará y el Ortoneis, las cuales registran los principales eventos de metamorfismo regional que han afectado a este sector de los Andes Septentrionales, y que están relacionadas con las orogenias Grenvilliana y Famatiniana (localmente orogenia Quetame-Caparonensis), respectivamente (**Cordani, et al.**, 2005; **Restrepo-Pace & Cediel**, 2010; **Mantilla, et al.**, 2013; **Mantilla-Figueroa, et al.**, 2016a). Este basamento metamórfico es intruido por granitoides Silúricos (Granito de Durania) y los grandes batolitos del Grupo Plutónico de Santander (**Material suplementario, figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>), que presentan un rango temporal desde el Triásico Tardío hasta el Jurásico Temprano (**Goldsmith, et al.**, 1971; **Ward, et al.**, 1973; **Dörr, et al.**, 1995; **Van der Lelij**, 2016; **Mantilla, et al.**, 2013; **Zuluaga & López**, 2019; **Rodríguez, et al.**, 2020).

El registro sedimentario del Triásico Tardío-Jurásico Temprano en la estribación occidental del Macizo de Santander está representado por las formaciones Bocas y Jordán, las cuales representan un registro continuo de sedimentación continental lacustre con desarrollo de actividad volcánica sinsedimentaria (**Alarcón & Rodríguez**, 2019).

La propuesta más reciente sobre la edad de la Formación Bocas es planteada por **Van der Lelij** (2016) como Pérmica con base en una datación U/Pb en un dique riolítico (250,7±4,3 Ma) que corta la unidad al SO del municipio El Playón y el reporte de plantas del género *Glossopteris* sp. por **Mojica, et al.** (1996). Previamente se había asignado una edad Triásica a la Formación Bocas en su localidad tipo por **Ward, et al.** (1973) basada en las morfologías de ostrácodos y del Jurásico Temprano (**Remy, et al.**, 1975), que se sustenta en fósiles de helechos de la especie *Phlebopteris branneri* y restos polínicos del género *Classopollis* sp.

La Formación Bocas presenta vestigios de actividad volcánica hacia el norte de Bucaramanga, donde se han reportado capas de tobas y flujos de basalto, así como en su localidad tipo, donde se han distinguido capas epiclásticas constituidas por fragmentos de basaltos, riolitas y tobas riolíticas (**Rabe**, 1977).

Para la Formación Jordán se han propuesto diferentes edades basadas en su posición estratigráfica en el Jurásico Temprano (**Ward, et al.**, 1973), el Jurásico Temprano-Medio (**Royero & Clavijo**, 2001) y el Jurásico Medio (**Rabe**, 1977; **Bayona, et al.**, 2006), lo que

se explica porque nunca se han realizado dataciones radiométricas ni se han encontrado fósiles guía dentro de la unidad, con excepción de trazas fósiles características de ambientes continentales y lacustres (Alarcón & Rodríguez, 2019) que solo han aportado a su interpretación ambiental.

Diversos autores han reportado la presencia de rocas volcánicas dentro de la Formación Jordán, hacia la zona sur de la Mesa de Los Santos, las cuales se caracterizan por tobos de composición félsica de poca continuidad lateral interestratificadas con lodolitas y areniscas rojizas (Dickey, 1941; Langenheim, 1959; Téllez, 1964; Cediell, 1968; Suárez & Díaz, 2016; Alarcón & Rodríguez, 2019). Ayala-Calvo, *et al.* (2005) han reportado basaltos con amígdalas en la base de la Formación Jordán al sur del municipio de Rionegro.

Las formaciones Bocas y Jordán se encuentran en discontinuidad estratigráfica con la suprayacente Formación Girón, de edad en el Jurásico Tardío (Rabe, 1977; Horton, *et al.*, 2015) y en el Jurásico Tardío a Cretácico Temprano (Pons, 1982), que se caracteriza por un potente espesor (± 3000 m) de areniscas, capas sedimentarias tojas, areniscas conglomeráticas y conglomerados. La Formación Girón infrayace en continuidad estratigráfica a la Formación Los Santos (Laverde & Clavijo, 1985; Etayo-Serna, 1989) de edad Berriasiana (Etayo-Serna & Rodríguez, 1985).

Métodos analíticos

Geocronología U/Pb en circones

Las dataciones se realizaron en el laboratorio del *Department of Geology, Washington State University*, en Pullman, Washington, utilizando un espectrómetro de masas con multicolectores y acoplamiento de plasma inducido (MC-ICP-MS), que a su vez está acoplado a un sistema de ablación láser. Todo el sistema mencionado se referencia en la literatura especializada mediante las siglas LA-MC-ICPMS (*laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry*). Los cristales analizados se seleccionaron de forma aleatoria de todos los circones extraídos en cada una de las dataciones. Para la ablación de los circones (previamente recolectados mediante la molienda de la roca y su concentración), se utilizó un láser que opera a una longitud de onda de 193 nm. El material obtenido de la ablación fue transportado con gas helio a la fuente de plasma. El espectrómetro, configurado para analizar simultáneamente los isótopos de U, Th, y Pb, toma las medidas en modo estático usando detectores Faraday para ^{238}U y ^{232}Th , un canal para conteo de iones de ^{204}Pb , y colectores Faraday para ^{208}Pb . El punto donde se realiza la ablación tiene una profundidad de ~ 15 micrones y un diámetro de ~ 35 micrones. En cada análisis los errores en la determinación de las relaciones $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ producen una incertidumbre en la medida de $\sim 1\%$ (2-sigma). Los detalles de la metodología de todo el proceso analítico usado para datar los circones se reportan en el estudio de Chang, *et al.* (2006). En cuanto a los estándares de laboratorio, se usaron muestras de circones conocidas y previamente datadas con otros métodos como las de: 1) Peixe (circones de Brasil con una edad de 564 ± 4 Ma); 2) Temora (circones de Australia con edades SHRIMP de $416,8 \pm 1,8$ Ma); 3) 91500 (circones de Canadá con edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de $1065,4 \pm 0,3$ Ma); 4) AS57 (circones de Estados Unidos con edades ID-TIMS de 1099 ± 3 Ma), y 5) MCC12-515E (circones de Estados Unidos con edades 1779 ± 4 Ma). Una descripción más detallada de las características de la instrumentación utilizada y los procesos de análisis y medición puede consultarse en los estudios de Gehrels, *et al.* (2006, 2008). Las constantes de desintegración utilizadas fueron las reportadas en Steiger & Jäger (1977), y para la corrección de ^{204}Pb se usó el modelo de Stacey & Kramers (1975). El procesamiento y análisis de datos geocronológicos se hizo mediante el programa IsoplotR (Vermeesch, 2018) e Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003). No se consideraron en la interpretación de la edad los resultados de circones con discordancias mayores al 10 %, ya que estos se califican como circones con pérdidas de plomo en su estructura cristalina.

Bioestratigrafía

Los fósiles de conchostracos de la Formación Bocas fueron identificados con ayuda de fotografías estereomicroscópicas e imágenes de SEM (*Scanning Electron Microscope*) por el doctor Oscar Gallego, investigador del CONICET (Gallego, *et al.*, 2019). Se recolectaron aproximadamente 80 especímenes de conchostracos en niveles de lodolitas carbonosas del conjunto inferior de la Formación Bocas (ver la sección de “Estratigrafía física y relaciones de campo de la Formación Bocas”) en su localidad tipo, con el fin de identificar taxonómicamente las especies o géneros presentes. Para la determinación de los rangos bioestratigráficos se utilizó la biozonación de Kozur & Weems (2010).

Análisis petrográfico

En el estudio se incluye una breve descripción petrográfica de las tobas en la localidad tipo de la Formación Jordán, clasificados según el diagrama de Schmid (1981). Se presenta, además, una descripción petrográfica de un basalto ubicado entre el tope y la base de las formaciones Bocas y Jordán sobre la vía Bucaramanga-Rionegro. El objetivo fue conocer las características texturales y composicionales de las distintas rocas de origen volcánico en estas unidades (Material suplementario, tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>). Se contó un mínimo de 200 puntos distribuidos en toda la sección delgada.

Resultados

A continuación, se describe la estratigrafía, las características litológicas y la información petrográfica de las formaciones Bocas y Jordán y se reportan nuevos datos bioestratigráficos y de geocronología U/Pb en circones para la determinación de sus edades de sedimentación.

Estratigrafía física y relaciones de campo

Formación Bocas. En el área de su sección tipo, a lo largo de la carretera norte de Bucaramanga (Ward, *et al.*, 1973), el conjunto inferior esta unidad, de aproximadamente 580 m de espesor, se caracteriza por una sucesión de lodolitas oscuras y areniscas gris verdosas, algunas ligeramente calcáreas, que se interestratifican hacia la parte media con capas de lodolitas carbonosas y un nivel de calizas de color gris oscuro. El conjunto superior, de aproximadamente 200 m, se diferencia del conjunto basal por tamaños de grano generalmente más gruesos y colores más claros. Se caracteriza por areniscas de grano fino y muy fino gris verdosas, feldespáticas, ligeramente calcáreas alternadas con limolitas ligeramente calcáreas y, esporádicamente, con horizontes conglomeráticos calcáreos. La Formación Bocas yace en discontinuidad estratigráfica sobre las calizas Pérmicas de la Formación Diamante en el sitio denominado Puente Tierra, y se encuentra en contacto concordante con la suprayacente Formación Jordán al sur del corregimiento de Bocas. Es común encontrar fósiles de conchostracos y ostrácodos en los niveles de limolitas y lodolitas de color oscuro del conjunto inferior, así como restos de plantas carbonizadas (helechos), algunas con buena preservación.

Rocas volcánicas en el tope de la Formación Bocas y la base de la Formación Jordán en el sector de Rionegro. Sobre la vía principal que conduce de Bucaramanga a Rionegro se pueden observar escasos flujos de lava de composición máfica que se interestratifican en el conjunto superior de la Formación Bocas y en la base de la Formación Jordán. Se trata de flujos de basaltos con textura amigdalal, algunos de los cuales muestran evidencias de mezcla con el sedimento (peperitas). Los flujos son más frecuentes en la parte superior de la Formación Bocas, pero el cuerpo de mayor dimensión se encuentra entre el tope y la base de las formaciones Bocas y Jordán, donde se pueden observar en una zona de estructuras circulares semejantes a lavas almohadilladas (Moore, 1965). En el afloramiento las rocas almohadilladas tienen formas entre elípticas y subredondeadas, con diámetros medios de 20 a 30 cm, y exhiben una textura porfirítica y amigdalal en muestra de mano, en tanto que en la sección delgada presentan una textura porfirítica e intergranular, definida por microfenocristales de plagioclasa (Figura 1 E-F). En los intersticios de las plagioclasas se

observan relictos de cristales de clinopiroxenos cloritizados, epidotas, opacos y vidrio. Las amígdalas tienen un tamaño promedio de 3 a 5 mm y son entre redondeadas y ovaladas, y están rellenas principalmente por epidotas, zeolitas y carbonatos.

Formación Jordán. En su sección tipo, ubicada en el escarpe sur de la Mesa de los Santos (Cediel, 1968), la Formación Jordán tiene un espesor aproximado de 500 m (Suárez & Díaz, 2016) que consiste en intercalaciones monótonas de limolitas, areniscas de grano fino y muy fino de color marrón rojizo y, en menor proporción, rocas volcanoclásticas.

El material piroclástico corresponde a tobas de composición riolítica clasificadas como líticas, de cristales y vítreas (**Material suplementario, tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>). Las tobas tienen una textura fragmental con cantidades variables de fragmentos de cristales y de líticos (**Figura 1 A-B**). La matriz varía de vítrea a criptocristalina por desvitrificación. Es posible observar una textura de flujo en la matriz, a veces con presencia de fiames que marcan una textura eutaxítica característica de las ignimbritas (**Figura 1 C-D**). Los fragmentos de cristales juveniles son principalmente de feldespatos potásico, plagioclasa, cuarzo y, en menor proporción, de moscovita, biotita y opacos (magnetita). Los fragmentos de líticos juveniles corresponden a rocas volcánicas félsicas (riolitas y tobas riolíticas) y, de manera subordinada, a líticos accidentales metamórficos de esquistos moscovíticos y cuarcitas foliadas; estos fragmentos metamórficos son similares a las litologías presentes en la unidad Esquistos del Silgará.

Este componente volcánico explosivo félsico dentro de la unidad se encuentra restringido y su distribución en el área es relativamente pequeña, concentrándose principalmente en su localidad tipo y en zonas adyacentes a la Mesa de Los Santos. Hacia el norte de Bucaramanga, en los afloramientos del valle del Río de Oro y sobre la vía al municipio de Matanza, las rocas volcánicas primarias desaparecen y solo se observan algunas facies epiclásticas. La Formación Jordán se encuentra en continuidad estratigráfica con la infrayacente Formación Bocas y en discordancia con la Formación Girón, sobre el valle del Río de Oro. Hacia el cañón de los ríos Chicamocha y Sogamoso, se observa en su contacto con la suprayacente Formación Los Santos una discordancia angular que varía entre 10° y 30° (Alarcón & Rodríguez, 2019).

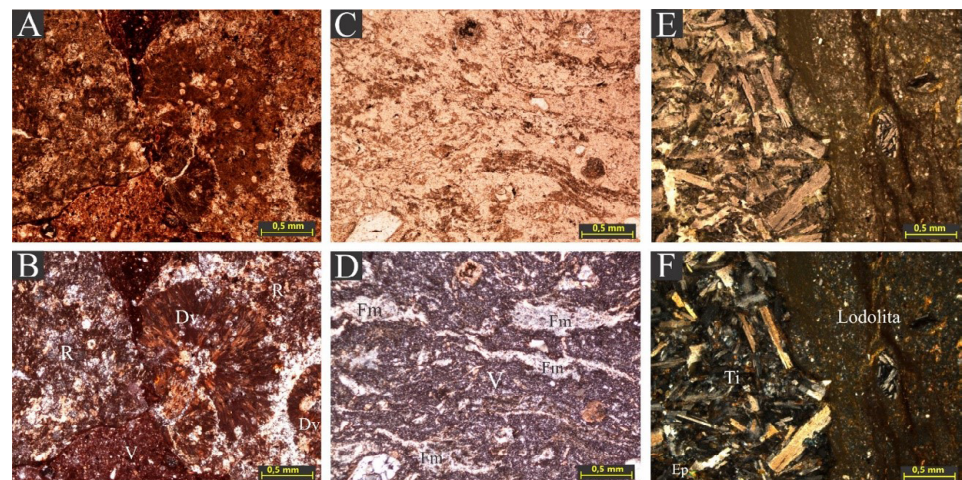


Figura 1. Microfotografías de secciones delgadas en nicols paralelos y cruzados de rocas volcánicas de las formaciones Bocas y Jordán. Dv: desvitrificación; V: matriz vítrea; Fm: fiamme; R: Lítico riolítico; Ep: epidota; Ti: textura intergranular en basalto. (**A-B**) Líticos de riolita con alteración esferulítica en toba de la Formación Jordán, muestra CRJ-01-01. (**C-D**) Fiames de ignimbrita riolítica de la Formación Jordán, muestra CRJ-05-01. (**E-F**) Basalto con textura intergranular entre el contacto de las formaciones Bocas y Jordán sobre la vía a Rionegro; se puede apreciar la mezcla con rocas sedimentarias (muestra FBJ-01-01).

Bioestratigrafía en la Formación Bocas. Se recolectaron 80 especímenes de conchostracos en niveles de lodolitas carbonosas de la parte media, conjunto inferior, de la Formación Bocas ($7^{\circ}13'29,20''N$ $73^{\circ}8'54,80''O$). Los conchostracos tienen una larga trayectoria de aplicaciones en la bioestratigrafía, desde **Petzold & Lane** (1988) hasta los recientes trabajos de **Geyer & Kelber** (2018). En los ambientes continentales se hallan los artrópodos más comunes, que son los fósiles continentales con la mayor resolución temporal para el periodo Triásico. En algunos intervalos su resolución es tan alta como la de los ammonoideos y conodontos en ambientes marinos (**Kozur & Weems**, 2010).

Desde el punto de vista sistemático, esta asociación con los conchostracos de la Formación Bocas se determinó preliminarmente como compuesta de las especies *Laxitextella multireticulata* **Reible** (1962), cuyo biocrón abarca el Triásico Tardío desde el límite Ladiniano-Carniano al Carniano temprano (zona de *Laxitextella multireticulata* del Carniano temprano) (Cordevoliano) de las cuencas germánicas y norteamericanas (**Kozur & Weems**, 2010). También se registra una forma similar a *Wannerestheria* sp., que podría ser *W. pennsylvanica*, reportada para el Carniano tardío (¿Zona de *W. pennsylvanica* y zona de *Howellisaura? ovata*) del Supergrupo Newark (Estados Unidos) de **Kozur & Weems** (2010). También se estableció la presencia de *Euestheria? buravasi* **Kobayashi** (1975) (zona de *Palaeolimnadia schwanbergensis*) Noriano temprano y la zona de *Euestheria buravasi*–*Euestheria* n. sp. **Kozur & Weems** (2010), además de *Shipingia hebaozhaiensis* **Shen** (1976), a la que se le adjudica una edad del Noriano medio (zona de *Shipingia hebaozhaiensis*) (**Gallego, et al.**, 2019).

Según la asociación de conchostracos registrada, los biocrones y las biozonas donde se reportan y mencionan estas especies, la edad del conjunto inferior de la Formación Bocas representa el Triásico Tardío desde el Carniano al Noriano (**Figura 2**).

Geocronología U/Pb en tobas de la Formación Jordán. La particularidad de la Formación Jordán de presentar capas de tobas interestratificadas permite determinar la edad magmática a partir de dataciones radiométricas U/Pb en circones volcánicos. Las dos rocas

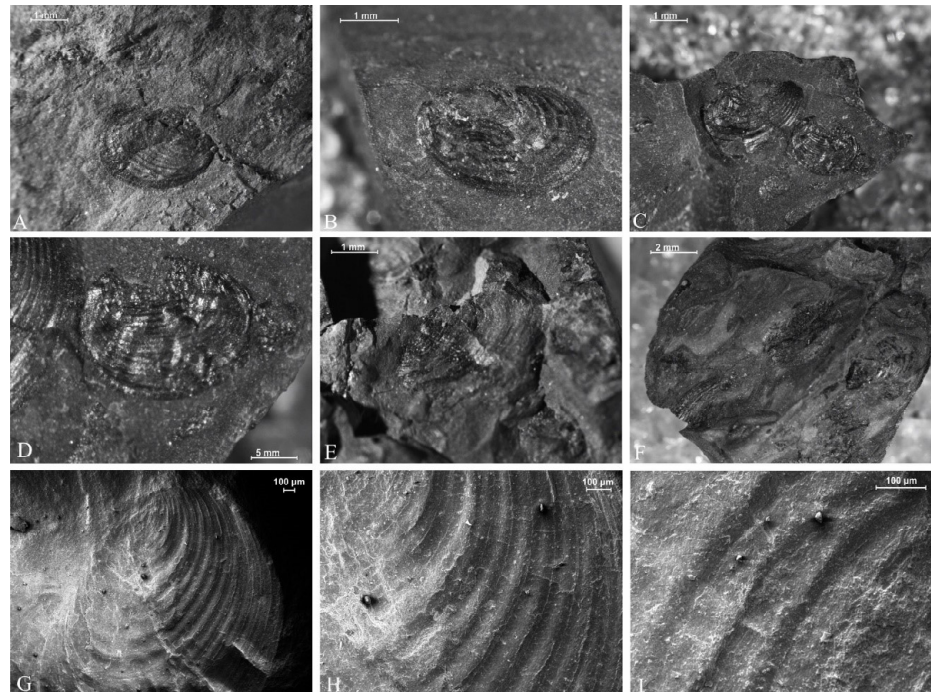


Figura 2. Fotografías estereomicroscópicas de conchostracos de la Formación Bocas. (A-B) *Shipingia hebaozhaiensis*. (C-D) *Euestheria buravasi*. (E-F) *Laxitextella multireticulata*. (G-H-I) Imágenes en SEM en las que se observa la textura de la conchilla y los detalles en las líneas de crecimiento.

datadas corresponden a una ignimbrita de composición félsica (CRJ-05-01) y una toba de caída (CRJ-03-01) (**Material suplementario. Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>). Las rocas se encuentran ubicadas hacia la parte inferior-media de la Formación Jordán en su localidad tipo (**Alarcón & Rodríguez, 2019**).

En las dos muestras se analizó una gran cantidad de circones para identificar la edad magmática, así como posibles xenocristales o edades heredadas producto del material asimilado durante la génesis y el ascenso del magma (**Material suplementario. Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>). Los circones de las dos muestras presentan morfologías similares. Los circones son prismáticos, alargados, con bordes y puntas bien definidas, y algunas veces se encontraron cristales ligeramente más cortos. En menor cantidad también se observaron cristales redondeados, que son morfologías características de los circones detríticos heredados. Los análisis se hicieron en los núcleos y los bordes de los cristales.

Los circones seleccionados para la interpretación de la edad magmática tenían relaciones Th/U de entre 0,4 y 2,5, características de una procedencia magmática (**Rubatto, 2002**), así como morfologías prismáticas con bordes bien definidos. Los resultados de las muestras CRJ-05-01 y CRJ-03-01 se graficaron en el diagrama de concordia de Wetherill (las elipses de error son graficadas a $\pm 2\sigma$) y se calculó una edad media ponderada de $199,37 \pm 0,34$ Ma y $198,49 \pm 0,33$ Ma, respectivamente, interpretadas como la edad de la actividad magmática coetánea a la sedimentación de la formación Jordán (**Figura 3**).

Las poblaciones de edades del Paleozoico Inferior, Neoproterozoicas y Mesoproterozoicas, en las dos muestras datadas coinciden con las firmas de las edades reportadas para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (**Cordani, et al., 2005; Van der Lelij, 2016; Mantilla-Figueroa, et al., 2016a; Mantilla-Figueroa, et al., 2016b**). Estas poblaciones se interpretan como circones heredados de estas unidades metamórficas (**Figura 3**).

Discusión

Edad de la Formación Bocas

Se destaca el trabajo bioestratigráfico realizado por **Remy, et al. (1975)** en la localidad tipo de la Formación Bocas, en el que se propone una edad correspondiente al Jurásico Temprano para la unidad con base en los fósiles de plantas de la especie *Phlebopteris branneri*

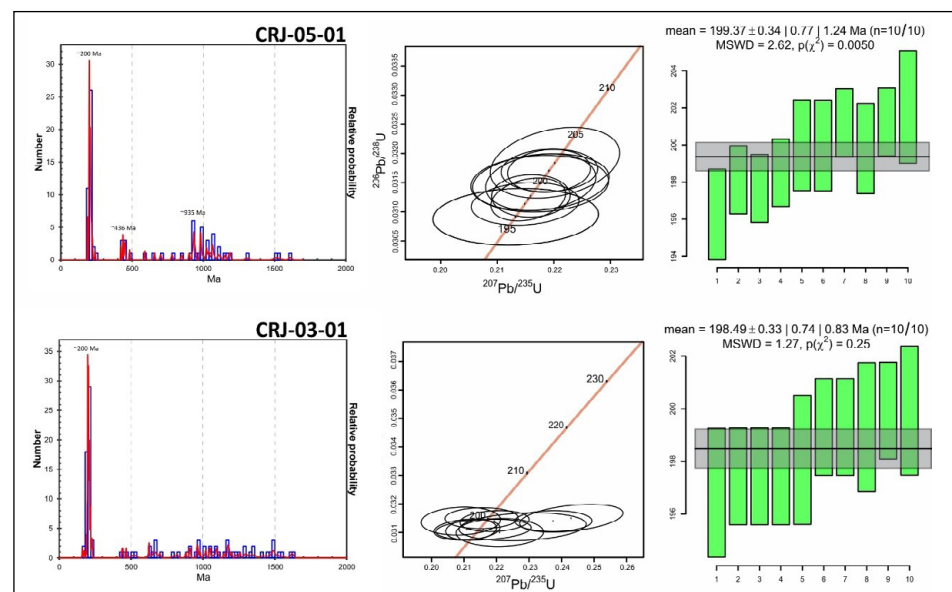


Figura 3. Histogramas de probabilidad relativa y edad media ponderada para las dataciones U/Pb en tobas de la Formación Jordán

y los restos de microflora del género *Classopollis* sp. En la actualidad, los rangos de edad para esta especie de planta y género de polen se han reinterpretado. *P. branneri* se reporta para el Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Schweitzer, 1978; Vaez-Javadi, 2006; Weber, 2008), el Jurásico Temprano (Wesley, 1966), el Jurásico Medio (Hill & Van Konijnenburg-van Cittert, 1973) y el Jurásico Superior (Pons, 1982). El género *Classopollis* sp. se ha reportado desde el Triásico Tardío hasta el Turoniano (Taylor & Alvin, 1984; Kddo, 2018). La reinterpretación actual de los rangos bioestratigráficos evidencia que los taxones identificados no son lo suficientemente resolutivos para determinar una edad específica en la Formación Bocas.

Con base en los resultados obtenidos en las dataciones radiométricas de las rocas volcánicas de la Formación Jordán y la asociación de conchostracos determinada en el conjunto inferior, se propone una edad de Triásico Superior para la Formación Bocas. Las edades obtenidas en las tobas de la Formación Jordán se encuentran muy cerca del límite del Triásico-Jurásico, $201,3 \pm 0,2$ Ma (Cohen, et al., 2020), lo que impone una edad prejurásica para las rocas infrayacentes a la Formación Jordán. Sumado a esto, la identificación de las especies de conchostracos en el conjunto inferior indica una edad correspondiente al Carniano-Noriano. Estas nuevas evidencias restringen la edad de la Formación Bocas al Triásico Tardío, entre el Carniano y el Rhaetiense (Figura 4).

La edad Pérmica planteada por Van der Lelij (2016) para la Formación Bocas se sustenta en una datación U/Pb de la muestra 10VDL58, con una edad de $250,7 \pm 4,3$ Ma, determinada en un dique riolítico en el SO del municipio El Playón. Esta datación se asoció con el reporte incorrecto del género *Glossopteris* sp. en la Formación Bocas en el estudio de Mojica, et al. (1996), según se constata en la siguiente cita:

Algunos hallazgos fosilíferos logrados en las últimas décadas han permitido, en algunos casos, una mejor delimitación temporal de las formaciones. Entre ellos se cuentan los de Glossopteris sp. y Classopollis sp. (REMY, et al., 1975), que señalan una edad jurásica para la Fm. Bocas... ”.

La equivocación de Mojica, et al. (1996) en cuanto al género *Glossopteris* sp. se debe posiblemente al gran volumen de información que manejaron en su publicación. Es importante aclarar que el género *Glossopteris* sp. no fue reportado por Remy, et al. (1975), quienes, en cambio, sí identificaron la especie *P. branneri*. Este reporte incorrecto del género *Glossopteris* sp. fue adoptado por Van der Lelij (2016) y llevó a la conclusión de una edad Pérmica para la Formación Bocas porque *Glossopteris* fue un género de planta muy común en este periodo (McLoughlin, et al., 1997). Debe tenerse en cuenta la relevancia del dato geocronológico reportado por Van der Lelij (2016), ya que indica la posible existencia de registros sedimentarios y volcánicos diferentes y anteriores a la Formación Bocas que no han sido diferenciados hasta el momento. En la zona hoy se llevan a cabo trabajos bioestratigráficos que en un futuro pueden ayudar a esclarecer las edades de estos registros.

Relaciones entre el plutonismo, la actividad volcánica y la sedimentación durante los 202-195 Ma en el Macizo de Santander

Las interpretaciones de Van der Lelij (2016) sobre el ambiente tectónico de formación del Grupo Plutónico de Santander se basan en un magmatismo de arco desarrollado entre los 202 y los 195 Ma. Estos plutones se caracterizan por una afinidad calcoalcalina alta en potasio y anomalías negativas de Nb y Ti, al igual que bajos contenidos de Nb e Y que son típicos del magmatismo en zonas de subducción. Por otra parte, Zuluaga & López (2019) propusieron que, dado el carácter elongado de estos plutones, la génesis y el emplazamiento de los pulsos magmáticos fueron controlados por una dinámica transtensiva en la corteza, asociada con una convergencia oblicua en la zona de subducción. Este factor en la corteza promueve el adelgazamiento cortical y favorece un alto régimen térmico en la corteza superior, probablemente relacionado con la fusión por descompresión (Zuluaga & López, 2019).

La extensión simultánea a la actividad magmática propuesta por Zuluaga & López (2019) pudo generar cuencas durante la formación y el emplazamiento del Grupo Plutónico de Santander. Las edades obtenidas en ese estudio fluctuaron entre $199,37 \pm 0,34$ Ma y

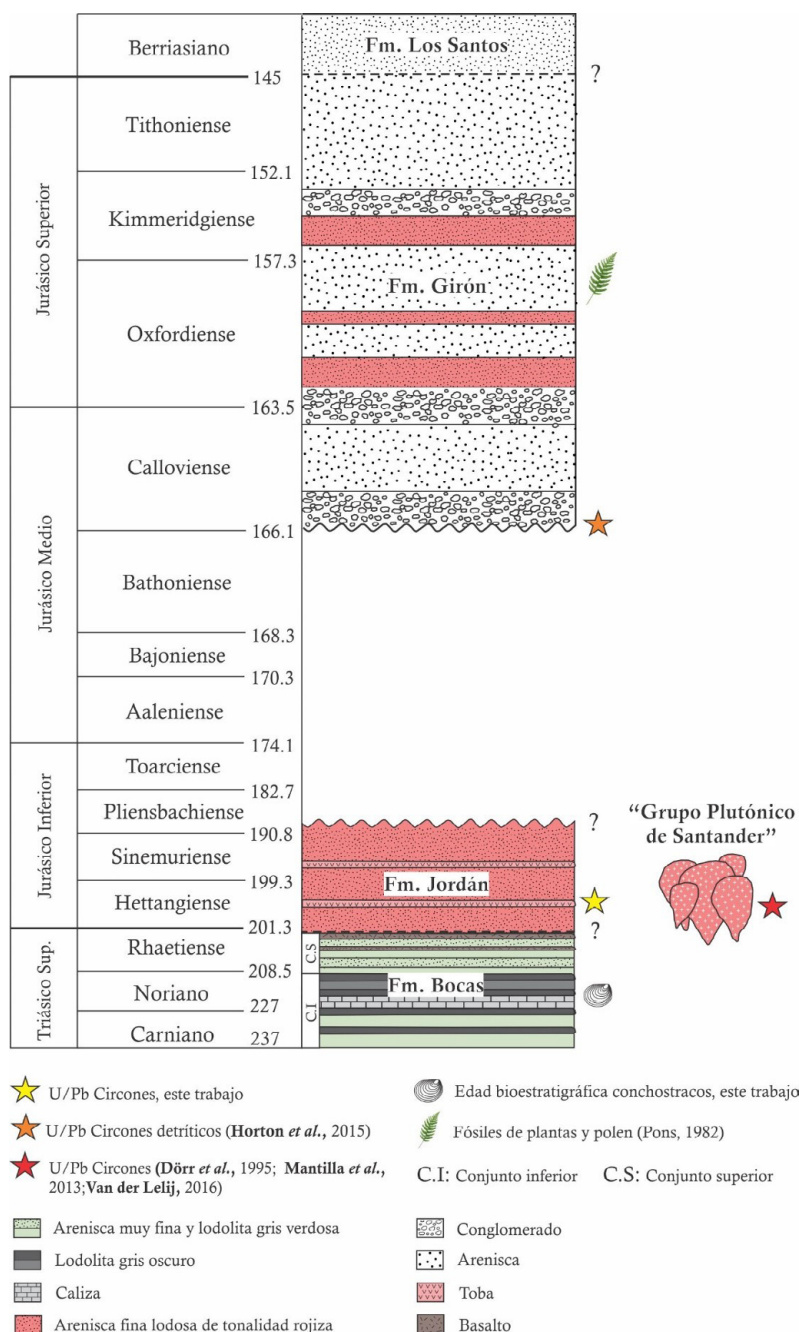


Figura 4. Propuestas de edades para las unidades del Triásico superior y del Jurásico en el Macizo de Santander

198,49± 0,33 Ma para las tobas de la Formación Jordán, las cuales son similares a las de los intrusivos. Esto apunta a que, posiblemente, la actividad volcánica se produjo en el mismo evento magmático y coetáneamente con la sedimentación fluvio-lacustre de la Formación Jordán (**Figura 4**).

La limitada extensión lateral y los potentes espesores de los cuerpos de ignimbritas dentro de la Formación Jordán, indican que las corrientes de densidad piroclástica producidas durante las etapas de actividad volcánica estaban fuertemente controladas por la paleotopografía (**Walker**, 1983), lo que impedía una mayor extensión de estos productos

volcánicos. Los edificios volcánicos se encontraban posiblemente emplazados sobre el basamento metamórfico del Macizo de Santander como se infiere de la cantidad de líticos metamórficos accidentales encontrados en las ignimbritas y tobas. Los ambientes sedimentarios lacustres de las formaciones Bocas y Jordán (Alarcón & Rodríguez, 2019) crearon cuerpos de agua con la suficiente extensión donde los flujos de lava entraron en contacto bajo el agua, tal como lo demuestra la presencia de abundantes amígdalas en los basaltos (Moore & Schilling, 1973) localizados en la vía Bucaramanga-Rionegro.

El registro sedimentario del Triásico Superior representado por la Formación Bocas demuestra que existieron depresiones que sirvieron de espacio de acomodación para su sedimentación simultáneamente con la actividad volcánica incipiente previa al evento magmático de finales del Triásico Tardío y comienzos de Jurásico Temprano (202-195 Ma) en el Macizo de Santander. El origen de las cuencas más antiguas y la actividad volcánica serán objeto de estudio en el futuro, ya que no se tienen datos suficientes para relacionar su origen y contexto.

Conclusiones

Los datos geocronológicos aportados en este estudio para las rocas volcánicas de la Formación Jordán apuntan a que la actividad volcánica registrada en la unidad coincidió con el evento magmático que dio origen a los granitoides del Grupo Plutónico de Santander, el cual se manifestó entre finales del Triásico Tardío e inicios del Jurásico Temprano. La extensión ocurrida durante la formación y el emplazamiento del Grupo Plutónico de Santander abre la posibilidad de que se generaran cuencas y simultáneamente se acumularan los registros continentales fluvio-lacustres (Alarcón & Rodríguez, 2019) representados en la Formación Jordán.

Con base en los resultados obtenidos en las dataciones radiométricas de las rocas volcánicas de la Formación Jordán, la bioestratigrafía de los conchostracos y la actualización de los rangos bioestratigráficos de la flora reportada por Remy, *et al.* (1975), se propone una edad correspondiente al Triásico tardío para la Formación Bocas, desde el Carniano al Rhaetiense.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1208/2925>

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), especialmente a su Escuela de Geología, y a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS, por todo el apoyo brindado a lo largo del proyecto 2343 (“Proveniencia y máxima edad estratigráfica del registro sedimentario Paleozoico aflorante en el Bloque de Pamplona, Macizo de Santander”). Un agradecimiento muy especial a los doctores Oscar Gallego y Mateo Monferrán del CONICET (Argentina), por su gran colaboración durante el estudio de los conchostracos, así como a los revisores y al comité editorial de la revista de la ACCEFYN por sus comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

Contribución de los autores

CMA concibió el estudio. JCT y LCM participaron en la escritura del documento y su análisis. JGR acompañamiento y toma de datos en campo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Alarcón, C. M. & Rodríguez, J. G. (2019). Estratigrafía, facies y paleoambiente de sedimentación de la Formación Jordán: un registro fluvio-lacustre con incidencia de actividad volcánica. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 130 p.

- Aspden, J. A., McCourt, W. J., Brook, M.** (1987). Geometrical control of subduction-related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. *Journal of the Geological Society*. **144** (6): 893-905. Doi: 10.1144/gsjgs.144.6.0893
- Ayala-Calvo, R., Veloza-Fajardo, G., Bayona, G., Gómez-Casallas, M., Rapalini, A., Costanzo-Álvarez, V., Aldan, M., Cortés, M.** (2005): Paleomagnetismo y Mineralogía Magnética en las unidades del Mesozoico de Bucaramanga y el Macizo de Floresta.- *Geología Colombiana*. **30**: 49-66.
- Bayona, G., García, D., Mora, P.** (1994). La Formación Saldaña: producto de la actividad de estratovolcanes continentales en un dominio de Retro-arco. Etayo-Serna, F. *Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena*, pp. I-1-I-21, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Bayona, G., Rapalini, A., Costanzo-Álvarez, V.** (2006). Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, planets and space*. **58** (10): 1255-1272. Doi: 10.1186/BF03352621
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J., Cordani, U.** (2010). Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta Massif: A preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 817-831. Doi: 10.1016/j.jsames.2009.10.005
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G., Salazar-Franco, A.M.** (2020). Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales, 36, 37 p. Bogotá. Doi: 10.32685/pub.esp.36.2019.05
- Blanco-Quintero, I. F., García-Casco, A., Toro, L. M., Moreno, M., Ruiz, E. C., Vinasco, C. J., Morata, D.** (2014). Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*. **56** (15): 1852-1872. Doi: 10.1080/00206814.2014.963710
- Bustamante, C., Archanjo, C. J., Cardona, A., Bustamante, A., Valencia, V. A.** (2017). U-Pb Ages and Hf Isotopes in zircons from parautochthonous Mesozoic terranes in the Western margin of Pangea: Implications for the terrane configurations in the Northern Andes. *The Journal of Geology*. **125** (5): 487-500. Doi: 10.1086/693014
- Cediel, F.** (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico INGEOMINAS*. **16** (1-3): 5-96.
- Cediel, F. & Cáceres, C.** (2000). *Geological map of Colombia, Scale 1:1.000.000*, (3rd. ed.). Geotec Ltd Ed., Bogotá, Colombia.
- Cediel, F., Shaw, R.P., Cáceres, C.** (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block. In: Bartolini, C., Buffler, R.T. & Blickwede, J. (editors). *The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. American Association of Petroleum Geologists. *Memoir*. **79**: 815-848.
- Chang, Z., Vervoort, J. D., McClelland, W. C., Knaack, C.** (2006). U-Pb dating of zircon by LA-ICP-MS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **7** (5). Doi: 10.1029/2005GC001100
- Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., 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.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Winkler, W., Ulianov, A., Mora, A., Chiaradia, M.** (2014). Distinguishing between in-situ and accretionary growth of continents along active margins. *Lithos*. **202**: 382-394. Doi: 10.1016/j.lithos.2014.05.031
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X.** (2020). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*. **36**: 199-204.
- Cordani, U., Cardona, A., Jimenez, D., Liu, D., Nutman, A.** (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented Grenville Belt. In: Vaughan, A., Leat, P., Pankhurst, R., (Eds). *Terrane processes at margins of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications. **246**: 329-346. Doi: 10.1144/GSL.SP.2005.246.01.13
- Correa-Martínez, A.M., Rodríguez, G., Arango, M.I., 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
- Dickey, P.A.** (1941). Pre-Cretaceous sediments in Cordillera Oriental of Colombia. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*. **25**: 1789-1795.

- Dörr, W., J. R. Grosser, G. I. Rodríguez, U. Kramm.** (1995). Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*. **8**: 187-194. Doi: 10.1016/0895-9811(95)00004-Y
- Etayo-Sena, F., & Rodríguez, G.** (1985). Edad de la Formación Los Santos. En Etayo-Serna, F. & Laverde-Montaño, F. Proyecto Cretácico (XXVI-1 - XXVI-13). Bogotá, Colombia: Publ. Geol. Esp. de Ingeominas (16).
- Etayo-Serna, F.** (1989). Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander. V Congreso Colombiano de Geología. Guía de Excursión Técnica. 41 p.
- Gallego, O.F., Tourani, A., Benaouiss, N., Alarcón-Gómez, C. M., Monferrán, M. D., Desojo, J.** (2019). Comparisons of two Triassic “conchostracan” associations from Morocco and Colombia. Reunión de comunicaciones de la Asociación Paleontológica Argentina. La Plata, Argentina. 163 p.
- Gehrels, G., Valencia, V. A., Pullen, A.** (2006). Detrital Zircon Geochronology by Laser-Ablation Multicollector ICPMS at the Arizona Laserchron Center, in Emergin Opportunities, Paleontological Society Short Course, Philadelphia, P. 67-76.
- Gehrels, G. E., Valencia, V. A., Ruiz, J.** (2008). Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation–multicollector–inductively coupled plasma–mass spectrometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **9** (3).
- Geyer, G. & Kelber, K. P.** (2018). Spinicaudata (“Conchostraca,” Crustacea) from the Middle Keuper (Upper Triassic) of the southern Germanic Basin, with a review of Carnian–Norian taxa and suggested biozones. *PalZ*. **92** (1): 1-34.
- Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H.** (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes: United States Geological Survey Professional Paper. **750**: 44-49.
- Hill, D. & Van Konijnenburg van Cittert, J.H.A.** (1973). Species of plant fossils collected from the Middle Jurassic plant bed at Hasty Bank, Yorkshire. *Naturalist*. **925**: 59-63.
- Horton, B.K., Anderson, V.J., Caballero, V., Saylor, J.E., Nie, J., Parra, M., Mora, A.** (2015). Application of detrital zircon U-Pb geochronology to surface and subsurface correlations of provenance, paleodrainage, and tectonics of the Middle Magdalena Valley Basin of Colombia: *Geosphere*. **11** (6): 1790-1811. Doi: 10.1130/GES01251.1
- Kddo, Y. H.** (2018). New Classopollis species from Triassic-Jurassic boundary in northern Iraq. *Iraqi National Journal of Earth Science*. **18** (2): 49-60.
- Kobayashi, T.** (1975). Upper Triassic Estherids in Thailand and the Conchostracan development in Asia in the Mesozoic era: *Geol. and Palaeont. Southeast Asia*, Tokyo Univ. Press. **16**: 57-90.
- Kozur, H. W. & Weems, R. E.** (2010). The biostratigraphic importance of conchostracans in the continental Triassic of the northern hemisphere. Geological Society, London, Special Publications. **334** (1): 315-417. Doi: 10.1144/SP334.13
- Langenheim, R. L.** (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Giron formation in Santander and Boyaca. *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander*. **3**: 35-50.
- Laverde, F. & Clavijo, J.** (1985). Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de “Tu y Yo” (Zapatoca). En Etayo-Serna, F., & Laverde-Montaño, F. Proyecto Cretácico (VI-1 – VI-9). Bogotá, Colombia: Publ. Geol. Esp. de Ingeominas (16).
- Leal-Mejía, H.** (2011). Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, 989 p.
- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., Draper, J. C. M.** (2019). Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes. In *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 253-410). Springer, Cham.
- Ludwig, K. R.** (2003). *Isoplot 3.0 d A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, Calif: Special Publication, vol. 4. Berkeley Geochronology Center.
- Mantilla, F.L.C., Bissig, T., Valencia, V., Craig, H.** (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. **45**: 235-249. Doi: 10.1016/j.jsames.2013.03.006
- Mantilla-Figueroa, L.C., García-Ramírez, C.A., Valencia, V.A.** (2016a). 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
- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., Valencia, V. A.** (2016b). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la Formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico

- para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **40** (155): 320-336. Doi: 10.18257/racefyn.303
- 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* (263-282). McLean, USA: Geological Society of America, v. 162.
- McLoughlin, S., Lindström, S., Drinnan, A. N.** (1997). Gondwanan floristic and sedimentological trends during the Permian–Triassic transition: new evidence from the Amery Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica. *Antarctic Science*. **9** (3): 281-298.
- Mojica, J. & Kammer, A.** (1995): Eventos Jurásicos en Colombia.- *Geol. Colombiana*. **19**: 165-172.
- Mojica, J., A. Kammer, G. Ujueta.** (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**: 3-40.
- Moore, J. G.** (1965). Petrology of deep sea basalt near Hawaii. *American Journal of Science*. **263** (1): 40-52.
- Moore, J.G. & Schilling, J.G.** (1973). Vesicles, water and sulphur in Reykjanes Ridge basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. **41**: 105-118.
- Petzold, D. D. & Lane, N. G.** (1988). Stratigraphic distribution and paleoecology of Pennsylvanian conchostracans (Crustacea: Branchiopoda) on the east side of the Illinois Basin. *Journal of Paleontology*. **62**: 799-808.
- Pons, D.** (1982). Etude paleobotanique et palynologique de la Formation Giron (jurassique moyencrétacé inférieur) dans la région de Lebrija, Departamento de Santander, Colombie. *Nat. Savantes Brest. Sci. Jasc.* **1**: 53-78.
- Quandt, D., Trumbull, R. B., Altenberger, U., Cardona, A., Romer, R. L., Bayona, G., Guzmán, G.** (2018). The geochemistry and geochronology of Early Jurassic igneous rocks from the Sierra Nevada de Santa Marta, NW Colombia, and tectono-magmatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*. **86**: 216-230. Doi: 10.1016/j.jsames.2018.06.019
- Rabe, E.** (1977). Zur Stratigraphie des ostandinen Raumes von Kolumbien. *Giessener Geologische Schriften*. N. 11, 223 p., 21. Fig., 4 pl. Giessen.
- Reible, P.** (1962). Die Conchostraken (Branchiopoda, Crustacea) der Germanischen Trias. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*. **114**: 169-244.
- Remy, W., Remy, R., Pfefferkorn, H.W., Volkheimer, W., Rabe, E.** (1975). Neueinstufung der Bocas-Folge (Bucaramanga, Kolumbien) in den Unteren Jura anhand einer Phlebopteris branneri und classopollis Flora. *Argumenta Paleobotánica*. **4**: 55-77.
- Restrepo-Pace, P.A. & Cediél, F.** (2010). Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of South American Earth Sciences*. **29**: 764-771. Doi: 10.1016/j.jsames.2010.06.002
- Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., 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., Arango, M. I., Zapata, G., Bermúdez, J. G.** (2018). Prolongation of the Upper Magdalena Valley-Colombia: Implications on the evolution of magmatic arcs in the NW Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. **81**: 10-30. Doi: 10.1016/j.jsames.2017.10.012
- Rodríguez-García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata-García, G., Arango-Mejía, M.I., Obando-Eraza, G., Zapata-Villada, J.P., Bermúdez, J.G.** (2020). Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. Doi: 10.32685/pub.esp.36.2019.04
- Royero G. J. M & Clavijo J.** (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Informe Ingeominas. 92 p.
- Rubatto, D.** (2002). Zircon trace element geochemistry: distribution coefficients and the link between U–Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*. **184**: 123-138. Doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S.** (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*. **21** (4): 383-411. Doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.003

- Sillitoe, R. H., Jaramillo, L., Damon, I. E., Shtiquillah, M., Escovar, R.** (1982). Setting, characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia: *Economic Geology*. **77**: 1837-1850. Doi: 10.2113/gsecongeo.77.8.1837
- Schmid, R.** (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments. *Geologische Rundschau*. **70** (2): 794-799.
- Schweitzer, H.J.** (1978). Die räto-jurassischen Floren des Iran und Afghanistans. 5. *Todites princeps*, *Thaumatopteris brauniana* und *Phleboteris polypodioides*. *Palaeontogr. Abt. B*. **168**: 17-60.
- Shaw, R. P., Leal-Mejía, H., Draper, J. C. M.** (2019). Phanerozoic metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic analysis in space and time. In *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 411-549). Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-319-76132-9_6
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., Beate, B.** (2015). The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research*. **27** (1): 95-139. Doi: 10.1016/j.gr.2014.06.004
- Stacey, J.S. & Kramers, J.D.** (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*. **26**: 207-221.
- Steiger, R. H. & Jäger, E.** (1977). Subcommittee on Geochronology: Convention on the use of decay constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*. **36**: 359-362.
- Suárez, C. & Díaz, F.** (2016). Estudio petrográfico y estratigráfico de la Formación Jordán en su localidad tipo sobre el escarpe sur de la Mesa de Los Santos y cañón del río Chicamocha, Santander. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 170 p.
- Taylor, T. N. & Alvin, K. L.** (1984). Ultrastructure and development of Mesozoic pollen: *Classopollis*. *American Journal of Botany*. **71** (4): 575-587. Doi: 10.2307/2443333
- Tellez, N.** (1964). Geología de la Mesa de Barichara. *Boletín de Geología*. **18**: 12-21.
- Toussaint, J.F.** (1995). Evolución geológica de Colombia: 2 Triásico– Jurásico. Universidad Nacional de Colombia, 94 p. Medellín.
- Tschanz, C. M., Marvin, R. F., Cruz, J., Mehnert, H. H., Cebula, G. T.** (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia: *GSA Bulletin*. **85**: 273-284. Doi:10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2
- Vaez-Javadi, F.** (2006). Plant fossil remains from the Rhaetian of Shemshak Formation, Narges-Chal Area, Alborz, NE Iran. *Riv. Ital. Paleontol. Stratigr.* **112**: 397-416.
- Van Der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., Mora, A.** (2016). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research*. **31**: 271-294. Doi: 10.1016/j.gr.2015.01.011
- Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C. A., López, J. A., Bermúdez, M. A.** (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*. 104087. Doi: 10.1016/j.jsg.2020.104087
- Vermeesch, P.** (2018). IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*. **9**: 1479-1493.
- Walker, G. P.** (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of volcanology and geothermal research*. **17** (1-4): 65-88.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., Restrepo, H.** (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamento de Santander. U.S. Geological Survey e INGEOMINAS. *Boletín Geológico*. **XXI** (1-3): 1-132.
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., Gómez, E.** (1977). Geologic Map of the Bucaramanga Quadrangle (H12), Colombia. US Geological Survey.
- Weber, R.** (2008). *Phleboteris* (Matoniaceae) en el Triásico y Jurásico de México. *Univ. Nac. Autónoma Méx. Inst. Geol. Bol.* **115**: 85-115.
- Wesley, A.** (1966). The fossil flora of the Grey Limestones of Veneto, Northern Italy, and its relationships to the other European floras of similar age. *Palaeobotanist*. **14**: 124-130.
- Zuluaga, C., Pinilla, A., Mann, P.** (2015). Jurassic silicic volcanism and associated Continental-arc Basin in northwestern Colombia (southern boundary of the Caribbean plate), in C. Bartolini and P. Mann, eds., *Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir*. **108**: 137-160. Doi: 10.1306/13531934M1083640
- Zuluaga, C. A. & López, J. A.** (2019). Ordovician orogeny and Jurassic low-lying orogen in the Santander Massif, northern Andes (Colombia). In *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. 195-250. Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-319-76132-9_4