

ISSN: 0120-1425 • Agosto de 2019

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO



bg

45

Boletín
Geológico

www.sgc.gov.co





Boletín Geológico
Núm. 45, 2019
Periodicidad anual
ISSN: 0120-1425
© Servicio Geológico Colombiano

Oscar Paredes Zapata
Director General

Mario Andrés Cuéllar
Editor invitado del Boletín Geológico
Director de Geociencias Básicas

Margarita Bravo Guerrero
Directora de Gestión de Información

Marta Lucía Calvache Velasco
Directora de Geoamenazas

Humberto Andrés Fuenzalida
Director de Hidrocarburos

Mary Luz Peña
Directora de Asuntos Nucleares (e)

Gloria Prieto Rincón
Directora de Recursos Minerales

Gloria Prieto Rincón
Directora de Laboratorios (e)

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Diagonal 53 N.º 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

COMITÉ EDITORIAL DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Teresa Duque
Presidenta Comité Editorial

Integrantes

Margarita Bravo
Marta Lucía Calvache
Mario Andrés Cuéllar
Humberto Andrés Fuenzalida
Mary Luz Peña
Gloria Prieto Rincón
Virgilio Amaris
Viviana Dionicio
Julián Escallón
Armando Espinosa
Juan Guillermo Ramírez
Manuel Hernando Romero

COMITÉ EDITORIAL DEL DEL BOLETÍN GEOLÓGICO

Antoni Camprubí Cano
Universidad Nacional Autónoma de México
México

Iván Darío Correa Arango
Consultor
Medellín – Colombia

John Makario Londoño
Servicio Geológico Colombiano
Manizales - Colombia

Camilo Montes Rodríguez
Universidad del Norte
Barranquilla - Colombia

Héctor Mora Páez
Servicio Geológico Colombiano
Manizales - Colombia

Antonio Romero Hernández
Universidad Nacional de Colombia
Medellín – Colombia

John Jairo Sánchez
Universidad Nacional de Colombia
Medellín – Colombia

Carlos Augusto Zuluaga Castrillón
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO DEL BOLETÍN GEOLÓGICO

German Alonso Bayona Chaparro
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

Matthias Bernet
Université Grenoble Alpes
Francia

Thomas Heinrich Cramer
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

Tobias Fischer
The University of New Mexico
Estados Unidos

Carlos Jaramillo
Instituto Smithsonian
de Investigaciones Tropicales
Panamá

María Isabel Marín Cerón
Universidad EAFIT
Medellín – Colombia

German A. Prieto
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá – Colombia

Natalia Pardo
Universidad de los Andes
Bogotá – Colombia

Yamirka Rojas Agramonte
Universidad de los Andes
Bogotá – Colombia

Luigi Solari
Universidad Nacional
Autónoma de México
México

CORRECCIÓN DE ESTILO Édgar Ordóñez

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
Diana Paola Abadía Z.

EDITORIA GENERAL
Carolina Hernández O.

FOTO DE CARÁTULA
José Alejandro Franco Victoria /
Raudal del Río Guayabero en la
Serranía de la Lindosa, atravesando las
areniscas Cretácicas de la Formación
San José, antes de su encuentro con el
Río Ariari para formar el Río Guaviare.
Departamento del Guaviare.

FOTO DE CONTRACARÁTULA
Villa de Leyva. Boyacá
Archivo fotográfico SGC

INCLUIDA EN LOS SIGUIENTES
ÍNDICES Y BASES DE DATOS:
Latindex
Ulrich

PÁGINA WEB:
<https://revistas.sgc.gov.co>

IMPRESIÓN
Imprenta Nacional de Colombia
Carrera 66 N.º 24-09
PBX: 457 8000
www.imprenta.gov.co
Bogotá, D. C., Colombia

Agosto, 2019



CONTENIDO

3 EDITORIAL

Mario Andrés Cuéllar Cárdenas

5 MEGACIRCONES EDIACÁRICOS DE LA SIENITA NEFELÍNICA DE SAN JOSÉ DEL GUAVIARE Y SU POTENCIAL COMO MATERIAL DE REFERENCIA PARA DATACIÓN U/PB MEDIANTE LA-ICP-MS

EDIACARAN MEGA-ZIRCONS FROM SAN JOSÉ DEL GUAVIARE NEPHELINE SYENITE AND ITS POTENTIAL AS A REFERENCE MATERIAL FOR U/PB DATING BY LAICP-MS

Jimmy Alejandro Muñoz Rocha, Alejandro Piraquive, José A. Franco, Amed Bonilla, Mary Luz Peña Urueña, Thomas Cramer, Lorena Rayo Rocha, Nicolás Villamizar

23 ANÁLISIS DE ANOMALÍAS GEOBOTÁNICAS A PARTIR DEL PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE PRODUCTOS DE SENSORES REMOTOS, ESTUDIO DE CASO: OCCIDENTE DE BOYACÁ (COLOMBIA)

ANALYSIS OF GEOBOTANICAL ANOMALIES FROM THE PROCESSING AND INTERPRETATION OF REMOTE SENSING PRODUCTS: CASE STUDY OF WEST BOYACÁ (COLOMBIA)

Manuel Guillermo Zafra Dulcey

37 NOTAS SOBRE EL CONTEXTO TECTONOESTRATIGRÁFICO DE FORMACIÓN DE LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS

NOTES ON THE TECTONOSTRATIGRAPHIC CONTEXT OF FORMATION OF THE COLOMBIAN EMERALDS

Roberto Terraza Melo

- 49** **CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE LA SERRANÍA DEL PERIJÁ MEDIANTE CARTOGRAFÍA A ESCALA 1:25.000 DEL GRUPO COGOLLO, EN EL SECTOR ORIENTAL DEL MUNICIPIO DE BECERRIL, CESAR**
CONTRIBUTION TO THE GEOLOGICAL KNOWLEDGE OF THE SERRANÍA DEL PERIJÁ MOUNTAIN RANGE THROUGH 1:25,000 SCALE MAPPING OF THE COGOLLO GROUP IN THE EASTERN SECTOR OF THE MUNICIPALITY OF BECERRIL, CESAR
Milton David **Lozada Molina**, Frank David **Lascarro Navarro**, Luisa Fernanda **León Díaz**, Elías Ernesto **Rojas Martínez**, Fabio Enrique **Carrillo Bolaño**, Luis Carlos **Tapia Vela**, Dino Carmelo **Manco Jaraba**
- 61** **POLÍTICA EDITORIAL**
EDITORIAL POLICIES
- 64** **INSTRUCCIONES A LOS AUTORES**
INSTRUCTIONS TO AUTHORS

EDITORIAL

El Servicio Geológico Colombiano, en su transformación a centro de investigación científica, continúa desarrollando sus propósitos de mejoramiento de las publicaciones institucionales, en particular, las relacionadas con la producción científica en el área de las geociencias. En este emprendimiento se mantiene el objetivo de volver realidad el sueño de convertir el *Boletín Geológico* en una revista científica de alto impacto y con un amplio reconocimiento a nivel nacional e internacional.

Para lograr esta meta, el Comité Editorial del *Boletín Geológico* del Servicio Geológico Colombiano adelanta el proceso de selección de artículos y de evaluación de los mismos por pares académicos reconocidos por el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología o por pares de la comunidad científica internacional.

El número 45 del *Boletín Geológico* contiene cuatro artículos de alta calidad en temas de interés geológico relacionados con geoquímica isotópica y geocronología, anomalías geobotánicas para la exploración de esmeraldas, tectonoestratigrafía de la formación de las esmeraldas colombianas y avances cartográficos de las Formación Lagunitas y Aguas Blancas, del Grupo Cogollo, en la Serranía del Perijá.

Estos artículos han tenido un cuidadoso proceso de elaboración y ajuste, y están a disposición de la comunidad geológica. Estamos seguros de que los lectores apreciarán el rigor científico, la calidad de los contenidos y el aporte de los mismos al conocimiento geocientífico del país.

Invitamos a la comunidad científica a participar de manera activa como lectores, revisores o autores de contenidos en futuras entregas del *Boletín Geológico*, para lograr un avance sólido de las geociencias del país.

Mario Andrés Cuéllar Cárdenas

Editor invitado

Director Técnico de Geociencias Básicas

Servicio Geológico Colombiano



Megacircones ediacáricos de la sienita nefelínica de San José del Guaviare y su potencial como material de referencia para datación U/Pb mediante LA-ICP-MS

Ediacaran mega-zircons of the San José del Guaviare nepheline syenite and their potential use as reference material for U/Pb dating through LA-ICP-MS

Jimmy Alejandro Muñoz Rocha¹, Alejandro Piraquive¹⁻³, José A. Franco²⁻³, Amed Bonilla²⁻³, Mary Luz Peña Urueña¹, Thomas Cramer²⁻³, Lorena Rayo Rocha¹, Nicolás Villamizar¹

Recibido: 24 de julio de 2018

Aceptado: 18 de marzo de 2019

Publicado en línea: 15 de julio de 2019

Doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.484

Citación: Muñoz Rocha, J. A., *et al.* (2019). Megacircones ediacáricos de la sienita nefelínica de San José del Guaviare y su potencial como material de referencia para datación U/Pb mediante LA-ICP-MS. *Boletín Geológico*, 45, 5-22. Doi: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.484>

RESUMEN

Con el objetivo de ampliar el conjunto de materiales de referencia del Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano (LG-SGC) se colectaron circones provenientes de la sienita nefelínica de San José del Guaviare, localidad del Jordán (Colombia). La muestra SNG-1 se compuso de 24 circones seleccionados de la fracción situada entre 2 y 5 milímetros de largo, montados y pulidos en un bloque de resina epóxica. La datación se realizó mediante análisis de relaciones isotópicas de uranio y plomo, utilizando el método LA-ICPMS. En el LG-SGC se seleccionaron 92 puntos sobre los circones y en la Universidad de Rennes, en Francia (LG-URF), se analizaron 24 puntos en áreas cercanas de los mismos cristales mediante estudio previo de catodoluminiscencia. Las edades concordantes obtenidas de los circones corresponden, en ambos laboratorios, a la edad de cristalización de $608 \pm 1,2$ Ma y 602 ± 3 Ma, respectivamente, que difieren en menos del 1%, pese a la diferencia en instrumentación y las rutinas analíticas. Para corrección de errores sistemáticos y control de calidad se emplearon materiales de referencia internacionales, como circones de Plešovice, GJ-1, FC-5 Duluth y Mount Dromedary. Las incertidumbres producidas durante los

¹ Servicio Geológico Colombiano (SGC)

² Universidad Nacional de Colombia

³ Grupo de Estudios en Geología Económica y Mineralogía Aplicada (Gegema)

Email de correspondencia: jamunoz@sgc.gov.co

análisis son similares (1,2 y 3,2 Ma), y el parámetro MSWD de los diagramas de concordia fue < 1 en ambos casos, lo que indica baja dispersión de los resultados. Algunas edades discordantes reveladas durante el análisis muestran que las relaciones U/Pb no son homogéneas, como se espera en un material de referencia primario. Sin embargo, consideramos, que los circones de la sienita del Jordán tienen potencial como material de referencia secundario para el LG-SGC, siempre y cuando se emplee una cuidadosa selección y preparación de estos, se caracterice su contenido geoquímico, incluyendo los elementos de tierras raras (REE) y se ejecute un monitoreo de calidad de dataciones U/Pb, teniendo como base significativa el gran tamaño de los circones, que puede alcanzar los 4 cm, su abundancia y posibilidad de recolección en el territorio colombiano.

Palabras clave: datación U/Pb de circones, láser, espectrometría de masas, megacircones, material referencia laboratorio, LA-ICPMS, geocronología, ediacárico, Colombia.

ABSTRACT

With the aim of expanding the reference materials of the Geochronology Laboratory of the Colombian Geological Survey (LG-SGC, in Spanish), zircons were collected from the nepheline syenite of San José del Guaviare, Jordán locality (Colombia). The SNG-1 sample was composed of 24 zircons selected from the fraction between 2 and 5 millimeters long, which were mounted and polished in an epoxy resin block. The zircons were dated by analyzing the isotopic ratios of uranium and lead using the LA-ICPMS method. In the LG-SGC, 92 points on the zircons were selected for analysis, and at the University of Rennes in France (LG-URF), 24 points from crystals found nearby were selected for analysis from a previous cathodoluminescence study. Concordant ages for the zircons for both laboratories corresponded to a crystallization age of 608 ± 1.2 Ma and 602 ± 3 Ma, respectively, which differ by less than 1% despite the difference in instrumentation and analytical procedures. For systematic error correction and quality control, international reference material, such as Plešovice, GJ-1, FC-5 Duluth and Mount Dromedary zircon, was used. The uncertainties generated during the analyses are similar (1.2 and 3.2 Ma), and the mean square-weighted deviation (MSWD) of the concordia diagrams was < 1 in both cases, indicating low dispersion of the results. Some discordant ages show that the U/Pb ratios are not uniform, as expected for a primary reference material. However, we believe that the zircons of the Jordán syenite have potential use as a secondary reference material for the LG-SGC provided they are carefully selected and prepared, their geochemical content (including rare earth elements, REE) is characterized, and quality monitoring of U/Pb dating is performed, as these zircons are large, reaching up to 4 cm, abundant, and possible to collect in the Colombian territory.

Keywords: U/Pb dating of zircons, laser, mass spectrometry, mega-zircons, laboratory reference material, LA-ICPMS, geochronology, Ediacaran, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Para la datación de materiales geológicos, el sistema isotópico U-Th-Pb es uno de los más confiables y probados, permite determinar edades absolutas utilizando minerales con alto contenido de U, como es el caso del circón (Corfu *et al.*, 2003). El circón es un nesosilicato de circonio [$ZrSiO_4$] que se presenta como un mineral

accesorio en rocas sedimentarias, metamórficas y sobre todo, rocas ígneas, donde se forma principalmente en plutonitas (granitoides). Debido a su alto punto de fusión (a partir de 1676 °C bajo presión normal se descompone incongruentemente en ZrO_2 y SiO_2) y gracias a su estabilidad estructural, con dureza de 7,5 Mohs (Finch y Hanchar, 2005), los circones pueden resistir variaciones de temperatura o de presión alta, al tiempo que incorporan

y preservan las interacciones con cada nuevo ambiente geológico, que se reflejan en la forma, textura y composición química del mineral, lo que permite, por ejemplo, el uso de circones detríticos para rastrear el origen de rocas sedimentarias (Fedó, Sircombe y Rainbird, 2003).

La estructura cristalina tetragonal del circón con clase cristalina 4/m 2/m 2/m puede incorporar y retener elementos de tierras raras (REE), incluyendo Y, Sc y lantánidos, y sobre todo cationes de tamaño similar con valencia 4+, como el Hf (normalmente entre 1 y 2%, aunque puede llegar a 32%), así como trazas de otros elementos (P, Ti, Th, U). La isotopía de circón ($Zr[SiO_4]$) y xenotima-Y ($Y[PO_4]$) causa una sustitución acoplada (heterovalente) Zr^{4+} y Si^{4+} por Y^{3+} y P^{5+} . Debido a la contracción de los lantánidos, Zr^{4+} y Hf^{4+} tienen radios iónicos casi idénticos, y se forma una solución sólida completa entre el hafnón ($Hf[SiO_4]$) y el circón, lo que transforma los circones en la mena principal de hafnio. (Turekian y Wedepohl, 1961).

La tabla 1 muestra el enriquecimiento de Zr y Hf en rocas ácidas y sienitas junto con la relación Zr/Hf. Se observa cierta disminución de la relación Zr/Hf en circones asociados a la diferenciación magmática, lo que explica inicialmente la abundancia e importancia de los circones asociados a la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare (SNSJG), localidad del Jordán.

El U^{4+} y Th^{4+} en coordinación 6 (tienen radios iónicos de 0,89 y 0,94 Å, respectivamente (Shannon, 1976), lo que, junto con sus altas valencias, los hace incompatibles para entrar en las estructuras cristalinas de los principales silicatos formadores de roca; en vez de eso, el U^{4+} con valores Clarke de 1,7 ppm en corteza continental (Wedepohl, 1995) forma minerales como la uranita o sustituye al Zr^{4+} con radio iónico de 0,86 Å y coordinación 6 en el circón ($ZrSiO_4$), al Ti^{4+} en el rutilo, al Nb y Ta en columbitas-tantalitas y por algunos cationes en minerales de REE, mientras que el Th con valores Clarke de 8,5 ppm en corteza continental (Wedepohl, 1995)

forma minerales accesorios, como torianita (ThO_2) y torita ($ThSiO_4$), o se concentra principalmente en fosfatos como la monacita, y sustituye el Zr^{4+} en circones en menor medida. En coordinación 8, todos estos radios aumentan entre 10 y 14%, y las reglas de Goldschmidt dejan constancia de que una variación de radios iónicos de hasta 15% permite un intercambio de cationes en la misma estructura cristalina sin problemas, si tienen la misma valencia, mientras diferencias de valencias > 1, prácticamente inhiben la sustitución catiónica.

La incorporación de U y Th (de 10 ppm hasta 5%) en circones, su alta resistencia, su presencia en casi todos los ambientes geológicos y la escasa incorporación de plomo común, los hicieron durante décadas el mineral preferido para dataciones U/Pb, aunque en los últimos años, gracias al desarrollo, sobre todo de LA-ICP-MS, también muchos otros minerales que incorporan trazas de U y Th han mostrado su utilidad geocronológica. En el caso de los circones, la metamictización (isotropización) causada por el decaimiento radiactivo de U y Th puede bajar su densidad normal de 4,6 a 4,7 g/cm³ a valores entre 3,9 y 4,2 g/cm³ ("low density zircons"). La medición de la relación de isótopos de uranio y torio y de isótopos de plomo permite su uso como un reloj natural, y la datación de eventos geológicos ocurridos desde la formación de la Tierra, hace 4,57 Ga, hasta el Pleistoceno (Schoene, 2014).

Los circones muestran a menudo exsoluciones e inclusiones y, algo especialmente importante, una zonación química y textural correspondiente a diferentes etapas de cristalización durante procesos magmáticos, hidrotermales y metamórficos (e. G., núcleos heredados, anillos), la que se puede observar bajo el microscopio petrográfico (mejorado con cauterización HF) y sobre todo con catodoluminiscencia pancromática, que es sensible a la presencia de ciertos elementos traza y defectos en la estructura cristalina (Koschek, 1993; Yang, Luff y Townsend 1992;

Tabla 1. Enriquecimiento de Zr y Hf en rocas ácidas, sienitas y relación Zr/H

	Zr [ppm] en rocas	Zr/Hf en circones	Hf [ppm] en rocas
Rocas ultrabásicas	45	70	0,6
Gabro	140	70	2,0
Granodiorita	140	60	2,3
Granito	175	45	3,9
Sienita	500	45	11,1
Rocas sedimentarias		Zr/Hf = 55	

Fuente: Turekian y Wedepohl (1961)

Hanchar y Miller, 1993). El contenido de Ti en circones cristalizados en un ambiente saturado en Ti depende en gran medida de la temperatura y se utiliza como un geotermómetro (Watson y Harrison, 2005; Watson, Wark y Thomas, 2006; Harrison, Watson y Aikman, 2007). Hay que tener en cuenta todos estos factores para la correcta aplicación e interpretación de dataciones radiométricas en circones, entre otras razones porque pueden modificar la temperatura de cierre de unos 900 °C, por debajo de la cual se supone que en los circones no habrá pérdidas de isótopos de U, Th y Pb, como base fundamental para poder realizar dataciones confiables analizando series de decaimiento, como $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ o $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$, según la ecuación de decaimiento $N = N_0 e^{-\lambda t}$, donde N es el número de isótopos al tiempo t, N_0 es el momento del cierre del sistema, y λ la constante de decaimiento característica de cada isótopo, un principio reconocido y aplicado desde los trabajos de Rutherford y Soddy (1903). En el sistema U/Th/Pb utilizamos ecuaciones derivadas como la siguiente:

$$\frac{\Delta (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})}{\Delta (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})} = \frac{(e^{\lambda^{235}\text{U}t} - 1)}{137,82(e^{\lambda^{238}\text{U}t} - 1)}$$

Siendo 137,82 la relación¹ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, que resolvemos iterativamente con algoritmos de minimización (regresión). La relación de plomo radiógeno $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ tiene la ventaja adicional de no verse afectada por difusión de U ni de Pb del sistema.

El uso de diagramas de concordia en vez de isócronas (véase el capítulo “Resultados”) permite adicionalmente eliminar ^{204}Pb del cálculo de las edades.

Entre las diferentes técnicas geocronológicas que existen para estudiar y datar circones, la técnica LA-ICP-MS está en un proceso de continuo desarrollo desde 1985 (p. Ej., Košler y Sylvester, 2003), entre otras razones porque con esta técnica se realizan análisis *in situ* de alta resolución local con ablaciones de algunas decenas de micrómetros sobre la superficie de circones pulidos, lo cual brinda resultados rápidos y precisos (Campbell, Reiners, Allen,

Nicolescu y Upadhyay, 2005; Solari, Gómez, Bernal, Pérez y Tanner, 2010). Además, una vez instalada y probada, es una técnica de bajo costo, rápida (aproximadamente 2 minutos por análisis) y bastante precisa, con un error interno de ~ 1% o menor (para dataciones U-Pb), por lo que tiene una amplia aplicación en las geociencias, lo cual se ha traducido en un crecimiento exponencial, en las últimas décadas, del número de publicaciones de edades U-Pb en circones (Schoene, 2014).

Con el fin de asegurar la calidad analítica de la técnica LA-ICP-MS se usan materiales de referencia para detectar y corregir errores sistemáticos, como el fraccionamiento elemental, y para verificar la exactitud y precisión de los resultados de medición. Los resultados de la medición adecuada de los materiales de referencia indican si la técnica fue aplicada correctamente para determinar edades en la muestra desconocida (Chang, Vervoort, McClelland y Knaack, 2006).

No obstante, existe un número limitado de materiales de referencia utilizados como estándares primarios e internos que cumplen con las condiciones necesarias para ser considerados como tales, es decir, que sean homogéneos en cuanto a su contenido de U, no presentan daño metamórfico o hidrotermal, y sus edades presentan una población unimodal con una baja dispersión.

Debido a que el Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano (LG-SGC) es relativamente nuevo, es de suma importancia en la implementación confiable de la técnica adquirir y utilizar diferentes materiales de referencia durante la realización de dataciones de circón. La mayoría de materiales estándares utilizados en este laboratorio provienen de regiones de Europa, Norteamérica y Asia, y no se cuenta en este momento con un material de referencia, primario o secundario, que provenga de Suramérica. Esto significa que para suplir las necesidades del Laboratorio de Datación U-Pb del SGC, que debe estar en un continuo funcionamiento para datar muestras del territorio colombiano, es necesario importar frecuentemente estos materiales de referencia.

En esta contribución presentamos los resultados del análisis de circones extraídos de la sienita nefelínica

¹. En los últimos años se encontró que esta relación puede variar un poco, y es también por debajo del valor “oficial” de 137,88 recomendado por la IGC Subcommission on Geochronology, lo que, igualmente como variaciones de l, puede causar desviaciones sistemáticas en el cálculo de las edades isotópicas.

de San José del Guaviare, en la localidad del Jordán. Por su abundancia, inusual gran tamaño y contenido de elementos de tierras raras (REE), presentan una oportunidad única de estudio para entender su formación y establecer si pueden ser utilizados como material de referencia del laboratorio. La facilidad de su adquisición, por ser un material propio de nuestro territorio, resultaría en una gran oportunidad para asegurar la continua producción de información geocientífica en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico.

Además, se llevaron a cabo análisis comparativos en el LG-SGC y en el Laboratorio de Géochimie Isotopique et Géochronologie de l'Université de Rennes (Francia). Este último es un referente a nivel mundial en geocronología de U-Th-Pb, donde se datan, con LA-ICP-MS, diferentes minerales, como circón, monacita, esfena, badeleyita, xenotima, rutilo, alanita, apatito, calcita, columbita-tan-

talita y scheelita. Por medio de este ejercicio se buscó verificar si las edades de estos cristales obtenidas en ambos laboratorios son similares, y si los resultados son precisos y exactos, algo que discutiremos a continuación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE CIRCONES

Los circones fueron extraídos de la sienita nefelínica recolectada en la localidad del Jordán, en el departamento del Guaviare, en el centro-oriente de Colombia (figura 1). Este cuerpo plutónico presenta variaciones locales a pegmatitas y aplitas y está constituido principalmente por feldespato (microclina), nefelina, biotita y hornblenda (figura 2) (Arango, Nivia, Zapata, Giraldo, Bermúdez y Albarracín, 2011; Arango, Zapata y Martens, 2012; Trumpy, 1943; Campos Rodríguez, 2017; García Romero, 2015).

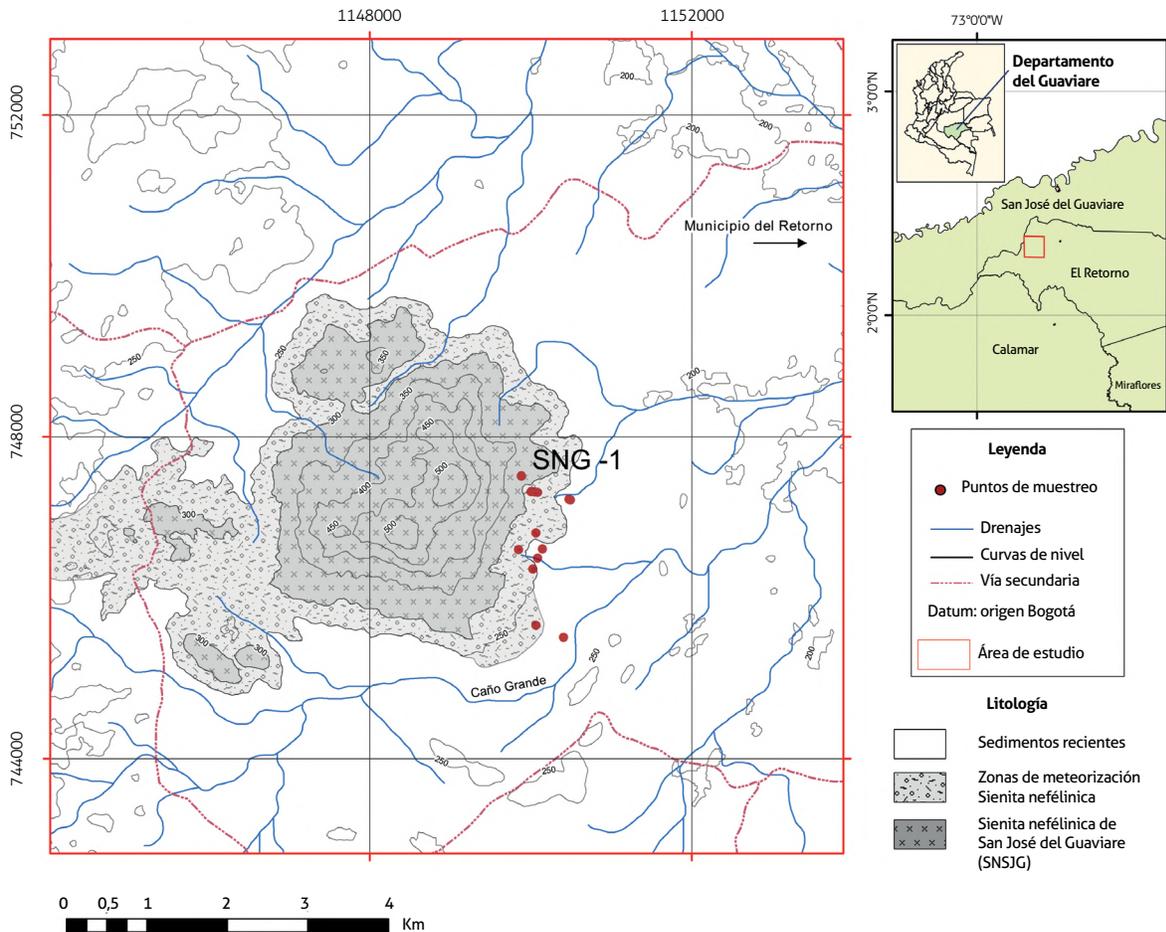


Figura 1. Mapa de localización de la sienita nefelínica de San José del Guaviare, localidad del Jordán, y de los puntos de toma de muestras de circones.

Fuente: autores



Figura 2. Compilación de características mesoscópicas de la sienita nefelínica.
Fuente: autores

La figura 2 muestra las especies minerales en paragénesis. Son frecuentes las texturas pegmatíticas con megacristales de feldespatos, circón, nefelina, biotita, magnetita y anfíbol. La textura pegmatítica puede encontrarse en diques hacia las zonas de borde de domos graníticos. Esta fase más gruesa contiene los mayores cristales de circón y magnetita, que alcanzan hasta 4 cm. La nefelina muestra una coloración grisácea y azulosa con un lustre perlado típico de alteración a cancrinita. Algunos secto-

res de la sienita muestran minerales foliados y bandas de cizalla conjugadas que contienen biotita. Las relaciones de corte no son aun suficientes para definir si la lineación mineral es magmática, una lineación relicta de la roca caja, o episodios de tectonismo durante y después del emplazamiento de sucesivas fases magmáticas; no obstante, los diques pegmatíticos son tardíos respecto al cuerpo principal (Franco, Muñoz, Piraquive, Bonilla, Cramer y Campos, 2018).



Figura 3. Izquierda: circones de la sienita nefelínica de San José del Guaviare, localidad del Jordán. Derecha: montaje estudiado, de 2,5 cm de diámetro.

Fuente: autores

Para el análisis geocronológico se seleccionaron circones en su mayoría prismáticos, con una longitud de 2 a 5 mm y una relación de longitud a ancho de 3:2 a 2:1 (figura 3), con algunos cristales hasta de 4:1. Se seleccionó esta fracción debido a que los cristales de tamaño superior a 2 cm exhiben daños metamórficos considerables causados por alto contenido de U, lo que puede resultar en edades discordantes, mientras la fracción de menor tamaño es, en términos generales, más homogénea, y por eso, más adecuada para este estudio.

3. DATACIÓN U-Pb MEDIANTE LA-ICP-MS

La datación U-Pb de los circones mediante LA-ICP-MS se llevó a cabo en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano y en el Laboratorio de LA-ICP-MS de la Universidad de Rennes. Solo aquellos circones de los que previamente se calcularon edades concordantes en el SGC fueron datados en el laboratorio de Rennes, y en puntos cercanos a los ablacionados en el LG-SGC.

Los detalles de adquisición de imágenes de catodoluminiscencia, ablación láser, parámetros del ICP-MS y reducción de datos empleados se muestran en la tabla 2. La reproducibilidad de las relaciones isotópicas U-Pb fue calibrada, en el caso del Servicio Geológico Colombiano, utilizando el estándar primario Plesovice (edad $337,13 \pm$

$0,37$ Ma, Sláma *et al.*, 2008), mientras que los estándares FC-5 Duluth (edad $1.099 \pm 0,6$ Ma, Paces y Miller, 1993) y Mount Dromedary (edad $99,12 \pm 0,14$ Ma, Renne, Swisher, Deino, Karner, Owens y De Paolo, 1998) fueron utilizados como estándares secundario y terciario, respectivamente, para calibrar y monitorear la precisión y exactitud de las edades U-Pb medidas.

En la Universidad de Rennes se utilizó el estándar de referencia primario GJ-1 con una edad de $607,7 \pm 0,67$ Ma (Jackson, Pearson, Griffin y Belousova, 2004), y para control de calidad, el estándar Plesovice. Los resultados de datación de circones mediante LA-ICP-MS se muestran en la tabla 2.

Antes de realizar los análisis mediante LA-ICP-MS se tomaron imágenes de catodoluminiscencia (figura 4). Estas imágenes muestran que la mayoría de los cristales idiomórficos presentan una zonación oscilatoria típica de origen ígneo (figura 4 a - l) y una alta concentración de U, elementos trazas y tierras raras; la ausencia de núcleos heredados indica una cristalización durante un evento magmático continuo. Sin embargo, núcleos con zonación oscilatoria y sectorial en algunos cristales y, en algunas ocasiones con bordes de sobrecrecimiento discretos y zonas con moteado, indican mayor alteración termal y daños metamórficos (figura 4 m-p), lo que disminuye la relevancia de los datos obtenidos.

Tabla 2. Instrumentación y parámetros de análisis utilizados

Laboratorio y preparación de muestras		
Nombre del laboratorio	Laboratorio de Geocronología, Servicio Geológico Colombiano	
Tipo de muestra o mineral	Zircones, sienita nefelínica	
Preparación de la muestra	Separación convencional de minerales (trititación, batea, separación magnética, separación por líquidos densos), selección de cristales manual, montaje de resina epóxica de una pulgada y pulido con pasta de diamante de 6 µm	
Imágenes	Detector GATAN Minicl pancromático, acoplado a un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-IT300LV, 15 kv, modo alta corriente	
Sistema de ablación láser		
	LG - SGC	Laboratorio Rennes
Marca, modelo y tipo	Photon Machines, Exite	ESI, Excimer (NWR193C)
Celda de ablación	Helix 2	Helix 2
Longitud de onda láser	193 nm	193 nm
Ancho de pulso	< 5 ns	< 5 ns
Fluencia	7 J/cm ²	7 J/cm ²
Frecuencia	8 Hz	3 Hz
Tamaño del diámetro de ablación	35 µm	30 µm
Duración de la ablación	21 s	60 s
Línea base	15 s	20 s
Tiempo de limpieza entre ablaciones	20 s	15 s
Gas de arrastre	100% He en la celda y para transporte hacia la antorcha	100% He, con flujo adicional de mezcla Ar y N ₂ (3 ml/min)
Flujo de gas de arrastre	0,350 LPM	0,750 LPM
Instrumento ICP-MS		
	Laboratorio SGC	Laboratorio Rennes
Marca, modelo y tipo	Thermo Scientific, Element II	Agilent 7700x
Introducción de muestra	A través de tubos flexibles tipo <i>tygon</i>	A través de tubos convencionales
Conos	Ni	Ni
RF power	1.200 W	1.300 W
Gas de arrastre	Ar 0,900 l/min	Ar 0,850 l/min
Sistema de detección	Multiplificador de electrones Monocolector	Multiplificador de electrones Monocolector
Masas medidas	²⁰² Hg, ²⁰⁴ (Hg + Pb), ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th y ²³⁸ U	²⁰² Hg, ²⁰⁴ (Hg + Pb), ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th y ²³⁸ U
Modo de detector	Contador de pulsos, corrección por tiempo muerto aplicada y modo análogo para cps > 4 x 10 ⁶ cps	Contador de pulsos, corrección por tiempo muerto aplicada y modo análogo para cps > 10 ⁶ cps
Tiempo de integración por pico	10-30 ms	10-30 ms
Procesamiento de datos		
	LG - SGC	Laboratorio Rennes
Blanco	20 s de señal, correspondiente al gas puro antes de la ablación	20 s antes del pico
Estrategia de calibración	Plesovice usado como material de referencia primario, FC 5 Duluth y Mount Dromedary usados como materiales de referencia secundario y terciario para monitorear y comparar los resultados obtenidos con MR primario	GJ 1 usado como material de referencia primario, Plesovice usado como material de referencia secundario
Materiales de referencia (zircones)	Plesovice (edad 337,13 ± 0,37 Ma, Sláma <i>et al.</i> , 2008), FC-5 Duluth (edad 1.099 ± 0,6 Ma, Paces y Miller, 1993) y Mount Dromedary (edad 99,12 ± 0,14 Ma, Renne <i>et al.</i> , 1998)	GJ 1 (edad 607,7 ± 0,67 Ma, (Jackson, Pearson, Griffin y Belousova, 2004), Plesovice (edad 337,13 ± 0,37 Ma, Sláma <i>et al.</i> , 2008)
Programa de procesamiento de datos/corrección de fraccionamiento de elementos inducido por láser (LIEF)	lolyte v2.5 para normalización, propagación de la incertidumbre y cálculo de la edad. Se asume que la corrección LIEF del material de referencia es idéntico para las muestras y se realiza mediante una ecuación del tipo $y = a + b.e^{-cx}$	Hoja de cálculo propia para normalización, propagación de la incertidumbre y cálculo de la edad. Se asume que la corrección LIEF del material de referencia es idéntico para las muestras
Corrección de Pb común, composición e incertidumbre	No se aplicó corrección de Pb común a los datos obtenidos	No se aplicó corrección de Pb común a los datos obtenidos
Nivel de incertidumbre y propagación	Edades calculadas a 2 desviaciones estándar, propagación realizada por adición cuadrática	Edades calculadas a 2 desviaciones estándar, propagación realizada por adición cuadrática
Control de calidad/validación	FC 5 Duluth edad promedio ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U = 1103,4 ± 3,9 (2 s, MSWD = 0,53, n = 25), Mount Dromedary, edad promedio ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U = 100,10 ± 0,61 Ma (2 s, MSWD = 0,78, n = 20)	Plesovice: edad de concordia = 336,5 ± 5,5 Ma (N = 2; MSWD = 0,18; probability = 0,91)

Fuente: autores

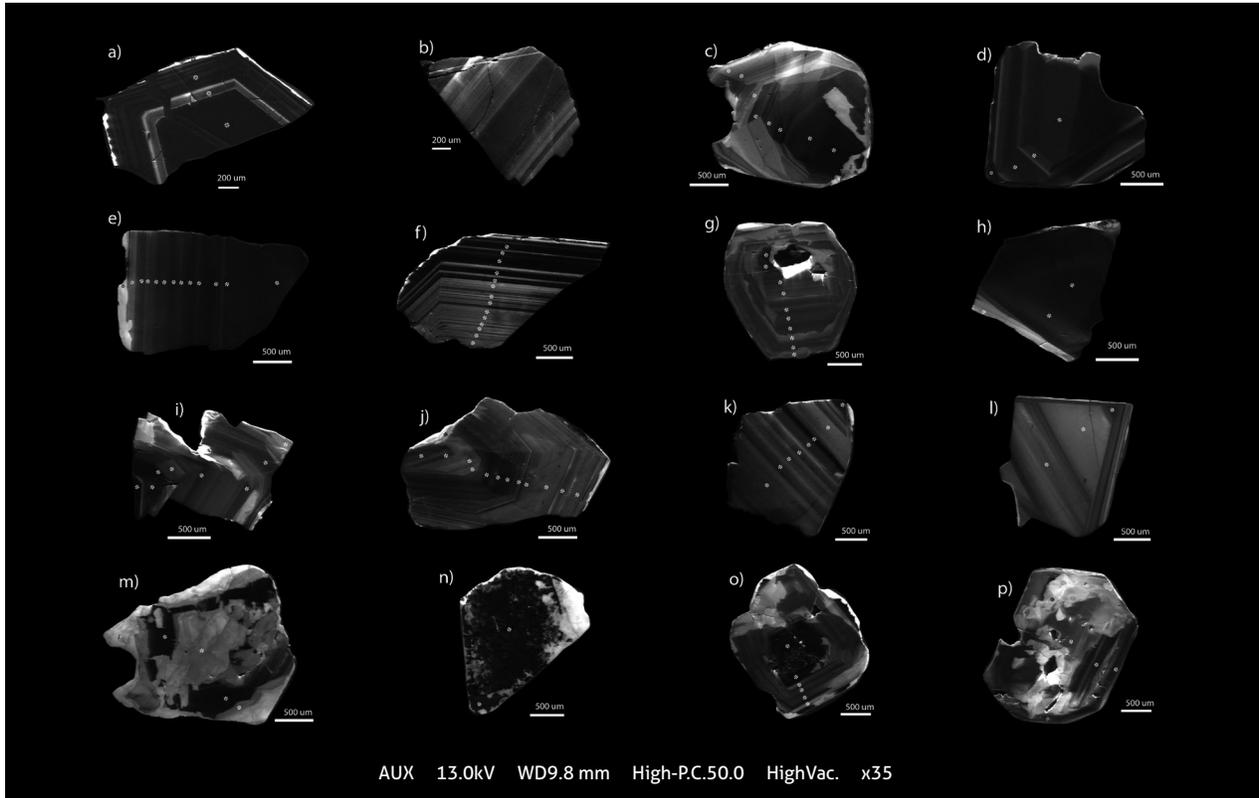


Figura 4. Imágenes de catodoluminiscencia de los circones más representativos. a - p: circones sienita nefelínica del Jordán, San José del Guaviare; (m-p) circones con daño radiogénico.

Fuente: autores

4. RESULTADOS

4.1. Laboratorio del Servicio Geológico Colombiano

Los resultados de las mediciones de las relaciones isotópicas ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{235}U , ^{238}U y de U_{total} y Th con las correspondientes desviaciones estándar $2s$ de los circones analizados en la tabla 2 solamente toman en cuenta edades concordantes calculadas por debajo de un umbral de discordia definido $< \text{al } 5\%$.

La discordancia de datos U/Pb en circones es definida como la no coincidencia de datos isotópicos derivados de dos o más sistemas isotópicos (Wetherill, 1956). Se debe generalmente a la migración de Pb (y en menor medida de U) y se la cuantifica usando relaciones de edades o de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Tera y Wasserburg, 1972) o de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Wetherill, 1956). La concordia es la curva en la que las edades derivadas de los dos sistemas coinciden. Las bajas concentraciones, sobre todo de ^{235}U y de su isótopo hijo ^{207}Pb , causan que ^{235}U a menudo no

se mida, y se calcule ^{235}U usando la relación $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} \sim 137,88$ para estimar principalmente la discordancia del análisis (Spencer, Kirkland y Taylor, 2016). Por eso en análisis de circones se emplean efectivamente dos edades isotópicas ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$), de las cuales se escoge la “mejor edad”. Normalmente se usa la edad $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ para circones que sobrepasen la edad de 1,2 Ga, y las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para circones de origen más reciente (Gehrels, Valencia y Ruiz, 2008). El análisis de ^{207}Pb es más impreciso, con ratas de conteo de casi una magnitud menor que el ^{206}Pb , lo que resulta en mayor imprecisión de las edades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de circones de menos de 1,2 Ga.

Una de las ventajas de usar diagramas concordia U/Pb en vez de isócronas es que inicialmente se puede dejar de lado el cálculo de plomo inicial residual no radiogénico (^{204}Pb) y de procesos radiogénicos anteriores ($^{207}\text{Pb}_0$ y $^{206}\text{Pb}_0$), así que solamente entra plomo radiogénico después del cierre ($^{207}\text{Pb}^*$ y $^{206}\text{Pb}^*$) en la ecuación para calcular la edad t , por ejemplo: $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} = (e^{\lambda_{238} t} - 1)$, que se expresa en el grado de la curvatura concordia.

Tabla 3. Relaciones isotópicas medidas para ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²³⁵U, ²³⁸U y de Utotal y Th y edades calculadas de los circones de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, analizados en el SGC

6 de febrero de 2018, Laboratorio de Datación U/Pb, Servicio Geológico Colombiano				Datos para diagrama Tera-Wasserburg				Datos para diagrama Wetherill				Edades obtenidas						% Dis-cordia. (k)				
Identifi-cador (a)	F206c (b)	Concen-tración -U ug. g ⁻¹ (c)	Th/U (d)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (e)	% Err. (f)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (e)	% Err. (f)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (e)	% Err. (f)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (e)	% Err. (f)	Rho (g)	Edad ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Ma (h)	2 s abs (i)	2 s abs (j)	Edad ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (h)	2 s abs (i)		2 s abs (j)	Edad ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (h)	2 s abs (i)	2 s abs (j)
SNG-1-51	N.R.	28.26	0.60	10,225	0.00154	0.0609	0.0015	0.8120	0.0230	0.09780	0.00154	0.033	630.0	52.0	55.0	601.6	6.3	9.6	603.0	13.0	15.0	0.4
SNG-1-58	N.R.	45.15	0.82	10,215	0.00196	0.0611	0.0013	0.8220	0.0170	0.09790	0.00196	0.055	638.0	47.0	50.0	602.0	8.1	11.0	608.7	9.5	12.0	0.6
SNG-1-116	N.R.	21.06	0.49	10,215	0.00224	0.0597	0.0016	0.8160	0.0250	0.09790	0.00224	0.037	600.0	62.0	65.0	602.1	9.2	12.0	608.0	15.0	17.0	-0.7
SNG-1-148	N.R.	61.20	0.60	10,215	0.00196	0.0607	0.0011	0.8090	0.0170	0.09790	0.00196	0.035	624.0	38.0	42.0	602.1	8.3	11.0	603.4	9.2	11.0	0.3
SNG-1-162	N.R.	35.81	0.43	10,215	0.00140	0.0595	0.0013	0.8060	0.0200	0.09790	0.00140	0.054	579.0	46.0	49.0	602.1	6.1	9.5	600.0	11.0	13.0	0.8
SNG-1-178	N.R.	14.94	0.30	10,204	0.00224	0.0597	0.0020	0.8060	0.0270	0.09800	0.00224	0.060	612.0	65.0	67.0	602.4	9.3	12.0	602.0	15.0	16.0	-1.0
SNG-1-128	N.R.	79.00	0.40	10,204	0.00140	0.0601	0.0009	0.8080	0.0120	0.09800	0.00140	0.075	604.0	32.0	36.0	602.8	6.0	9.5	602.7	7.2	11.0	-1.0
SNG-1-146	N.R.	88.80	0.62	10,204	0.00154	0.0602	0.0009	0.8170	0.0140	0.09800	0.00154	0.049	616.0	34.0	39.0	602.9	6.2	9.6	606.2	7.7	11.0	-1.0
SNG-1-140	N.R.	65.70	0.56	10,194	0.00140	0.0601	0.0014	0.8050	0.0190	0.09810	0.00140	0.043	611.0	51.0	54.0	603.0	6.0	9.5	599.0	10.0	13.0	0.6
SNG-1-193	N.R.	15.06	0.36	10,194	0.00182	0.0598	0.0020	0.8160	0.0260	0.09810	0.00182	0.037	584.0	72.0	74.0	603.4	7.8	11.0	605.0	14.0	16.0	0.1
SNG-1-198	N.R.	26.39	0.44	10,194	0.00182	0.0596	0.0010	0.8210	0.0170	0.09810	0.00182	0.059	594.0	33.0	36.0	603.4	7.6	11.0	608.1	9.3	12.0	0.9
SNG-1-117	N.R.	45.05	0.68	10,183	0.00238	0.0594	0.0011	0.8030	0.0200	0.09820	0.00238	0.043	578.0	41.0	45.0	603.5	9.8	12.0	598.0	11.0	14.0	1.4
SNG-1-130	N.R.	35.34	0.24	10,183	0.00196	0.0595	0.0012	0.8030	0.0130	0.09820	0.00196	0.022	582.0	41.0	45.0	603.9	8.1	11.0	598.1	7.2	10.0	1.2
SNG-1-159	N.R.	50.25	0.51	10,176	0.00118	0.0595	0.0009	0.8040	0.0120	0.09827	0.00118	0.057	583.0	33.0	37.0	604.3	4.9	8.8	598.8	6.7	9.8	-1.1
SNG-1-189	N.R.	29.19	0.95	10,171	0.00127	0.0596	0.0013	0.8210	0.0150	0.09832	0.00127	0.078	584.0	47.0	50.0	604.5	5.4	9.1	608.2	8.2	11.0	-0.2
SNG-1-74	N.R.	118.89	0.70	10,161	0.00104	0.0605	0.0008	0.8160	0.0140	0.09842	0.00104	0.033	619.0	29.0	34.0	605.1	4.3	8.5	605.6	7.7	11.0	0.5
SNG-1-14	N.R.	61.61	0.60	10,163	0.00154	0.0602	0.0008	0.8250	0.0130	0.09840	0.00154	0.050	615.0	28.0	33.0	605.2	6.4	9.7	610.6	7.4	10.0	0.5
SNG-1-147	N.R.	65.94	0.61	10,178	0.00137	0.0611	0.0012	0.8270	0.0160	0.09825	0.00137	0.066	649.0	40.0	43.0	605.3	6.1	9.8	611.8	8.7	11.0	0.9
SNG-1-177	N.R.	12.22	1.41	10,152	0.00168	0.0603	0.0027	0.8250	0.0390	0.09850	0.00168	0.052	617.0	86.0	87.0	605.4	7.2	10.0	613.0	20.0	22.0	0.0
SNG-1-61	N.R.	64.60	0.69	10,152	0.00182	0.0595	0.0012	0.8010	0.0160	0.09850	0.00182	0.043	580.0	42.0	45.0	605.6	7.4	10.0	599.1	9.7	12.0	1.4
SNG-1-7	N.R.	354.30	2.80	10,150	0.00136	0.0600	0.0006	0.8141	0.0087	0.09852	0.00136	0.064	602.0	21.0	27.0	605.7	5.7	9.3	604.7	4.8	8.7	-1.2
SNG-1-157	N.R.	43.90	0.59	10,150	0.00130	0.0608	0.0017	0.8210	0.0200	0.09852	0.00130	0.035	622.0	62.0	64.0	605.7	5.5	9.2	608.0	11.0	13.0	1.0
SNG-1-11	N.R.	108.30	0.93	10,148	0.00120	0.0606	0.0007	0.8210	0.0120	0.09854	0.00120	0.062	624.0	26.0	32.0	605.8	5.0	8.9	608.7	6.5	9.8	0.6
SNG-1-13	N.R.	59.00	0.63	10,147	0.00125	0.0607	0.0007	0.8252	0.0095	0.09855	0.00125	0.059	633.0	25.0	31.0	605.9	5.2	9.0	610.8	5.3	9.0	0.1
SNG-1-119	N.R.	16.30	0.47	10,142	0.00196	0.0606	0.0014	0.8180	0.0190	0.09860	0.00196	0.076	619.0	52.0	55.0	606.1	8.0	11.0	606.0	11.0	13.0	0.8
SNG-1-64	N.R.	31.51	0.48	10,142	0.00196	0.0607	0.0015	0.8310	0.0230	0.09860	0.00196	0.070	668.0	55.0	58.0	606.2	8.0	11.0	614.0	13.0	15.0	0.8
SNG-1-144	N.R.	259.30	1.09	10,142	0.00140	0.0593	0.0006	0.8050	0.0110	0.09860	0.00140	0.046	575.0	22.0	28.0	606.2	6.1	9.5	599.6	6.2	9.5	-0.5
SNG-1-12	N.R.	54.16	0.86	10,140	0.00104	0.0607	0.0011	0.8270	0.0150	0.09862	0.00104	0.070	624.0	41.0	44.0	606.3	4.3	8.5	611.7	8.4	11.0	-0.4
SNG-1-15	N.R.	64.02	0.61	10,138	0.00122	0.0600	0.0006	0.8235	0.0099	0.09864	0.00122	0.050	602.0	23.0	29.0	606.4	5.1	8.9	609.9	5.5	9.1	-0.4
SNG-1-69	N.R.	84.00	0.56	10,142	0.00154	0.0598	0.0010	0.8190	0.0130	0.09860	0.00154	0.099	592.0	38.0	42.0	606.4	6.3	9.7	607.2	7.2	10.0	-0.2
SNG-1-45	N.R.	635.00	2.56	10,142	0.00168	0.0604	0.0007	0.8250	0.0110	0.09860	0.00168	0.053	620.0	23.0	28.0	606.5	7.2	10.0	610.6	6.0	9.4	0.6
SNG-1-47	N.R.	575.00	2.05	10,173	0.00238	0.0604	0.0006	0.8220	0.0170	0.09830	0.00238	0.049	617.0	21.0	28.0	606.5	9.5	12.0	608.9	9.4	12.0	1.3
SNG-1-139	N.R.	118.20	0.75	10,135	0.00129	0.0603	0.0010	0.8130	0.0140	0.09867	0.00129	0.054	613.0	36.0	40.0	606.6	5.4	9.1	603.7	7.8	11.0	0.3
SNG-1-145	N.R.	145.20	0.81	10,132	0.00168	0.0601	0.0007	0.8130	0.0120	0.09860	0.00168	0.049	607.0	24.0	30.0	606.6	7.1	10.0	604.7	7.0	10.0	1.1
SNG-1-16	N.R.	48.59	0.59	10,133	0.00111	0.0598	0.0009	0.8140	0.0110	0.09870	0.00111	0.053	601.0	31.0	36.0	606.7	4.6	8.7	604.5	6.1	9.5	0.3
SNG-1-181	N.R.	98.80	0.74	10,132	0.00196	0.0604	0.0007	0.8157	0.0099	0.09870	0.00196	0.066	617.0	24.0	30.0	606.7	8.1	11.0	605.5	5.5	9.1	0.4
SNG-1-175	N.R.	98.20	1.37	10,132	0.00168	0.0607	0.0011	0.8240	0.0160	0.09870	0.00168	0.066	625.0	40.0	44.0	606.8	7.2	10.0	610.1	8.9	11.0	0.0
SNG-1-99	N.R.	12.87	5.31	10,132	0.00224	0.0607	0.0019	0.8280	0.0230	0.09870	0.00224	0.041	620.0	64.0	66.0	606.9	9.6	12.0	614.0	12.0	14.0	-0.5
SNG-1-114	N.R.	66.10	0.69	10,132	0.00196	0.0610	0.0011	0.8200	0.0180	0.09870	0.00196	0.045	635.0	38.0	42.0	606.9	8.3	11.0	608.0	10.0	12.0	-0.1
SNG-1-142	N.R.	139.80	0.87	10,128	0.00108	0.0610	0.0010	0.8230	0.0110	0.09874	0.00108	0.041	637.0	37.0	41.0	607.0	4.5	8.6	613.1	7.8	12.0	0.0
SNG-1-141	N.R.	78.30	0.63	10,121	0.00168	0.0606	0.0011	0.8190	0.0160	0.09880	0.00168	0.099	622.0	41.0	45.0	607.4	6.8	10.0	608.9	9.5	12.0	-0.7
SNG-1-156	N.R.	124.70	0.91	10,119	0.00120	0.0601	0.0007	0.8211	0.0091	0.09882	0.00120	0.058	607.0	25.0	30.0	607.5	5.1	8.9	609.7	5.3	9.4	0.7
SNG-1-172	N.R.	237.30	1.57	10,116	0.00130	0.0600	0.0008	0.8192	0.0099	0.09885	0.00130	0.035	602.0	28.0	33.0	607.6	5.4	9.1	607.5	5.5	9.1	0.0
SNG-1-187	N.R.	17.90	36.34	10,121	0.00196	0.0594	0.0014	0.8150	0.0240	0.09880	0.00196	0.025	596.0	58.0	61.0	607.6	8.4	11.0	605.0	13.0	15.0	1.1
SNG-1-70	N.R.	76.60	0.57	10,114	0.00134	0.0607	0.0012	0.8180	0.0150	0.09887	0.00134	0.076	632.0	41.0	45.0	607.7	5.6	9.2	606.5	8.6	11.0	0.4
SNG-1-5	N.R.	43.48	6.22	10,111	0.00154	0.0604	0.0014	0.8210	0.0190	0.09880	0.00154	0.031	612.0	51.0	53.0	607.8	6.6	9.9	608.0	10.0	13.0	-0.5
SNG-1-167	N.R.	520.30	2.55	10,101	0.00140	0.0597	0.0004	0.8138	0.0071	0.09900	0.00140	0.070	597.0	15.0	25.0	608.3	5.9	9.4	604.5	4.0	8.2	0.2
SNG-1-192	N.R.	50.44	0.54	10,101	0.00140	0.0607	0.0011	0.8280	0.0120	0.09900	0.00140	0.048	625.0	40.0	44.0	608.3	6.1	9.6	612.3	6.6	9.9	1.1
SNG-1-182	N.R.	60.30	0.53	10,100	0.00104	0.0600	0.0010	0.8190	0.0150	0.09901	0.00104	0.070	599.0	35.0	40.0	608.6	4.4	8.6	608.9	8.0	11.0	0.4
SNG-1-155	N.R.	104.94	0.34	10,101	0.00182	0.0604	0.0027	0.8360	0.0370	0.09900	0.00182	0.044	598.0	95.0	97.0	608.7	7.7	11.0	615.0	20.0	22.0	0.1
SNG-1-156	N.R.	127.00	1.26	10,																		

6 de febrero de 2018, Laboratorio de Datación U/Pb, Servicio Geológico Colombiano				Datos para diagrama Tera-Wasserburg				Datos para diagrama Wetherill				Edades obtenidas						% Discordia. (k)				
Identificador (a)	F206c (b)	Concentración -U ug. g ⁻¹ (c)	Th/U (d)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (e)	% Err. (f)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (e)	% Err. (f)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (e)	% Err. (f)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (e)	% Err. (f)	Rho (g)	Edad ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Ma (h)	2 s abs (i)	2 s abs prop. (j)	Edad ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (h)	2 s abs (i)		2 s abs prop. (j)	Edad ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (h)	2 s abs (i)	2 s abs prop. (j)
SNG-1-35	N.R.	64,80	1,65	10,000	0,00252	0,0603	0,0013	0,8370	0,0170	0,10000	0,00252	0,064	618,0	50,0	53,0	614,0	11,0	13,0	617,0	9,3	12,0	0,2
SNG-1-38	N.R.	77,00	2,65	10,000	0,00154	0,0597	0,0010	0,8320	0,0160	0,10000	0,00154	0,060	591,0	35,0	39,0	614,4	6,5	9,9	614,2	8,8	11,0	-0,1
SNG-1-173	N.R.	247,50	1,37	9,999	0,00118	0,0607	0,0006	0,8353	0,0097	0,10001	0,00118	0,070	627,0	21,0	28,0	614,5	4,9	8,9	616,4	5,4	9,1	-1,0
SNG-1-50	N.R.	80,70	0,73	10,000	0,00210	0,0610	0,0009	0,8400	0,0150	0,10000	0,00210	0,033	637,0	33,0	38,0	614,6	8,9	12,0	620,5	7,6	10,0	0,4
SNG-1-73	N.R.	125,90	0,74	9,990	0,00168	0,0601	0,0008	0,8220	0,0120	0,10010	0,00168	0,055	605,0	30,0	35,0	614,9	7,1	10,0	608,9	6,6	9,8	0,6
SNG-1-103	N.R.	296,20	1,39	9,991	0,00125	0,0599	0,0006	0,8230	0,0110	0,10009	0,00125	0,037	597,0	21,0	28,0	614,9	5,2	9,1	609,5	6,2	9,6	-0,7
SNG-1-202	N.R.	63,95	0,72	9,990	0,00154	0,0606	0,0009	0,8350	0,0120	0,10010	0,00154	0,035	621,0	32,0	36,0	615,2	6,7	10,0	616,0	6,7	10,0	0,3
SNG-1-76	N.R.	125,50	0,71	9,980	0,00168	0,0610	0,0008	0,8320	0,0140	0,10020	0,00168	0,054	643,0	27,0	32,0	615,7	6,8	10,0	614,6	7,6	11,0	0,8
SNG-1-79	N.R.	221,20	0,89	9,980	0,00140	0,0605	0,0006	0,8220	0,0100	0,10020	0,00140	0,060	620,0	20,0	27,0	615,7	5,9	9,5	609,2	5,7	9,2	-1,0
SNG-1-202	N.R.	28,26	0,60	10,225	0,00154	0,0609	0,0015	0,8120	0,0230	0,09780	0,00154	0,075	630,0	52,0	55,0	601,6	6,3	9,6	603,0	13,0	15,0	-1,0
SNG-1-76	N.R.	45,15	0,82	10,215	0,00196	0,0611	0,0013	0,8220	0,0170	0,09790	0,00196	0,049	638,0	47,0	50,0	602,0	8,1	11,0	608,7	9,5	12,0	-1,0
SNG-1-79	N.R.	21,06	0,49	10,215	0,00224	0,0597	0,0016	0,8160	0,0250	0,09790	0,00224	0,042	600,0	62,0	65,0	602,1	9,2	12,0	608,0	15,0	17,0	0,6
SNG-1-202	N.R.	61,20	0,60	10,215	0,00196	0,0607	0,0011	0,8090	0,0170	0,09790	0,00196	0,037	624,0	38,0	42,0	602,1	8,3	11,0	603,4	9,2	11,0	0,1

N.R.: no se realizó corrección por Pb común.

a) SNG-1-xx, xx corresponde al número de ablación.

b) Corrección Pb común no aplicada.

c) Concentración aproximada reportada por el programa Iolite v2.5.

d) Relación ²³²Th/²³⁸U calculada a partir de las intensidades obtenidas.

e) Relaciones elementales calculadas a partir de las intensidades obtenidas para cada isótopo.

f) Errores calculados a 2 sigma y propagados usando el algoritmo de Schmitz y Schoene (2007) y Crowley *et al.* (2007).

g) Parámetro Rho calculado como [(error interno 2 SE ²⁰⁶Pb/²³⁸U)² x 0,5] / (error interno 2 SE ²⁰⁶Pb/²³⁸U * error interno 2 SE ²⁰⁷Pb/²³⁵U) y utilizado para la concordancia de las edades. Schmitz y Schoene (2007)

h) Cálculos de edad basados en la constante de decaimiento radiactiva de Jaffey *et al.* (1971).

i) Errores como 2 sigma. La señal obtenida de cada isótopo es integrada y reducida mediante el programa Iolite v2.5* [10].

j) Errores como 2 sigma propagada. La señal obtenida de cada isótopo es integrada y reducida mediante el programa Iolite v2.5* [10].

k) El % Discordia = porcentaje de discordancia, corresponde a la diferencia porcentual entre la edad ²⁰⁶Pb/²³⁸U y la edad ²⁰⁷Pb/²³⁵U.

Fuente: autores

La distribución de edades calculadas de 92 relaciones isotópicas de discordias <5% con una curva de distribución normal sobrepuesta en la figura 5 muestra un rango de edades entre 600 y 616 Ma y un promedio de 608 Ma, aunque con otra acumulación hacia 614 Ma:

Las edades concordia, calculadas de 92 mediciones, en los diagramas de concordia ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb vs. ²³⁸U/²⁰⁶Pb (Tera y Wasserburg, 1975) de 608,8 ± 1,3 Ma y ²⁰⁶Pb/²³⁸U vs. ²⁰⁷Pb/²³⁵U (Wetherill 1956) de 608,6 ± 1,2 Ma en figura 6, solamente difieren levemente alrededor de la edad promedio de 608 Ma.

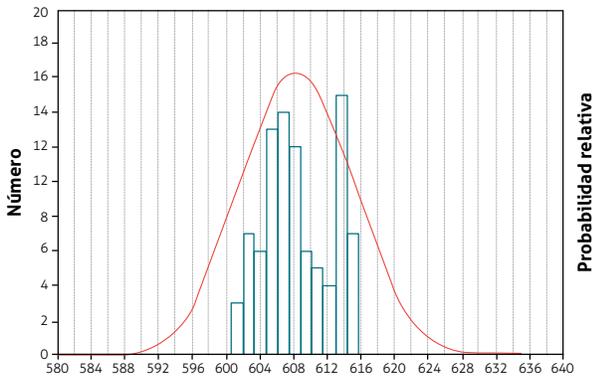


Figura 5. Histograma de edades correspondiente a la sienita. Fuente: autores

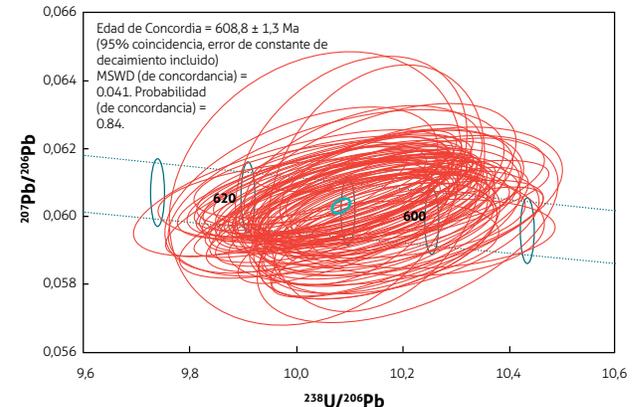
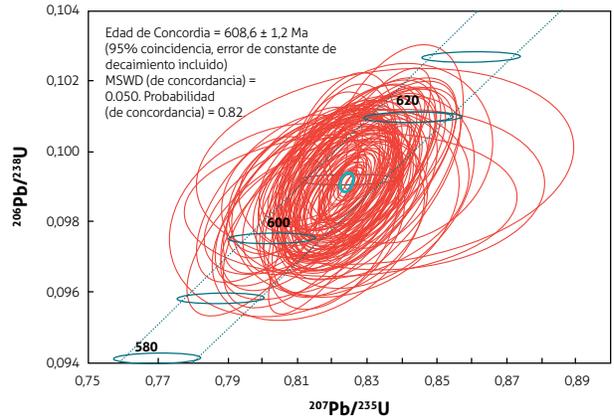


Figura 6. Edades de concordia correspondientes a la muestra de sienita. Arriba: diagrama Wetherill; abajo: Tera Wasserburg. Fuente: autores

Las edades, sin descartar datos en el diagrama concordia de la figura 7, muestran adicionalmente una alta dispersión y datos discordantes que indican abundante pérdida de Pb en los anillos externos de cristales, con daño metamórfico y áreas con recristalización de ~20 μm, que frecuentemente dan una respuesta baja en catodoluminiscencia (e. g., figuras 4a, 4m y 4o). En contraste, los análisis realizados en sectores no alterados que preservan la zonación oscilatoria intacta dieron siempre resultados concordantes, lo que son las zonas recomendadas para futuros análisis.

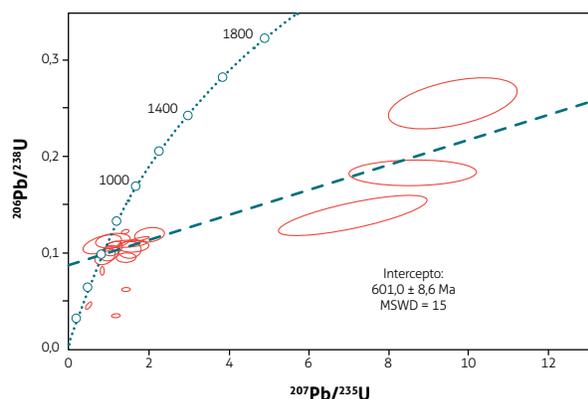


Figura 7. Diagrama de concordia Wetherill, obtenido en el SGC sin descartar datos, con un total de 202 análisis. Fuente: autores

La figura 7 muestra una alta dispersión y datos discordantes que indican fuerte perturbación en los anillos externos de cristales con daño metamórfico resultando en pérdida de Pb y áreas con recristalización de ~20 μm, que frecuentemente dan una respuesta baja en catodoluminiscencia (e. g., figuras 4a, 4m y 4o). Estos corresponden a los

once datos más discordantes; en contraste, los análisis realizados en sectores no alterados que preservan la zonación oscilatoria intacta dieron siempre resultados concordantes. En este cálculo inicial se filtraron datos de borde de los cristales en contacto con la resina altamente discordantes y sectores con fracturas e inclusiones en las caras cristalinarias (total, once datos), para un total de 191 ablaciones.

Las edades obtenidas de los materiales de referencia (figura 8) en el SGC fueron, para FC-5 Duluth, 1103,4 ± 3,9 Ma (1.099 ± 0,6 Ma según Paces y Miller, 1993), y para Mount Dromedary, 100,10 ± 0,61 Ma (99,12 ± 0,14 Ma según Renne *et al.*, 1998).

4.2. Laboratorio de la Universidad de Rennes

Las veinticuatro ablaciones y mediciones de los circones de la sienita nefelínica realizadas en el Laboratorio LA-ICP-MS de la Universidad de Rennes dieron una edad promedio, en el diagrama Tera Wasserburg, de 602 ± 3 Ma (± 0,5%) (figura 9). Todos los datos fueron concordantes debido a que se habían escogido ablaciones en puntos cercanos a los medidos previamente en el SGC, que brindaron los mejores resultados y evitaron, sobre todo, los anillos recristalizados y zonas con daño metamórfico. Para el estándar primario GJ-1 (GJ-1 607,7 ± 0,67 Ma, según Jackson *et al.*, 2004) se realizaron diez ablaciones y tres ablaciones sobre el material de referencia interno Plesovice dieron una edad de 336,5 ± 5,5 Ma (± 1,63%). Todos los resultados son concordantes, incluso en sectores de cristales cuya zonación interna es compleja (figura 4m-p).

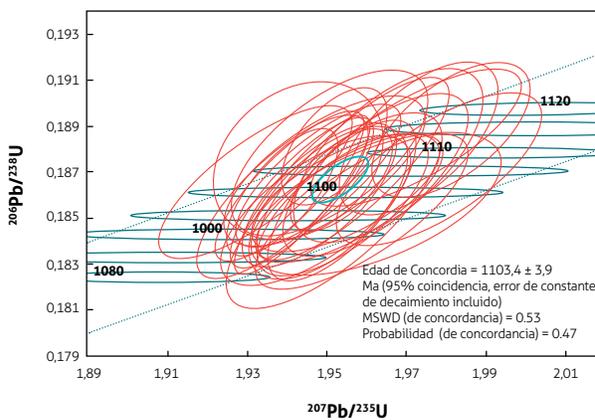
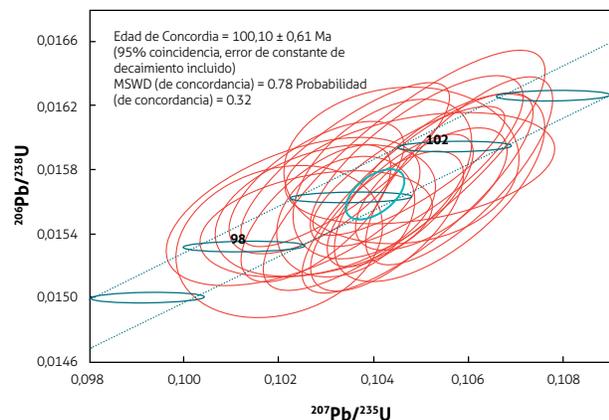


Figura 8. Edades de concordia correspondientes a los materiales de referencia, obtenidas en el SGC. Izquierda Mount Dromedary, derecha FC – 1 Duluth. Fuente: autores

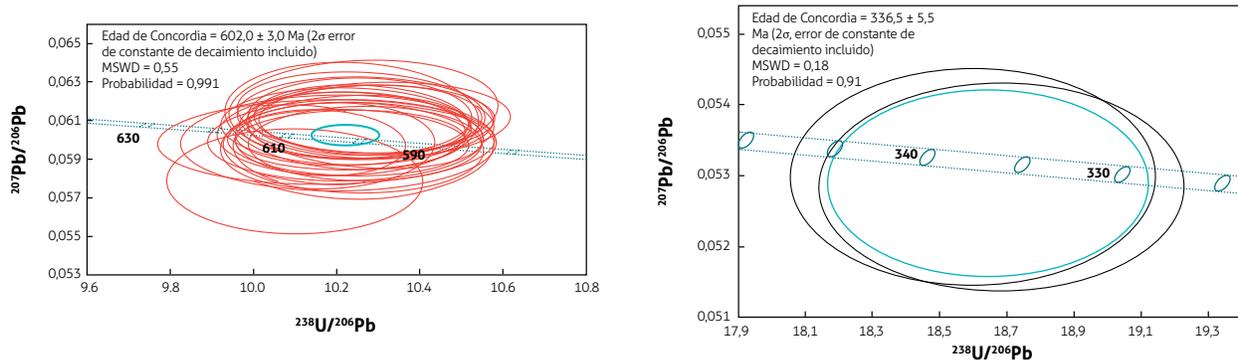


Figura 9. Laboratorio LA-ICPMS de Rennes. Izquierda, edades de concordia SNSJG calculadas en veinticuatro ablaciones, en el. Derecha material de referencia Plesovice.

Fuente: Laboratorio de la Universidad de Rennes, Francia

4.3. Relación Th/U

Las relaciones Th/U pueden servir como criterio para determinar el origen de los circones, lo cual indica si estos minerales se han formado a partir de un fundido enriquecido en tierras raras, como el Th, o por recristalización subsólida en un ambiente empobrecido en estos elementos (Rubatto, 2002, 2017; Schaltegger, Fanning, Günther, Maurin, Schulmann y Gebauer, 1999). Aunque el valor Clarke de Th con 8,5 ppm es mayor que el de U con 1,7 ppm, la incorporación preferencial de U en circones explicada en la introducción causa que una relación Th/U > 0,1 indique un origen magmático de los circones.

Las relaciones Th/U medidas tanto en el LG-SGC como en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Rennes coinciden en términos analíticos y se encuentran dentro de la expectativa, de acuerdo con las edades obtenidas y el origen magmático de estos cristales, como puede observarse en la figura 10. Hay una alta dispersión de la relación Th/U, especialmente en los circones con poco U_{total} (5 a 200 ppm), que tiende a inscribirse en una curva parabólica que se acerca al límite 6 de U/Th con el aumento de U.

La relación Th/U entre 0,2 y 6,2 confirma el origen magmático, de acuerdo con Rubatto (2017), porque solamente un fundido enriquecido en elementos raros e incompatibles permite alcanzar estas altas relaciones, lo cual es coherente con el origen asumido de la sienita nefelínica generada por un magmatismo intra-placa alcalino.

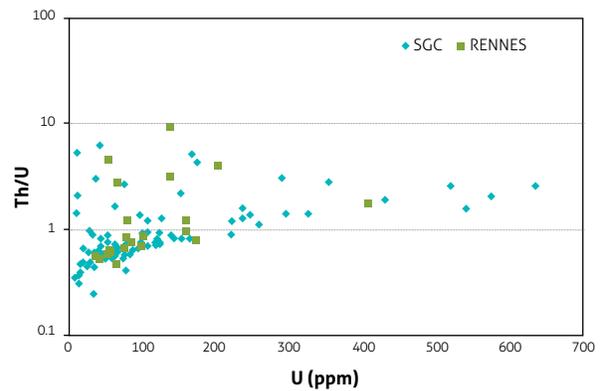


Figura 10. Relación Th/U versus contenido de U (ppm) de circones magmáticos de la sienita.

Fuente: autores

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Edad de cristalización de la sienita nefelínica

Las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ calculadas de un total de 92 análisis (Discordias < 5%) en el LG-SGC por LA-ICP-MS, escogidas de circones de la sienita nefelínica de San José del Guaviare en la localidad del Jordán, muestran una distribución normal unimodal (figura 5) con una edad media de $608,5 \pm 1,0 \text{ Ma}$ ($\pm 0,16\%$, MSWD = 0,61).

Los datos discordantes (figura 7) se deben a una pérdida de Pb, probablemente como consecuencia de la metamictización causada por el decaimiento de Th y U enriquecido en inclusiones minerales de hasta 10 micras. Un evento termal que afectó esta región durante el Ordovícico (Pinson, Hurley, Mencher y Fairbairn, 1962) puede haber facilitado la migración de uranio y plomo, y a la vez

la recristalización en anillos discretos que se observa en los puntos con mayores edades discordantes.

Las edades concordancia obtenidas en los laboratorios, LG - SGC con 92 análisis edad de $608,8 \pm 1,3$ ($\pm 0,21\%$) Ma y Laboratorio de Rennes con 24 análisis edad de 602 ± 3 ($\pm 0,5\%$) Ma con MSWD de 0,041 y 0,55) y un promedio entre ambos laboratorios de 605,4 Ma sugieren la cristalización debajo de la temperatura de cierre de los circones durante el Ediacárico Temprano (Franco *et al.*, 2018), considerablemente anteriores que las edades reportadas en la localidad de La Pizarra, con edades U/Pb en circón de $577,8 \pm 6,3$ Ma (Ediacárico Tardío) para la cristalización y edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (HS) en biotita de 494 ± 5 Ma (Furoginiano) del enfriamiento debajo del punto de cierre de las biotitas (Arango *et al.*, 2011 y 2012).

5.2. Precisión analítica de los resultados LA-ICP-MS correspondientes a la sienita nefelínica de San José del Guaviare

Los resultados de la datación de la sienita nefelínica usando LA-ICP-MS en los laboratorios del Servicio Geológico Colombiano y la de Universidad de Rennes, en Francia, se muestran en las figura 6 y 9, con variaciones de 608,8 Ma a 602,0 Ma, respectivamente, con errores de 1,3 Ma y 3,0 Ma. La diferencia entre las edades calculadas para los dos laboratorios fue del 1,12%.

Los materiales de referencia utilizados para evaluar tanto la exactitud como la precisión de la medición fueron Plesovice en la Universidad de Rennes, cuya edad de concordancia obtenida fue de $336,5 \pm 5,5$ Ma ($\pm 1,63\%$) y una diferencia con la edad esperada del $-0,19\%$ (figura 9), y en el Servicio Geológico Colombiano, las edades obtenidas en el SGC (figura 8) fueron, con FC-5 Duluth, $1.103,4 \pm 3,9$ Ma ($1.099 \pm 0,6$ Ma, según Paces y Miller, 1993), y con Mount Dromedary, $100,10 \pm 0,61$ Ma ($99,12 \pm 0,14$ Ma, según Renne *et al.*, 1998), con diferencias en las edades esperadas de 0,4% y 0,1% respectivamente. Las diferencias de los resultados obtenidos en los materiales de referencia evaluados por ambas organizaciones, tanto en error como en exactitud respecto a la edad esperada, están por debajo de las diferencias reveladas en estudios interlaboratorios, como los de Li, Liu, Su, Sun, Huang y Yi (2015) y Klötzli, Klötzli, Günes y Koslar (2009).

Los valores 2σ de las mediciones concordantes con distribución normal indican una buena reproducibilidad

o precisión interna. La diferencia de 6,8 Ma (1,1%) del valor medio de las edades determinadas en ambos laboratorios serán objeto de estudios futuros. Las 92 mediciones escogidas en el SGC, de las cuales se intentó reproducir 24 mediciones en puntos cercanos de circones en Rennes, son finalmente una base estadística por debajo de las mínimo 100 series de medición que se espera en geocronología para tener un 2σ robusto, $\sigma_m = \sigma/\sqrt{n}$, lo que podría sugerir la necesidad de aumentar la cantidad de las mediciones, para así seguir refinando la metodología y los protocolos.

Los resultados muestran en ambos laboratorios MSWD (*mean square weighted deviation*) menores que 1 (figuras 6 y 9). Considerando que $\text{MSWD} > 2,5$ indican desequilibrio isotópico, este indicador de la bondad de ajuste derivado de la estadística chi-cuadrada reducida confirma una buena calidad de la reproducibilidad interna y externa de prueba χ^2 de los valores medidos, indicando que los resultados de las mediciones representan datos geocronológicos coherentes y confirman que había equilibrio isotópico en el momento de cierre, y que el sistema quedó cerrado posteriormente. Los valores muy bajos indican, por su parte, incertidumbres sobreestimadas o que no reflejan la variación real de los datos, lo cual posiblemente sea consecuencia del esquema de reducción que se haya utilizado en cada laboratorio, como mencionan Spencer, Kirkland y Taylor (2016), es decir, baja dispersión de los resultados o incertidumbres sobreestimadas.

6. CONCLUSIONES

Este estudio de datación U-Pb con LA-ICPMS de circones procedentes de la sienita nefelínica de la localidad del Jordán, Guaviare, Colombia, muestra que las edades obtenidas por los dos laboratorios son precisas, con incertidumbres o porcentajes de error bajos y diferencias entre edades de aproximadamente del 1%. Lo mismo puede decirse de los materiales de referencia, estándares internacionales e internos.

Los megacristales de circón de la sienita nefelínica de San José del Guaviare tienen potencial como material interno de referencia, con edades ediacáricas de cristalización de entre 602 ± 3 Ma y $608,8 \pm 1,3$ Ma. Sin embargo, eso requiere una cuidadosa selección del material,

teniendo en cuenta la presencia de zonación y anillos de recristalización de áreas con daño metamórfico en algunos cristales. Solamente los cristales de una fracción menor a 1 cm son aptos como materiales de referencia, porque presentan menos fracturas y daño metamórfico, para lo cual, una revisión mediante imágenes de catodoluminiscencia es indispensable.

Consideramos que tal selección vale la pena, debido al gran tamaño (> 0,5 cm) y abundancia de los cristales, pues un montaje de la calidad adecuada puede ser utilizado durante varias rutinas de ablación (spot 30 μm) sin ser reemplazado, ya sea para sintonización del sistema LA-ICPMS o como material de referencia interno para control de calidad del laboratorio, y el cual posteriormente puede ser pulido para ser reutilizado.

Proyectamos la realización de análisis adicionales en otros laboratorios de manera sistemática y en colaboración con otros expertos para la obtención de resultados y la distribución de este mineral a otros laboratorios, incluyendo comparación mediante técnicas como TIMS, MC-SIMS y SHRIMP, eventualmente después de reparación térmica de los daños cristalinos durante 48 h con T de 800-1000 °C y abrasión mecánica o química (Mattinson, 2005) para aumentar el número de edades concordantes. Además de continuar disminuyendo los errores analíticos, es necesario indagar sobre las razones de la diferencia de edades de casi 1% entre los dos laboratorios, los efectos de la metamictización y posibles influencias de la meteorización y del ambiente oxidante sobre los cristales recolectados que facilitan migraciones y pérdidas de U y Pb y puedan influir así la zonación visible en catodoluminiscencia, la distribución espacial de otros elementos traza, con el objeto de verificar con más datos la aptitud de una fracción considerable de estos circones, abundantes como material de referencia. Los contenidos relativamente altos de Th, y por eso de ^{208}Pb , sugieren que también debe indagarse sobre el uso de este tercer grupo isotópico en la caracterización de los circones, y a la vez entender mejor el desarrollo geológico de esta parte del cratón amazónico y de sus sienitas nefelínicas, intrusivos subsiliciosos hasta ahora no reportados en otras partes del país.

De esta manera, el LG-SGC no solamente va acumulando experiencia en el cumplimiento de los protocolos internacionales, el refinamiento de la metodología y su

ampliación a otros sistemas isotópicos, sino que puede usar cada vez más el creciente parque analítico y la capa de investigadores existentes en el país para hacer aportes geocientíficos relevantes sobre la materia tanto en Colombia como a escala mundial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango, M. I., Zapata García, G. y Martens, U. (2012). Caracterización petrográfica, geoquímica y edad de la sienita nefelínica de San José del Guaviare. *Boletín de Geología*, 34, 15-26.
- Arango, M., Nivia, A., Zapata, G., Giraldo, M., Bermúdez, J. y Albarracín, H. (2011). *Geología y geoquímica de la plancha 350, San José del Guaviare*. Memoria. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.
- Campbell, I. H., Reiners, P. W., Allen, C. M., Nicolescu, S. y Upadhyay, R. (2005). He-Pb double dating of detrital zircons from the Ganges and Indus Rivers: Implication for quantifying sediment recycling and provenance studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 237 (3-4), 402-432. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.043>.
- Campos Rodríguez, H. R. (2017). *Caracterización geoquímica y mineralógica de la sienita nefelínica de San José del Guaviare y minerales asociados con elementos raros (ER)*. Trabajo de Grado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chang, Z., Vervoort, J. D., McClelland, W. C. y Knaack, C. (2006). U-Pb dating of zircon by LA-ICP-MS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7 (5). Doi: <https://doi.org/10.1029/2005GC001100>.
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O. y Kinny, P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 469-500. Doi: <https://doi.org/10.2113/0530469>.
- Crowley, J. L., Schoene, B. y Bowring, S. A. (2007). U-Pb dating of zircon in the Bishop Tuff at the millennial scale. *Geology* 35 (12), 1123-1126. Doi: <https://doi.org/10.1130/G24017A.1>.
- Fedo, C. M., Sircombe, K. N. y Rainbird, R. H. (2003). Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1), 1-25. Doi: <https://doi.org/10.2113/0530277>.

- Finch R. J. y Hanchar J. M. (2005). Structure and Chemistry of Zircon and Zircon-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53 (1): 1-25. Doi: <https://doi.org/10.2113/0530001>.
- Franco, J. A., Muñoz, J. A., Piraquive, A., Bonilla, A., Cramer, T. y Campos, H. (2018). Geochronology of the nepheline syenite of el Jordán, Guaviare, Colombia, evidences of Neoproterozoic-Cambrian intraplate magmatism and its implications during Pan-African tectonics in Western Gondwana. En EGU2018 general assembly, Vienna, EGU2018, 20. Disponible en <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-10861.pdf>.
- García Romero, D. F. (2015). Petrografía y geoquímica de las rocas aflorantes al sur de San José del Guaviare. *Trabajo de Grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gehrels, G. E., Valencia, V. A. y 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). Doi: <https://doi.org/10.1029/2007GC001805>.
- Hanchar, J. M. y Miller, C. F. (1993). Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. *Chemical Geology*, 110 (1-3), 1-13. Doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90244-D](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90244-D).
- Harrison, T. M., Watson, E. B. y Aikman, A. B. (2007). Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks. *Geology*, 35 (7), 635-638. Doi: <https://doi.org/10.1130/G23505A.1>
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L. y Belousova, E. A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211 (1-2), 47-69. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>.
- Jaffey, A. H., Flynn, K. F., Glendenin, L. E., Bentley, W. C. y Essling, A. M. (1971). Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . *Physical Review Section C*, 4 (5). Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.4.1889>.
- Klötzli, U., Klötzli, E., Günes, Z. y Koslar, J. (2009). Accuracy of laser ablation U-Pb zircon dating: Results from a test using five different reference zircons. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 33 (1), 5-15. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00921.x>.
- Koschek, G. (1993). Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171 (3), 223-232. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>.
- Košler, J. y Sylvester, P. J. (2003). Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICPMS. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 243-275. Doi: <https://doi.org/10.2113/0530243>.
- Li, X., Liu, X., Liu, Y., Su, L., Sun, W., Huang, H. y Yi, K. (2015). Accuracy of LA-ICPMS zircon U-Pb age determination: An inter-laboratory comparison. *Science China Earth Sciences*, 58 (10), 1722-1730. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5110-x>.
- Ludwig, K. R. (2012). *User's manual for Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, v. 5, 1-72.
- Mattinson, J. M. (2005). Zircon U-Pb chemical abrasion ("CA-TIMS") method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chemical Geology*, 220 (1-2), 47-66. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.03.011>.
- Paces, J. B. y Miller, J. D. (1993). Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 98 (B8), 13997-14013. Doi: <https://doi.org/10.1029/93JB01159>.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. y Hergt, J. (2011). Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12, 2508-2518. Doi: <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>.
- 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. Doi: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.7>.
- Petrus, J. A. y Kamber, B. S. (2012). Visual age: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36 (3), 247-270. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2012.00158.x>.
- Pinson W. H, J. R., Hurley, P. M., Mencher, E. y Fairbairn, H. W. (1962). K-Ar AND Rb-Sr Ages of Biotites from Colombia, South America. *GSA Bulletin*, 73(7), 907-910. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1962\)73\[907:KARAOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1962)73[907:KARAOB]2.0.CO;2)
- Renne, P. R., Swisher, C. C., Deino, A. L., Karner, D. B., Owens, T. L. y De Paolo, 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: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00159-9).
- 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: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2).
- Rubatto, D. (2017). Zircon: The metamorphic mineral. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83 (1), 261-295. Doi: <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.83.9>.
- Rutherford, E. y Soddy, F. (1903). Radioactive change. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5 (29), 576-591. Doi: <https://doi.org/10.1080/14786440309462960>.
- Schaltegger, U., Fanning, C. M., Günther, D., Maurin, J. C., Schulmann, K. y Gebauer, D. (1999). Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (2-3), 186-201. Doi: <https://doi.org/10.1007/s004100050478>.
- Schmitz, M. D. y Schoene, B. (2007). Derivation of isotope ratios, errors and error correlations for U-Pb geochronology using ^{205}Pb - ^{235}U -(^{233}U)-spiked isotope dilution thermal ionization mass spectrometric data. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 8 (8). Doi: <https://doi.org/10.1029/2006GC001492>.
- Schoene, B. (2014). *U-Th-Pb Geochronology*. Vol. 4. Princeton: Princeton University Press. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00310-7>.
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, A32, 751-767. Doi: <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M. *et al.* (2008). Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249 (1-2), 1-35. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.
- Solari, L., Gómez Tuena, A., Bernal, J., Pérez Arvizu, O. y Tanner, M. (2010). U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICPMS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34 (1), 5-18. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00027.x>.
- Spencer, C. J., Kirkland, C. L. y Taylor, R. J. M. (2016). Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U-Pb zircon geochronology. *Geoscience Frontiers*, 7 (4), 581-589. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.006>.
- Sylvester, P. J. (2001). Data reduction software for LA-ICP-MS: Appendix. En *Laser Ablation-ICP-mass spectrometry in the Earth sciences: Principles and applications* (short course series). Ottawa: Mineralogical Association of Canada.
- Tera, F. y Wasserburg, G. J. (1972). U-Th-Pb systematics in lunar highland samples from the Luna 20 and Apollo 16 missions. *Earth and Planetary Science Letters*, 17 (1), 36-51. Doi: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(72\)90257-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(72)90257-9).
- Tera, F. y Wasserburg, G. J. (1975). Precise isotopic analysis of lead in picomole and subpicomole quantities. *Analytical Chemistry*, 47 (13), 2214-2220. Doi: <https://doi.org/10.1021/ac60363a036>.
- Trumpy, D. (1943). Pre-cretaceous of Colombia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 54 (9), 1281-1304. Doi: <https://doi.org/10.1130/GSAB-54-1281>.
- Turekian, K. K. y Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *GSA Bulletin*, 72 (2), 175-192. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTAIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTAIS]2.0.CO;2).

- Watson, E. B. y Harrison, T. M. (2005). Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308 (5723), 841-844. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.1110873>.
- Watson, E. B., Wark, D. A. y Thomas, J. B. (2006). Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151, 413-433. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>.
- Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (7), 1217-1232. Doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).
- Wetherill, G. W. (1956). Discordant uranium-lead ages, I. *Transactions, American Geophysical Union*, 37 (3), 320-326. Doi: <https://doi.org/10.1029/TR037i003p00320>.
- Yang, B., Luff, B. J. y Townsend, P. D. (1992). Cathodoluminescence of natural zircons. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 4 (25), 5617. Disponible en <http://stacks.iop.org/0953-8984/4/i=25/a=015>.

Análisis de anomalías geobotánicas a partir del procesamiento e interpretación de productos de sensores remotos, estudio de caso: occidente de Boyacá (Colombia)

Analysis of geobotanical anomalies from the processing and interpretation of remote sensing products: Case study of West Boyacá (Colombia)

Manuel Guillermo Zafra Dulcey¹

* Email de correspondencia: manuelzafra@landterra.com.co

Recibido: 28 de mayo de 2018

Aceptado: 18 de diciembre de 2018

Publicado en línea: 15 de julio de 2019

Doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.485

Citación: Zafra D., M. G. (2019). Análisis de anomalías geobotánicas a partir del procesamiento e interpretación de productos de sensores remotos, estudio de caso: occidente de Boyacá (Colombia). *Boletín Geológico*, 45, 23-35. Doi: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.485>

RESUMEN

Este trabajo presenta la delimitación de una nueva zona de interés para la exploración detallada de esmeraldas en Colombia mediante la interpretación de anomalías geobotánicas en zonas de cobertura vegetal densa. Se diseñó una metodología en la que se calcularon quince índices vegetales, de los cuales se seleccionaron aquellos cuyas anomalías presentan mayor correlación con los lineamientos detectados, mediante la interpretación del modelo de sombras generado a partir el modelo digital de terreno (MDT). Un análisis espectral adelantado en las zonas mineralizadas del área de mayor correlación arrojó una aureola de estrés de vegetación en todos los casos estudiados y corroboró una relación directa entre la albitización presente en las zonas mineralizadas, los lineamientos y los niveles de estrés vegetal. Se identificó como objetivo de exploración detallada un sector localizado entre la mina de Coscuez y la mina La Pita, donde los índices de vegetación son más favorables y se correlacionan mejor con los lineamientos naturales del terreno. Se comprobó que la metodología planteada de anomalías geobotánicas es coherente y puede ser empleada como herramienta de exploración esmeraldífera.

Palabras clave: índices de vegetación, anomalías geobotánicas, análisis espectral, esmeralda, sensores remotos.

¹ Consultor de Landaterra Consultores.

ABSTRACT

This work presents the boundaries of a new area of interest for the detailed exploration of emeralds in Colombia, identified through the interpretation of geobotanical anomalies in areas of dense vegetation. A methodology was designed in which fifteen vegetation indices were calculated. The anomalies correlated most with the lineaments detected from the interpretation of a shaded-relief model generated from a digital terrain model (DTM) were selected. A detailed spectral analysis in the mineralized zones of the area with the highest correlation showed a halo of vegetative stress in all studied cases; moreover, the analysis corroborated a direct relationship between the albitization present in the mineralized zones, the lineaments and the degree of vegetative stress. A sector between the Coscuez mine and the La Pita mine was identified as a target for detailed exploration, where the vegetation indexes indicate less vegetative stress and correlate better with the natural terrain lineaments. It was found that the proposed methodology based on geobotanical anomalies yields consistent results and can be used as a tool for emerald exploration.

Keywords: Vegetation indices, geobotanical anomalies, spectral analysis, emerald, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con un desarrollo básico en exploración minera: las dificultades de orden social, económico y tecnológico han relegado a la minería, como en el caso concreto de las esmeraldas, a un retraso en las técnicas exploratorias. Se plantean técnicas de utilización de sensores remotos como un método efectivo y de bajo costo para delimitar zonas nuevas en explotación de recursos minerales. Las dificultades del terreno, por su abundante cobertura vegetal y complicada accesibilidad, no permiten realizar campañas exploratorias detalladas que concreten ese objetivo.

Con menos de un 15% del territorio nacional estudiado para minería, Colombia se considera un país inmaduro en términos exploratorios. Esta condición, sumada a las manifestaciones minerales y los precios altos, ha motivado a nacionales y extranjeros a buscar nuevas oportunidades que en algunos casos son esencialmente mineras y en otros sólo objeto de especulación. (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2014).

Desde el punto de vista investigativo, en la exploración de recursos minerales se usan índices vegetales principalmente en depósitos asociados a pórfidos cupríferos, mineralizaciones de oro y otros metales, median-

te la interpretación de imágenes satelitales de anomalías geoquímicas, esencialmente seritización y argilización. Camacho Velasco (2015) realiza una evaluación de la técnica del análisis de imágenes hiperespectrales (HSI) y su aplicación, uso actual y futuro, que se ha restringido al uso privado en la búsqueda de oro y minerales metálicos por AngloGold Ashanti, Ecopetrol y la Agencia Nacional de Hidrocarburos, a nivel estatal. Crosta (1989) y Van der Meer (2006) han realizado estudios de la respuesta espectral de diferentes minerales asociados a depósitos epitermales y las alteraciones relacionadas con los mismos.

Los yacimientos de esmeralda en Colombia, a diferencia de los de otros países, se emplazan en lutitas oscuras carbonosas, en zonas con alteración propilitica y albitización. La alta presencia anómala de Na y Cr en la roca encajante, el primero por alteración hidrotermal y el segundo como oligoelemento presente en la lutita negra carbonosa de la formación Muzo, puede generar una salinidad del suelo en las zonas alteradas y verse expresado en la salud o estrés de la vegetación. Este principio básico plantea, en primera instancia, la necesidad de determinar una relación posible entre los índices de vegetación, las características geológicas del área de trabajo y las mineralizaciones de esmeraldas, para priorizar áreas nuevas de exploración.

Debido a que la albitización y propilitización son los tipos de alteración presentes en la zona de estudio, el diseño de una metodología de trabajo que permita la

delimitación de zonas bajo parámetros corroborables es un ejercicio inédito para la industria de las esmeraldas en Colombia.

Basado en esta premisa, el objetivo de este trabajo es la evaluación de diferentes índices de vegetación con miras a identificar zonas en las que la absorción o reflectividad captada por el sensor sea anómala, para de este modo poder establecer su relación directa con los condicionantes litológicos, estructurales y geoquímicos que limitan la precipitación de las esmeraldas en Colombia, de tal manera que las anomalías geobotánicas identificadas sean un indicador de zonas con alteración.

1.1. Anomalía geobotánica

Se establece como la interacción de las características físico-químicas intrínsecas del tipo de cobertura vegetal de un área y los condicionantes de cantidad y calidad de biomasa presente (figura 1) (*Biology Dictionary*, 2017). Existe una fuerte interrelación entre estas variables y las características del suelo que las soporta; de igual manera, las propiedades del suelo son una respuesta al regolito que las genera.

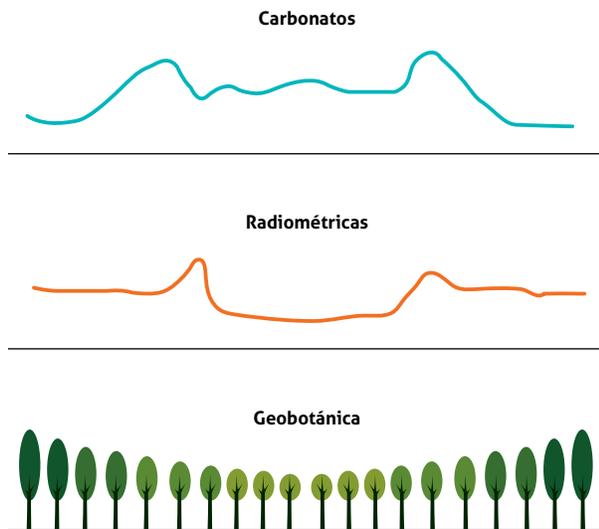


Figura 1. Anomalías asociadas a alteraciones superficiales.
Fuente: modificado a partir de Souza Filho *et al.* (2008)

Souza Filho *et al.* (2008) realizó una evaluación de las alteraciones superficiales inducidas por hidrocarburos y su detección por técnicas de percepción remota, en la que la variación de la química del suelo aparecía direc-

tamente relacionada con la presencia de etano, pentano, propano y metano. Por otra parte, Singer (2015) evaluó la correlación que existe entre las diferencias de pH, Eh y la movilidad de elementos, así como las repercusiones en la calidad y cantidad de la vegetación que circunda dicha alteración.

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son características del suelo: pH, potencial *redox*, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, entre otras. La naturaleza de la contaminación y el origen de los metales y formas de deposición y condiciones medioambientales producen acidificación, cambios en las condiciones *redox*, variación de temperatura y humedad en los suelos. (Sahuquillo, Rigol y Rauret, 2003).

1.2. Índices de vegetación

“Los índices de vegetación obtenidos a partir de sensores remotos son algoritmos para evaluaciones cuantitativas y cualitativas de la cobertura vegetal, el vigor y la dinámica de crecimiento, entre otras aplicaciones” (Xue y Su, 2017).

Los índices de vegetación se aplican en análisis cualitativos o cuantitativos. Empleados cualitativamente, permiten determinar rápidamente el estado relativo de la vegetación en una zona. Como una gran variedad de factores afecta directamente la producción de biomasa. Los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona o momento. (Towers y von Martini, 2002)

1.3. Firmas espectrales

La radiación fotosintéticamente activa (RAP, casi el 28% de la energía absorbida por la planta) es usada en la fotosíntesis y para la conversión de compuestos orgánicos de alta energía.

Las propiedades ópticas de las hojas en la región RAP dependen de varios factores, tales como condiciones de la radiación, especie vegetal, espesor de las hojas, estructura de la superficie de la hoja, clorofila, contenido de carotenoides de las hojas (pigmentos orgánicos que se encuentran en forma natural en las plantas), contenido

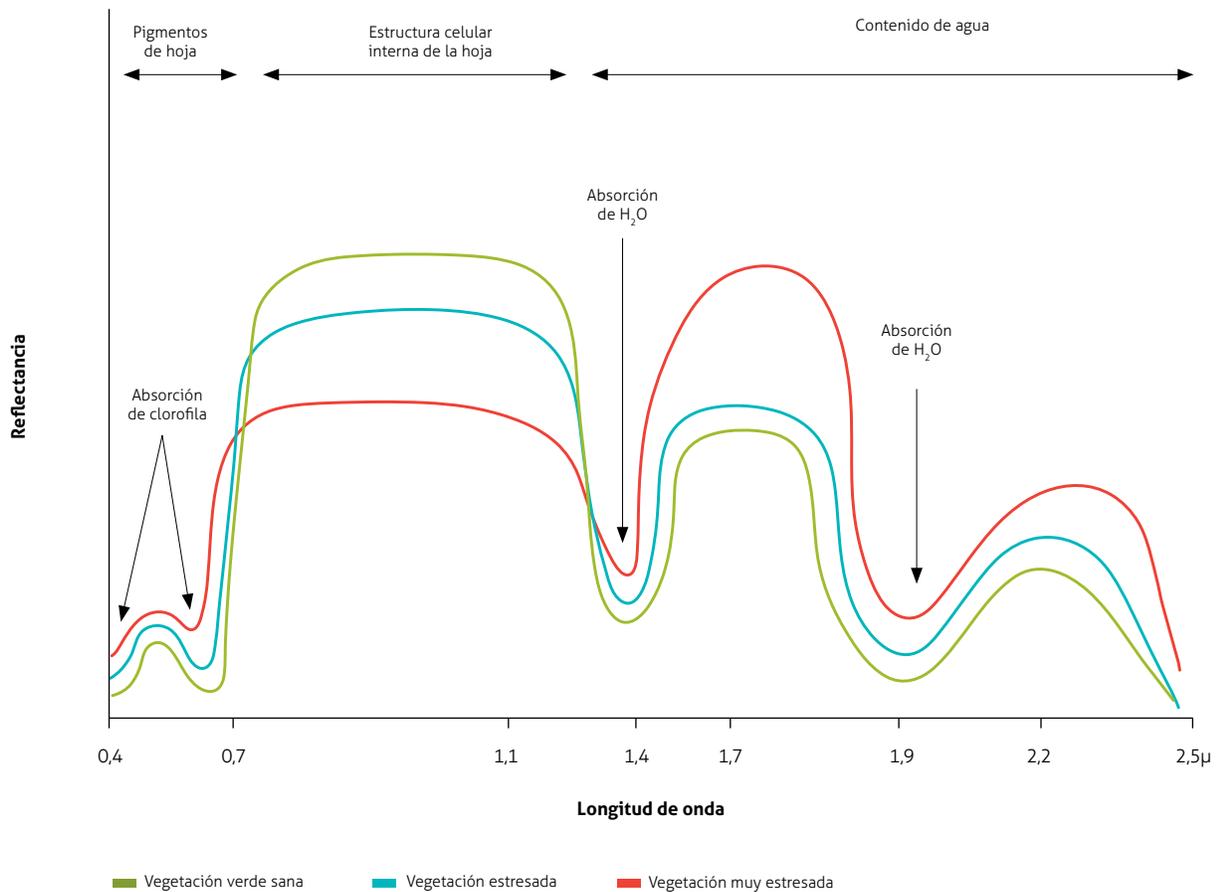


Figura 2. Comparación de las curvas espectrales de vegetación sana y estresada (diagrama esquemático).

Fuente: modificado a partir de Souza Filho *et al.* (2008)

de materia seca por unidad de área y estructura interna (Ross, 1981). De tal manera, es posible interpretar la “salud” de la planta a partir de la reflectancia calculada de cada pixel analizado (Milgrom, 1997) (figura 2). El comportamiento resultante de la firma espectral depende del estado de estrés o salud de la planta, y este a su vez está directamente relacionado con las condiciones físico-químicas del suelo, como emplazamiento de la misma (Prieto, 2009); (Heldt, 1997).

1.4. Geología de las mineralizaciones de esmeraldas en Colombia

Se pueden considerar tres aspectos clave para la precipitación de las esmeraldas: los condicionantes litológicos, estructurales y geoquímicos en un contexto de temperatura y presión adecuado. Estos aspectos se constituyen en el objetivo de exploración necesario para descubrir

nuevas zonas o para potenciar aquellas ya conocidas en el negocio minero esmeraldífero.

La mineralización de esmeraldas en el cinturón esmeraldífero occidental de Colombia está restringida a la relación de fluidos de origen hidrotermal y neumatolítico en conjunción con rocas sedimentarias cretácicas pertenecientes a la formación Muzo, de edad hauteriviense-barremianse (Mendoza Parada, 1996), constituidas por intercalaciones de lutitas negras carbonosas laminadas y lenticulares con lutitas silíceas y bandas arenosas y calcáreas (figura 3).

Los fluidos hidrotermales vetiformes presentan una paragénesis mineral que incluye calcita, pirita, cuarzo y esmeralda. Localmente pueden presentar carbonatos de tierras raras como parisita y codazzita.

Es conocido que la presencia de esmeraldas en el occidente de Boyacá está restringida a la formación Muzo.

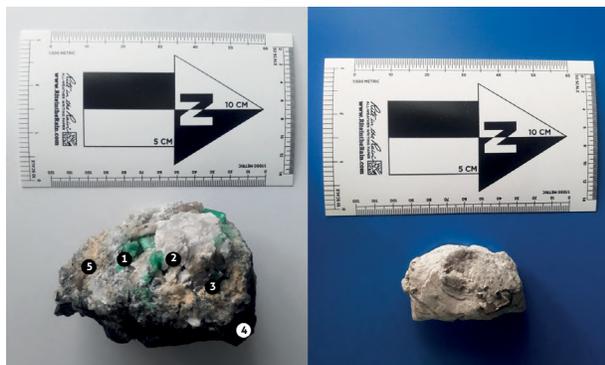


Figura 3. Izquierda: asociación mineral en zona productora. 1) Esmeralda. 2) Calcita fibrosa. 3) Cuarzo. 4) Roca encajante lutítica negra carbonosa. 5) Dolomita y carbonatos de tierras raras. Origen de la muestra: Coscuez (Boyacá). Derecha: albitización en lutitas carbonosas con cristales de pirita. Origen de la muestra: Coscuez (Boyacá)

Fuente: autor

El aporte de elementos traza, como Cr y V, a los fluidos hidrotermales desde la roca encajante y su movilidad a través de la columna estratigráfica no permiten identificar los niveles exactos y las concentraciones necesarias de dichos elementos para la generación de gemas de buena calidad.

Desde el punto de vista estructural, Ujueta (1992) postula lineamientos de orientación NW-SE conocidos como *lineamiento de Muzo*, al occidente, y *lineamiento de Gachalá*, al oriente, que controlan la presencia de la mineralización. Existe una relación directa entre las zonas mineralizadas y las estructuras regionales, como la falla del río Minero, los sinclinales de Muzo, Santa Elena, Otanche y Coscuez, y los anticlinales de La Chapa, y aquellos presentes a escala local (Mendoza Parada, 1996).

El factor estructural es un ítem determinante como facilitador del emplazamiento de los fluidos ascendentes mineralizados. El fallamiento y los pliegues a escala macro y micro se convierten en el segundo parámetro de análisis local. La dirección preferencial de las mineralizaciones en Muzo, Quípama y Coscuez, zonas de interés para el presente trabajo, corresponden a orientaciones N40°W y N10°E, correspondientes a direcciones de esfuerzo máximo N19° ± 10°E, causante de las fracturas de relajación mineralizadas con dirección preferencial N50°W y N80°E (Mendoza Parada, 1996).

En el aspecto geoquímico y mineralógico se debe analizar el comportamiento de la precipitación de Be como consecuencia de su enriquecimiento por procesos de albitización, posiblemente por pegmatización de los mine-

rales en su precipitación o removilización a partir de rocas graníticas y redeposición de los estados finales posmagmáticos (Mendoza Parada, 1996). En la zona de trabajo no están cartografiados cuerpos ígneos de tipo granítico que puedan aportar Be, y aquellos que están reseñados en zonas relativamente contiguas no tienen la temporalidad adecuada que indique que este proceso pueda presentarse. Si bien la albitización está presente en todos los casos de éxito en la exploración esmeraldífera del occidente de Boyacá, no es un indicador único, ya que los procesos metamórficos provenientes del hidrotermalismo son comunes en la zona, incluso en áreas no productivas.

De forma anómala, el descubrimiento denominado *La Pelanga*, en la mina de Muzo, litológicamente ubicada en la parte basal de la formación Capotes, suprayacente a la formación Muzo y conformada por lutitas silíceas, indica la movilidad de los fluidos hidrotermales y el arrastre de elementos a niveles superiores, cuya precipitación se produjo por factores eminentemente físicos, como temperatura y presión.

Las variables litoestratigráficas, geoquímicas y estructurales se deben cumplir en su totalidad para que ocurra la precipitación de los fluidos hidrotermales y la formación de los cristales de esmeralda, y de hecho están presentes en el área de estudio. No obstante, esta favorabilidad, la litología, la geomorfología y el clima del área favorecen la generación de una cobertura vegetal abundante que enmascaran las estructuras y no exponen las unidades de roca. Por tales motivos, la identificación de nuevos prospectos se ha restringido históricamente a zonas aledañas a aquellas ya conocidas.

1.5. Área de estudio

El área de estudio propuesta se encuentra enmarcada en un polígono de coordenadas 5°38'40,02"N a 5°28'18,91"N y -74°12'27,88"W a -74°3'25,88"W, que comprende los municipios de San Pablo de Borbur, Muzo, Quípama y Maripí, en el occidente del departamento de Boyacá (figura 4).

La zona se caracteriza por un fuerte contraste entre terrenos escarpados de origen estructural y suaves ondulaciones en las zonas más altas por la litología presente. La temperatura oscila entre los 20 y 30 °C, y las alturas, entre los 450 y los 850 m.s.n.m.

La zona en general presenta dos temporadas lluviosas de poca intensidad: la primera, de enero a marzo, y

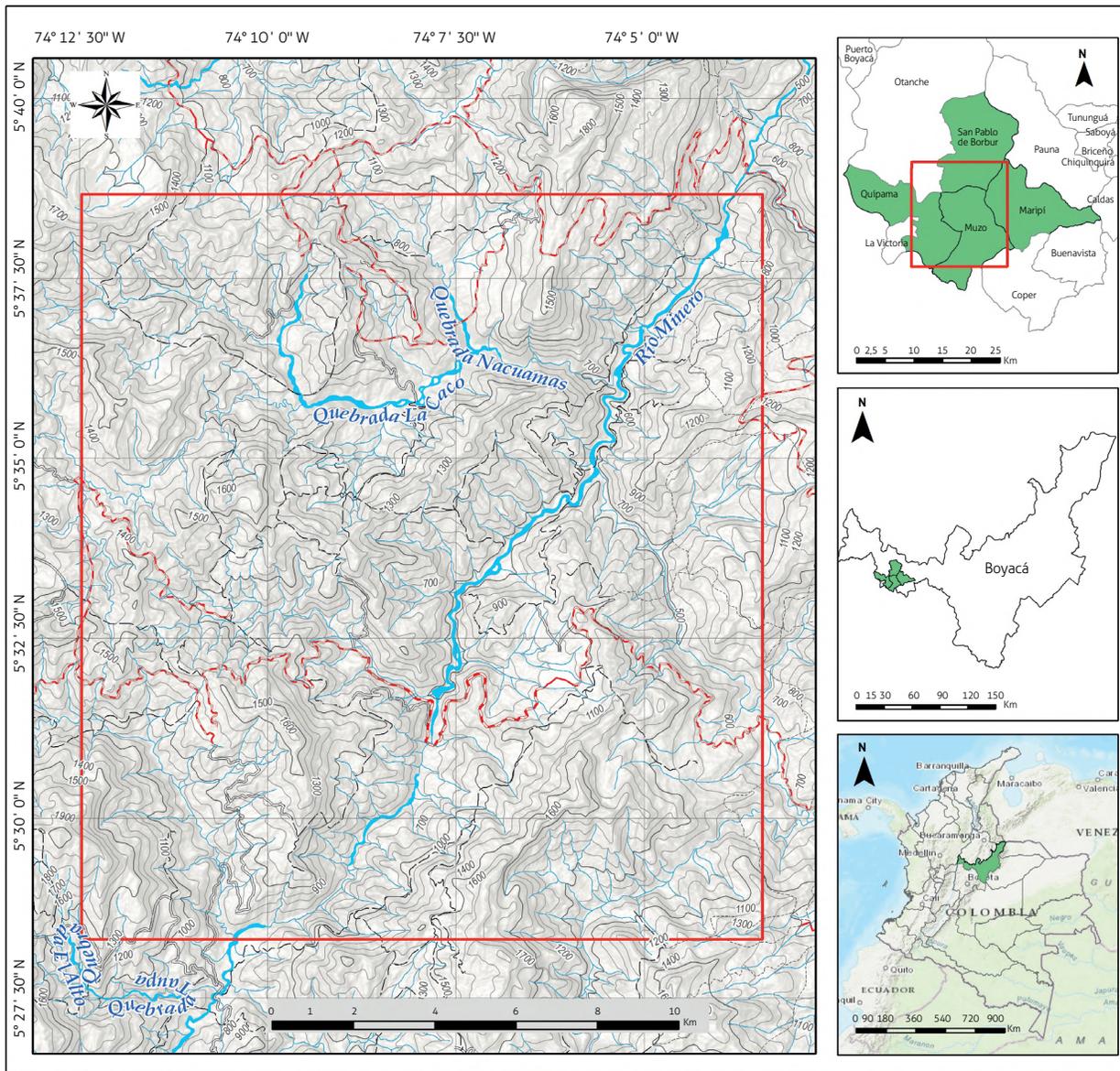


Figura 4. Localización del área de estudio

Fuente: autor

la segunda, de octubre a diciembre. En 2016 se registró una precipitación media de 60 mm de lluvia anual, con máximos de 330 mm en octubre (Geoportal IDEAM, s.f.).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo una zonificación de áreas potenciales para la exploración detallada de esmeraldas mediante técnicas de percepción remota en la región de Muzo y

Coscuez, en el departamento de Boyacá, se estructuró un diagrama de flujo que permitiera el diseño y prueba de una metodología que cumpliera ese objetivo (figura 5).

El satélite Sentinel-2 está provisto de una cámara multiespectral que captura una imagen de 290 km de ancho, con intervalos de longitud de onda desde 490 nm hasta 2.190 nm en sus 13 bandas (European Spatial Agency, 2017), obtiene imágenes con resoluciones de 60, 20 y 10 m/píxel y 450.000 píxeles, lo que permite realizar análisis multiespectrales enfocados en a la geobotánica.

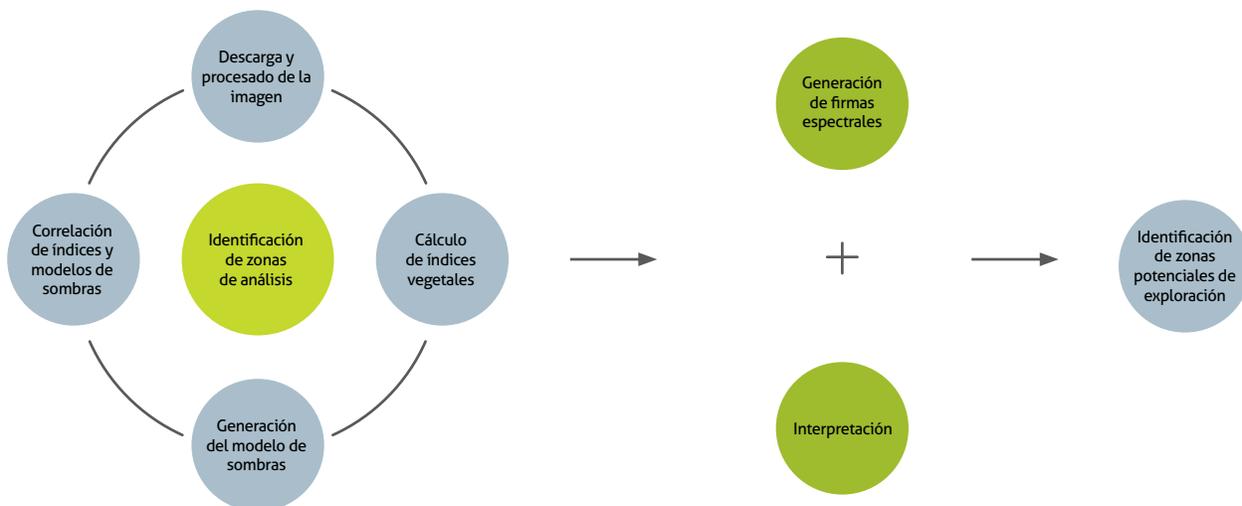


Figura 5. Metodología de trabajo utilizada.

Fuente: autor

Se escogió una imagen del satélite Sentinel-2A, ya que permite el análisis de los diferentes índices que se van a utilizar, su cobertura global y la calidad de las imágenes ópticas a través de su cámara hiperespectral de alta resolución. Se calculó una cobertura de nubes en el área de trabajo menor del 2%. La imagen seleccionada está codificada como S2A_MSIL2A_20170901T152641_N0205_R025_T18NWM_20170901T152638.

Se realizó la corrección atmosférica mediante el algoritmo Sen2Cor en el software SNAP, que la Agencia Espacial Europea (ESA) distribuye libremente.

Para el modelo digital de terreno (MDT) se utilizó el satélite de acceso gratuito ALOS-PALSAR, con resolución de 12 m, y el procesamiento de la información se realizó por medio del software SNAP.

Se han utilizado, en la medida de lo posible, recursos gratuitos y software libre con el objetivo de abrir la posibilidad de que análisis posteriores por esta metodología no incurran en elevados costos en imágenes y software.

Inicialmente, se interpretó el MDT disponible desde cuatro posiciones de iluminación en azimut (0°, 90°, 180° y 270°), con un ángulo de inclinación de 70°, escogido en relación con la topografía abrupta del área de trabajo (figura 6). Esta técnica permite observar los rasgos estructurales, en este caso, lineamientos, simulando diferentes posiciones del observador. La generación de esta superficie hipotética que representa el terreno permite simular la

proyección de una fuente luminosa desde todos los puntos de vista del observador.

El análisis del modelo de sombras busca identificar los lineamientos naturales como una expresión de fracturas en la superficie en forma de alineamientos de topografía y drenaje, tendencias lineales en vegetación y truncamiento de las secuencias litológicas. Así, se parte de la necesidad de buscar correlaciones claras entre los lineamientos detectados y los resultados obtenidos con los índices de vegetación escogidos.

El índice NDVI es el más frecuentemente utilizado, debido a que una vegetación fotosintéticamente activa presenta, entre sus principales características espectrales, una intensa absorción de radiación en longitudes de onda del rojo visible, por clorofila, y una intensa reflexión de radiación del infrarrojo cercano debido a la estructura foliar (Souza Filho *et al.*, 2008).

Se tienen disponibles índices de vegetación (GNDVI, IPVI, IRED, MSAVI 2, NDI 45, MTCI, NDVI, PVI, PSSRA, REIP, RVI, SAVI, TSAVI, TNDVI, WDV), con el fin de obtener un parámetro de comparación eficiente entre los lineamientos obtenidos mediante la interpretación del modelo de sombras y el resultado de los mismos. Se procesaron los quince índices, de los cuales se obtuvo una mejor correlación con respecto al análisis de lineamientos naturales realizado con el modelo de sombras (tabla 1) en NDVI, GNDVI e IPVI (figura 7).

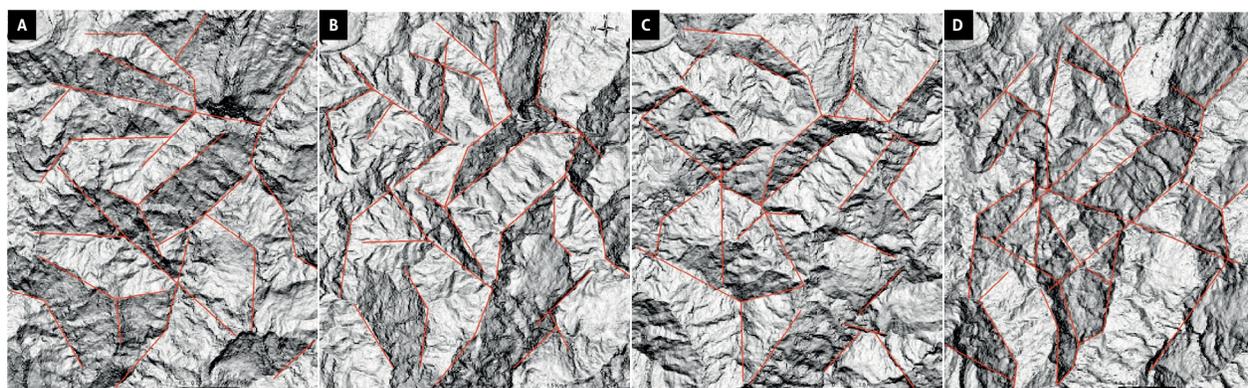


Figura 6. Análisis del modelo de sombras. A) Sombreado 0°/70°. B) Sombreado 90°/70°. C) Sombreado 180°/70°. D) Sombreado 270°/70°. Fuente: autor

Tabla 1. Características de los índices escogidos

Índice	Nombre	Características
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Explora la vitalidad de la vegetación en la superficie de la tierra, minimiza efectos topográficos. Los valores arrojados por dicho índice también oscilan entre -1 y 1. Valores entre -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo. Se obtiene mediante esta fórmula: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	El uso de banda espectral verde es más eficiente que la banda espectral roja para discriminar el nitrógeno. Los valores arrojados por dicho índice también oscilan entre -1 y 1. Valores entre -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo. Se obtiene mediante esta fórmula: $GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)$
IPVI	Índice de vegetación porcentual infrarrojo	Elimina la extrañeza conceptual de los valores negativos de los índices de vegetación. Por ello es funcionalmente equivalente al NDVI, pero solamente en el rango de valores entre 0 y 1. Se calcula con esta fórmula: $IPVI = \frac{1}{2} * (NDVI + 1)$

Fuente: autor

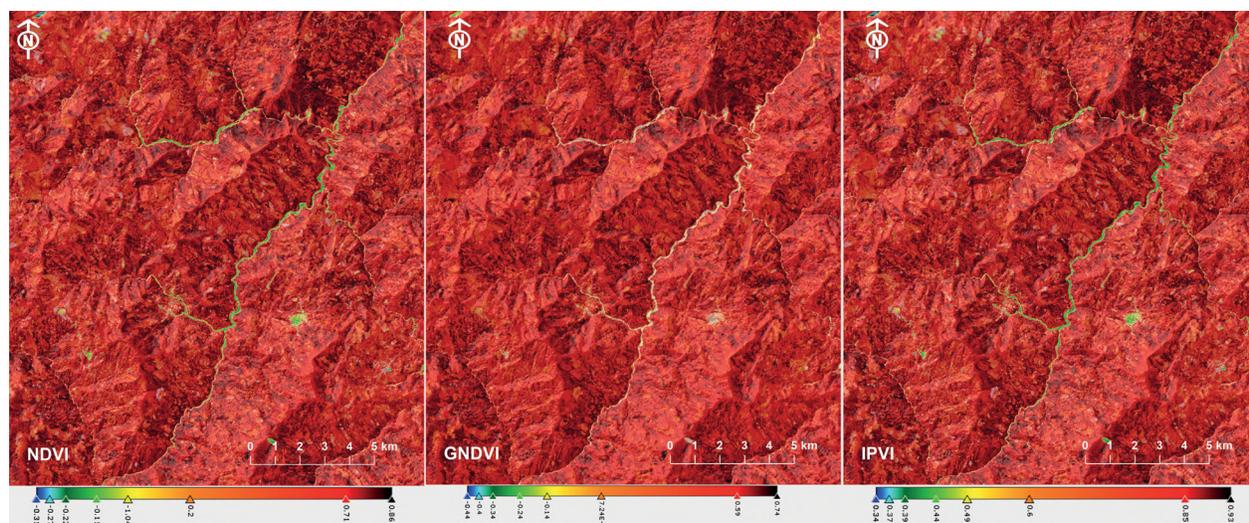


Figura 7. Resultados del cálculo de índices de vegetación NDVI, GNDVI y IPVI. Fuente: autor

Para la interpretación se parte de la comparación de la respuesta espectral de puntos conocidos (Prol y Ruiz, 1995). La zona con vegetación sana, en verde, corresponde al comportamiento teórico esperado. Por su parte, la vegetación estresada, azul, se tomó en la zona de la mina de Muzo, y se observa un comportamiento similar al teórico esperado. De igual manera, se obtuvo un espectro de nubes, concreto (zona urbana), tanto del casco urbano de Muzo como de Quípama, con el fin de diferenciarlas efectivamente en el momento del análisis final. Este proceso es fundamental, en la medida en que posibilita encontrar rasgos comunes en las zonas ya conocidas de explotación esmeraldífera, por lo cual pueden ser consideradas un patrón que puede tenerse en cuenta en la posterior elección de las zonas de interés (figura 8).

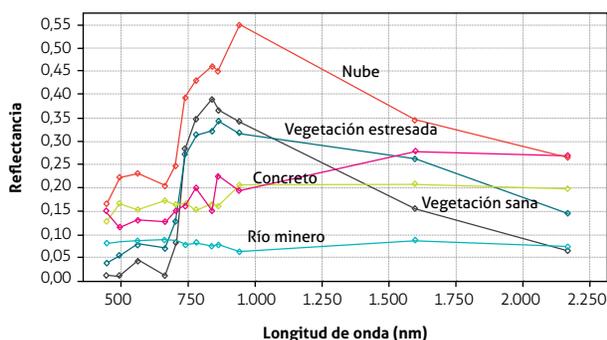


Figura 8. Patronaje de las firmas espectrales de los diferentes materiales con respecto a la vegetación.

Fuente: autor

Teniendo en cuenta este análisis comparativo se seleccionaron líneas a las que se les realizó el análisis espectral independiente, desde el centro de la zona albitizada hacia el exterior (figura 9). La elección de un análisis espectral bidireccional desde un centro, en la mina de Muzo, se basa en la hipótesis de que las mayores concentraciones de elementos están hacia el centro de la mineralización. Para el caso de Coscuéz, se plantea únicamente la dirección E-W, en razón de las características estructurales del área. Para la mina La Pita se plantean dos direcciones perpendiculares, evitando la zona de influencia de la falla del río Minero y el posible sesgo de mineralizaciones producidas por este rasgo estructural.

El análisis posterior de respuestas espectrales de las zonas alteradas parte de la elección de píxeles en dirección centro hacia el exterior que permitan identificar la

respuesta de la vegetación a la alteración y tener un panorama completo desde el centro del sector patrón y de la zona elegida.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los índices de vegetación son una herramienta eficaz para la interpretación de imágenes satelitales de zonas con una cobertura vegetal densa, ya que es posible diferenciar áreas con una vegetación estresada como respuesta a las condiciones específicas del suelo. La presencia de las zonas albitizadas se interpretó como una respuesta del estado de la vegetación y la presencia de oligoelementos que modifiquen la físico-química del suelo. Se analizaron con base en la banda 8 (842 nm) y la banda 4 (665 nm) de la imagen Sentinel-2 seleccionada.

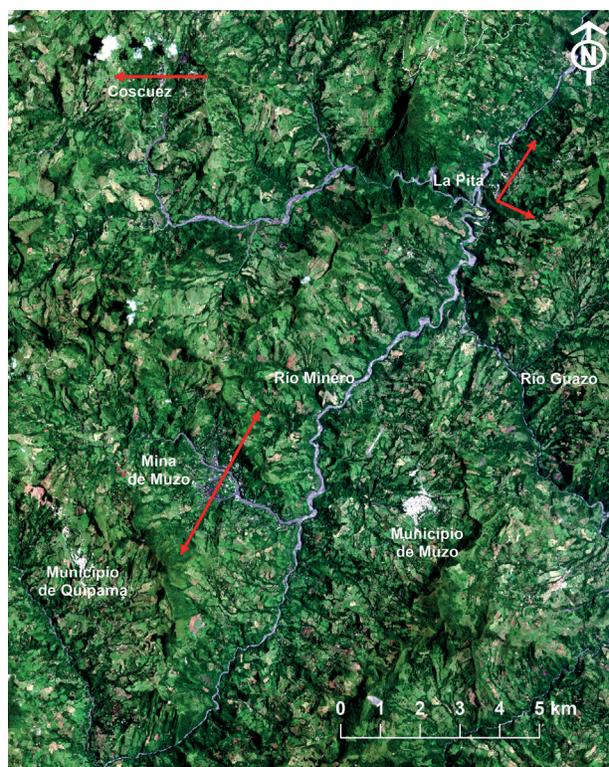


Figura 9. Líneas de evaluación de los índices espectrales seleccionados.

Fuente: autor

El patrón de interpretación se llevó a cabo en las tres mineralizaciones conocidas y que han sido históricamente productivas: mina de Muzo, mina de Coscuéz y mina La Pita. Existen varias zonas en las que se puede realizar un análisis espectral siguiendo la misma metodología

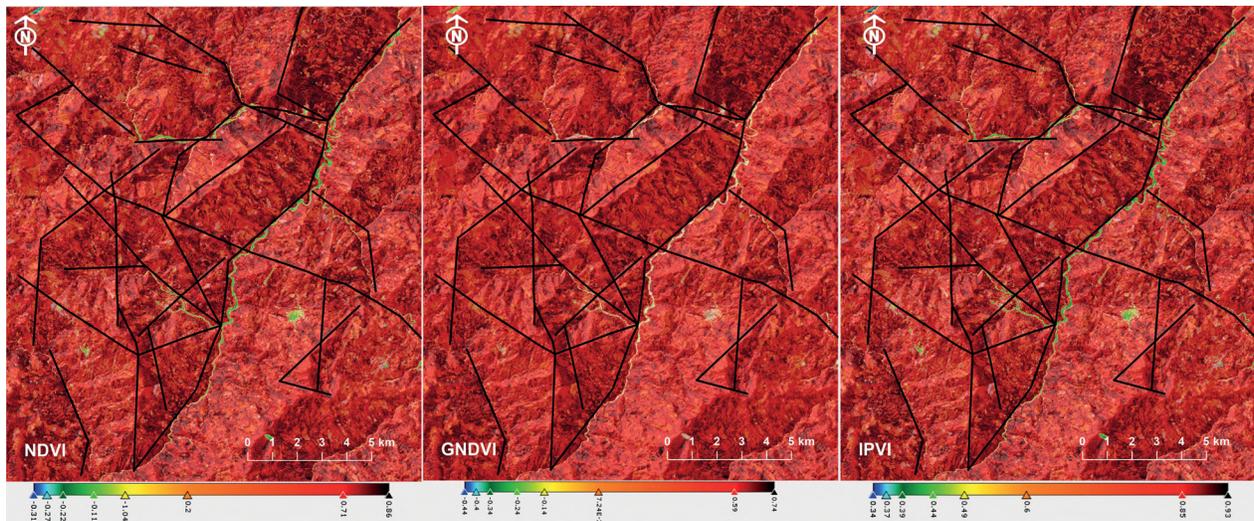


Figura 10. Análisis de lineamientos naturales resultantes cruzados correspondientes a cada uno de los índices de vegetación elegidos.

Fuente: autor

planteada. Se escogió la zona más al este de la mina La Pita y al suroeste de la mina de Coscuez, por ser la que mejor coincide con los lineamientos interpretados a partir del modelo de sombras (figura 10) y por presentar mayor anomalía en los tres índices seleccionados (figura 11).

La zona a la que se le realizó el análisis espectral individual de corroboración está situada en dirección $N45^{\circ}W$, entre la mina de La Pita y la mina de Coscuez.

En ella confluye la mayoría de lineamientos naturales identificados en una zona cuyo índice NDVI y GNDVI está en el rango 0 a 0,3 (patronado como *zona alterada*), y cuyos valores en el índice IPVI estaban en el rango 0 a 0,35 (zona alterada).

La similitud obtenida en los resultados de los tres índices puede simplificar el análisis, y el índice NDVI puede utilizarse en posteriores exploraciones.

La zona de la mina de Muzo muestra un muy alto nivel de estrés hacia el interior de la alteración, y presenta menos estrés a medida que se separa del centro de la zona albitizada, nivel determinado por el comportamiento del NIR decreciente hacia la zona central y creciente hacia longitudes de onda más largas (figura 12). Esto puede indicar una forma concéntrica en la zona de alteración, a partir de sitios más altos en concentración de elementos, producto del metasomatismo y una dispersión radial desde este foco.

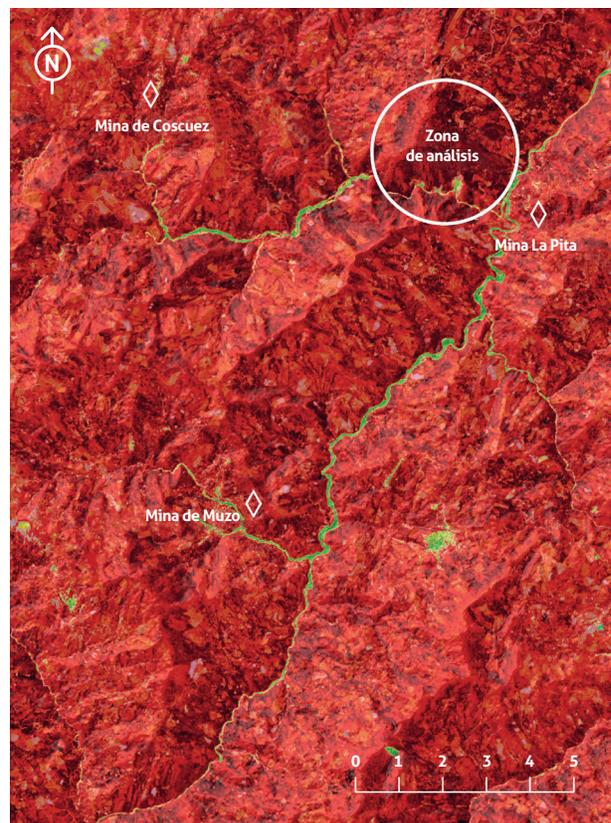


Figura 11. Selección de la zona que será evaluada por análisis espectrales.

Fuente: autor

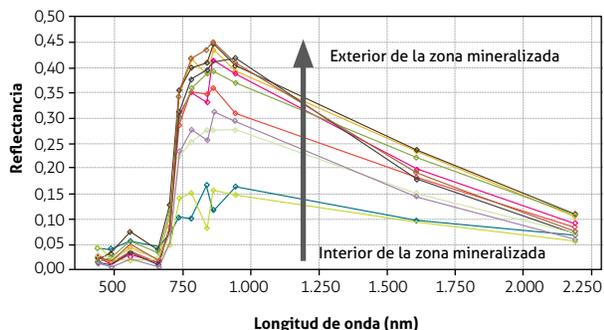


Figura 12. Análisis espectral de la línea de la mina de Muzo
Fuente: autor

La zona de Coscuez presenta un comportamiento similar al de la mina de Muzo, aunque la zona mineralizada podría ser de menor extensión o tener unos niveles de Na menores que la zona de Muzo (figura 13). Si bien se encuentran diferencias en los valores absolutos registrados, el comportamiento del NIR y del rojo es similar, y el estrés en la vegetación tiene parecidas características. El punto Coscuez 3 tiene un comportamiento anómalo en vegetación y se asimila más al tabulado como zona urbana, es decir, pudo haber sido tomado en los campamentos o la zona urbanizada de la vereda.

En la zona de la mina La Pita se tomaron 12 puntos de análisis, ya que es una mina más reciente que Muzo y Coscuez, y por ende, menos estudiada y explorada. Tiene una mayor influencia tectónica por encontrarse a poca distancia de la falla del río Minero, de orden principal, y puede controlar más la mineralización. El comportamiento encontrado se asemeja a los datos arrojados por los dos anteriores análisis (figura 14). Se optó por tomar dos direcciones: una hacia el este, en la misma dirección de los túneles actuales, y otra en dirección noreste, de forma aleatoria, pero alejándose de la falla, con la intención de eliminar el ruido que pudiese generar la falla, por facilitar el ascenso de fluidos hidrotermales. Las características de la vegetación son similares a las anteriores, con una disminución del estrés vegetal hacia la zona exterior de la mineralización.

Finalmente, y tomando como base la mayor correlación existente entre los resultados obtenidos en los trece índices de vegetación, y en particular los obtenidos con el NDVI, el GNDVI y el IPVI, se seleccionó el área de interés. De igual modo, se trazó una línea de la que se obtuvieron las firmas espectrales de los puntos, cuyo resulta-

do fue similar en las líneas patrón (figura 15). La zona de transición NIR/RED es anómala en aquellos píxeles cercanos a la zona de lineamiento, y a medida que se separa de la misma, la vegetación presenta una respuesta menos estresada. La aureola de afectación de la vegetación es extensa y puede ser catalogada como una zona de muy alto interés para la exploración detallada de esmeraldas en este sector del occidente de Boyacá.

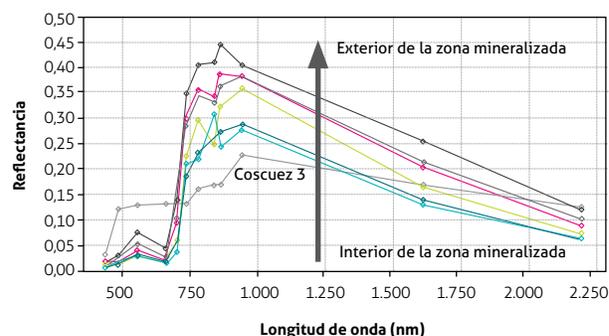


Figura 13. Análisis espectral de la línea de la mina de Coscuez.
Fuente: autor

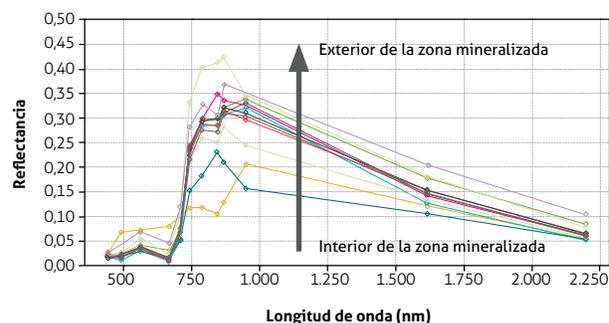


Figura 14. Análisis espectral de las líneas de la mina La Pita
Fuente: autor

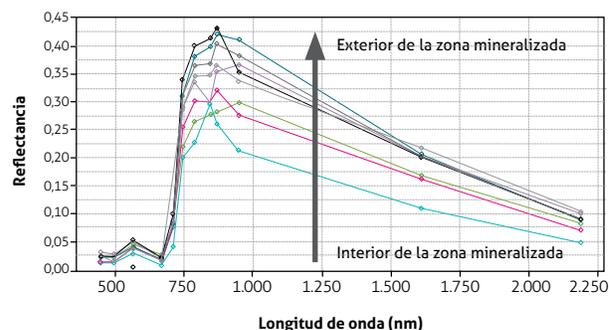


Figura 15. Análisis espectral de las líneas de la zona de interés
Fuente: autor

4. CONCLUSIONES

El uso de la metodología de interpretación del modelo de sombras con diferentes ángulos de origen de luminosidad y alto grado de inclinación permitió hacer una evaluación completa de los lineamientos naturales del terreno, como técnica de bajo costo y gran cubrimiento en áreas de cobertura vegetal densa.

Se establecieron lineamientos naturales coincidentes en todas las proyecciones de fuente luminosa, que en muchos casos coinciden con estructuras conocidas, como la falla del río Minero y pliegues cartografiados.

Se encontró que los índices NDVI, IPVI y GNDVI mostraron una mayor correlación entre sus valores patronados como *zonas de alteración* y los lineamientos naturales determinados con el modelo de sombras.

En las zonas mina de Muzo, mina de Coscuez y mina La Pita, las firmas espectrales obtenidas muestran un comportamiento de aureola, en el que las anomalías geobotánicas están concentradas hacia el centro, y se normalizan hacia el exterior, lo que permitió determinar un patrón efectivo para la zonificación de áreas no exploradas.

El análisis espectral de las zonas en explotación y el realizado en el área de mayor correlación entre índice vegetal y lineamiento natural arrojó una aureola de estrés concéntrica de la vegetación en todos los casos estudiados, lo que corrobora una relación directa entre la albitización presente en las zonas mineralizadas y la reflectancia de la vegetación.

La metodología desarrollada muestra que es posible identificar zonas de interés en la exploración de esmeraldas mediante la aplicación de técnicas de análisis de anomalías geobotánicas, por medio de índices vegetales y el análisis espectral con software de bajo costo.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su más profundo agradecimiento al geólogo Hans Eduardo Morales Böpp y a la geógrafa Milagro Caraballo Pérez, por sus invaluable aportes y constante asistencia intelectual y técnica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biologydictionary.net. (2017). Chlorophyll. Consultado el 8 de septiembre de 2017 en <https://biologydictionary.net/chlorophyll/>.
- Camacho Velasco, A., Vargas-García, C., Rojas-Morales, F., Castillo-Castelblanco, S. y Arguello-Fuentes, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24 (40), 17-29. Doi: <https://doi.org/10.19053/01211129.3845>.
- Crosta, A. (1989). Enhancement of Landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW minais Gerrain. *Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote sensing for exploration geology Calgary*. Calgary.
- European Spatial Agency (2017). Consultado el 26 de septiembre de 2017 en <http://www.esa.int/ESA>.
- Geoportal IDEAM (s. f.). Consultado el 27 de septiembre de 2017 en <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe/data>.
- Heldt, H. W. (1997). *Plant biochemistry and molecular biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Mendoza Parada, J. (1996). Anotaciones geoquímicas para exploración de esmeraldas en la región Muzo-Coscuez con base en la relación Na/K y elementos traça. *Geología Colombiana*, 21, 89-98.
- Milgrom, L. R. (1997). *The colours of life: An introduction to the chemistry of porphyrins and related compounds*. Oxford: Oxford University Press.
- Prieto, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D. y Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1), 19-44.
- Prol Ledesma, R. M. y Ruiz-Armenta, J. R. (1995). Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física de la Tierra*, 7, 105-137.
- Ross, J. (1981). *The radiation regime and architecture of plants stands*. Londres: Springer. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8647-3>.
- Sahuquillo, A., Rigol, A. y Rauret, G. (2003). Overview of the use of leaching extraction tests for risk assessment

- of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 22 (3), 152-159. Doi: [http://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00303-0](http://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00303-0).
- Singer, M. (2015). Photophosphorylation: The light reactions in photosynthesis. *OpenStax CNX*. Consultado en <https://cnx.org/contents/-CmzvUct@12/The-Light-Dependent-Reactions-of-Photosynthesis>.
- Souza Filho, C., Augusto, V., Oliveira, W. J. y Lammoglia, T. (2008). Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (1, sup. 2), 228-243.
- Towers, P. C. y von Martini, A. (2002). *Conceptos iniciales sobre teledetección y su aplicación al agro*. Buenos Aires: AgriSat.
- Ujueta, G. (1992). Lineamientos río Ariari, Bogotá y Gachalá, en los departamentos de Cundinamarca y Meta, Colombia. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 18 (70), 345-358.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (2014). *Plan Nacional de Desarrollo Minero*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Van der Meer, F. (2006). The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (1), 3-17. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.06.001>.
- Xue, J. y Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.



Notas sobre el contexto tectonoestratigráfico de formación de las esmeraldas colombianas

Notes on the tectonostratigraphic context of formation of the Colombian emeralds

Roberto Terraza Melo¹

* Email de correspondencia: rterraza@sgc.gov.co

Recibido: 21 de mayo de 2018

Aceptado: 25 de febrero de 2019

Publicado en línea: 15 de julio de 2019

Doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.486

Citación: Terraza M., R. (2019). Notas sobre el contexto tectonoestratigráfico de formación de las esmeraldas colombianas. *Boletín Geológico*, 45, 37-48. Doi: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.486>

RESUMEN

Las exploraciones geológicas realizadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) entre los años 2005 y 2008 muestran que las zonas potenciales para exploración y explotación de esmeraldas en el cinturón esmeraldífero occidental (CEOC) están estrechamente relacionadas a las formaciones geológicas Muzo (edad Hauteriviano-Barremiano) y Rosa Blanca (edad Valanginiano), y en el cinturón esmeraldífero oriental (CEOR), a las formaciones Santa Rosa y Chivor, de edad Berriasiano. La mineralización se encuentra asociada a diversas estructuras tectónicas de escala mesoscópica con alteraciones hidrotermales.

Palabras clave: esmeralda, estratigrafía, tectónica, cordillera Oriental, Colombia.

ABSTRACT

The geological explorations carried out by the Colombian Geological Survey (SGC, in Spanish) between 2005 and 2008 show that the potential areas for exploration and exploitation of emeralds in the Western Emerald Belt (CEOC, in Spanish) are closely related to the Muzo (Hauterivian-Barremian age) and Rosa Blanca (Valanginian age) geological formations, and in the Eastern Emerald Belt (CEOR, in Spanish), are associated to the Santa Rosa and Chivor formations (Berriasian age). Mineralization is associated with various mesoscopic tectonic structures with hydrothermal alteration.

Key words: Emerald, stratigraphy, tectonic, Cordillera Oriental, Colombia.

¹ Servicio Geológico Colombiano.

1. INTRODUCCIÓN

El antiguo Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC), adelantó entre los años 2005 y 2008 la exploración geológica de los cinturones esmeraldíferos de la cordillera Oriental de Colombia, con el propósito de descubrir nuevas áreas potenciales para su explotación. Los estudios geológicos se llevaron a cabo directamente por personal técnico del SGC o mediante convenios de cooperación técnico-científica con la Universidad Industrial de Santander (UIS), y además se contó con la participación de algunos consultores privados (Reyes *et al.*, 2006; Montoya, Terraza, Reyes, Moreno y Fuquen, 2008; Terraza, Montoya, Reyes, Moreno y Fuquen, 2008; Mantilla *et al.*, 2007, 2008; Ingeominas y Mora, 2005).

Se realizó cartografía geológica sistemática a escala 1:25.000, sustentada con bioestratigrafía y estratigrafía detalladas, lo cual permitió generar un nuevo contexto

estratigráfico y tectónico de los cinturones esmeraldíferos. A pesar de que ya ha transcurrido una década desde que el SGC oficializó dichos estudios, aún en publicaciones recientes hay un total desconocimiento de los mismos (p. e., Pignatelli *et al.*, 2015).

Con base en el nuevo conocimiento geológico generado en el marco de estas investigaciones, y apoyados por la información geológica disponible de trabajos anteriores, se propuso una serie de criterios geológicos que permitieron reconocer y delimitar nuevas áreas con potencial esmeraldífero, los cuales a su vez sirven para orientar los trabajos mineros relacionados con la exploración y explotación de estos depósitos (Mantilla *et al.*, 2007; Terraza y Montoya, 2011).

El objetivo de estas notas es presentar de manera sencilla y resumida el contexto tectonoestratigráfico de formación de las esmeraldas colombianas localizadas en los denominados *cinturones esmeraldíferos oriental y occidental* (figura 1).

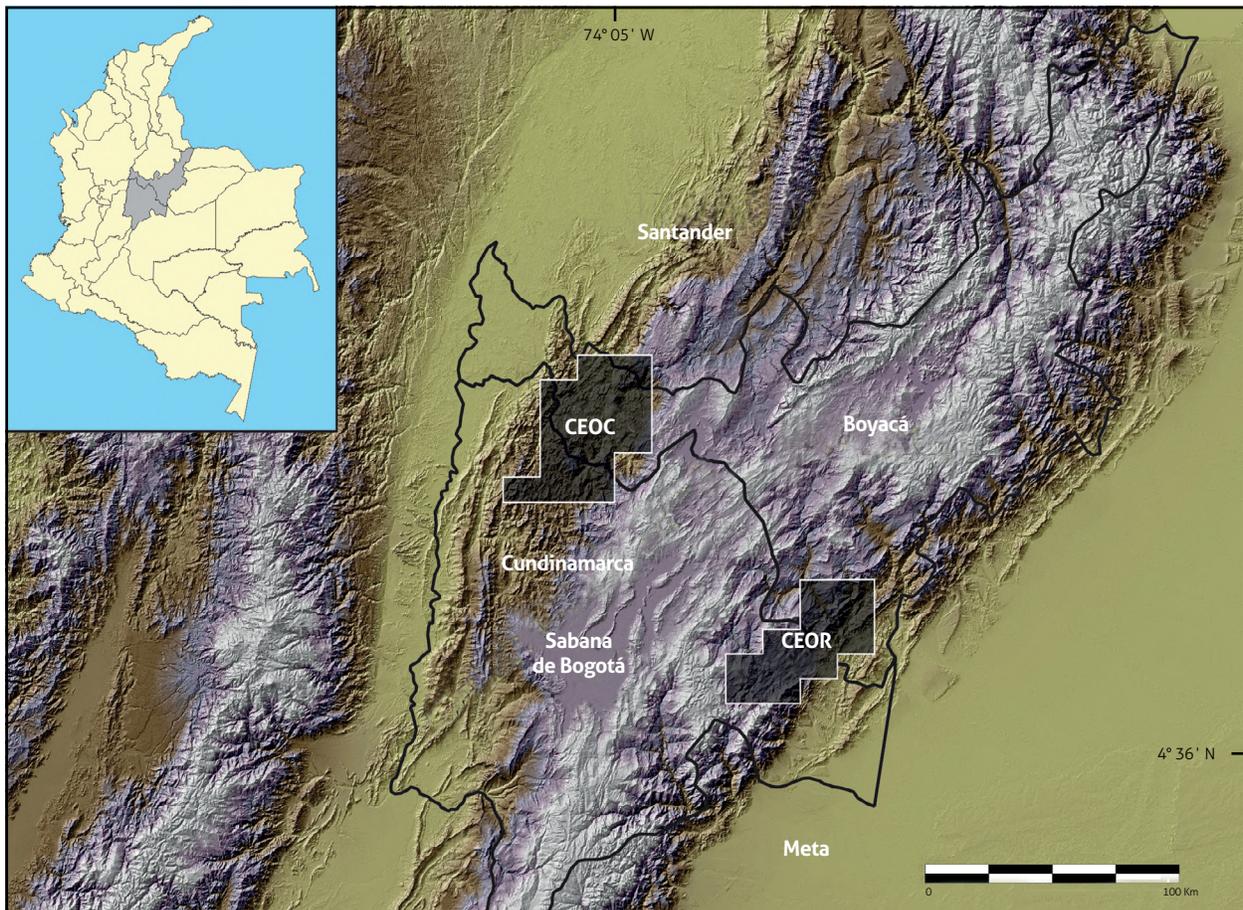


Figura 1. Localización geográfica de los cinturones esmeraldíferos de la cordillera Oriental de Colombia. CEOC = cinturón esmeraldífero occidental, CEOR = cinturón esmeraldífero oriental. Fuente: Terraza y Montoya (2011)

2. GENERALIDADES SOBRE LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS

Las esmeraldas son piedras preciosas que corresponden a una variedad del mineral de color verde conocida como *berilo*, que pertenece a una clase de minerales denominada *ciclosilicatos*. Su conspicuo color verde se debe a impurezas en su estructura cristalina debidas a la presencia de pequeñas cantidades de elementos químicos como el cromo y el vanadio; su dureza oscila entre 7,5 y 8 en la escala de Mohs, que va del 1 al 10, donde 1 es el mineral más blando (talco) y 10 el mineral más duro (diamante).

La explotación de esmeraldas en Colombia data de la época precolombina, cuando los muiscas las extraían en el territorio que hoy ocupa el pueblo de Somondoco, para intercambiarlas comercialmente con otros pueblos indígenas. Los españoles continuaron con su explotación en la época colonial, hasta que a principios del siglo XX el Estado colombiano asumió su explotación.

Existen varios modelos geológicos que explican el origen de las esmeraldas que se encuentran en diferentes regiones del mundo, como la actividad magmática, el metamorfismo y los procesos hidrotermales; no obstante, las esmeraldas colombianas son únicas en el mundo por su origen asociado a rocas sedimentarias, que requiere la interacción de varios procesos geológicos, junto a condiciones físico-químicas específicas, sin las cuales ellas no podrían existir.

3. CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO DE LOS DEPÓSITOS

En Colombia, una zona depocentral relativamente amplia del Cretácico Inferior (abarca las áreas OSsh, SFOS y SFMS alrededor de Bogotá; véase la figura 2) debió jugar un papel muy importante en la circunscripción geográfica de los yacimientos de esmeralda a zonas específicas del país, ya que solo allí se dieron todas las condiciones físico-químicas y los procesos geológicos que posibilitaron su generación. En la actualidad aún se desconocen los límites geográficos exactos de esa área depocentral; sin embargo, con base en los datos geológicos recopilados por el SGC y la UIS durante la exploración geológica realizada en los cinturones esmeraldíferos, se cree

que el límite norte se localiza cerca al municipio de Sucre (departamento de Santander), y el límite sur aproximadamente en el municipio de La Palma (departamento de Cundinamarca); de occidente a oriente, esa zona estaría delimitada por los municipios de Puerto Romero y Santa María, en el departamento de Boyacá.

Estos condicionamientos geológicos de las esmeraldas hacen que sus yacimientos se localicen en dos áreas particulares de la cordillera Oriental: una ubicada sobre su borde occidental, en la región de Muzo, Quípama, La Palma, La Victoria, Otanche y San Pablo de Borbur, denominada *cinturón esmeraldífero occidental* (CEOC), y la otra, sobre su costado oriental, en los municipios de Gachalá, Ubalá, Chivor, Macanal y Santa María, denominada *cinturón esmeraldífero oriental* (CEOR). Los dos cinturones forman parte de la primitiva área depocentral del Cretácico Inferior. El nombre de *cinturón* se debe a que las formaciones geológicas que contienen las mineralizaciones de esmeralda configuran geográficamente regiones alargadas en sentido suroccidente-nororiental, de forma similar a un cinturón (véase la figura 1).

Las zonas potenciales para exploración y explotación de esmeraldas en el CEOC se localizan en las formaciones geológicas Muzo (edad Hauteriviano-Barremiano) y Rosa Blanca (edad Valanginiano), y en el CEOR, en las formaciones Santa Rosa y Chivor, de edad Berriasiano. En general, las facies sedimentarias son finogranulares y ricas en materia orgánica, principalmente calcáreas, en el caso de las formaciones Muzo y Rosa Blanca, siliciclásticas en el caso de la Formación Santa Rosa, y calcárea-evaporítica-siliciclástica en el caso de la Formación Chivor. Las rocas corresponden principalmente a arcillolitas y lodolitas calcáreas y micritas de coloración negra muy ricas en materia orgánica. En el caso particular del CEOR, es evidente una estrecha relación entre las mineralizaciones de esmeralda con niveles calcáreo-evaporíticos intercalados, tanto en la Formación Chivor como en la Formación Santa Rosa.

Los cinturones esmeraldíferos están separados entre sí por unos 110 km, y hasta la fecha, en la zona de separación no se han encontrado yacimientos de esmeraldas. En las figuras 3 y 4 se ilustran las sucesiones estratigráficas de cada cinturón esmeraldífero.

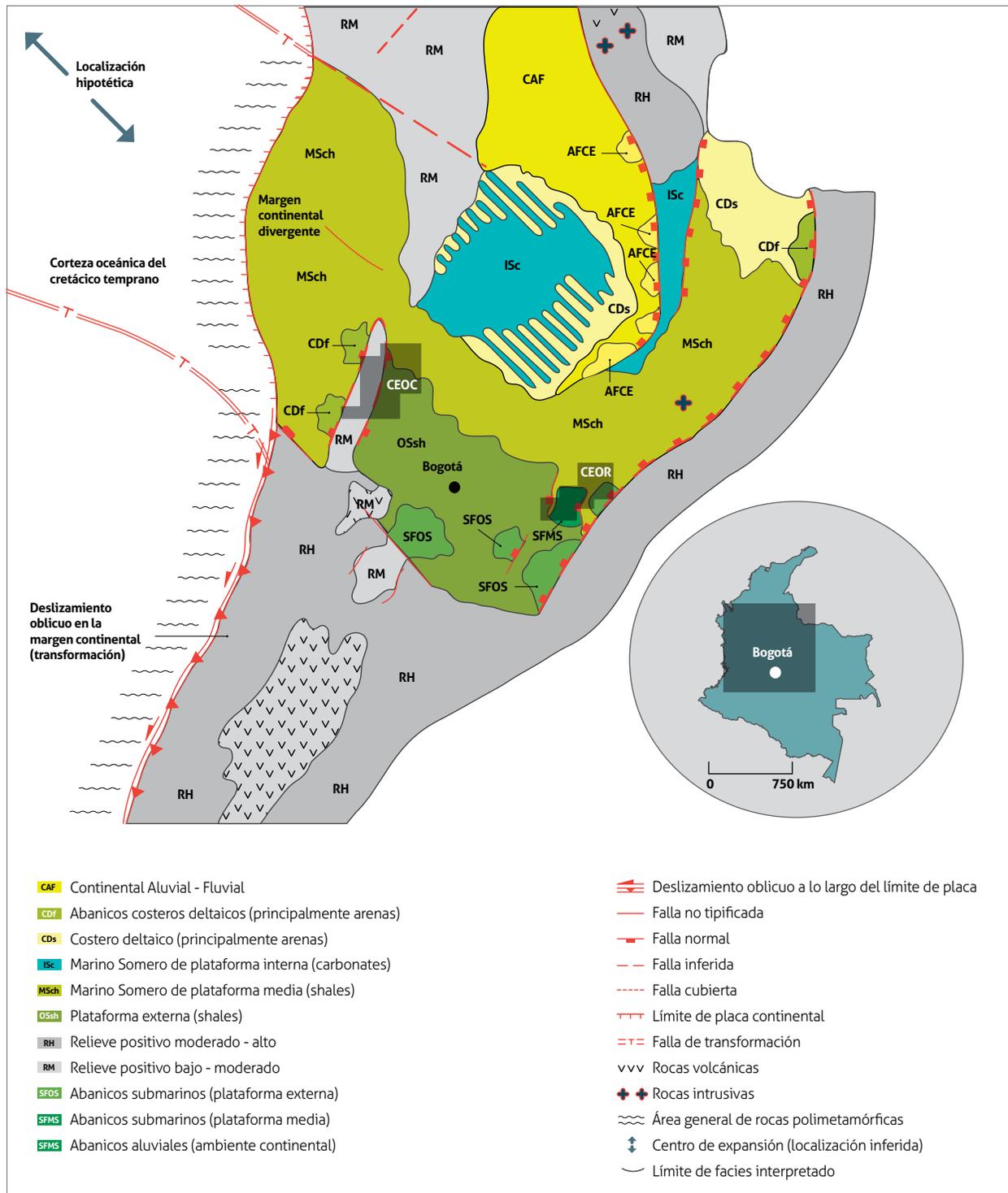


Figura 2. Distribución de facies sedimentarias y armazón tectónico de Colombia a lo largo del Fanerozoico durante el intervalo de tiempo Berriasiano-Valanginiano. CEOC = cinturón esmeraldífero occidental; CEOR = cinturón esmeraldífero oriental.

Fuente: Etayo, Cediell y Cáceres (1997 y 2003)

4. CONTEXTO TECTÓNICO REGIONAL DE LOS DEPÓSITOS

El CEOC se encuentra fuertemente plegado y fallado. El régimen tectónico es compresivo y transpresivo. Este último se manifiesta por la presencia de fallas inversas con salto transcurrente. El plegamiento es notorio a escala regional y local. Regionalmente se presentan pliegues sinclinales abiertos y frecuentemente con doble inmersión, tanto al NE como al S; a escala de afloramiento hay pliegues anticlinales métricos (de poca longitud), generalmente asimétricos y apretados. Los planos de falla en las zonas con mineralización de esmeralda por lo regular

no están mineralizados, y las brechas que normalmente se reconocen en las minas son de origen hidrotermal; no obstante, se pueden confundir con brechas de origen tectónico cuando algunas de las fallas afectan la zona mineralizada. Por los análisis y observaciones de campo realizados, se infiere que las fallas principales son posteriores a las mineralizaciones de esmeralda. La textura finogranular de la mayoría de las unidades litoestratigráficas influye en la deformación de las rocas debido a su comportamiento dúctil, que genera foliación intensa, fallas con poca expresión geomorfológica y, en algunas zonas, replegamiento intenso.

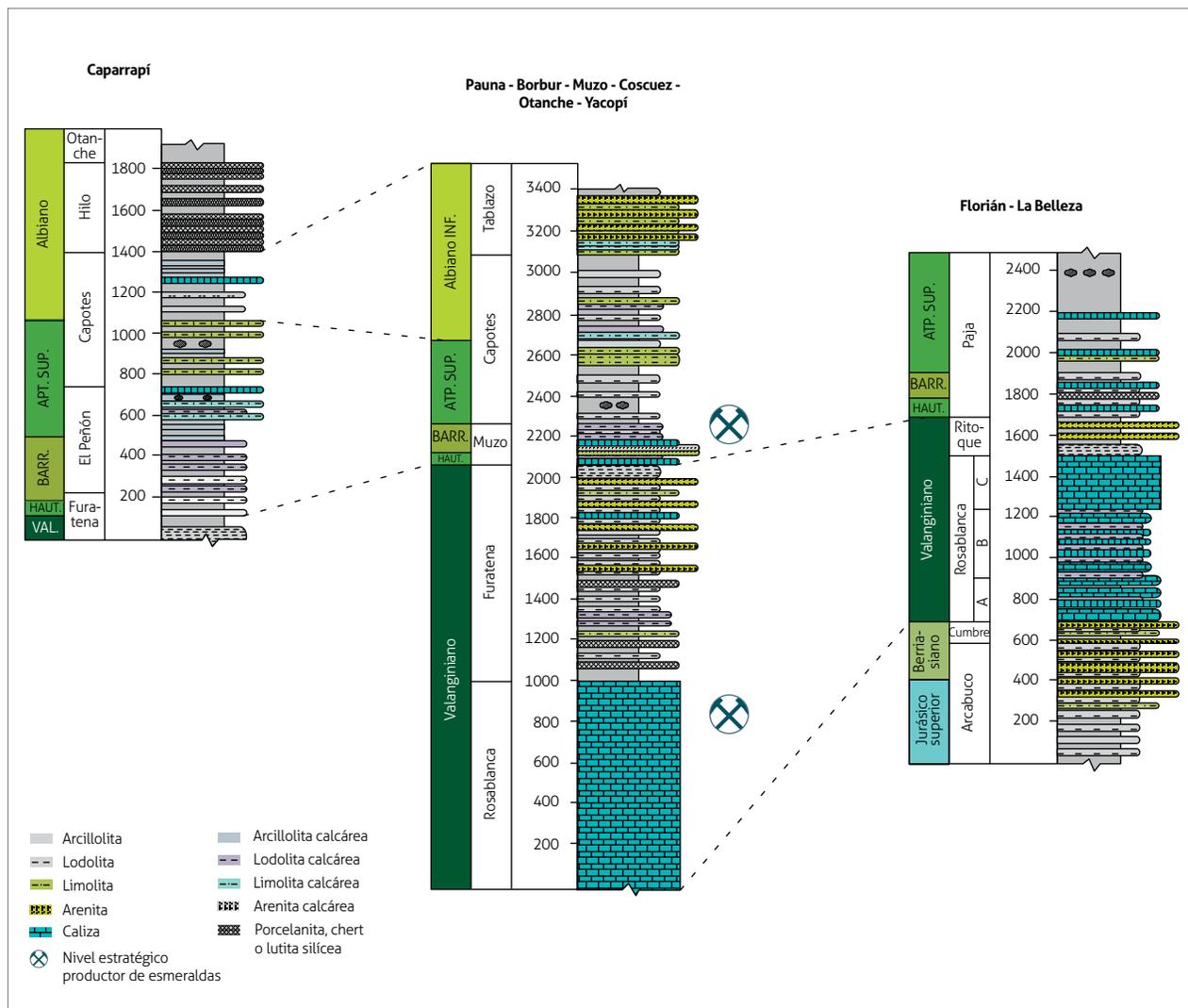


Figura 3. Litoestratigrafía del Cretácico Inferior en el CEOC.

Fuente: Terraza, Montoya y Reyes (2007)

En el CEOR, el macizo de Quetame atraviesa el cinturón en dirección NE, y en él afloran rocas del Grupo Farallones que conforman el basamento paleozoico sobre el cual se acumularon las rocas del Cretácico. Las rocas cretácicas bordean el macizo, y sus características

estructurales dependen de su ubicación con respecto a este basamento paleozoico. Al oriente, las fallas son estructuras regionales, orientadas en sentido SW-NE, que se extienden por decenas de kilómetros y corresponden a fallas inversas con vergencia oriental, que hacen parte

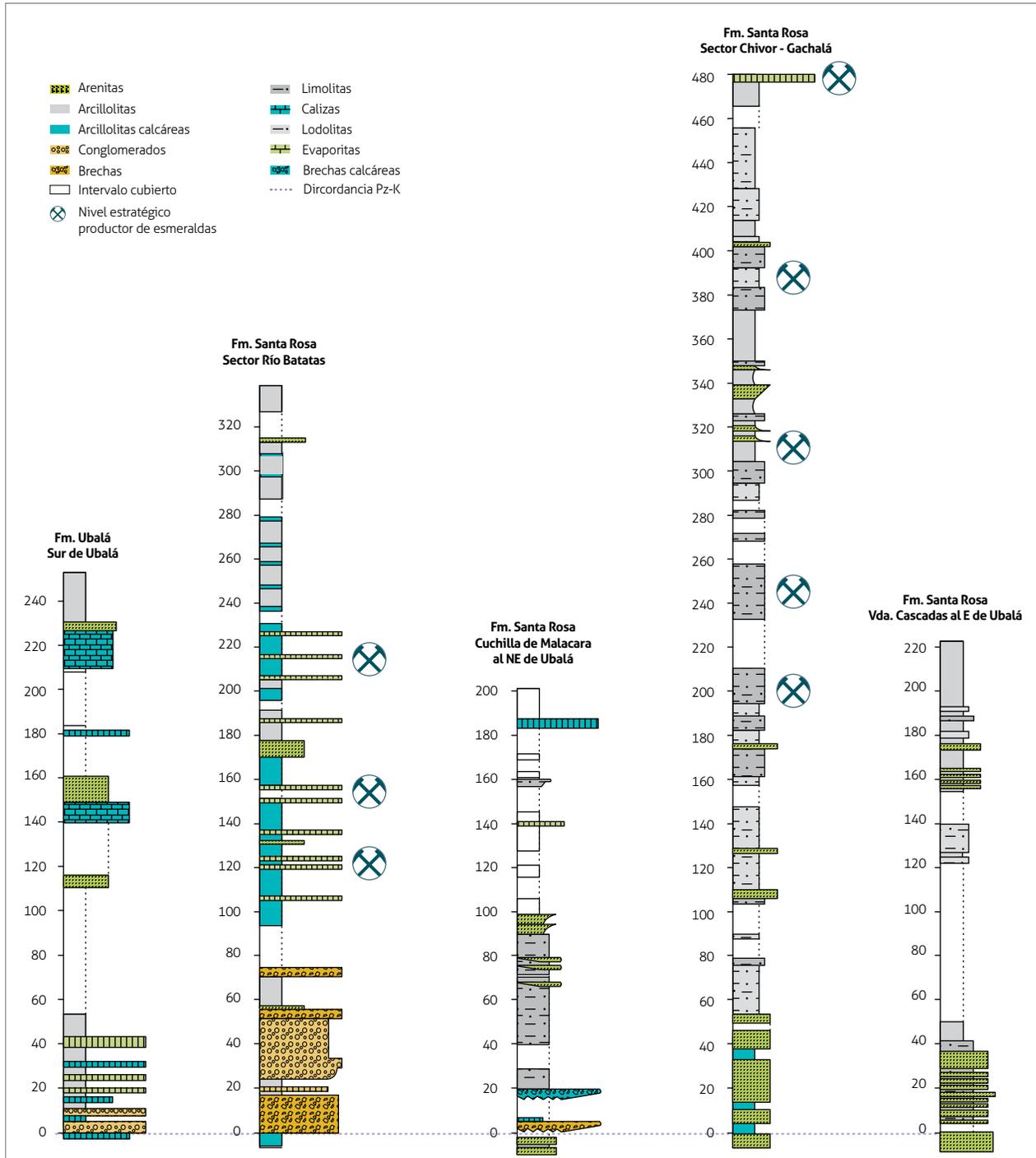


Figura 4. Litoestratigrafía del Cretácico basal en el CEOR.
Fuente: Terraza y Montoya (2011)

del sistema de fallas del piedemonte llanero. Al occidente se presentan dos tipos de fallas: a) fallas de menor longitud con vergencia al oriente y dirección NE, y que son las responsables del cabalgamiento de rocas paleozoicas sobre cretácicas, y b) otras fallas más regionales, de salto combinado, tanto inverso como transcurrente (dextral o sinistral), con ejes de pliegues oblicuos a su trazo y que repiten secuencia en aquellos sitios en que el segmento de la falla es transpresivo. El plegamiento en las rocas del Cretácico, en general, no es complejo, y se desarrollan pliegues anticlinales y sinclinales amplios y extensos con orientación NE-SW, así como también numerosos pliegues de menor longitud y amplitud. De igual forma, en el CEOR las fallas principales son posteriores a las mineralizaciones de esmeralda.

5. RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ROCA CAJA Y LA MINERALIZACIÓN DE ESMERALDAS

Tanto la cartografía geológica regional como los estudios estratigráficos locales (Ingeominas y Mora, 2005; Reyes

et al., 2006; Terraza *et al.*, 2008; Montoya *et al.*, 2008) sugieren que las rocas encajantes de las mineralizaciones de esmeraldas se encuentran restringidas, por el contexto paleogeográfico, a ciertas unidades litoestratigráficas del Cretáceo Inferior, como ya se indicó (véanse las figuras 2, 3 y 4). La relación establecida con rocas de origen evaporítico (en el caso del CEOR) refuerza la conclusión de Giuliani *et al.* (1995) y Giuliani, Cheillettz, Rueda y France (1995) en cuanto a un origen a partir de salmueras evaporíticas de buena parte de los fluidos mineralizantes; no obstante, estas condiciones paleoambientales aún no se han podido establecer, en el caso del CEOC. Lo planteado anteriormente sugiere un origen de los fluidos mineralizantes en un sistema cerrado y autóctono, lo que implica migración de fluidos de cortas distancias.

Se plantea una sucesión de eventos tectónicos que dieron origen a las mineralizaciones de esmeraldas (figura 5), lo cual implica que las mineralizaciones están circunscritas a un proceso de plegamiento (Ingeominas y Mora, 2005).

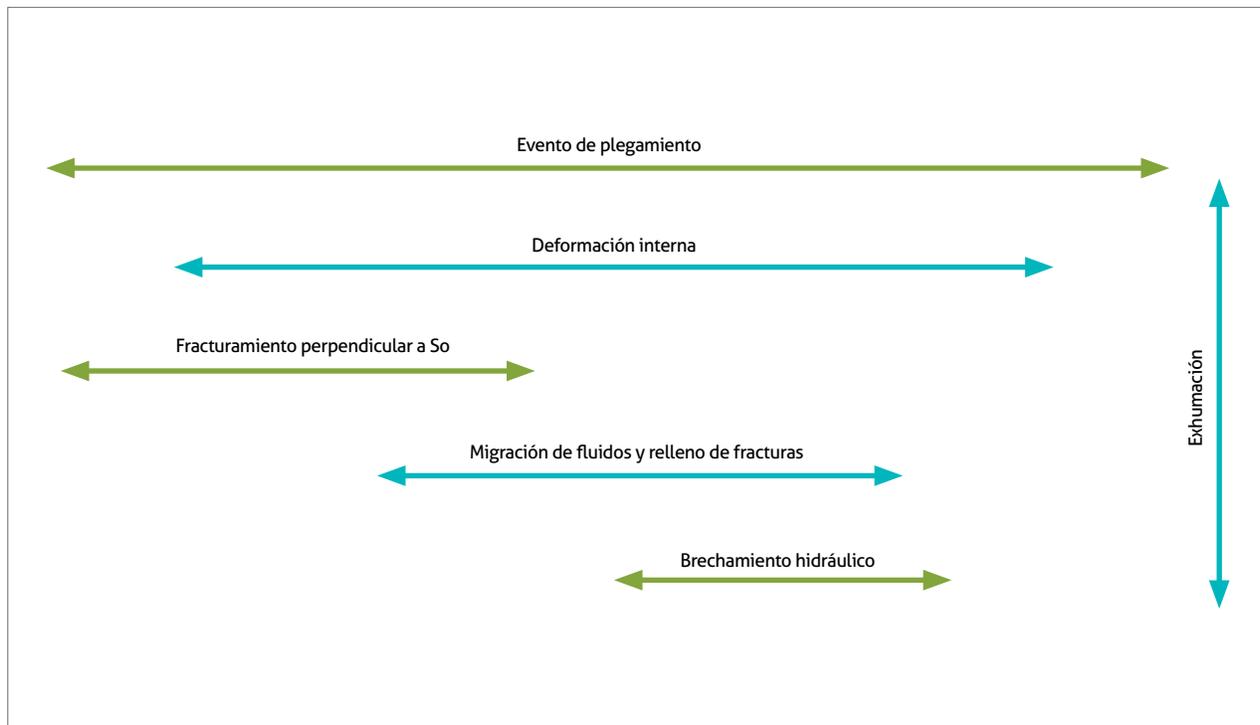


Figura 5. Sucesión de eventos tectónicos generadores de las esmeraldas.
Fuente: Ingeominas y Mora (2005)

En esta sucesión de eventos se identificaron los siguientes estadios comunes a ambos cinturones esmeraldíferos:

- » Fracturas conjugadas que forman ángulos agudos entre sí. Se originan en un estadio de preplegamiento durante el cual, si bien ya existía el régimen de esfuerzos que originó los pliegues, la flexión de las capas asociadas a los mismos aún no se había iniciado, o era de muy bajo ángulo.
- » Fracturas paralelas y perpendiculares al eje de pliegues. Se originan durante los estadios iniciales del plegamiento. Este juego de fracturas ortogonales y simétricas respecto al pliegue es un elemento común respecto a otros cinturones plegados y de cabalgamiento.
- » El hecho de que las fracturas estén o no mineralizadas depende directamente de las unidades que las contienen, entendiéndose en este caso por *mineralización* cualquier relleno de las fracturas, y no necesariamente la paragénesis de las esmeraldas. En este contexto, las unidades litológicas pelíticas no calcáreas serían las más inadecuadas para contener fracturas mineralizadas; por el contrario, las fisuras de las rocas de las unidades calcáreas serían las más propensas a rellenarse con los fluidos mineralizantes. Este hecho sugiere un régimen de migración de fluidos intraformacional y de cortas distancias en concordancia con lo dicho anteriormente. Por lo tanto, el fracturamiento inicial está relacionado con los estadios iniciales de la deformación tectónica. Dichos estadios iniciales también se asociarían, desde el principio, con una deformación interna penetrativa (foliación tectónica). Una vez estos procesos se inician, las evidencias indican que ante un aumento en la amplitud de los pliegues y de la presión de fluidos se produciría el relleno de las fracturas preexistentes. En este proceso de mineralización, las esmeraldas serían los minerales más internos dentro de un crecimiento sintaxial (es decir, crecen desde las paredes de las venas hacia el interior, algo opuesto a un crecimiento antitaxial, que ocurre desde el interior hacia las paredes).
- » En estadios posteriores de deformación, con amplificación aún mayor de los pliegues, las venas mineralizadas extensionales terminan pasivamente en posiciones dentro del pliegue, lo que implica que sufran acortamiento y plegamiento ptigmático. De esta manera, se produce el brechamiento hidráulico ante presión de fluidos finalmente máxima.
- » En esta sucesión de eventos, por lo tanto, las mineralizaciones están circunscritas a un proceso de plegamiento.
- » El fracturamiento, y sin duda alguna buena parte de las mineralizaciones que rellenan las fracturas, está totalmente ligado a fenómenos flexurales. Aún más, parece ser que ciertas mineralizaciones de calcita se asocian directamente a disolución por presión en las capas directamente adyacentes, donde se genera foliación tectónica y migración directa de fluidos hacia las fracturas circundantes. Sin embargo, no se puede descartar del todo un contexto en el que la mineralización específica de las esmeraldas se relacione con otros procesos, por ejemplo, migración de fluidos hidrotermales externos a la roca encajante. Pese a esto, sean cuales fueren esos procesos adicionales, no fueron anteriores ni posteriores a un proceso de plegamiento y deformación interna: fueron contemporáneos.
- » El fracturamiento hidráulico observado (p. e., zona mineralizada de Coscuez-CEOC y río Bata-tas-CEOR) sugiere que la migración de los fluidos se produjo, probablemente, de modo principal a través de los planos de estratificación. Se observó que las zonas de brechamiento hidráulico no son niveles estratiformes continuos, lo cual implica que dichas zonas no constituyeron vías importantes para la migración de los fluidos mineralizantes. Las fracturas perpendiculares a la estratificación tienen longitudes muy cortas para representar vías de migración representativas. Las zonas principales de falla permanecen como una hipótesis no demostrada; solo en algunos casos puntuales observados sirvieron como eventuales vías de migración de fluidos. En oposición a lo que argumentan Branquet, Laumonier, Cheilletz y Giuliani (1999), no se encontró evidencia alguna de que la migración de fluidos se haya dado principalmente a través de fallas de cabalgamiento. Los casos documentados son aislados y tampoco indican que las zonas de falla o los contactos mecánicos puedan llegar a ser sitios potenciales

de prospección de esmeraldas (la cercanía o lejanía de las minas de esmeraldas respecto a las fallas son casos más bien fortuitos). Tampoco se observaron casos suficientes como para generalizar sobre la presencia de despegues mineralizados, como lo asumen Cheilietz, Féraud, Giuliani y Rodríguez (1994).

- » Posteriormente, en etapas más avanzadas de la deformación, áreas como la zona mineralizada de Coscuez en el CEOC sufren un acortamiento aún mayor, probablemente contemporáneo con la fase de mayor exhumación, que bascula las capas a estados subverticales y probablemente rota localmente los ejes de pliegues a lo largo de ejes verticales. Las fracturas previamente formadas también son pasivamente basculadas en este proceso. Finalmente, también se observó que en general hay una superposición de deformación cataclástica tardía, que en ningún caso se observó mineralizada.

Las edades obtenidas por Cheilietz, Féraud, Giuliani y Rodríguez (1991) y Cheilietz *et al.* (1995), que oscilan entre 32 y 38 Ma en el caso del CEOC, y 62 a 68 Ma en el del CEOR, así como las de Romero, Schultz y Kawashita (2009), de 67 Ma en el caso de los depósitos del CEOC, y de 61 Ma en el del CEOR, concuerdan con estudios regionales (Van der Hammen, 1958; Gómez *et al.*, 2003; Restrepo, Colmenares, Higuera y Mayorga, 2004; Gómez, Jordan, Allmendiger y Cardozo, 2005; Cortés, Angelier y Colleta, 2005) que muestran evidencias de la presencia de deformación y plegamiento desde el Maastrichtiano-Paleoceno y durante el Eoceno. De igual forma, la edad $12,4 \pm 0,9$ Ma de las esmeraldas del CEOC (Mantilla *et al.*, 2007) es concordante con procesos de fuerte plegamiento, levantamiento e inicio de erosión en la cordillera Oriental durante el Mioceno Medio (Van der Hammen, 1958; Cooper *et al.*, 1995).

Los estudios de microsonda y de inclusiones fluidas de Cheilietz *et al.* (1994) sirvieron de base para sustentar la hipótesis de que las mineralizaciones se producen antes de los procesos mayores de exhumación de la cordillera Oriental, ya que el inicio de la exhumación puede ser un factor capaz de detener los procesos mineralizantes, dadas las condiciones de presión y temperatura propuestas por los citados investigadores.

Los mineros extraen las esmeraldas de las “estructuras hidrotermales”, que se originan cuando los fluidos mineralizantes transportan los elementos o sustancias que forman la esmeralda, y “penetran” en la roca sedimentaria sometida a deformación tectónica (plegamiento, deformación interna y fracturamiento), lo que hace que la roca se rompa, y en esas fracturas, debido a procesos de cristalización, se forman distintos minerales, incluida la esmeralda; estas estructuras se conocen como “venas”, “brechas hidráulicas” o “zonas o bandas albitizadas” (figura 6). Comúnmente, la esmeralda está acompañada de otros minerales que son típicos de los yacimientos esmeraldíferos, como la albita, la calcita, carbonatos de elementos de las tierras raras (como la parisita), fluorita, barita y algunos sulfuros (p. e., piritita y calcopiritita). Los mineros tradicionales, que normalmente no tienen el conocimiento geológico de los yacimientos, han explotado este recurso de manera empírica desde hace muchos años, porque aprendieron a reconocer tanto los minerales asociados a la esmeralda como las diferentes estructuras hidrotermales presentes en la roca. Su extracción generalmente es subterránea, mediante la excavación de túneles con ramales en distintas direcciones, literalmente *persiguiendo* las estructuras hidrotermales mencionadas, aunque en otras minas su explotación puede ser superficial.

Como se puede ver, la geología de los yacimientos de esmeraldas en Colombia es bastante compleja. La explotación de cualquier recurso mineral (hidrocarburos, agua subterránea, carbón, esmeraldas u otro mineral) implica un conocimiento geológico detallado del territorio, tanto a nivel de superficie como del subsuelo, que se logra mediante diversas disciplinas de las geociencias, como la cartografía geológica, estratigrafía, geoquímica, geofísica, estudios satelitales, paleontología, geocronología y otras más. La cantidad de recurso mineral disponible dependerá del grado de conocimiento geológico que se tenga y del avance tecnológico de la minería, pues no es lo mismo extraerlo con métodos de hace quinientos años, cuando nuestros ancestros extraían las esmeraldas de forma rudimentaria sin ningún conocimiento geológico, a como lo hacemos hoy en día. No obstante, aún nos falta mucho conocimiento sobre la geología de nuestros yacimientos esmeraldíferos.

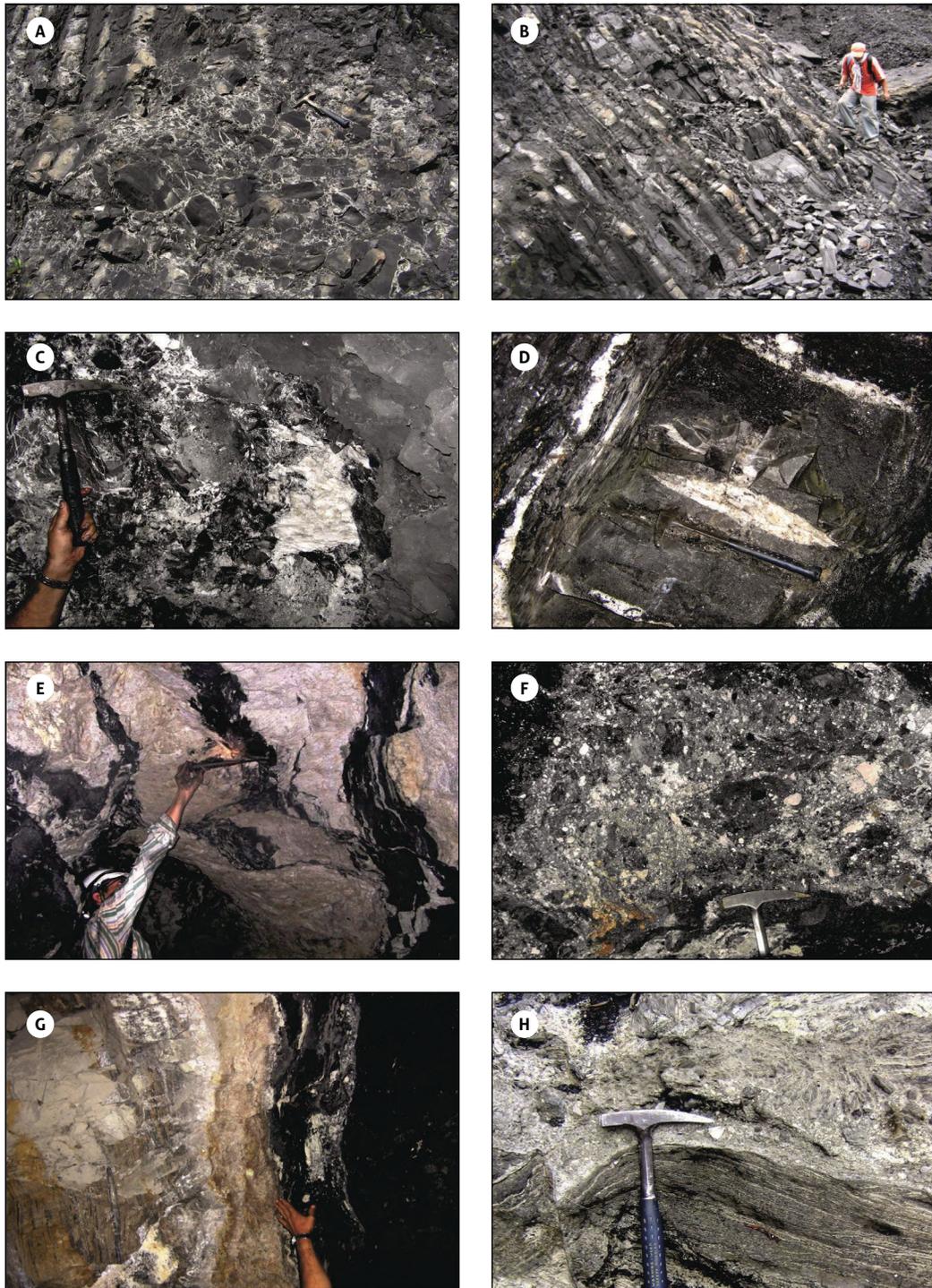


Figura 6. Estructuras hidrotermales típicas de las zonas con mineralización de esmeraldas en Colombia. A) Brecha hidráulica de fragmentos de arcillolita calcárea carbonosa cementados por calcita. B) Venas de calcita paralelas a la estratificación. C) Lodolita calcárea carbonosa con venas de calcita-dolomita de aspecto brechoide. D) Venas de calcita lenticulares transversales a la estratificación. E) Lodolita carbonosa con bandeamientos albitíticos. F) Brecha de clastos de lodolita cementados con calcita y dolomita. G y H) Nivel albitizado con pirita, calcita y dolomita. Localización geográfica: A y B) minas de Coscuez, Formación Muzo; C y E) minas de Muzo, Formación Muzo; D) minas de Peñas Blancas, Formación Rosa Blanca; F) minas de Gachalá, Formación Santa Rosa; G y H) minas de Chivor, Formación Chivor.

Fuente: Terraza y Montoya (2011)

6. CONCLUSIONES

Las zonas potenciales para exploración y explotación de esmeraldas, en el CEOC están restringidas a las formaciones geológicas Muzo (edad Hauteriviano-Barremiano) y Rosa Blanca (edad Valanginiano), y en el CEOR, a las formaciones Santa Rosa y Chivor, de edad Berriasiano.

La sucesión de eventos geológicos más importantes que dieron origen a las esmeraldas fueron los siguientes:

1. Acumulación de espesas secuencias de sedimentos finogranulares, ricos en materia orgánica, carbonatos y evaporitas, en varios episodios del Cretácico Temprano de Colombia, como en el piso Berriasiano (135-131 Ma), Valanginiano (131-123 Ma) y Hauteriviano-Barremiano (123-117 Ma). Esta acumulación de sedimentos ocurrió en áreas depocentrales o de mayor subsidencia de la antigua cuenca sedimentaria cretácica colombiana (véase la figura 2).
2. Enterramiento de los sedimentos a varios kilómetros de profundidad, que permitió que la roca alcanzara alta diagénesis y bajo grado de metamorfismo (temperaturas >100-200 °C y presiones >1 kbar).
3. Sucesión de eventos tectónicos que afectaron a la roca sedimentaria como plegamiento, deformación interna, fracturamiento, migración del fluido mineralizante de la esmeralda, relleno de fracturas y brechamiento hidráulico; se han identificado varios eventos tectónicos asociados a las esmeraldas que tienen edades geológicas que van desde 62 a 68 Ma (Paleoceno Tardío-Maastrichtiano), 32 a 38 Ma (Eoceno Tardío) y 12 Ma (Mioceno Tardío).
4. Exhumación de la roca con los yacimientos de esmeralda posterior a los 12 Ma (en este caso particular se hace referencia al levantamiento e inicio de los procesos erosivos en la cordillera Oriental, sitio en el cual se localizan los yacimientos esmeraldíferos colombianos).
5. Las mineralizaciones de esmeraldas se encuentran asociadas a diferentes estructuras tectónicas con alteración hidrotermal, como venas, brechas hidráulicas o zonas o bandas albitizadas.

AGRADECIMIENTOS

A los revisores anónimos del manuscrito por sus comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branquet, Y., Laumonier, B., Cheilletz, A. y Giuliani, G. (1999). Emeralds in the Eastern Cordillera of Colombia: Two tectonic settings for one mineralization. *Geology*, 27 (7), 597-600.
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G. y Rodríguez, C. (1991). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser-probe dating of the Colombian emerald deposits: Metallogenic implications. En M. Pagel y J. L. Leroy (eds.), *Source, Transport and Deposition of Metals*, Proceedings of the 25 years SGA Anniversary Meeting, Nancy, 30 August-3 September 1991, Rotterdam (A. A. Balkema), 373-376.
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G. y Rodríguez, C. (1994). Time-pressure and temperature constraints on the formation of Colombian Emeralds: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and fluid inclusion study. *Economic Geology*, 89 (2), 361-380.
- Cheilletz, A., Giuliani, G., Zimmermann, J. L., Ribeiro Althoff, A. M., Féraud, G. y Rueda, F. (1995). Ages, geochemical signatures and origin of Brazilian and Colombian emerald deposits: A magmatic versus sedimentary model. En J. Pasava, B. Kribek y K. Zák (eds.), *Mineral Deposits: From their origin to their environmental impacts*. Proc 3rd Biennial SGA Mtg., Prague, AA Balkema, Rotterdam, 569-572.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B. et al. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79 (10), 1421-1442.
- Cortés, M., Angelier, J. y Colleta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 24 (1), 1-27. Doi: <https://doi.org/10.1029/2003TC001551>.
- Etayo, F., Cediél, F. y Cáceres, C. (1997). *Mapa de distribución de facies y ámbito tectónico a través del Fanerozoico de Colombia. Escala 1:1'500.000*. Bogotá: Ingeominas, Geotec Ltda.
- Etayo, F., Cediél, F. y Cáceres, C. (2003). *Mapa de distribución de facies y ámbito tectónico a través del Fanerozoico de Colombia. Escala 1:1'500.000*. Bogotá: Ingeominas, Geotec Ltda.

- Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F. y Baker, J. H. (1995). An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: Fluid inclusion and sulphur isotope evidence. *European Journal of Mineralogy*, 7 (1), 151-165. Doi: <https://doi.org/10.1127/ejm/7/1/0151>
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Rueda, F. y France, L. C. (1995). The genesis of Colombian emerald deposits: An unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. En J. Pasava, B. Kribek y K. Zák (eds.), *Mineral deposits: From their origin to their environmental impacts*, Proc 3rd Biennial SGA Mtg., Prague, AA Balkema, Rotterdam, 943-946.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendiger, R. W., Hegarty, K., Kelley, S. y Heizler, M. (2003). Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 115 (2), 131-147. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)1150131COAOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)1150131COAOTL>2.0.CO;2).
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendiger, R. W. y Cardozo, N. (2005). Development of the Colombian foreland-system basin as a consequence of the diachronous exhumation of the northern Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (9-10), 1272-1292. Doi: <https://doi.org/10.1130/B25456.1>
- Ingeominas y Mora, A. (2005). Levantamiento de Información estratigráfica y estructural de los cinturones esmeraldíferos de la cordillera Oriental. Informe técnico, contrato de prestación de servicios BTA-013. Bogotá: Ingeominas.
- Mantilla, L. C., Silva, A., Serrano, J. J., Conde, J., Gómez, C., Ramírez, J. C. et al. (2007). *Investigación petrográfica y geoquímica de las sedimentitas del Cretácico Inferior (K1) y sus manifestaciones hidrotermales asociadas; planchas 169, 170, 189, 190 (cordillera Oriental): implicaciones en la búsqueda de esmeraldas*. Acuerdo específico 1 de 2005. Bogotá: Ingeominas-Universidad Industrial de Santander.
- Mantilla, L. C., Silva, A., Conde, J., Gaviria, J. A., Gallo, F., Torres, D. A. et al. (2008). *Estudio de los procesos de interacción fluido-roca en el cinturón esmeraldífero oriental (cordillera Oriental, Colombia) y su importancia en la exploración de nuevos yacimientos hidrotermales*. Acuerdo específico 2 de 2006. Bogotá: Ingeominas-Universidad Industrial de Santander.
- Montoya, D., Terraza, R., Reyes, G., Moreno, G. y Fuquen, J. (2008). *Geología del cinturón esmeraldífero oriental, planchas 210, 228 y 229 (mapa)*. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- Pignatelli, I., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Agrosì, G., Mathieu, S., Morlot, C. et al. (2015). Colombian trapiche emeralds: Recent advances in understanding their formation. *Gems & Gemology*, 51 (3), 222-259.
- Romero, F. H., Schultz Güttler, R. y Kawashita, K. (2000). Geoquímica del rubidio-estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. *Geología Colombiana*, 25, 221-229.
- Reyes, G., Montoya, D., Terraza, R., Fúquen, J., Mayorga, M. y Gaona, T. (2006). *Geología del cinturón esmeraldífero occidental, planchas 169, 170, 189 y 190 (mapa e informe)*. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- Restrepo, P. A., Colmenares, F., Higuera, C. y Mayorga, M. (2004). A fold-and-thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia: Style, kinematics, and timing constraints derived from seismic data and detailed surface mapping. En K. R. McKlay (ed.), *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*, vol. 82 Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. Doi: <https://doi.org/10.1306/M82813C31>.
- Terraza, R. y Montoya, D. (2011). Las esmeraldas de Colombia en su ámbito geológico: excursión geológica a los cinturones esmeraldíferos de la cordillera Oriental de Colombia en el marco del XIV Congreso Latinoamericano de Geología del 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011.
- Terraza, R., Montoya, D. y Reyes, G. (2007). El Cretácico Inferior en el cinturón esmeraldífero occidental. Memorias XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, agosto 14 al 17 de 2007.
- Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G. y Fuquen, J. (2008). *Geología del cinturón esmeraldífero oriental, planchas 210, 228 y 229 (informe)*. Bogotá: Ingeominas.
- Van der Hammen, T. (1958). Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes colombianos. *Boletín Geológico*, 6 (1-3), 67-128.

Contribución al conocimiento geológico de la Serranía del Perijá mediante cartografía a escala 1:25.000 del Grupo Cogollo, en el sector oriental del municipio de Becerril, Cesar

Contribution to the geological knowledge of the Serranía del Perijá mountain range through 1:25,000 scale mapping of the Cogollo Group in the eastern sector of the municipality of Becerril, Cesar

Milton David **Lozada Molina**¹, Frank David **Lascarro Navarro**¹, Luisa Fernanda **León Díaz**¹, Elías Ernesto **Rojas Martínez**¹, Fabio Enrique **Carrillo Bolaño**¹, Luis Carlos **Tapia Vela**¹, Dino Carmelo **Manco Jaraba**²

Email de correspondencia: erojas@areandina.edu.co

Recibido: 10 de julio de 2018

Aceptado: 12 de marzo de 2019

Publicado en línea: 15 de julio de 2019

Doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.487

Citación: Lozada M., M. D. *et al.* (2019). Contribución al conocimiento geológico de la Serranía del Perijá mediante cartografía a escala 1:25.000 del Grupo Cogollo, en el sector oriental del municipio de Becerril, Cesar. *Boletín Geológico*, 45, 49-59. Doi: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.487>

RESUMEN

En el departamento del Cesar, municipio de Becerril, se encuentran rocas Cretácicas de composición calcárea que afloran en gran parte de su territorio y pertenecen a la Formación Lagunitas y Aguas Blancas, del Grupo Cogollo, y la Formación La Luna. Este estudio presenta los resultados de un trabajo cartográfico que tiene como objetivo contribuir al conocimiento geológico de esta zona, localizada en un área de 25 km² en el sector oriental del municipio de Becerril, mediante labores de campo, identificación de unidades geomorfológicas y descripciones petrográficas a escala 1:25.000. Se concluye que la Formación Lagunitas se caracteriza por presentar una sucesión de calizas masivas fosilíferas de coloración gris oscura, con pequeñas alternaciones de lodolitas calcáreas y calizas lumaquéllicas. De la Formación Aguas Blancas se identifica con detalle el Miembro Ánimas, constituido por lodolitas calcáreas con abundante materia orgánica, intercalada con calizas micríticas de color negro, que gradan horizontalmente a arenis-

¹ Fundación Universitaria del Área Andina.

² Universidad de la Guajira.

cas con cemento calcáreo de grano fino; el Miembro Tucuy, compuesto por limolitas arenosas de cemento calcáreo, areniscas de gran fino y arcillolitas carbonatadas, y el Miembro Maracas, constituido principalmente por calizas lumaquéllicas masivas. De igual forma, se identificaron cuatro ambientes geomorfológicos: estructural, en el que se identificaron las unidades de barras monoclinales, ladera estructural de sierra homoclinal y ladera de contrapendiente de sierra homoclinal; denudacional, en el que se identificaron unidades como escarpe de erosión, lomeríos poco bisectados y ondulaciones denudacionales; cárstico, con unidades de valle cárstico y ladera cárstica; y fluvial, con la unidad llanura de inundación.

Palabras clave: Cartografía, Grupo Cogollo, Serranía del Perijá.

ABSTRACT

In the department of Cesar, Municipality of Becerril, there are extensive outcroppings of Cretaceous rocks with calcareous sequences belonging to the Lagunitas and Aguas Blancas Formations, the Cogollo Group, and the La Luna Formation. This study presents the mapping of a 25 km² area in the eastern sector of the Municipality of Becerril, intended to contribute geological knowledge of this area through field work, identification of geomorphological units and petrographic descriptions at a scale 1:25,000. The Lagunitas Formation is characterized by a succession of dark gray massive fossiliferous limestone intercalated with calcareous mudstone and lumachellic limestone. From the Aguas Blancas Formation, the Ánimas Member is identified in detail, consisting of calcareous mudstone with abundant organic matter interbedded with black micritic limestones that grades horizontally to sandstones with fine-grained calcareous cement. The Tucuy Member consists of calcareous siltstone, fine-grained sandstone and carbonated claystone. The Maracas Member consists mainly of massive lumachellic limestone. Similarly, four geomorphological environments were identified: structural, identifying units of hog-backs, homoclinal ridges and cuestas; denudation, identifying units such as erosion scarps, lightly bisected hills and undulating interfluges; karstic, with units of karstic valley and karstic slope; and fluvial, with the floodplain unit.

Keywords: Cartography, Cogollo Group, Serranía del Perijá.

1. INTRODUCCIÓN

La Serranía del Perijá es conocida como un sistema montañoso localizado en la esquina noroccidental de Suramérica, levantada entre finales del Eoceno y el Plioceno por actividad orogénica debido a la colisión de las placas de Suramérica y el Caribe (Cáceres, Cediell, Ujueta, 1976).

Este trabajo se desarrolló sobre el flanco occidental de la Serranía del Perijá, donde afloran rocas cretácicas sedimentarias pertenecientes a la Formación Río Negro,

el Grupo Cogollo, y la Formación La Luna. El área cartografiada se localiza al nororiente del municipio de Becerril, en la carretera que comunica el corregimiento de Casacará con la Jagua de Ibirico, sector atravesado por los ríos Maracas y Tucuy, que se intersecan con las quebradas Socomba y Rodrigo (figura 1).

Los resultados de la cartografía a escala 1:25.000 del Grupo Cogollo son una contribución al conocimiento geológico de la Serranía del Perijá en este sector, debido a que los estudios cartográficos y petrográficos a dicha escala son desconocidos o escasos.

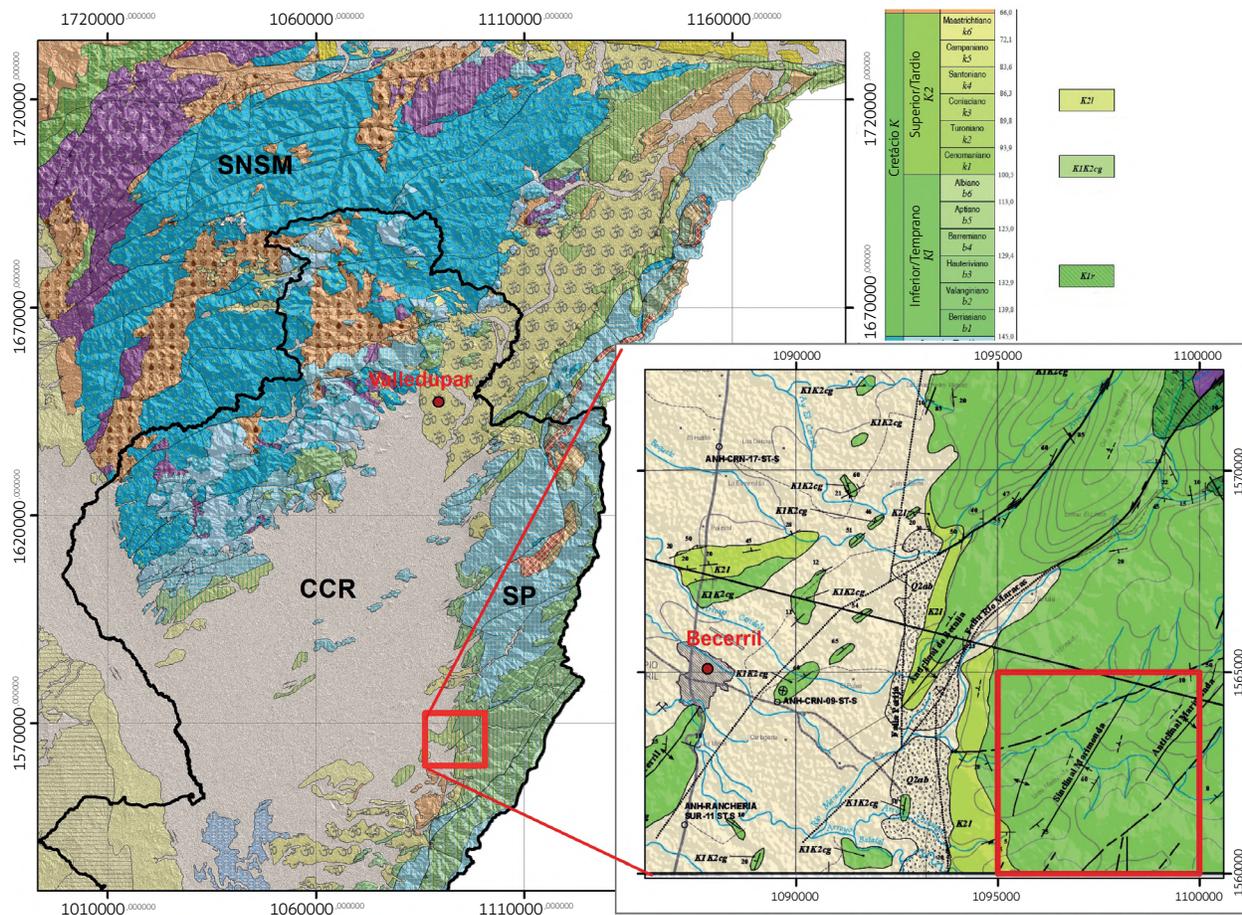


Figura 1. Mapa de localización. SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta; CCR: cuenca Cesar-Ranchería; SP: Serranía del Perijá. Fuente: adaptado y modificado a partir de la Plancha 41-Becerril, SGC (2015)

2. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS

La presente metodología se basa en la “Metodología de la investigación” de Hernández S. (2014) y tiene un enfoque cuantitativo, ya que busca describir, explicar y comprobar los datos obtenidos en campo para adelantar un análisis objetivo, con alcances descriptivos, correlacionales y explicativos que resultan de la revisión bibliográfica, al tiempo que brinda perspectivas para la cartografía. Asimismo, cuenta con un diseño no experimental basado en el análisis de la documentación relacionada con el tema de estudio, el levantamiento y la digitalización de los mapas correspondientes y la sistematización de los datos obtenidos en campo, donde se realizó muestreo de tipo no probabilístico, ya que las muestras fueron obtenidas de forma intencional por los cambios de litologías.

Este estudio comprendió varias etapas o fases en las que se logró un correcto desarrollo del trabajo:

primero se reconocieron unidades geológicas de la zona mediante un estudio fotogeológico (fotografías aéreas 200, 201, 202, del vuelo C2506, y fotografías 12, 13, 14, 15, del vuelo C2435, correspondientes a la plancha 41-IVC del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]). Se realizó una visita a campo que se correlacionó con geología regional encontrada en la memoria geológica del Cesar; también se realizaron estudios cartográficos en la región. Posteriormente se realizaron descripciones petrográficas de las muestras recolectadas y levantamiento estratigráfico de las unidades en la zona, y se procedió a identificar con claridad la distribución geográfica de cada miembro del Grupo Cogollo y los depósitos del Cuaternario. Asimismo, se tomaron datos estructurales con brújula en los flancos de los pliegues encontrados, que permitieron la finalización de la cartografía del área.

3. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de trabajo se ubica sobre dos provincias geológicas: el piedemonte occidental de la Serranía del Perijá y el oriente de la cuenca Cesar-Ranchería.

El municipio de Becerril se caracteriza por presentar rocas de diferentes ambientes geológicos, con contrastes en litología, edad y composición. A escala 1:100.000 sobre la Plancha 41, González *et al.* (2015) dan información de la geología regional, en la que se pueden apreciar rocas metamórficas y formaciones sedimentarias (figura 1).

3.1. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas están representada en el ámbito regional por la granulita de Los Mangos, que tiene presencia en la parte más alta de la Serranía del Perijá, hacia el este del municipio de Codazzi (Colmenares *et al.*, 2007).

3.2. Rocas sedimentarias

En la Serranía del Perijá afloran rocas sedimentarias de gran diversidad, como areniscas, lodolitas, lutitas y calizas, entre otras. Además, estas rocas hacen parte de formaciones de importancia minera en la región, como las Formaciones Barcos y Los Cuervos (esta última contiene mantos de carbón explotables). Aparte de ello, en la zona de estudio afloran las Formaciones Río Negro, Lagunitas, Aguas Blancas y La Luna, así como los depósitos del Cuaternario, con espesores que pueden ser de interés para la explotación minera (Gil y Martínez, 1990; Hernández, 2003).

3.2.1. Formación Río Negro

La Formación Río Negro, inicialmente descrita por Liddle (1928), comprende areniscas, conglomerados, lodolitas y arcillolitas, de edad Neocomiano a Aptiano. Las areniscas generalmente se presentan con coloración blanca y grano grueso; los conglomerados, heterogéneos; las arcillolitas y lodolitas típicamente muestran tonos brillantes de amarillo, rojo y morado por presencia de óxidos de hierro, composicionalmente son arcosas a subarcosas y su espesor varía entre 800 y 1.000 metros en la zona cercana a Fernambuco; esta se encuentra en contacto gradacional con el Grupo Cogollo (Geoestudios, 2006; González *et al.*, 2015; González *et al.*, 2008).

3.2.2. Grupo Cogollo

El Grupo Cogollo fue descrito inicialmente por Miller (1960), quien agrupó una serie de calizas, calizas arenosas y areniscas calcáreas de edad Barremiano-Aptiano que hacen parte del bloque levantado del borde occidental de la Serranía de Perijá. Su contacto inferior es discordante con la Formación La Quinta y gradacional con la Formación Río Negro (Castro, 2009; González *et al.*, 2008). Litológicamente, este grupo es dividido de base a techo en las Formaciones Lagunitas y Aguas Blancas, y esta última es subdividida en tres miembros por Hernández (2003) y González *et al.* (2008): Ánimas, Tucuy y Maracas.

3.2.3. Formación La Luna

La Formación La Luna es descrita por Gardner (1926), quien la describe como una secuencia alternante de limolitas, arcillolitas, lutitas negras carbonosas, calizas bituminosas, capas de *chert* y nódulos de variable tamaño. Hacia la base de la formación predominan las lodolitas y las capas de *chert*, mientras que en la parte superior son comunes las calizas bituminosas. Además, esta formación es concordante con el Grupo Cogollo y transicional con la Formación Molino. La edad de la Formación La Luna, según informes de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (González *et al.*, 2008) se ubica entre el Turoniano Temprano y el Coniaciano.

3.2.4. Depósitos del Cuaternario

Están constituidos por acumulaciones de sedimentos no consolidados de origen fluvial.

A escala 1:100.000, González *et al.* (2008) señalan que en el área de estudio se observan rocas de edad Cretácica, pertenecientes al Grupo Cogollo y a Formación La Luna. Debido a la escala de trabajo que manejaron no les fue posible separar el Grupo Cogollo en sus formaciones y subunidades.

4. CARTOGRAFÍA

En el área afloran unidades litológicas con edades que van desde el Aptiano al Coniaciano, según estudios anteriores proporcionados por Geoestudios (2006) y Gonzales *et al.* (2015). Todas las muestras se tomaron en un recorrido marcado con GPS que se visualiza en la figura 2, en las que se encontraron rocas de las Formaciones Lagunitas y Aguas Blancas, descritas a continuación.

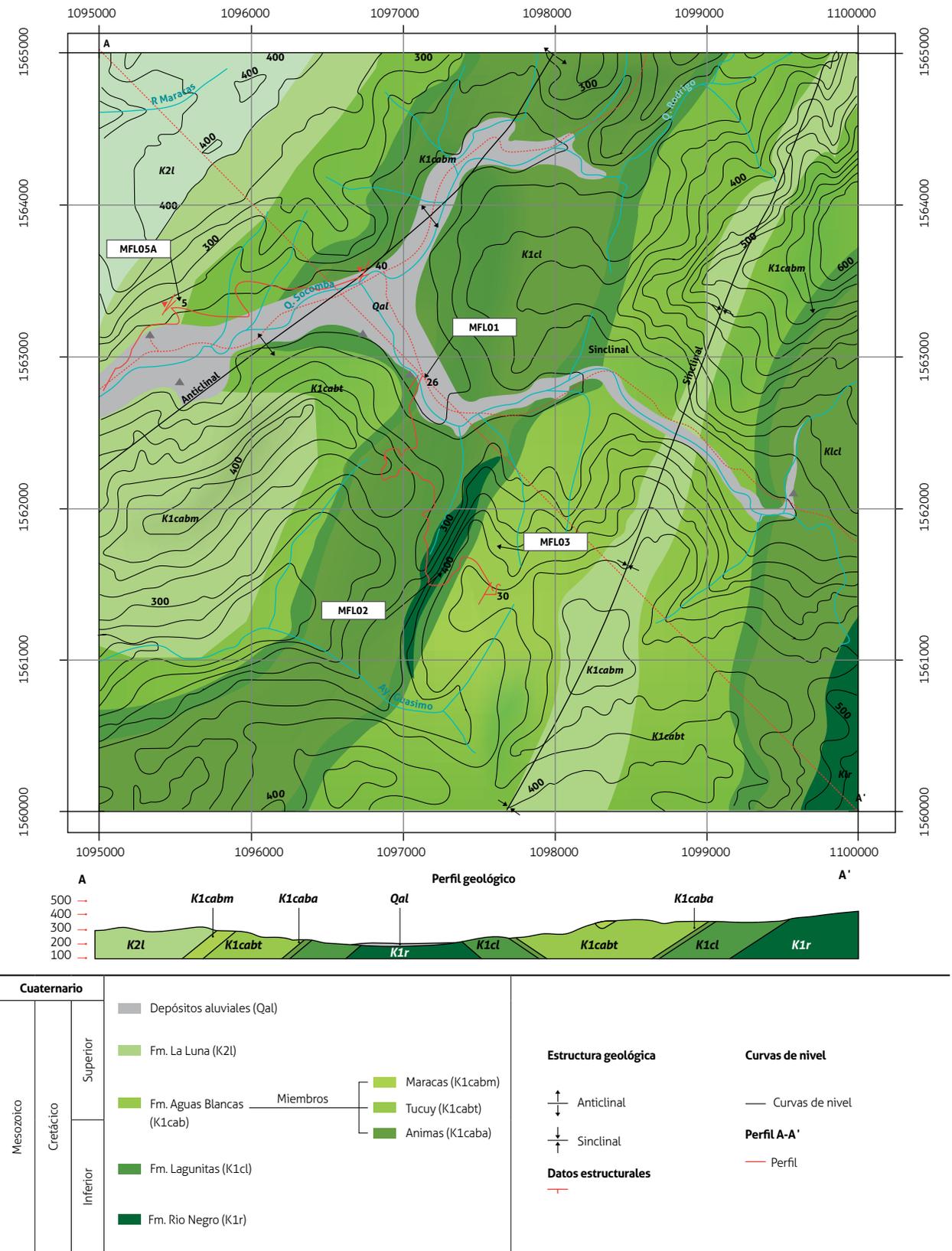


Figura 2. Cartografía geológica levantada, con las localizaciones de las muestras recolectadas en campo.

Fuente: autores

4.1. Formación Lagunita

Se caracteriza por presentarse como una sucesión de calizas masivas fosilíferas de coloración gris oscura, con pequeñas alternaciones de lodolitas calcáreas y calizas lumacuéllicas (Hernández, 2003), cuyo espesor máximo alcanza los 290 metros (Cáceres *et al.*, 1976).

El área de estudio se encuentra representada por la muestra MFL01, descrita como una caliza de color negro grisáceo a marrón claro, con presencia de venillas de calcita, de textura masiva, catalogada en la tabla de clasificación de Dunham (1962) como *mudstone*, y según Folk (1962), como una micrita con intraclastos. La muestra, por sus características litológicas y ubicación geográfica, se asocia a la Formación Lagunita (figura 3).



Figura 3. Muestra de caliza perteneciente a la Formación Lagunita
Fuente: autores

4.2. Formación Aguas Blancas

Está constituida por tres Miembros (Ánimas, Tucuy y Maracas), de los cuales se identificaron y describieron los de Ánimas y Tucuy.

4.2.1. Miembro Ánimas

El Miembro Ánimas está constituido por un conjunto lodolítico calcáreo con abundante materia orgánica intercalado con calizas micríticas de color negro que gradan horizontalmente a areniscas con cemento calcáreo de grano fino; su espesor es de 285 metros (González *et al.*, 2008).

En el área de estudio, el Miembro Ánimas se encuentra en afloramientos en los que se observan lutitas bituminosas con intercalaciones de limolitas calcáreas de color gris, con laminación plano-paralelas (figura 4). Estas rocas se asocian a la Formación Aguas Blancas, Miembro Ánimas, por su correlación litológica y características muy similares a las descritas en campo y en el laboratorio. La muestra MFL 02 es descrita microscópicamente, según la clasificación de Dunham (1962), como un *wackestone* lodo-soportado (bitumen como matriz de la roca “Btm”), y en ella se observan diversas especies de foraminíferos planctónicos de caparazón micrítico, así como foraminíferos fragmentados (globigerinas) “Fr”. En dos partes de la sección se observan vetillas de calcita recrystalizada que atraviesa de forma horizontal la sección (figura 5).

Según la clasificación de Flügel (2004) sobre la distribución de los tipos de microfacies, presenta microfacies SMF-3 (*wackestone* con foraminíferos), lo que permite relacionar el Miembro Animas a un ambiente de deposición de pie de talud, en rampa carbonatada exterior (FZ-3), según Wilson (1975).



Figura 4. Formación Aguas Blancas, Miembro Ánimas. Intercalaciones de lutitas oscuras con limolitas calcáreas.

Fuente: autores

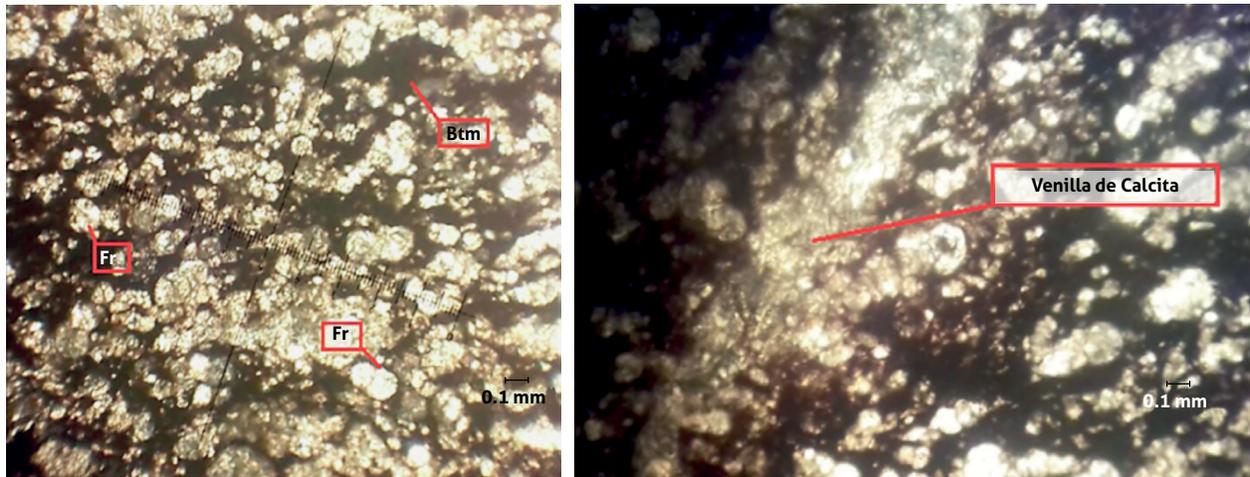


Figura 5. Fotomicrografía de lámina delgada de *wackestones* pertenecientes a la Formación Aguas Blancas, Miembro Ánimas. Luz reflejada; ampliación: 10x.

Fuente: autores

4.2.2. Miembro Tucuy

El Miembro Tucuy agrupa un conjunto arenoso presente en la Formación Aguas Blancas, constituido por limolitas arenosas de cemento calcáreo, areniscas de grano fino y arcillolitas calcáreas. Su espesor es de 450 metros, según González *et al.* (2008).

La muestra MFL03 se clasifica como una arenisca lodosa (>90% arena) de color amarillo ocre, en algunas partes gris de grano fino a muy fino si se observa con ayuda del estereomicroscopio (es difícilmente perceptible a simple vista) y con patrones texturales proporcionados (Castro, 1989). Se observa matriz arenosa con cemento carbonatado, con buen calibrado, granos subangulares a subredondeados, con empaquetamiento completo y *sorting* de 0,35. Presenta una estratificación plano-paralela. La muestra está compuesta en un 95% de cuarzo (Qz), 1% de feldespatos (Fd), 1% de fragmentos líticos (Fr), y 3% de minerales accesorios. Según Folk (1974), se clasifica como una cuarzoarenita, y se relaciona con el Miembro Tucuy, cuyo ambiente tectónico procede de bloques continentales de cratón interior, según la clasificación de Dickinson (1985) (figura 6).

La muestra MFL05A, tomada en campo, es una caliza arenosa de color amarillo ocre con oxidación en algunas partes. Tiene una laminación ondulada de textura masiva y es clasificada, según Dunham (1962), como *wackestone*, y según Folk (1962), como una micrita con fósiles (figura 7).



Figura 6. Muestra MFL03 de arenisca perteneciente a la Formación Aguas Blancas, Miembro Tucuy.

Fuente: autores



Figura 7. Muestra MFL5A, caliza arenosa perteneciente a la Formación Aguas Blancas, del Miembro Tucuy.

Fuente: autores

4.2.3. Miembro Maracas

El Miembro Maracas es el conjunto calcáreo superior de la Formación Aguas Blancas, y está compuesto principalmente por calizas lumaquéllicas masivas. El espesor de este Miembro es de 217 metros (González *et al.*, 2008).

5. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología se llevó a cabo con información recogida en campo y fotogeología, en las que se identificaron nueve unidades geomorfológicas, que son agrupadas en cuatro ambientes geomorfológicos: estructural, denudacional, cárstico y fluvial (figura 8).

5.1. Ambiente estructural

5.1.1. Barras homoclinales (Sbh)

Caracterizadas por presentarse como una tendencia alargada. En su morfología se destaca la alternancia en la disposición subvertical de las unidades resistentes, si se compara con las superficies suaves de las zonas excavadas, fenómeno debido a procesos de escorrentía en las unidades blandas.

5.1.2. Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle)

Se caracteriza por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente. Su longitud es corta, y sus formas son rectas y con pendientes poco escarpadas. Se relaciona con una estructura homoclinal.

5.1.3. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)

En el área de estudio, este tipo de ladera se caracteriza por presentarse como una superficie subvertical de escasa longitud, de forma cóncava, con pendiente abrupta y escarpada. Es generada por estratos dispuestos contra la pendiente del terreno y se relaciona con una estructura de sierra homoclinal.

5.2. Ambiente denudacional

5.2.1. Escarpe de erosión (Deeme)

Localizado en un altiplano, el escarpe de erosión es definido como una unidad geomorfológica de forma recta

con pendiente escarpada, de ladera abrupta, originada por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.

5.2.2. Ondulaciones denudacionales (Dmo)

Tiene forma colinada, cóncava, inclinación suave y drenaje divergente. Se relaciona con procesos de meteorización y erosión sobre rocas blandas. Su disposición es ligeramente inclinada.

5.2.3. Lomeríos poco bisectados (DALpd)

Su morfología es alomada, con cimas planas amplias y redondeadas, de laderas cortas y de forma recta, con pendientes inclinadas muy abruptas.

5.3. Ambiente cárstico

5.3.1. Valle cárstico (Kvca)

En el área de estudio se encuentra con una morfología elongada, de fondo suavemente ondulado, con bordes cóncavos bien marcados, formados por disolución de rocas calcáreas Cretácicas.

5.3.2. Ladera cárstica (Klac)

La ladera cárstica se caracteriza por presentarse como una superficie en declive, de morfología alomada, con pendientes inclinadas a escarpadas, de longitud corta. El patrón de drenaje es cárstico. Es común la presencia de valles ciegos.

5.4. Ambiente fluvial

5.4.1. Llanura de inundación (Fpi)

Se localiza bordeando los cauces fluviales de las quebradas locales. Su morfología plana es eventualmente inundable. Se presenta como superficie estrecha, alargada y profunda, con red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad. Los procesos erosivos evidenciados son producidos por la quebrada Socomba, aportante del material cuaternario en la zona.

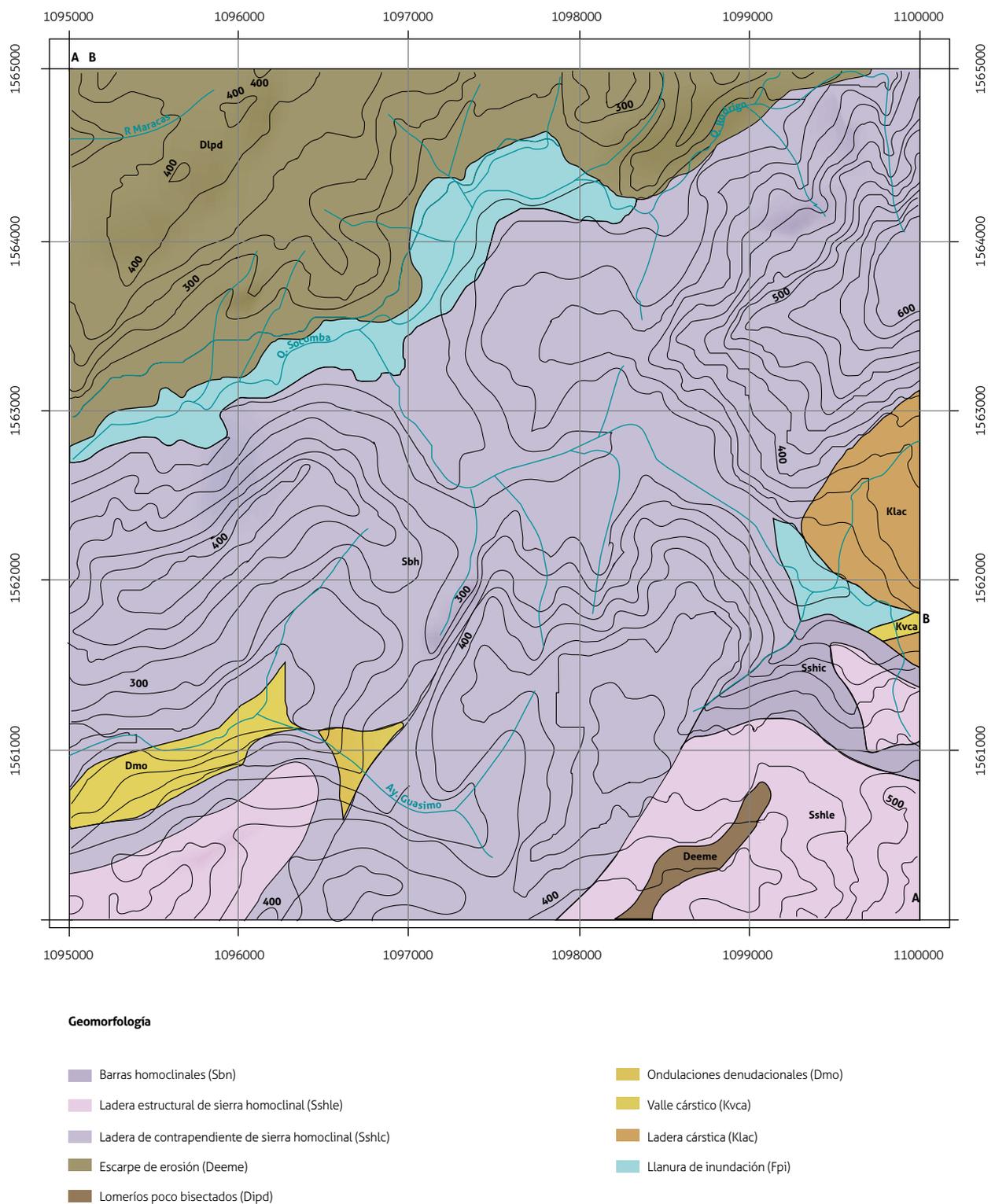


Figura 8. Geomorfología del área de estudio. Nomenclatura y colores tomados del Servicio Geológico Colombiano (2017).

6. CONCLUSIONES

Como resultado final de la cartografía, se obtuvo un mapa geológico a escala 1:25.000 que muestra la variación espacial litológica de las Formaciones Lagunitas y Aguas Blancas, del Grupo Cogollo.

La Formación Lagunitas se caracteriza por presentar una sucesión de calizas masivas fosilíferas de coloración gris oscura, con pequeñas alternaciones de lodolitas calcáreas y calizas lumaquéticas.

De la Formación Aguas Blancas se identifican con detalle el Miembro Ánimas, constituido por lodolitas calcáreas con abundante materia orgánica intercalada con calizas micríticas de color negro, que gradan horizontalmente a areniscas con cemento calcáreo de grano fino; el Miembro Tucuy, compuesto por limolitas arenosas de cemento calcáreo, areniscas de gran fino y arcillolitas calcáreas, y el Miembro Maracas, compuesto principalmente por calizas lumaquéticas masivas.

Se identificaron cuatro ambientes geomorfológicos: a) estructural, en el que se identificaron las unidades de barra homoclinal, ladera estructural de sierra homoclinal y ladera de contrapendiente de sierra homoclinal; b) denudacional, en el que se identificaron unidades como escarpe de erosión, lomeríos poco bisectados y ondulaciones denudacionales; c) cárstico, con unidades de valle cárstico y ladera cárstica, y d) fluvial, con la unidad llanura de inundación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cáceres, C., Cediell, F. y Ujueta, G. (1976). *Mapa geológico de Colombia, a escala 1:1'000.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Castro, A. (1989). *Petrografía básica: textura, clasificación y nomenclatura de rocas*. Madrid: Paraninfo.
- Castro, E. (2009). *Aspectos geológicos y principales consideraciones de la evaluación ambiental estratégica (diagnóstico ambiental) del distrito minero La Jagua, departamento del Cesar*. Bucaramanga: UIS.
- Colmenares, F. H., Mesa, A., Roncancio, J., Arciniegas, E., Pedraza, P., Cardona, A. et al. (2007). *Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33, 34 y 40. Proyecto: evolución geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta*. Bogotá: Ingeominas.
- Dickinson, W. R. (1985). Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. En G. G. Zuffa (ed.), *Provenance of arenites* (pp. 333-361). Dordrecht: Reidel Publ. Doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En W. E. Ham (ed.), *Classification of carbonate rocks*. Memoir 1 (pp. 108-121). Tulsa: AAPG.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of carbonate rocks analysis, interpretation and application*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08726-8>.
- Folk, R. L. (1962). Clasificación de las rocas de carbonatos de acuerdo a las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos: granos (aloquímicos), matriz micrítica y cemento, esparítico (ortoquímicos). *Boletín Asociación Americana de Geólogos del Petróleo*, 43.
- Gardner, A. H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of geological formations in Venezuela. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 677-684.
- Geoestudios, Ltda. (2006). *Cartografía geológica cuenca Cesar-Ranchería. Informe final*. Bogotá: Ministerio de Minas Y Energía, Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Gil, A. y Martínez, H. (1990). *Análisis microfacial del grupo Cogollo, y formación La Luna, cuenca Cesar-Ranchería, Guajira, Colombia* (trabajo de grado, Geología). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.
- González, H., Salinas, R., Barbosa, A., Muñoz, C., Gallego, C., Quintero, D. et al. (2015). *Mapa geológico de la Plancha 41 Becerril. Escala 1:100 000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- González, M., Mier, R., Arias, A., Cortés, Y., Moreno, M., Salazar, O. et al. (2008). Prospectividad de la cuenca Cesar-Ranchería. Contrato 27 de 2007 entre la Universidad Industrial de Santander y la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bucaramanga. Disponible en http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cesar_Rancheria.pdf
- Hernández, M. (2003). *Memoria explicativa geología Plancha 48, Jagua de Ibirico. Escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.

- Hernández Sampieri, R. F. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). México: Mc Graw Hill.
- Liddle, R. A. (1928). Barraquin Formation. En *The geology of Venezuela and Trinidad*. Fort Worth: J. P. McGowan, 108-103.
- Miller, J. B. (1960). Directrices tectónicas en la sierra de Perijá y partes adyacentes de Venezuela y Colombia. Memoria. III Congreso Geológico Venezolano, Caracas.
- Servicio Geológico Colombiano (2017). *Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000. Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)*. Bogotá: SGC.
- Wilson, J. L. (1975). *Carbonate facies in geologic history*. Berlin: Springer.



BOLETÍN GEOLÓGICO

POLÍTICA EDITORIAL

El *Boletín Geológico* es una publicación científica seriada del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Fue creada en 1953 con el propósito de fomentar y divulgar la investigación de la institución sobre las diferentes áreas de las ciencias de la tierra. El *Boletín Geológico* publica artículos científicos inéditos de investigación, reflexión, revisión o reportes de caso sobre geociencias, recursos minerales, geoamenazas, geoquímica, hidrocarburos, ciencias y aplicaciones nucleares y ambientales. Se admiten artículos en español o inglés de autores vinculados o no vinculados al Servicio Geológico Colombiano. La revista no cobra a los autores por publicar. Su periodicidad es anual y se publica de forma digital en la página web del Servicio Geológico Colombiano: <https://revistas.sgc.gov.co/>, e impresa, bajo la política de acceso abierto.

Se permite la reproducción total o parcial de los artículos publicados bajo el adecuado reconocimiento a la fuente y la indicación sobre cambios realizados o adaptaciones.

Proceso de arbitraje

La revisión de los artículos estará sujeta a un estricto proceso de evaluación por dos pares nacionales o internacionales. El envío y recepción de artículos no garantiza por sí solo la publicación de los trabajos sometidos al *Boletín Geológico*.

Se verificará en primera instancia el cumplimiento de todos los criterios de presentación establecidos por en las instrucciones a los autores. Posteriormente se iniciará el proceso de evaluación, el cual es completamente anónimo para evaluadores y autores. Superado el proceso de evaluación, en un plazo no mayor a tres semanas, los autores deberán atender las sugerencias y correcciones realizadas. En caso de que no incluyan una o varias sugerencias, deberán argumentar con detalle sus razones en una carta adicional. Si los dos evaluadores recomiendan rechazar el artículo, este no será publicado. Si las dos evaluaciones son completamente contrarias, se someterá el artículo a una tercera evaluación. Si se recomienda la publicación del artículo, pero realizando modificaciones y sujeta a una segunda evaluación, la nueva versión será enviada al evaluador asignado para su aprobación.

Los evaluadores deberán firmar un acuerdo de confidencialidad y una declaración de conflicto de intereses, si es el caso, para salvaguardar el adecuado uso de la información. Además, tanto evaluadores como autores deberán conocer y aceptar las normas internacionales de ética en investigación emitidas por el Committee on Publication Ethics con respecto al plagio y a la revisión por pares, normas a las que se acoge el *Boletín Geológico*. Estas normas podrán ser consultadas en http://publicationethics.org/files/International%20standard_editors_for%20website_11_Nov_2011.pdf

Autoría

La autoría deberá corresponder a quienes hayan contribuido de forma activa y sustancial al contenido intelectual del artículo y al análisis o interpretación de los datos; por tanto, los autores estarán en condiciones de hacerse públicamente responsables del artículo enviado. La lista y orden de autores deben ser revisados antes de someter por primera vez el trabajo a publicar; después de ser sometido no se aceptan cambios de autoría.

Los autores deberán firmar una carta donde: a) aceptan conocer la política editorial de la revista y estar de acuerdo con el proceso de evaluación, y con la decisión que se derive de dicho proceso sobre la publicación del artículo, b) declaran haber incluido como autores a todas las personas que así lo acrediten, c) aseguran que el artículo es original y no se ha incurrido en ningún tipo de plagio, d) aseguran haber incluido la referenciación y debida atribución a las fuentes originales de todas las citas, figuras y tablas, e) confirman que el artículo no ha sido postulado de forma simultánea en otro medio o revista, o publicado anteriormente, f) aceptan realizar los cambios o ajustes sugeridos por los evaluadores, en los tiempos que la revista indique, y se comprometen a continuar con el proceso hasta que se tome la decisión final sobre su publicación, y g) aceptan ceder los derechos patrimoniales al SGC, para su divulgación, reproducción y distribución en los medios impresos y digitales que se dispongan, así como para su inclusión en bases de datos e índices nacionales o internacionales, en caso de que se apruebe la publicación del artículo en el *Boletín Geológico*.

EDITORIAL POLICIES

Boletín Geológico is a scientific journal of the Servicio Geológico Colombiano –SGC– (Colombian Geological Service), created in 1953 to promote and publish research from different earth science fields conducted by the SGC. *Boletín Geológico* publishes previously unpublished scientific research articles, editorials, reviews or case reports on geosciences, mineral resources, geological threats, geochemistry, hydrocarbons and nuclear and environmental sciences and applications. Articles in Spanish or in English from authors regardless of their affiliation with the Servicio Geológico Colombiano are accepted. *Boletín Geológico* is published annually online on the webpage of the Servicio Geológico Colombiano, and in print, under an open-access policy.

Total or partial reproduction of the published articles is not allowed without prior written consent from the Editorial Board of the Servicio Geológico Colombiano and without proper source citation.

Review process

The articles submitted for publication will be subjected to a strict peer-review process by two national or international reviewers. Mere submission in response to calls for papers does not guarantee the publication of the submitted works.

Initially, compliance with all submission criteria established by *Boletín Geológico* in the author guidelines will be assessed. Subsequently, the double-blind peer-review process will be conducted. Once the evaluation process has been completed, the authors must reply to the reviewers' suggestions and corrections within three weeks. If the authors decide not to include one or several sugges-

tions, they should argue their reasons, in detail, in an additional response letter. If both reviewers recommend rejecting the article, it will not be published. If the two reviewers reach opposing conclusions, the article will be sent to a third reviewer. If the reviewers recommend publishing the article, albeit with modifications and subject to a second review, the new version will be sent to the reviewer assigned to its approval.

The reviewers must sign a declaration of confidentiality and a conflict of interest form, if applicable, to safeguard the proper use of information. Furthermore, both reviewers and authors must be informed about and apply the international research ethics standards published by the Committee on Publication Ethics on plagiarism and peer review, which are followed by *Boletín Geológico*. These rules are available from http://publicationethics.org/files/International%20standard_editors_for%20website_11_Nov_2011.pdf

Authorship

Authorship should be attributed to those who have actively and substantially contributed to the intellectual content of the article and to its data analysis or interpretation; therefore, the authors are responsible for the content of the submitted article. The list and order of authors must be reviewed before submission, since after submitting the article author changes are not accepted. The authors of an article approved for publication will transfer the patrimonial copyright to the Servicio Geológico Colombiano for its subsequent publication, reproduction and distribution in any print and online media the Servicio Geológico Colombiano may choose and for its inclusion in databases and in national or international citation indexes.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

1. CRITERIOS DE PRESENTACIÓN

Todo artículo sometido a consideración debe cumplir con los siguientes criterios de presentación:

- Se debe enviar en formato Word por la página web: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo>, a través de la pestaña “Someter artículos” de las Instrucciones a los autores.
- Debe incluir el título en español e inglés, y debe ser breve y reflejar la esencia de la investigación.
- Se debe incluir la información de los autores, la información completa de afiliación institucional y el email del autor de correspondencia.
- Se debe incluir el resumen y las palabras clave en español e inglés.
- Las imágenes se deben adjuntar como archivos gráficos individuales, con una resolución mínima de 300 dpi.
- La extensión de los artículos no debe superar las 8.000 palabras.

2. NORMAS EDITORIALES

a. Tablas

Las tablas se deben presentar en formato editable, no como imágenes, y acompañadas de una leyenda explícita y la fuente. Todas las tablas deben estar referenciadas en el texto y deben ser esenciales para explicar o ampliar parte del argumento del artículo.

b. Figuras

Las figuras como diagramas, fotografías o mapas deben aportarse en archivos gráficos con una resolución mínima de 300 dpi. Cada figura debe ser citada en el texto y estar acompañada de una leyenda explicativa que incluya la fuente.

Las imágenes de fuentes distintas a los autores del artículo deben contar con la autorización del autor de la imagen original, o estar libres de conflictos de derechos de autor o tener licencia *Creative Commons* (consultar el siguiente enlace: <https://co.creativecommons.org/>). Los mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite deben incluir una escala gráfica.

c. Citas

La norma de citación del *Boletín Geológico* es APA. En el texto, las citas deben corresponder con la información de autor y fecha de la obra referenciada en la sección de referencias bibliográficas.

Cuando se citen varias obras de un mismo autor se organizarán de forma cronológica y se expondrán separadas por coma: (Castaño, 2016).

Cuando un trabajo referenciado sea de dos autores, se citarán los apellidos de los dos autores separados por la conjunción “y”, no “and”: (Raigosa y Londoño, 2018).

Si la obra tiene entre tres y cinco autores, la primera vez se citarán los apellidos de todos; posteriormente se citará solo al primer autor, seguido por la abreviación “*et al.*” en cursiva. Primera vez (Van der Lelij, Spikings, y Mora, 2016); luego (Van der Lelij *et al.*, 2016).

Cuando la obra tenga seis autores o más, se citará solo al primer autor seguido por la abreviación “*et al.*” en cursiva: (Blanco Quintero *et al.*, 2014).

Si se trata de un autor corporativo, la primera vez se escribirá el nombre de la organización, y entre paréntesis la sigla, seguida del año; posteriormente se citará solamente con la sigla. (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2017).

Al citar varios autores, se ordenarán de forma cronológica y separados por punto y coma: (Mantilla *et al.*, 2013; Van der Lelij *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2017). Si se cita una página específica de una obra, se incluirá luego del año con la abreviatura p., o pp., si corresponde a varias páginas: (Castaño, 2016, p. 48).

d. Citas textuales

Cuando la cita textual sea menor de cuarenta palabras se reproducirá dentro del párrafo, entre comillas y sin cursiva. Al final de la cita deberá aparecer su respectiva referenciación (Castaño, 2016, p. 48).

Cuando la cita textual supere las cuarenta palabras, se escribirá en párrafo aparte, con sangría izquierda de 2,5 cm, sin comillas y sin cursiva, y la tipografía de todo ese párrafo se dejará con un tamaño un punto menor que el texto normal. Al final de la cita deberá aparecer su respectiva referenciación (Castaño, 2016, p. 48).

e. Referencias bibliográficas

Hay que tener en cuenta que en la norma APA, de los nombres de pila de los autores solo se aporta la inicial. En caso de que se anoten los dos apellidos, no deben separarse por guion. Las referencias bibliográficas deben ir a espacio sencillo y con sangría francesa de 1 cm (en la sangría francesa, el primer renglón del párrafo no lleva sangría, y los que le siguen están sangrados, en este caso, a 1 cm). Si los documentos cuentan con Doi, este dato se debe incluir al final de la referencia.

Libros

Los títulos de los libros llevan mayúscula únicamente en la inicial de la primera palabra y en la inicial de los nombres propios, si los tiene. Los títulos se escriben en cursiva, y el subtítulo va separado del título por dos puntos, no por punto. En español, después de los dos puntos sigue minúscula; en inglés, sigue mayúscula.

La información consignada debe corresponder estrictamente a la incluida en los siguientes ejemplos y con las mismas normas de puntuación entre cada elemento de la referencia:

Maynard, J. (1983). *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. Nueva York: Springer-Verlag. Doi: 10.1007/978-1-4613-9493-8.

Gaviria, S. (2016). *Química para geología: aplicación en laboratorio y campo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Capítulos de libros

Para los capítulos rigen las mismas reglas que para los títulos de libros, con la diferencia de que los títulos de capítulos no llevan cursiva. Debe señalarse en cursiva el título del libro de donde procede el capítulo, introducido por la preposición “En”.

La información consignada debe corresponder estrictamente a la incluida en los siguientes ejemplos y con las mismas normas de puntuación entre cada elemento de la referencia:

- Horstwood, M. (2008). Data reduction strategies, uncertainty assessment and resolution of LA-(MC-) ICP-MS isotope data. En P. Sylvester (Ed.), *Laser ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues*. Vancouver: Mineralogical Association of Canada.
- Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P., y O'Connor, P. (2014). The gemas project - concept and background. En C. Reimann, A. Demetriades, M. Birke e I. Schoeters (Eds.). *Chemistry of Europe's Agricultural Soils, Part A*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Artículos de revista

Para los títulos de artículos de revista rigen las mismas reglas que para los títulos de capítulos de libro, con la diferencia de que los títulos de las revistas llevan mayúscula en la inicial de todas las palabras significativas (primera palabra, sustantivos, verbos y adjetivos), se escriben en cursiva y no van introducidos por la preposición "En".

La información consignada debe corresponder estrictamente a la incluida en los siguientes ejemplos y con las mismas normas de puntuación entre cada elemento de la referencia:

- Burgl, H. (1981). Sedimentación cíclica en el geosinclinal cretáceo de la cordillera Oriental de Colombia. *Boletín Geológico*, 7(1-3): 85-118.
- Domeier, M. y Torsvik, T. (2014). Plate tectonics in the late Paleozoic. *Geoscience Frontiers*, 5(3): 303-350. Doi: 10.1016/j.gsf.2014.01.002.

Tesis

- Van der Lelij, R. (2013). *Reconstructing north-western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: A geochronological, thermochronological and geochemical study* (tesis de doctorado). Université de Genève, Ginebra, Suiza.

Congresos, seminarios y otros

Los títulos de las ponencias presentadas en estos certámenes se escriben sin cursiva y llevan mayúscula únicamente en la inicial de la primera palabra y en los sustantivos propios, si los tienen. Los nombres de los eventos llevan mayúscula en todas las palabras significativas.

La información consignada debe corresponder estrictamente a la incluida en el siguiente ejemplo y con las mismas normas de puntuación entre cada elemento de la referencia:

- Duque Caro, H. (1972). The geology of Monteria area. 14th. Annual Conference. Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, Bogotá.

Mapas

La información consignada debe corresponder estrictamente a la incluida en el siguiente ejemplo y con las mismas normas de puntuación entre cada elemento de la referencia:

- Behrendt, J. y Bajwa, L. (1972). Bouguer gravity map of Colorado. Scale 1:500.000. U.S. Geological Survey.

Páginas web

University of Innsbruck. (2018). *Giant earthquakes: Not as random as thought*. ScienceDaily. Disponible en www.sciencedaily.com/releases/2018/01/180130091241.htm
 Geobulletin. (2018). Disponible en <http://www.geobulletin.org/>

Enlaces sugeridos

- Escribir un buen artículo científico:
<https://revistas.uam.es/index.php/reice/article/viewFile/7965/8220>
- Palabras clave en geociencias:
<https://www.americangeosciences.org/georef/georef-thesaurus-lists>
- Normas APA:
<https://uniandes.ipublishcentral.com/product/manual-de-citas-y-referencias-bibliograficas>,
<https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2017/07/Manual-de-citacio%C81n-APA-v7.pdf>
- Centro de escritura Javeriano. Normas APA
http://centrodeescritura.javerianacali.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=138:normas-apa&catid=45:referencias-bibliograficas&Itemid
- Creative Commons: <https://co.creativecommons.org/>

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

1. SUBMISSION CRITERIA

All articles submitted for consideration for publication must meet the following submission criteria:

- Articles must be sent in Word format by the website <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo>, through the “Article Submission” tab of the Instructions to the authors.
- The title, in Spanish and English, should be concise and reflect the subject matter.
- The name, and complete institutional affiliation of each author and the email of the corresponding author must be included.
- The abstract and keywords must be included in both Spanish and English. Images must be attached as individual graphics files, with a minimum resolution of 300 dpi.
- Articles must not be longer than 8000 words.

2. EDITORIAL GUIDELINES

a. Tables

Tables must be submitted in an editable format, not as images, and they must be accompanied by an explicit legend and source. They must be referenced in the text, and they must be essential to explain or further support the argument of the article.

b. Figures

Figures, such as diagrams, photographs or maps, should be sent in graphics files with a minimum resolution of 300 dpi. Each figure must be cited in the text and be accompanied by an explanatory legend that includes the source.

Images from sources other than the authors of the article must have the permission from the authors of the original image, be free of copyright conflicts or have a Creative Commons license (for further information, please refer to: <https://co.creativecommons.org/>). Maps, aerial photographs and satellite images should include a graphic scale.

c. Citations

The citation format of *Boletín Geológico* is American Psychological Association (APA) style. In the text, citations must include the author's name and date of publication, and all references must be listed in the references section.

When several works by the same author are cited, they must be organized in chronological order and will be shown separated by a comma: (Groat, 2014).

When a reference has two authors, the surnames of both authors must be cited and separated by the conjunction "&": (Pokrovski & Dubessy, 2014).

When the reference has from three to five authors, all names must be cited in the first instance; subsequently, only the first author will be mentioned, followed by the italicized abbreviation "*et al.*". First instance: (Van der Lelij, Spikings, & Mora, 2016); then (Van der Lelij *et al.*, 2016).

When the reference has six or more authors, only the first author must be cited, followed by the italicized abbreviation "*et al.*": (Feneyrol *et al.*, 2013).

In the case of a corporate author, the name of the organization must be written the first time with the acronym in parentheses, followed by the year; subsequently, only the acronym will be mentioned (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2017).

When citing several references, they must be chronologically sorted and separated by semicolons: (Mantilla *et al.*, 2013; Van der Lelij *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2017). When a specific page of a reference is cited, the page number must be included after the year and be preceded by the abbreviation p., or pp. in the case of several pages: (Groat, 2014, p. 48).

d. Quotes

When the quote is shorter than forty words, it must be written within the paragraph, in quotation marks and without italics. The reference must be included at the end of the quote (Groat, 2014, p. 48).

When the quote is longer than forty words, it must be written in a separate paragraph, with a 2.5-cm left indent, without quotation marks or italics and with a font size one point smaller than the body text. The reference must be included at the end of the quotation (Groat, 2014, p. 48).

e. References

According to the APA format, only the first letter (initial) of the first names of the authors is provided. In the case where two surnames are included, they must not be separated by a hyphen. References must be written in single-space format and with a 1-cm hanging indent (in a hanging indent, the first line of the paragraph is not indented, and all subsequent lines are indented, in this case, 1 cm). If the documents have a Digital Object Identifier (DOI), this identifier must be included at the end of the reference.

Books

Only the first letter (initial) of the first word and of proper names, if any, in the titles of books are capitalized. The titles should be italicized, and the subtitle separated from the title by a colon, not by a period. In Spanish, the first letter of a word following a colon is written in uppercase font; in English, this letter is capitalized.

The information provided must strictly match that included in the following examples and follow the same rules of punctuation between each element of the reference:

Lee, M. S. (2012). *Mass Spectrometry Handbook* (Vol. 1). New Jersey: Wiley.

Bormann, P. (2013). *New Manual of Seismological Observatory Practice 2* (NMSOP-2). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum. Doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_3.1.

Book chapters

Book chapters follow the same rules as those of book titles, except for one difference: the titles of book chapters must not be italicized. The title of the book must be italicized and preceded by the preposition “In”.

The information provided must strictly match that included in the following examples and follow the same rules of punctuation between each element of the reference:

Horstwood, M. (2008). Data reduction strategies, uncertainty assessment and resolution of LA–(MC–) ICP–MS isotope data. In P. Sylvester (Ed.), *Laser ablation–ICP–MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues*. Vancouver: Mineralogical Association of Canada.

Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P., & O’Connor, P. (2014). The gemas project - concept and background. In C. Reimann, A. Demetriades, M. Birke & I. Schoeters (Eds.). *Chemistry of Europe’s Agricultural Soils, Part A*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Journal articles

Titles of journal articles follow the same rules as those of titles of book chapters, except for one difference: the first letters of all meaningful words (first word, names, verbs and adjectives) of titles of journal articles must be written in uppercase font and italicized, but they must not be preceded by the preposition “In”.

The information provided must strictly match that included in the following examples and follow the same rules of punctuation between each element of the reference:

Domeier, M. & Torsvik, T. (2014). Plate tectonics in the late Paleozoic. *Geoscience Frontiers*, 5(3): 303-350. Doi: 10.1016/j.gsf.2014.01.002.

Konstantinou, K. (2015). Tornillos modeled as self-oscillations of fluid filling a cavity: application to the 1992-1993 activity at Galeras volcano, Colombia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 238: 23-33. Doi: 10.1016/j.pepi.2014.10.014.

Thesis works

Saylor, J. (2008). *The Late Miocene Through Modern Evolution of the Zhada Basin, South-Western Tibet*. (Ph. D. Thesis). The University of Arizona, Tucson.

Conferences, seminars and others

The titles of talks given in these contexts are written without italics, and only the first letter of the first word and proper nouns, if included, are capitalized. All meaningful words in event names are capitalized.

The information provided must strictly match that included in the following example and follow the same rules of punctuation between each element of the reference:

Sulochana, V., Francis, A. & Tickle, A. (2015). Morphology based radon processed neural network for transmission line fault detection. *2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*.

Maps

The information provided must strictly match that included in the following example and follow the same rules of punctuation between each element of the reference:

Bacchin, M., Miligan, P. R., Wynne, P. & Tracey, R. (2008). *Gravity anomaly map of the Australian region*, 3rd edn, 1:5,000,000. Geoscience Australia, Canberra.

Web pages

EURACHEM/CITAC. (2016). *Guide to quality in analytical chemistry an aid to accreditation*. Retrieved from www.eurachem.org.

Suggested links

- Keywords in the Geosciences:
<https://www.americangeosciences.org/georef/georef-thesaurus-lists>
- Creative Commons: <https://co.creativecommons.org/>





Boletín Geológico 45

Fue compuesto en caracteres
Minion Pro (10/14, para el cuerpo
de texto) y Aller (para la titulación).
Se terminó de imprimir en la
Imprenta Nacional de Colombia
en agosto de 2019.



CONTENIDO

- 3 EDITORIAL**
Mario Andrés Cuéllar Cárdenas
- 5 MEGACIRCONES EDIACÁRICOS DE LA SIENITA NEFELÍNICA DE SAN JOSÉ DEL GUAVIARE Y SU POTENCIAL COMO MATERIAL DE REFERENCIA PARA DATACIÓN U/PB MEDIANTE LA-ICP-MS**
Jimmy Alejandro Muñoz Rocha, Alejandro Piraquive, José A. Franco, Amed Bonilla, Mary Luz Peña Urueña, Thomas Cramer, Lorena Rayo Rocha, Nicolás Villamizar
- 23 ANÁLISIS DE ANOMALÍAS GEOTÁNICAS A PARTIR DEL PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE PRODUCTOS DE SENSORES REMOTOS, ESTUDIO DE CASO: OCCIDENTE DE BOYACÁ (COLOMBIA)**
Manuel Guillermo Zafra Dulcey
- 37 NOTAS SOBRE EL CONTEXTO TECTONOESTRATIGRÁFICO DE FORMACIÓN DE LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS**
Roberto Terraza Melo
- 49 CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE LA SERRANÍA DEL PERIJÁ MEDIANTE CARTOGRAFÍA A ESCALA 1:25.000 DEL GRUPO COGOLLO, EN EL SECTOR ORIENTAL DEL MUNICIPIO DE BECERRIL, CESAR**
Milton David Lozada Molina, Frank David Lascarro Navarro, Luisa Fernanda León Díaz, Elías Ernesto Rojas Martínez, Fabio Enrique Carrillo Bolaño, Luis Carlos Tapia Vela, Dino Carmelo Manco Jaraba
- 61 POLÍTICA EDITORIAL / EDITORIAL POLICIES**
- 64 INSTRUCCIONES A LOS AUTORES / INSTRUCTIONS TO AUTHORS**

