

**Estudio mineralógico-petrográfico de las litologías aflorantes en el sector Algarrobo - La Llandada (Entre los municipios de Rionegro- El Playón, Departamento de Santander).**

**Omar Felipe Latorre Ramírez, Nicolás Rojas Rodríguez**

**Trabajo de grado para Optar al Título de Geólogo**

**Director**

**Luis Carlos Mantilla Figueroa**

**Ph.D. en Geología Económica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingeniería Físicoquímica**

**Escuela de Geología**

**Bucaramanga**

**2018**

## Dedicatoria

*A Dios todo honor y grandeza.*

*A la mujer más especial de mi vida, mi madre que ha luchado incansablemente por sacarme adelante.*

*A mi padre que con su sabiduría y esfuerzo me ha guiado por el camino de la rectitud y justicia.*

*A mi hermano quien ha sido mi compañero y motor de vida para superar las dificultades.*

*A mi compañero de tesis, Nicolás Rojas Rodríguez por sus aportes y contribuciones en la realización del proyecto.*

**Omar Felipe Latorre Ramírez**

## Dedicatoria

*Con aprecio y felicidad dedico mis logros a mi familia*

*A la mujer más importante en mi vida, mi madre Ana Inés Rodríguez que ha sido mi más grande empuje que con su esfuerzo y dedicación me formo como persona, mostrándome las cosas importantes de la vida.*

*A mi padre Alberto Rojas que gracias a su esfuerzo hoy puedo celebrar un logro más en mi vida.*

*A mi hermano Johan Sebastian Rojas Rodríguez que ha sido mi inspiración, mi ejemplo y la persona que más admiro.*

*A mi pareja María Teresa Ulloque Ardila a quien conocí en esta ultima etapa de mi vida universitaria y ha sido mi compañera, mi mejor amiga y un pilar en mi vida quien me enseñó el significado de muchas palabras entre ellas lealtad y amor.*

*A mi compañero de tesis Omar Felipe Latorre Ramírez por ser no solo mi amigo si no un guía en mi conocimiento.*

*A nuestro director de tesis Luis Carlos Mantilla Figueroa por ser tan apasionado profesor que inculco en mí el amor de las geociencias, a la investigación y abrir mi mente para entender y resolver cualquier enigmático problema que puede presentar nuestra amado planeta.*

*Por ultimo a mis amigos y futuros colegas que gracias a ellos puedo decir que conocí el significado de la palabra amistad.*

**Nicolás Rojas Rodríguez**

### **Agradecimiento**

Brindamos nuestro fraterno agradecimiento a la Escuela de Geología, al grupo de investigación en geología básica y aplicada (GIGBA), al laboratorio de difracción de rayos x y al laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, a sus funcionarios y empleados por su colaboración en este proyecto, entre estos a Luis Eduardo Garrido Palencia, Luis Fernando Anaya Molina, Cesar Enrique Llerena Betancour y al profesor José Antonio Henao Martínez

Especial agradecimiento al director de este proyecto, Luis Carlos Mantilla Figueroa por su continuo seguimiento durante el desarrollo de esta tesis y por sus enormes contribuciones científicas y personales.

A los docentes y geólogos que aportaron ideas y conocimiento que fueron indispensables para la realización de este proyecto, entre estos Julián Andrés López Izasa, Francisco Velandia, Carlos Alberto García Ramírez, Carlos Alberto Ríos Reyes, Joaquin Andres Valencia Ortiz y Cesar Augusto Suarez.

A los compañeros estudiantes de geología, quienes apoyaron y ayudaron durante el transcurso de este trabajo, entre estos a Juan Pablo Oviedo Diaz, Hernan Andres Carmago Olave, Luis Felipe Cruz Ceballos, Ángel Fabian Salazar, Carlos Eduardo Guerrero Ardila, Andres Buitrago Burgos, Carlos Andres Moreno Jimenez, Daniel Felipe Ayala Plata, Juan Nicolás Gómez González, Néstor Raúl Zipamoncha, Carlos Andrés Castro, Álvaro Sergio Osma, Diego Ardila, Danilo Alfonso Gonzáles Pacheco, Denis Rueda, Laura Vera y Maria Teresa Ulloque Ardila.

**Tabla de Contenido**

	Pág.
Introducción.....	18
1. Localización.....	19
2. Planteamiento del problema.....	21
2. Objetivos.....	22
3.1 Objetivo general.....	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. Antecedentes y Marco geológico.....	23
5. Métodos.....	27
6. Resultados.....	29
6.1 Relaciones de campo.....	29
6.2. Descripción macroscópica.....	34
6.3 Análisis petrográfico y contextos paragéneticos.....	40
6.4 Métodos de tinción.....	43
6.5 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) .....	44
6.6 Difracción de Rayos X (DRX).....	51

6.7 Geocronología U-Pb en zircones detríticos.....	56
6.8 Modelo de evolución geológica.....	60
7. Discusión.....	63
8. Conclusiones.....	66
9. Recomendaciones.....	67
Referencias bibliográficas.....	68

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema tectónico del departamento de Santander. Adaptado de Clavijo, et al. (1993). Tomado de (Royero y Clavijo, 2001).....	20
Figura 2. Mapa geológico del departamento de Santander. Modificado de Royero y Vargas (1999).....	20
Figura 3. Localización y división político-administrativa del departamento de Santander (Adaptado del IGAC, 1997). Modificado de Royero y Clavijo (2001).....	23
Figura 4. Representación de los Andes del Norte de Colombia y Venezuela. Se muestra el margen de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. El Macizo de Santander enmarcado por el rectángulo de color rojo denotado por las iniciales SM. Adaptada de Van der Lelij (2015) .....	24
Figura 5. Afloramiento de rocas sedimentarias con intercalación de areniscas y lodolitas (contacto en línea roja) con su respectivo muestreo. PLY-01-02 y PLY-01-01 correspondientes a una arenisca color crema y a una lodolita negra respectivamente. Estratificación predominante: 320°/82° (tomada en azimuth rumbo). Estación: PLY-1. Coordenadas: X = 1'094.067, Y = 1'314.336, Z = 587 [m].....	32
Figura 6. Afloramiento donde se aprecian flujos de lava riolíticos reportados por Van Der Lelij (2013) en contacto con rocas sedimentarias. Se observa la muestra PLY-02-01 con textura peperítica y la muestra PLY-02-02 que corresponde a una riolita afanítica. Estación: PLY-2. Coordenadas: X = 1'094.214, Y = 1'314.000, Z = 569 [m].....	33

- Figura 7. Afloramiento de contacto (líneas rojas) entre dos litologías que corresponden a riolitas (PLY-8-1) con tonalidad blanca y brechas volcánicas (PLY-8-2) con tonalidad anaranjada. Estación: PLY-8. Coordenadas:  $X = 1'093.339$ ,  $Y = 1'317.549$ ,  $Z = 1050$  [m].....34
- Figura 8. Muestra PLY-8-1 que corresponde a una roca volcánica de tonalidad gris claro. Presenta una textura porfirítica y los cristales se observan anhedrales a subhedrales, inequigranulares de grano fino a medio, que corresponde a riolita.....34
- Figura 9. Muestra PLY-8-2 que corresponde a una roca volcánica de tonalidad rojiza que presenta clastos subangulares a subredondeados de cuarzos y plagioclasas. Según el tamaño del material piroclástico se denomina como una toba lapilica.....35
- Figura 10. Fotografía de las secciones delgadas utilizadas para los métodos de tinción para carbonatos y feldespatos potásicos respectivamente.....43
- Figura 11. Microfotografías posteriores a los métodos de tinción. A) Feldespatos potásicos (flechas negras). B) y C) Carbonatos de variedad calcita (flechas blancas). D) Carbonatos de variedad dolomita (flecha roja).....44
- Figura 12. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Pirita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....46
- Figura 13. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Zircón, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....46
- Figura 14. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Monacita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....47

Figura 15. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Leucita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	47
Figura 16. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Anatasa o Brookita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	48
Figura 17. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Pirita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	49
Figura 18. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Galena, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	49
Figura 19. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Kaersutita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	50
Figura 20. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Xenotina, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	50
Figura 21. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Sillimanita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.....	51
Figura 22. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148001.....	52
Figura 23. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148002.....	53
Figura 24. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148003.....	53

Figura 25. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148004.....	54
Figura 26. Gráfica de densidad para datos U-Pb en zircones detríticos de la muestra PLY-01-02.....	58
Figura 27. Gráfico de datos de concordia obtenidos a partir de la arenisca de la Fm. Bocas, PLY-01-02. Error de elipses es $\pm 2\sigma$ .....	58
Figura 28. Gráfica de densidad para datos U-Pb en zircones detríticos en la muestra PLY-04-01.....	59
Figura 29. Gráfico de datos de concordia obtenidos a partir de las brechas, PLY-04-01. Error de elipses es $\pm 2\sigma$ .....	60
Figura 30. Esquema geológico del área de estudio. Modificado del mapa geológico de Colombia cuadrángulo H12 de Bucaramanga a escala 1:100000 (Ward et al., 1973) .....	61

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Asociaciones minerales posibles identificados mediante la Microscopia Electrónica de Barrido.....	45
Tabla 2. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148001.....	52
Tabla 3. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148002.....	53
Tabla 4. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148003.....	54
Tabla 5. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148004.....	55
Tabla 6. Resumen de datos geocronológicos recopilados durante este estudio. Códigos de muestra completos y localización geográfica de las muestras, utilizadas para datación U-Pb en zircones detríticos.....	57

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO MINERALÓGICO-PETROGRÁFICO DE LAS LITOLÓGÍAS AFLORANTES EN EL SECTOR ALGARROBO-LA LLANDADA (ENTRE LOS MUNICIPIOS DE RIONEGRO- EL PLAYÓN, DEPARTAMENTO DE SANTANDER)\*.

**AUTORES:** Omar Felipe Latorre Ramírez, Nicolás Rojas Rodríguez\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Mineralógico, Petrográfico, Litología, Riolita, Formación Bocas.

### DESCRIPCIÓN:

Las rocas aflorantes en el sector Algarrobo-La Llandada (Entre los municipios de Rionegro- El playón, Departamento de Santander) y sus alrededores, corresponden a la Formación Bocas y a Riolitas que intruyen la mencionada formación. Geocronología U-Pb en zircones detríticos de una arenisca de la Formación Bocas reportó edades entre  $243,4 \pm 7,4$  Ma y  $2696,6 \pm 16,4$  Ma, lo que permite determinar que la máxima edad estratigráfica de los paleo sedimentos del protolito de esta unidad es del Changhsingian (finales del Pérmico). Por otra parte, la unidad de Riolitas agrupa rocas volcánicas y volcanosedimentarias, estas últimas datadas mediante Geocronología U-Pb en zircones detríticos de una toba lapilica y presenta edades entre  $249,7 \pm 7,4$  Ma y  $2171,1 \pm 13,8$  Ma, lo que permite determinar que la máxima edad de formación de este evento es del Wuchiapingian (finales del Pérmico).

Con las edades obtenidas para ambas unidades se infiere una coetaneidad de eventos en su formación, lo que confirma el magmatismo en el Permo-Triásico.

El análisis paragenético llevado a cabo mediante las siguientes técnicas: petrografía, mineralogía, Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), permitió identificar los diferentes eventos que presenta este bloque fallado entre la falla de Bucaramanga al Este y la falla de Lebrija al Oeste, dichos eventos son: (1) Evento sedimentario, (2) Evento magmático extrusivo, (3) Evento volcanosedimentario y (4) Evento hidrotermal.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Escuela de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa

## ABSTRACT

**TITLE:** MINERALOGICAL-PETROGRAPHIC STUDY OF THE OUTCROPPING LITHOLOGIES IN ALGARROBO – LA LLANDADA SECTOR (BETWEEN RIONEGRO – EL PLAYÓN TOWN, SANTANDER DEPARTMENT)\*.

**AUTHORS:** Omar Felipe Latorre Ramírez, Nicolás Rojas Rodríguez\*\*

**KEYWORDS:** Mineralogical, Petrographic, Lithology, Rhyolite, Formacion Bocas.

### DESCRIPTION:

The outcropping rocks in Algarrobo – La Llandada sector (between Rionegro – El Playón town, Santander department) and its surroundings, belong to the Formacion Bocas and the Rhyolites, which cut the mentioned unit. Detrital zircon U-Pb geochronology of a Formacion Bocas' sandstone reported ages between  $243,4 \pm 7,4$  Ma and  $2696,6 \pm 16,4$  Ma, what determines that the maximum stratigraphic age of the protolith's paleosediments of this unit corresponds to Changhsingian (Late Permian). Besides, the Rhyolites unit consists of volcanic and volcanosedimentary rocks, the latter were dated through detrital zircon U-Pb geochronology of a lapilic tuff and it informs ages between  $249,7 \pm 7,4$  Ma and  $2171,1 \pm 13,8$  Ma, what defines that the maximum setting-up age of this event corresponds to Wuchiapingian (Late Permian).

The ages of both units deduce contemporary events in their setting-up, which confirm the magmatism in the Permo-Triassic period.

The paragenetic analysis was accomplished by techniques such as petrography, mineralogy, X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). Thereby, it identifies that the faulted block presents different events between the east of the Bucaramanga Fault and the west of Lebrija Fault, these events are: (1) Sedimentary event, (2) Extrusive magmatic event, (3) Volcanosedimentary event and (4) Hydrothermal event.

---

\*Degree work

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: PhD. Luis Carlos Mantilla Figueroa

## **Introducción**

La finalidad de este proyecto de grado consiste en caracterizar mineralógica y petrográficamente las litologías volcánicas, subvolcánicas y sedimentarias pertenecientes a la Formación Bocas, que afloran en la zona NW del área contigua (Sector Algarrobo – La Llandada) de los Municipios Rionegro y El Playón respectivamente. Así mismo, se busca establecer los diferentes contextos paragenéticos y definir la sucesión de eventos de los procesos de formación de las rocas de interés.

Para llevar a cabo este trabajo, es necesario realizar técnicas y métodos para el estudio de la evolución geológica del área, teniendo en cuenta los siguientes análisis: (1) Microscopia de luz transmitida, (2) Microscopia electrónica de barrido (SEM), (3) Micro difracción de rayos X y (4) Geocronología.

## 1. Localización

El área de trabajo comprende parte de los Municipios El Playón y Rionegro, específicamente la parte W entre los sectores Algarrobo - La Llandada (Departamento de Santander), delimitado por las siguientes coordenadas:

**X= 1'090.000 m**

**X= 1'096.000 m**

**Y= 1'322.000 m**

**Y= 1'314.000 m**

Estas coordenadas comprenden una extensión superficial total de 48 km<sup>2</sup> que hacen parte del cuadrángulo H12 de Bucaramanga y H13, tomando como base las planchas a escala 1:100.000 (97 - Cáchira, 109 - Rionegro) y a las planchas escala 1:25.000 (97-III-D, 97-IV-C, 109-I-B, 109-II-A), pertenecientes al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, donde se presentan las siguientes unidades geológicas: Riolitas (r), Formación Bocas (TRb) (Ward et al., 1973).

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco occidental de la Cordillera Oriental (CO), en el Macizo de Santander (MS). Se presenta en un bloque caído producto de la interacción de la Falla de Bucaramanga y la Falla de Lebrija, la cual es una falla mayor asociada a la estructura en flor de la de Bucaramanga que muestra el límite occidental del Macizo de Santander (Velandia et al., 2017).



## 2. Planteamiento del Problema

Por medio del estudio mineralógico-petrográfico se pretende estudiar la evidencia del magmatismo del Triásico Temprano que está registrado por los diques riolíticos que intruyen las rocas sedimentarias al oeste de la Falla Bucaramanga-Santa Marta con una edad radiométrica de  $250.7 \pm 4.3$  Ma (Van der Lelij, 2013, Spikings et al., 2015 & Van der lelij et al., 2015). Para esto, se debe tener en cuenta el bloque ubicado entre la Falla de Bucaramanga y la Falla de Lebrija y también la edad en la que dichas fallas han tenido actividad alguna, puesto que posiblemente fueron un factor importante para dar lugar al presente magmatismo.

Además, se ha distinguido una gran variedad en el tamaño de unos clastos y a su vez diferentes posibles actividades para la formación de las distintas brechas encontradas en el área, por lo que se estudia a profundidad la proveniencia de dichos fluidos y los procesos que dieron lugar a la formación de estas rocas. Se requiere identificar si posiblemente actuaron fluidos hidromagmáticos, magmáticos, lávicos y material volcanoclástico. Por esta razón, es necesario plantear los diferentes eventos que han dado lugar a dichas litologías y que indican la presencia de diferentes tipos de flujos.

A través de la literatura se documenta de alguna manera más amplia sobre la Formación Bocas y su posible simultaneidad de depositación junto con el magmatismo del Triásico Temprano como se mencionó anteriormente, evidenciado en las Rolitas presentes en la Formación Bocas.

Estos flujos sugieren la evidencia de la actividad volcánica en el área de El Playón, para afirmar esto es necesario utilizar diferentes tipos de análisis incluyendo la petrografía, difracción de rayos X, Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), incluyendo otros métodos.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Realizar un estudio mineralógico y petrográfico de las litologías volcánicas, subvolcánicas y sedimentarias aflorantes en el sector Algarrobo-La Llandada (Entre los municipios de Rionegro-El playón, Departamento de Santander).

#### 3.2 Objetivos específicos

- Realizar una compilación y análisis de la información geológica disponible sobre el área de estudio para lograr contextualizar geológicamente dicha área.
- Reconocer las relaciones a escala macroscópica entre las diferentes litologías aflorantes en el área de estudio y establecer sus edades relativas.
- Realizar análisis de microscopía óptica y electrónica a las muestras de interés para determinar los contextos paragenéticos relacionados con su evolución geológica.
- A través de los nuevos datos, proponer un modelo geológico de formación de las litologías de interés.

#### 4. Antecedentes y Marco geológico

El área de estudio se localiza en el municipio El Playón, ubicado al norte del departamento de Santander en la Provincia Soto Mayor (Royer y Clavijo, 2001), delimitado al norte por el municipio de Cáchira, al este por el municipio de Suratá, al sur por los municipios de Matanza y Rionegro y al oeste por los municipios de Rionegro y Cáchira (Elplayon-santander.gov.co, 2017).

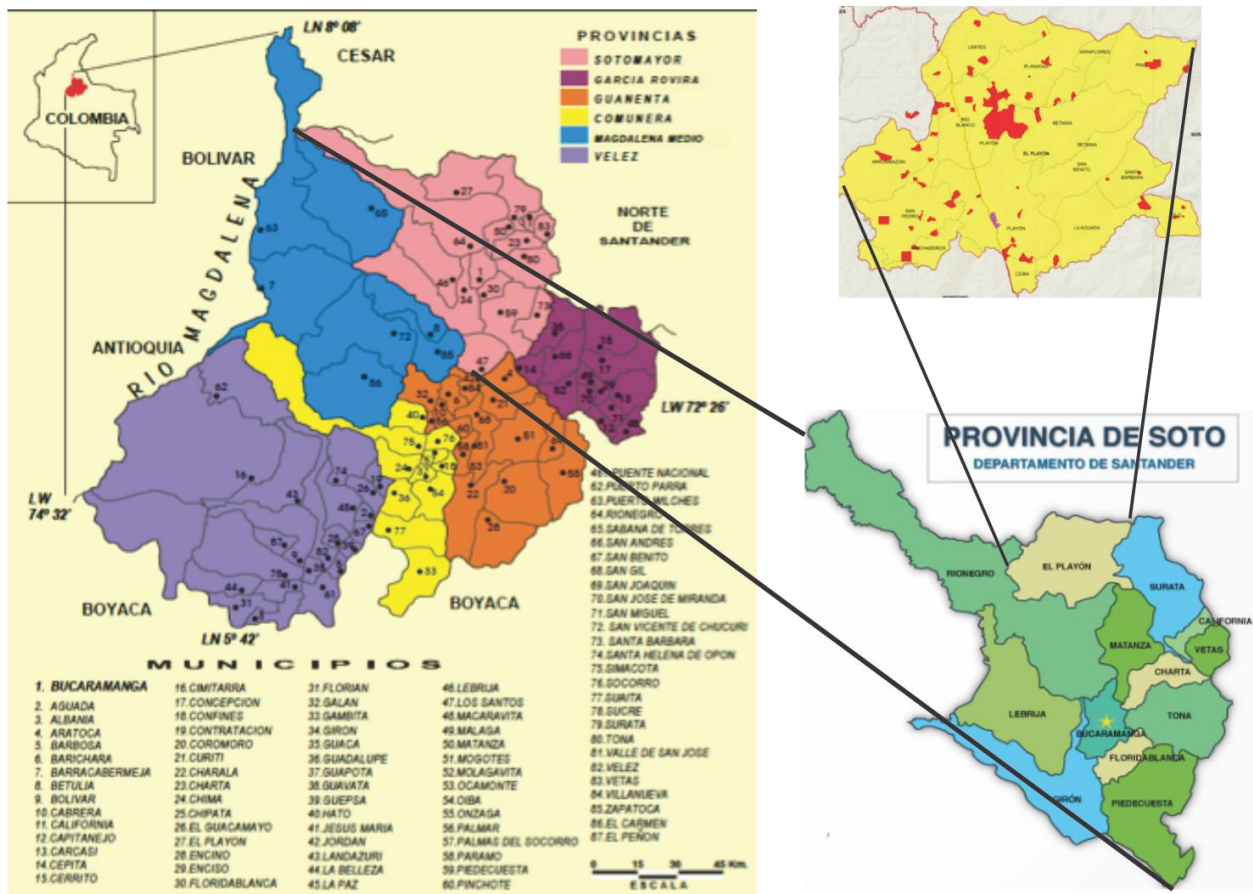
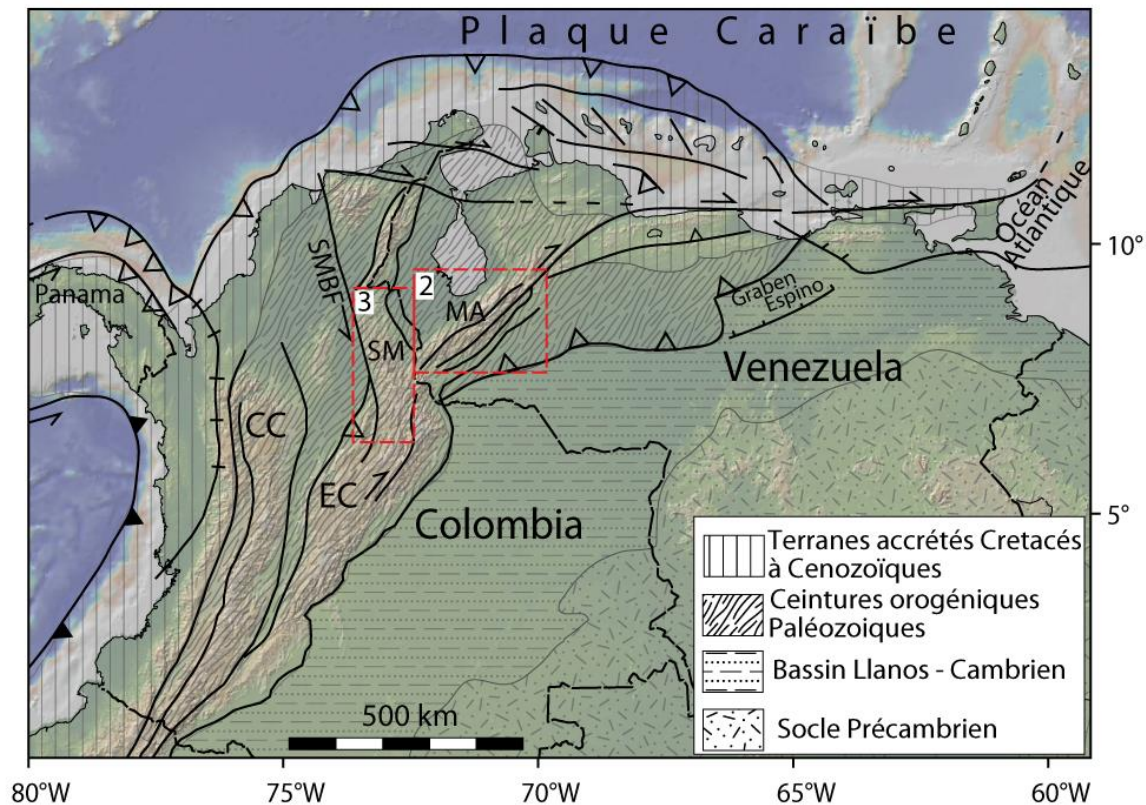


Figura 3. Localización y división político-administrativa del Departamento de Santander (Adaptado del IGAC, 1997). Modificado de Royero y Clavijo (2001).

Esta región pertenece al Sistema Andino de Colombia (SAC), que al igual que los Andes de Mérida y Ecuador conforman el denominado Bloque Andino (Pennington, 1981) o también

denominado Andes del Norte (Gansser, et al., 1973; Alemán & Ramos, 2000). Específicamente, el área de estudio se localiza en la Cordillera Oriental (CO) en el Macizo de Santander (MS), que corresponde al Terreno Chibcha (Toussaint y Restrepo, 1976), se ubica en un bloque esquinero del Bloque Maracaibo limitado por la Falla Bucaramanga-Santa Marta, Oca y Boconó (Tschanz et al., 1974, en Mantilla, Mendoza, Bissing & Craig, 2011).



*Figura 4.* Representación de los Andes del Norte de Colombia y Venezuela. Se muestra el margen de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. El Macizo de Santander enmarcado por el rectángulo de color rojo denotado por las iniciales SM. Adaptada de Van der Lelij (2015).

El Macizo de Santander está constituido por rocas metamórficas de edad Precámbrica a Paleozoica. Las unidades que corresponden con estas edades son el Neis de Bucaramanga, la Formación Silgara y el Ortoneis (Ward et al., 1973); éstas son cortadas por cuerpos intrusivos del

Triásico y Jurásico (Goldsmith, 1971), los cuales fueron agrupados y denotados como el Grupo Plutónico de Santander, este grupo está representado por las siguientes unidades geológicas: Batolitos y Plutones, Batolito de Mogotes (RC), Batolito de Rionegro, Riolitas de la Formación Bocas (r) y rocas Diques (Ward et al., 1973). Las rocas sedimentarias que conforman el Grupo Suratá (Formación Diamante, Formación Tiburón y Formación Bocas) (Ward et al., 1973). Así mismo, son conocidas las Sedimentitas del Jurásico Inferior-Medio, que están conformadas por las Formaciones Montebel, Bocas y Jordán y por otro lado, el Jurásico Superior está compuesto por las Formaciones Girón, La Rusia y Arcabuco (Amaya, 2012). Se ha considerado la edad Triásico-Jurásico teniendo en cuenta las edades radiométricas K/Ar, Rb/Sr, U-Pb (Goldsmith, 1973, Hall et al., 1972, Van der Lelij et al., 2015, Spikings et al., 2015 & Van der Lelij, 2013).

El levantamiento actual del Macizo de Santander comienza en el Terciario Tardío y continúa en el Pleistoceno. Este levantamiento es acompañado por apreciables fallas de alto y bajo ángulo; las más sobresalientes son las fallas noroeste, con tendencia vertical de la Falla de Bucaramanga, en el lado oeste del Macizo y donde el mayor desplazamiento de estas fallas es producto de los strike-slip (Goldsmith, 1971).

Las Riolitas de la Formación Bocas son cuerpos intrusivos, granófiros y brechas que se encuentran en la parte norte del cuadrángulo H-12, al oeste de la Falla de Bucaramanga. Esta unidad se encuentra representada por cuerpos volcánicos principalmente de riolitas, granófiros y brechas que afloran al occidente de El Playón, en el caserío de Ceiba, en la carretera El Playón-Cuesta Rica al suroriente de Coromoro, al oriente de Encino, al norte del Departamento de Santander y al suroccidente del municipio de Onzaga. Las rocas volcánicas son de color gris, gris claro, gris verdoso y rosado pálido; presentan texturas afaníticas, porfiríticas y esporádicamente esferulíticas; están compuestas de plagioclasa, cuarzo, ortoclasa, máficos y escasos minerales

accesorios. La presencia de rocas porfíricas de composición dacítica en el área de California y Cachirí, que cruzan sedimentitas del Cretácico Inferior, indica que gran parte de los cuerpos volcánicos riolíticos y porfíricos dacíticos son posteriores al Cretácico Inferior, aunque Ward et al. (1973) las considera de edad Jurásica a posiblemente Cretácica.

Las brechas contienen fragmentos rojos, grises verdosos y grises rosáceos. Algunas de las rocas presentan prominentes esferoides grises con bordes blancos en una matriz afanítica blanca grisácea con escasos minerales máficos rosados. Se hallan cristales pequeños diseminados de pirita en algunas muestras y en otras se encuentran bandas de flujo (Ward et al., 1973).

Las rocas magmáticas del Paleozoico Tardío son escasas o ausentes en el Macizo de Santander y el magmatismo del Triásico Temprano está registrado por los diques riolíticos que intruyen las rocas sedimentarias al oeste de la Falla Bucaramanga-Santa Marta con una edad radiométrica de  $250.7 \pm 4.3$  Ma (Van der Lelij, 2013, Spikings et al., 2015 & Van der lelij et al., 2015). Mientras que los granitoides y riolitas que cristalizaron durante los 272-196 Ma, se formaron por un sistema de arco continental (Van der lelij, 2013).

Se han cartografiado varios cuerpos intrusivos de pocos  $\text{km}^2$  aflorando en superficie, se localizan principalmente al oeste de la Falla Bucaramanga y en la parte sur, las riolitas que ocurren están relacionadas con la Formación Bocas. Pero, hacia el norte dicha relación no se encuentra; por el contrario, se presenta en contacto con el Ortoneis, con la Tonalita y en el extremo norte con el Neis de Bucaramanga. En general, estos cuerpos están conformados por riolitas afaníticas, porfíricas brechosas y microbrechosas; en algunos sectores ocurren aglomerados volcánicos y riolitas. En muestra de mano, las riolitas son de color gris a gris verdoso y en sección delgada, las riolitas presentan textura porfírica a microporfírica con

fenocristales de minerales como cuarzo, feldespatos y clorita incluidos en una matriz de tamaño criptocristalino, sus minerales accesorios son calcita, zircón y algunos opacos (Arias et al., 1978).

Además, ocurre un tipo de riolita con características metamórficas en la plancha 97, específicamente al este del caserío La Esperanza, entre la carretera al mar y el Alto Caraño. Composicionalmente, son riolitas porfíricas y brechas volcánicas que fueron sometidas a metamorfismo dinámico; algunas de estas rocas alcanzaron la sub-facies más baja de los esquistos verdes (Arias, et al., 1978).

En cuanto al material sedimentario, Moreno et al. (2016) explican que en cercanías a Covarachía (Norte de Boyacá) se presentan pequeños enclaves gabroicos afectando ortoneises, que podrían ser coetáneos con los basaltos de la Formación Nogontova. No obstante, las unidades volcanosedimentarias de la Cordillera Oriental que podrían correlacionarse con dichos basaltos son las formaciones Bocas y Jordán pertenecientes al Jurásico Temprano. Las formaciones Bocas y Jordán tienen tobos y material volcánico ácido coetáneo a la sedimentación. La existencia de sedimentos lacustres en estas formaciones podría haber generado las condiciones para la creación de estructuras almohadilladas en los basaltos.

Remy et al. (1975) expone que la aparición del fósil *Phlebopteris brannei* (White) Gothan se puede relacionar con microflora del género *Classopollis*, el cual establece la edad de la Formación Bocas como Jurásico Inferior.

Dentro de la Formación Bocas se encuentran fósiles (*Glossopteris* sp. And *Classopollis* sp), que datan edad del Jurásico (Mojica et al., 1996). Sin embargo, los *Glossopteris* también existían durante el Pérmico (McLoughlin et al., 1997).

## 5. Métodos

Para el desarrollo de este proyecto, se tuvieron en cuenta parámetros bastante específicos sobre los factores clave de su resultado, como son los análisis macro y microscópico, además de acompañarlos de análisis posteriores desarrollados por diferentes laboratoristas experimentados, con el propósito de identificar las litologías aflorantes en la Franja Rionegro – El Playón, específicamente de las unidades que se observan desde Algarrobo hasta La Llandada.

Primeramente, se buscó la información pertinente de diferentes autores acerca de la Formación Bocas y los cuerpos Riolíuticos presentes en el área de estudio, para conocer su marco geológico regional y local, anexando información de las unidades relacionadas directamente, tanto en nuestra zona de estudio como en los diferentes sectores donde se ha reportado con anterioridad la Formación Bocas y los cuerpos Riolíuticos.

Posterior a la contextualización de nuestro primer objetivo, se realizó una salida de campo, con el fin de recolectar datos y muestras de la zona para determinar las litologías aflorantes mediante descripciones macroscópicas, para esto se utilizaron los siguientes parámetros: para rocas sedimentarias, el tamaño de grano se basó en la clasificación propuesta por C.K.Wentworth (1922); en Friedman et al. (1922) y para determinar el nombre según su clasificación textural, se usó Folk (1974); para rocas volcánicas, el triángulo de clasificación de rocas volcánicas propuesto por Streckeisen (1979) y finalmente para rocas o depósitos volcanoclásticos, se empleó la clasificación propuesta por Schmid (1981).

El análisis petrográfico se desarrolló utilizando un microscopio de luz transmitida de marca NIKON ECLIPSE E200 50/POL con pantalla y cámara integrada, ubicado en el Laboratorio de

Microscopia Óptica de la Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander. Además, se usó un microscopio de luz transmitida de marca LEICA DM750P con cámara integrada, ubicado en el Laboratorio del Grupo de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) en el Parque Tecnológico de Guatiguará. Teniendo en cuenta la complejidad y detalle que se requerían para definir este tipo de litologías y su historia paragenética, se realizó el análisis petrográfico correspondiente a 11 secciones delgadas, efectuando un conteo de 300 puntos a cada una para la clasificación textural y composicional de rocas sedimentarias propuesta por Folk (1974), clasificación del tamaño de grano propuesta por Murcia et al. (2013), siguiendo la guía de clasificación de Schmid (1981) para rocas volcanoclásticas y finalmente la clasificación propuesta por Streckeisen (1979) para rocas volcánicas.

Se realizaron métodos de tinción para feldespatos potásicos y carbonatos, los cuales fueron llevados a cabo por los laboratoristas pertenecientes a la Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander. La tinción para feldespatos potásicos se basó en exponer la sección delgada a vapores del ácido fluorhídrico al 40%, posterior a ello se sumerge la sección en una solución de cobalto nitrito de sodio y se lava la muestra. Para la tinción de carbonatos, se sumergió la sección delgada en una solución de agua destilada, ácido clorhídrico al 10%, rojo de alizarina y ferrocianuro de potasio.

La difracción de rayos X realizada en un difractómetro de polvo de marca BRUJER modelo D8 DISCOVER con Geometría DaVinci y la Microscopia Electrónica de Barrido, fueron desarrolladas en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, por sus respectivos laboratoristas, este proceso facilitó la diferenciación de los minerales que tenían mayor complejidad de reconocer mediante los métodos de análisis desarrollados anteriormente. Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados

de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD). La interpretación de los datos de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) se basó en el libro *Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals* (Severin , 2004).

La edad geológica de depositación de las litologías de estudio ha sido un tema de discusión y debate en varios artículos y se ha desarrollado anteriormente mediante bioestratigrafía para la Formación Bocas. Sin embargo, en este trabajo se elabora un método diferente de correlación cronoestratigráfica, mediante un análisis de isótopos inestables de U-Pb en zircones detríticos, extraídos en el Laboratorio ZirChron LLC (Tucson, AZ) y con su posterior procesamiento.

Para la realización del esquema geológico, se utilizó el programa ArcGis 10.5, con el fin de georreferenciar con exactitud las unidades y sus límites. Mediante este software e imágenes satelitales, se reconocieron las estructuras y fallas más importantes que afectan la zona de estudio y se delimitaron las unidades.

## **6. Resultados**

### **6.1 Relaciones de campo**

El trabajo de campo es fundamental para establecer la distribución espacial de las masas rocosas y conocer las relaciones entre ellas. Básicamente se realizaron dos recorridos en el área del proyecto. El primer recorrido se desarrolló en el desvío hacia la parte oeste que comunica la vía de Rionegro – El Playón, que comprende una carretera destapada hacia Algarrobo, Rionegro y el segundo recorrido se realizó en cercanías a la Vereda Tres Portones del municipio El Playón.

En el primer recorrido se observaron rocas sedimentarias, donde predominan intercalaciones de lodolitas en capas de 2 metros con areniscas de espesor variable entre 0,5 a 1 metro. Algunas areniscas efervescen con ácido clorhídrico, lo que indica su contenido de carbonatos. Estratigráficamente, presentan una dirección y rumbo preferente de  $320^{\circ}/82^{\circ}$  (tomado en azimut de rumbo). Por otra parte, se observaron rocas volcánicas con estructuras de lavas en contacto con rocas sedimentarias, lo cual le otorga a la roca una textura peperítica; metros más adelante por la misma vía, se identificaron brechas con material volcánico in situ con presencia de sulfuros.

En este primer recorrido de campo se identificaron varios eventos en la zona, en estos eventos se incluyen la depositación de la Formación Bocas y su posible coetaneidad con flujos de lava riolíticos. Posterior a ello, ocurren brechas de apariencia volcánica, las cuales se describen con mayor detalle en microscopía.

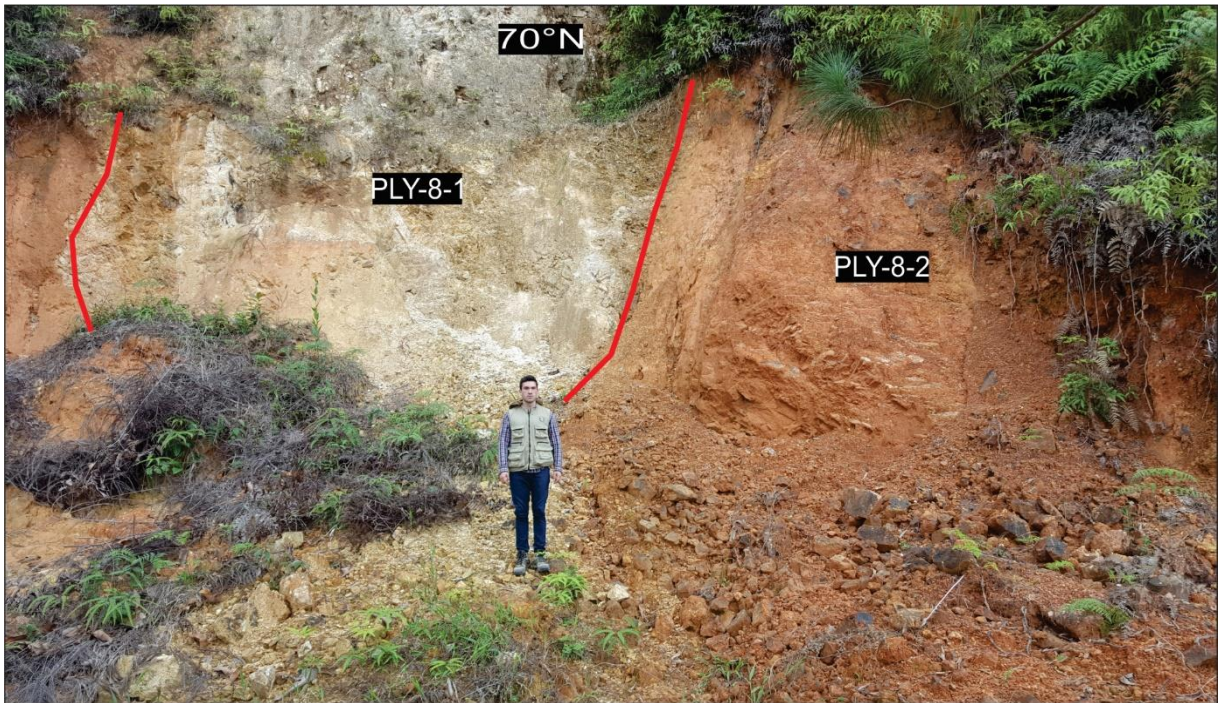
El segundo recorrido de campo fue en las cercanías a la Vereda Tres Portones, donde se identificaron de igual forma diferentes tipos de roca como rocas sedimentarias, brechas de apariencias magmática e hidrotermal con presencia de sulfuros de pirita y nuevamente riolitas. Además, existe la presencia de tobas, las cuales son explicadas en detalle en la sección de petrografía. Dentro de los rasgos geológicos más importantes que se observaron durante este recorrido, se halla la presencia de un contacto entre riolitas y brechas volcánicas. Se debe resaltar que una de las características con las que se determinó dicho contacto es la ocurrencia superficial de la roca que se encuentra expuesta a la intemperie, por lo que se realizó muestreo de cada cuerpo de roca para su posterior análisis macroscópico.



*Figura 5.* Afloramiento de rocas sedimentarias con intercalación de areniscas y lodolitas (contacto en línea roja) con su respectivo muestreo. PLY-01-02 y PLY-01-01 correspondientes a una arenisca color crema y a una lodolita negra respectivamente. Estratificación predominante:  $320^{\circ}/82^{\circ}$  (tomada en azimuth rumbo). Estación: PLY-1. Coordenadas: X = 1'094.067, Y = 1'314.336, Z = 587 [m].



*Figura 6.* Afloramiento donde se aprecian flujos de lava riolíticos reportados por Van Der Lelij (2013) en contacto con rocas sedimentarias. Se presenta la muestra PLY-02-01 con textura peperítica y la muestra PLY-02-02 que corresponde a una riolita afanítica. Estación: PLY-2. Coordenadas: X = 1'094.214, Y = 1'314.000, Z = 569 [m].



*Figura 7.* Afloramiento de contacto (líneas rojas) entre dos litologías que corresponden a riolitas (PLY-8-1) con tonalidad blanca y brechas volcánicas (PLY-8-2) con tonalidad anaranjada. Estación: PLY-8. Coordenadas: X = 1'093.339, Y = 1'317.549, Z = 1050 [m].



*Figura 8.* Muestra PLY-8-1 que corresponde a una roca volcánica de tonalidad gris claro. Presenta una textura porfirítica y los cristales se observan anhedrales a subhedrales, inequigranulares de grano fino a medio, que corresponde a riolita.



*Figura 9.* Muestra PLY-8-2 que corresponde a una roca volcánica de tonalidad rojiza que presenta clastos subangulares a subredondeados de cuarzos y plagioclasas. Según el tamaño del material piroclástico se denomina como una toba lapilica.

## **6.2. Descripción macroscópica**

### **PLY-01-01**

Roca sedimentaria color gris claro a gris oscuro con un armazón lodosoportado y una matriz lodosa. Su clasificación textural está determinada por los porcentajes de arena 5%, arcilla 50% y limo 45%, que corresponde a una lodolita de grano muy fino.

### **PLY-01-02**

Roca sedimentaria de color crema con un armazón lodosoportado y una matriz limosa. La roca está bien cementada con escasa porosidad, presenta un tamaño de grano fino a muy fino. Su

clasificación textural está definida por los porcentajes de arena 55%, limo 40% y grava 5%, que corresponde a una arenisca de grano fino limosa.

### **PLY-01-03**

Roca sedimentaria de color gris oscuro, que presenta armazón arenosoportado y tamaño de grano de arena muy fina a fina bien calibrada con matriz lodo calcárea. Se clasifica como una arenisca de grano muy fino a fino ligeramente calcárea.

### **PLY-02-01**

La roca presenta un contacto entre un cuerpo sedimentario ubicado hacia el techo y hacia la base un cuerpo ígneo, formando en el intermedio una textura peperítica.

El techo de la roca corresponde a un cuerpo sedimentario de color gris claro a gris oscuro, de tamaño de grano muy fino, equigranular, de armazón arenosoportado y matriz arcillosa; según su clasificación textural corresponde a una arenisca. El intermedio se observa el contacto y la formación de la textura peperítica, producto de la interacción del cuerpo sedimentario e ígneo. En la base ocurre un cuerpo ígneo de tonalidad gris claro debido a la presencia de cuarzo y feldespatos, con textura fanerítica y tamaño de grano grueso inequigranular; según la clasificación composicional dado por los porcentajes (cuarzo 50%, plagioclasas 15%, alcalinos 35%), esta roca corresponde a una riolita.

### **PLY-02-02**

Esta roca es sedimentaria de color gris claro a gris oscuro con tamaño de grano muy fino equigranular, de armazón arenosoportado y matriz arcillosa; según su clasificación textural corresponde a una arenisca.

**PLY-02-03**

Roca volcánica de tonalidad gris claro a gris oscuro. Presenta una textura porfirítica con presencia de sulfuros diseminados (pirita). Los cristales son anhedrales a subhedrales, inequigranulares de grano fino a medio. Hacia los bordes, se observa la presencia de cuarzo bipiramidal y una tonalidad blanca con naranja producto de alteración supergena, dicha alteración genera el mineral alunita ocasionando la pérdida de pirita y la formación de cristales de tonalidad café (goethita); según la clasificación composicional es una riolita.

**PLY-03-01**

Roca sedimentaria que tiene laminación plano paralela, su tonalidad es gris oscuro, con armazón lodosoportado y matriz lodo calcárea, está bien calibrada y presenta moscovita como mineral accesorio en algunos sectores; según la clasificación para rocas aloquímicas, esta roca es una caliza tipo II, que recibe el nombre de roca aloquímica microcristalina.

**PLY-03-02**

Roca volcánica de color gris claro, presenta una textura porfirítica con ocurrencia de sulfuros diseminados (pirita). Los cristales son anhedrales a subhedrales, inequigranulares de grano fino a medio. Hacia los bordes de la muestra, se observa la presencia de cuarzo bipiramidal y una tonalidad blanca con naranja producto de alteración supergena, debido a la alteración se produce alunita ocasionando la pérdida de pirita y la generación de cristales de tonalidad café (goethita); según la clasificación composicional corresponde a una riolita. Además, contiene vetillas de sulfuros oxidados y se observa una tonalidad amarilla por los sulfuros.

**PLY-04-01**

Roca volcanoclástica de tonalidad gris oscura con presencia de clastos subredondeados a angulares embebidos en una matriz afanítica. Presenta enclaves de feldespatos debido a la cantidad de máficos y también ocurren cristales de cuarzo calcedónico; según el tamaño del material piroclástico, esta roca se denomina como toba lapilica.

#### **PLY-04-02**

Roca sedimentaria de color gris oscuro con una matriz lodosoportada, que presenta clastos de carbonatos. La roca contiene pirita como mineral accesorio tanto en la matriz como en los clastos. Debido a la angularidad que predomina en los clastos, la muestra corresponde a una brecha sedimentaria.

#### **PLY-04-03**

Roca sedimentaria de color gris oscuro con una matriz lodosoportada con presencia de clastos de material silíceo. Además, se observan venas de cuarzo. Debido a la angularidad que predomina en los clastos, la muestra corresponde a una brecha sedimentaria.

#### **PLY-05-01**

Roca volcanoclástica de tonalidad gris clara a oscura, con presencia de clastos subredondeados a angulares, embebidos en una matriz afanítica. Tiene pirita diseminada de modo aleatorio sobre la muestra; según el tamaño del material piroclástico se denomina como toba lapilica

#### **PLY-05-02**

Muestra de brecha con textura stockwork con evidencia de venas hidrotermales, las cuales cortan la matriz riolítica, cuya tonalidad es gris oscura.

**PLY-06-01**

Muestra de roca sedimentaria muy meteorizada de color blanco a anaranjado. Presenta una matriz limosa a arenosa y un armazón arenoso, tamaño de grano fino, bien seleccionado.; según la clasificación textural la muestra corresponde a una arenisca.

**PLY-07-01**

Muestra de roca sedimentaria arenosoportada bien seleccionada de tamaño de grano muy fino a fino y con color anaranjado debido a la alteración; según la clasificación textural, la muestra es una arenisca.

**PLY-08-01**

Roca volcánica de tonalidad gris claro a oscuro, que presenta una textura porfirítica y sus cristales son anhedrales a subhedrales, inequigranulares, su tamaño de grano es fino a medio; según la clasificación composicional corresponde a una riolita.

**PLY-08-02**

Roca volcánica de tonalidad rojiza debido a la oxidación de los minerales ferromagnesianos, presenta clastos de cuarzo y plagioclasa subangulares a subredondeados; según el tamaño del material piroclástico, esta roca se denomina toba lapilica.

**PLY-09-01**

Roca sedimentaria de color gris oscuro con una matriz lodosoportada, que presenta clastos subangulares a subredondeados de cuarzo y plagioclasa. Debido a la angularidad que predomina en los clastos, la muestra corresponde a una brecha sedimentaria.

**PLY-10-01**

Arenisca tobácea con tonalidad gris clara con tamaño de grano medio a grueso y presencia de fragmentos líticos dominantes de 2 mm.

**PLY-10-02**

Roca sedimentaria de color gris oscuro con una matriz lodosoportada, que presenta clastos subangulares a subredondeados de cuarzo y plagioclasa. Debido a la angularidad que predomina en los clastos la muestra corresponde a una brecha sedimentaria.

**PLY-11-01**

Roca sedimentaria con alteración supergena, que tiene una matriz lodosoportada con clastos subredondeados de tamaño de grano arena muy gruesa a guijas. Debido a la redondez de los clastos, esta muestra corresponde a un conglomerado.

**6.3 Análisis petrográficos y contextos paragenéticos**

El análisis petrográfico consistió en el estudio de 11 secciones delgadas de diferentes áreas de los trayectos realizados en campo desde Algarrobo, Rionegro hasta el municipio de El Playón, y áreas aledañas a éste. A continuación, se plantea una breve descripción de los diferentes resultados obtenidos (para un mayor detalle, dirigirse al APENDICE A: PETROGRAFÍA).

En la zona de estudio se han reportado los siguientes litotipos: cuerpos volcánicos principalmente de riolita, granófiros y brechas que afloran al occidente del Playón (Clavijo et al., 2001), además de limolitas oscuras, shales y arcillolitas de la Formación Bocas (Ward et al., 1973). Basado en la petrografía, se consideran cuatro eventos para los litotipos de la Formación

Bocas, denominados de la siguiente manera: **EVENTOS SEDIMENTARIOS** (agrupa minerales detríticos y aporte volcánico significativo), **EVENTO MAGMÁTICO EXTRUSIVO**, **EVENTO VOLCANOSEDIMENTARIO** y **EVENTO HIDROTHERMAL**.

### **EVENTOS SEDIMENTARIOS**

En casi todas las secciones delgadas se reportaron minerales de índole sedimentaria que dieron información sobre el protolito de la roca, estos minerales pueden ser de origen detrítico o volcánico. Los minerales representativos de este evento son: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, zircón y monacita. Fundamentalmente, estos minerales tienen forma anhedral y localmente subhedral, sus tamaños de granos son muy fino a fino, sin embargo, se identificaron fragmentos líticos volcánicos con tamaños más gruesos correspondientes a vidrios volcánicos y rocas ígneas de posible composición riolítica. Localmente, se evidencian fragmentos de pómez con textura fiamme mostrando la dirección preferente de depositación.

Se presentan muestras con cemento calcáreo, en algunos casos por el reemplazamiento de plagioclasa a calcita, en otros casos se presenta en fragmentos líticos de materiales sedimentarios ya previamente retrabajados. Finalmente y para resaltar de este evento, existe evidencia de una depositación interrumpida por eventos magmáticos y piroclásticos.

### **EVENTO MAGMÁTICO EXTRUSIVO**

Básicamente, se evidencia la presencia de diques y flujos de lava de composición riolítica con texturas microporfídicas, donde los minerales representativos de este evento son: cuarzo, ortoclasa, sanidina y minerales opacos idiomorfos. Los cuarzos y feldespatos son euhedrales a subhedrales de tamaño de grano fino, presentan texturas de embayamiento con bordes corroídos. Localmente, se hallan texturas mirmequíticas y lamelas de deformación, en una matriz

microcristalina con textura felsítica producto de la desvitrificación, la cual guarda relictos de vidrio volcánico y genera estructuras esferoidales. También se presentan localmente algunas venas de flujo con minerales isotrópicos presentando bordes de alteración en la muestra PLY-08-01.

### **EVENTO VOLCANOSEDIMENTARIO**

Ocurren una gran variedad de tobas y brechas de acuerdo al tamaño de los fragmentos y a los tipos composicionales de los piroclastos, donde se incluyen tobas cristalinas y líticas. A pesar de la complejidad de este evento, se afirma que los minerales representativos son: cuarzo, feldespatos potásico, minerales opacos y vidrio volcánico. Fragmentos de índole sedimentario y volcánico se caracterizan por su forma angular hasta subredondeada, mostrando la evidencia de depósitos volcánicos retrabajados. Es importante aclarar la evidencia de la composición riolítica en todas las secciones delgadas pertenecientes a este evento ya sea en la matriz (muestra PLY-10-01) o como fragmento piroclástico (muestra PLY-04-01). Sin embargo, se encontraron clastos sedimentarios correspondientes a areniscas con cemento calcáreo por lo que se presentan brechas polimícticas. Por último, algunas rocas presentan pirita diseminada.

### **EVENTO HIDROTERMAL**

Se presenta una muestra característica (PLY-05-02) con evidencias de hidrofracturamiento y actividad hidrotermal, donde los minerales principales de este evento son cuarzo y vidrio volcánico. Se resalta la presencia de riolita desvitrificada como matriz con fragmentos de vidrio, los cuales han sido fracturados y rellenados por los fluidos hidrotermales observados en venas de cuarzo con textura en mosaico y crustiforme.

## 6.4 Métodos de tinción

Este proceso se llevó a cabo a las muestras observadas en la Figura 10.

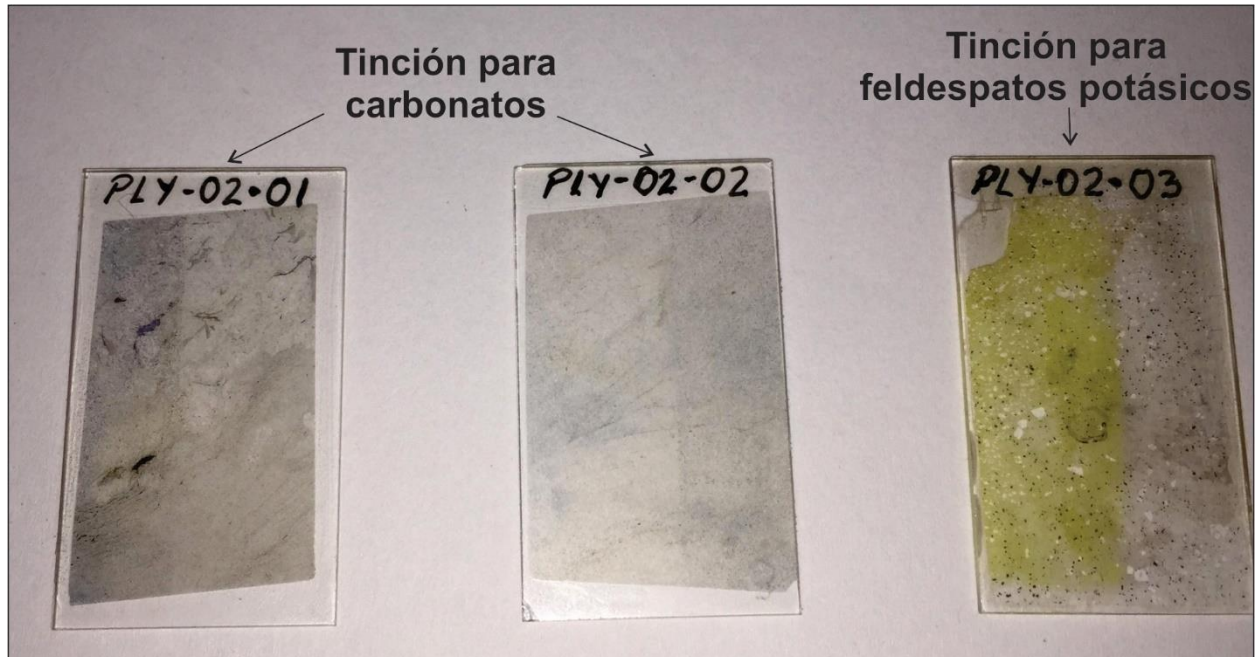


Figura 10. Fotografía de las secciones delgadas utilizadas para los métodos de tinción para carbonatos y feldespatos potásicos.

Se realizó tinción para feldespatos potásicos en la muestra PLY-02-03 con el fin de corroborar o corregir su clasificación composicional correspondiente a una riolita mediante el conteo en sección delgada de 300 puntos. En este proceso, los feldespatos potásicos se observaron en sección delgada con colores amarillos y/o naranjas y se determinó una muestra correspondiente con el nombre de **Riolita** de acuerdo a su composición mineralógica.

Por otra parte, la muestra PLY-02-01 presenta carbonatos de variedad **calcita** (tonalidades rosadas) al contrario de la muestra PLY-02-02 en la que ocurren dos variedades de carbonatos **calcita** y **dolomita**, la cual presenta una tonalidad morada lo que significa un mayor contenido de hierro.

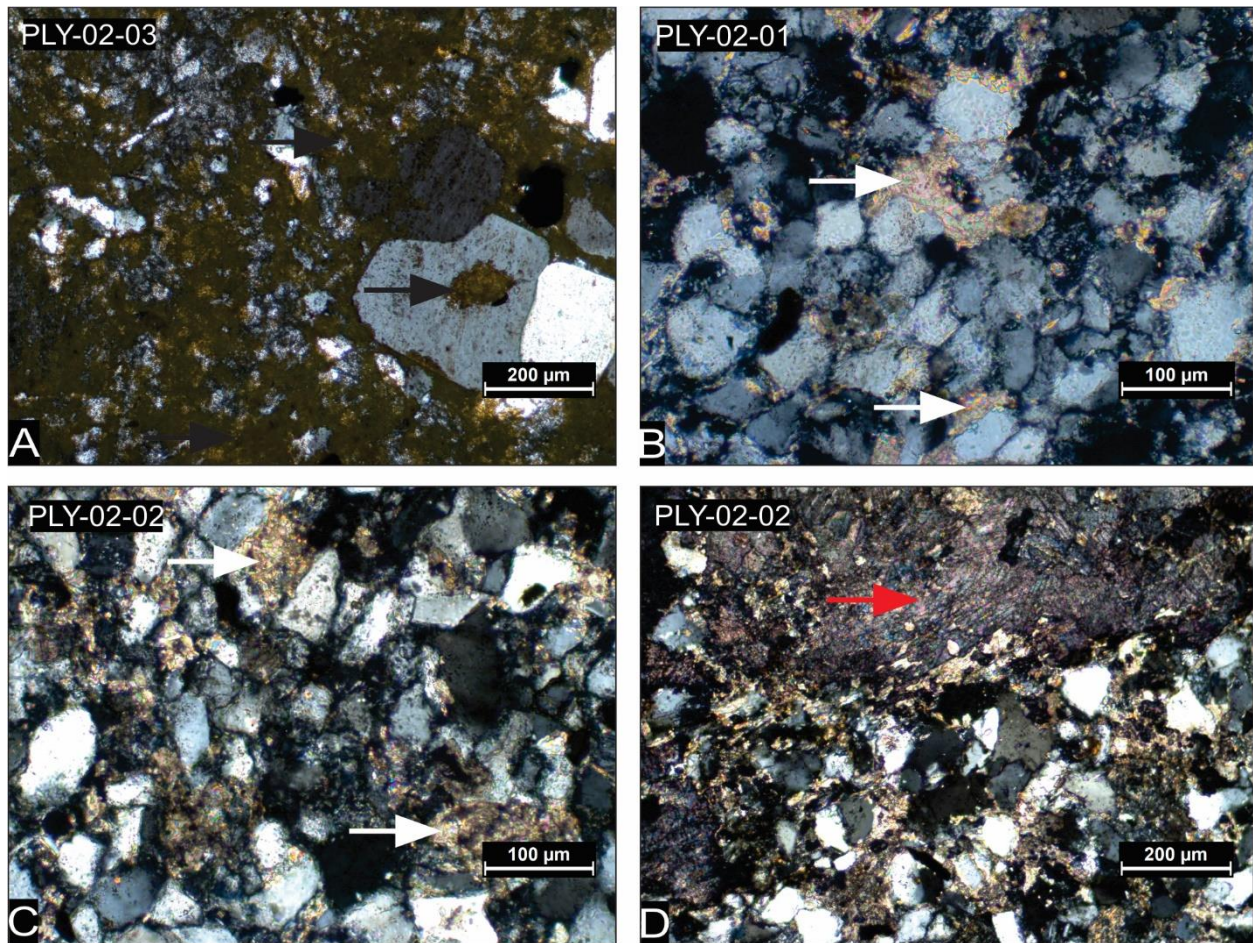


Figura 11. Microfotografías posteriores a los métodos de tinción. A) Feldespatos potásicos (flechas negras). B) y C) Carbonatos de variedad calcita (flechas blancas). D) Carbonatos de variedad dolomita (flecha roja).

### 6.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para el reconocimiento mineral que durante la petrografía no fue posible determinar, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta práctica se realizó a tres muestras seleccionadas: PLY-02-03, PLY-03-02 y PLY-05-02 (para un mayor detalle dirigirse al APENDICE B: MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO).

Tabla 1.

*Asociaciones minerales posibles identificadas mediante la microscopía electrónica de barrido.*

<b>Muestra</b>	<b>Puntos</b>	<b>Mineral</b>	<b>Observación</b>
<b>PLY-02-03</b>	PLY-02-03-A	Pirita	
	PLY-02-03-B	Zircón	
	PLY-02-03-C	Monacita	Elementos de las tierras raras (Pr, Nd, SM, Gd).
	PLY-02-03-D	Leucita	
<b>PLY-03-02</b>	PLY-03-02-A	Anatasa o Brookita	Elementos de las tierras raras (Pt, Nb) y bajo contenido de azufre.
	PLY-03-02-B	Pirita	Metal de transición (Ti).
	PLY-03-02-C	Galena	Metal de transición (Mo).
	PLY-03-02-D	Kaersutita	Grupo de los Lantánidos (Dy, Gd), Metal de transición (Y).
<b>PLY-05-02</b>	PLY-05-02-A	Xenotima	Elementos de las tierras raras (Nd, Dy, Ho, Er).
	PLY-05-02-B	Sillimanita	Se presenta en forma fibrosa.

## Resultados SEM

- **PLY-02-03**

A continuación, se exhibe el análisis de cuatro minerales diferentes en la muestra PLY-02-03.

### (1) PLY-02-03-A

Mediante el diagrama de espectro de elementos se infiere que estos picos de elementos predominantes corresponden al mineral pirita.

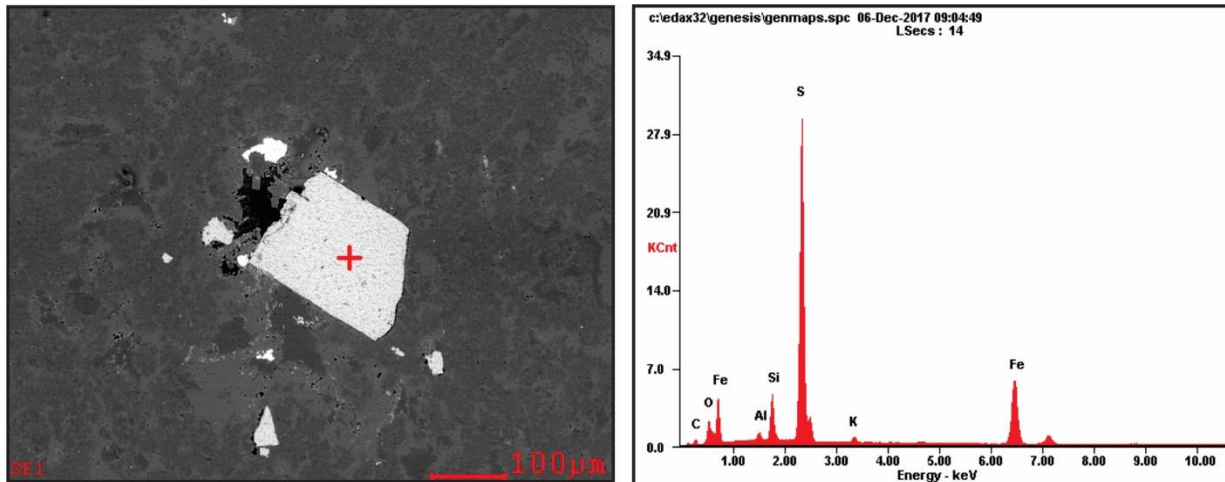


Figura 12. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral pirita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.

### (2) PLY-02-03-B

Según la morfología y el diagrama de espectro de elementos se considera que el mineral formado a partir de estos elementos corresponde a zircón.

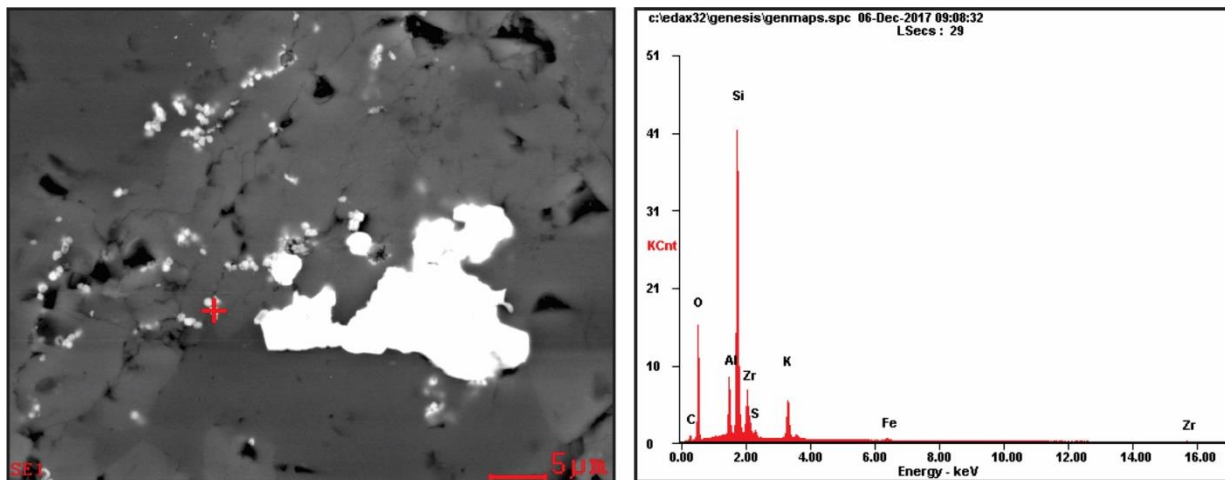


Figura 13. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral zircón, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.

### (3) PLY-02-03-C

Los picos de los elementos predominantes en este espectro se interpretan como monacita, sin embargo, presenta una anomalía en el porcentaje de sílice.

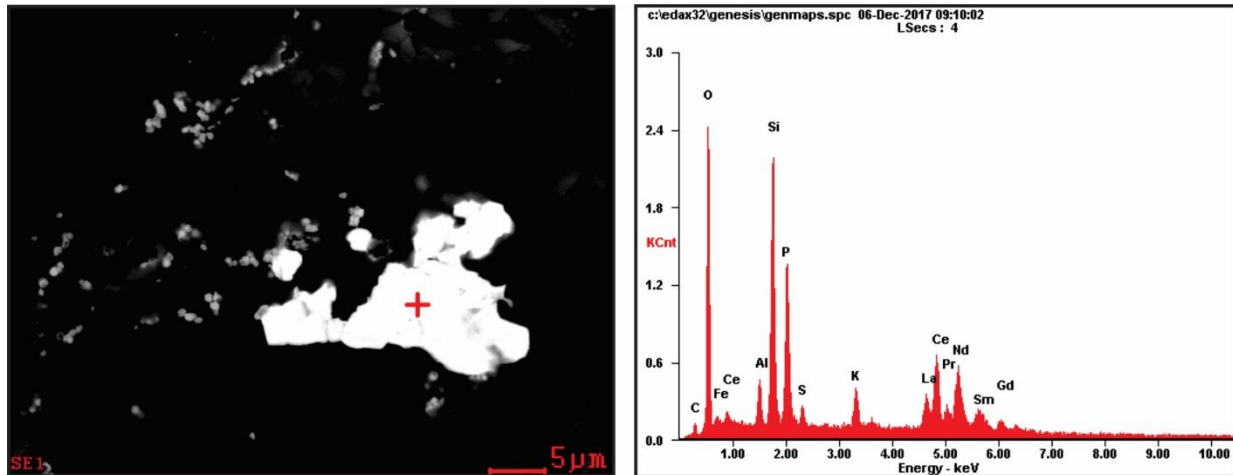


Figura 14. Morfología y diagrama de dispersión de elementos que pertenecen al mineral monacita, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido-UIS.

#### (4) PLY-02-03-D

A través del espectro de elementos, se observan porcentajes significantivos de sílice, aluminio y potasio, lo cual indica que es un aluminosilicato de potásico llamado leucita.

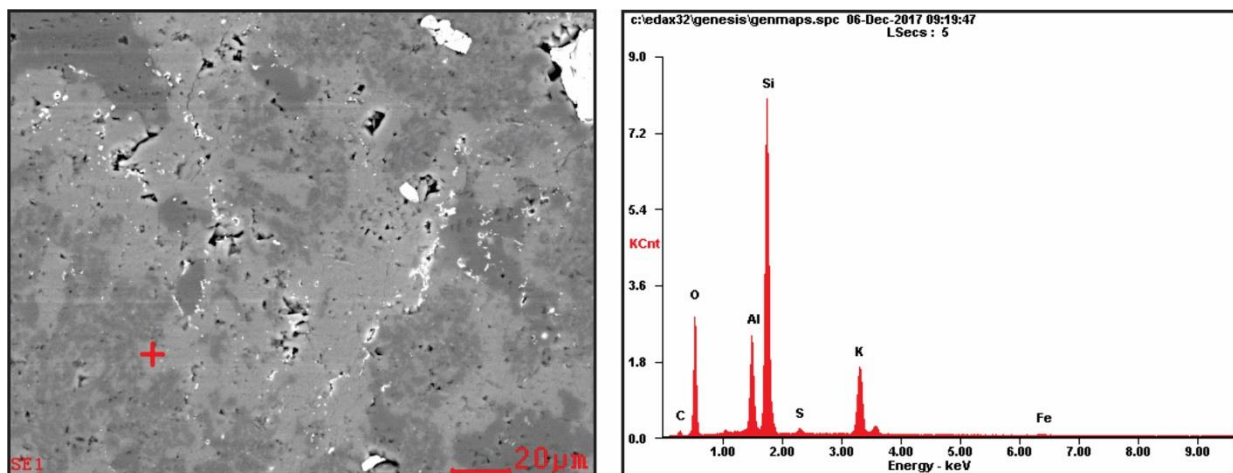


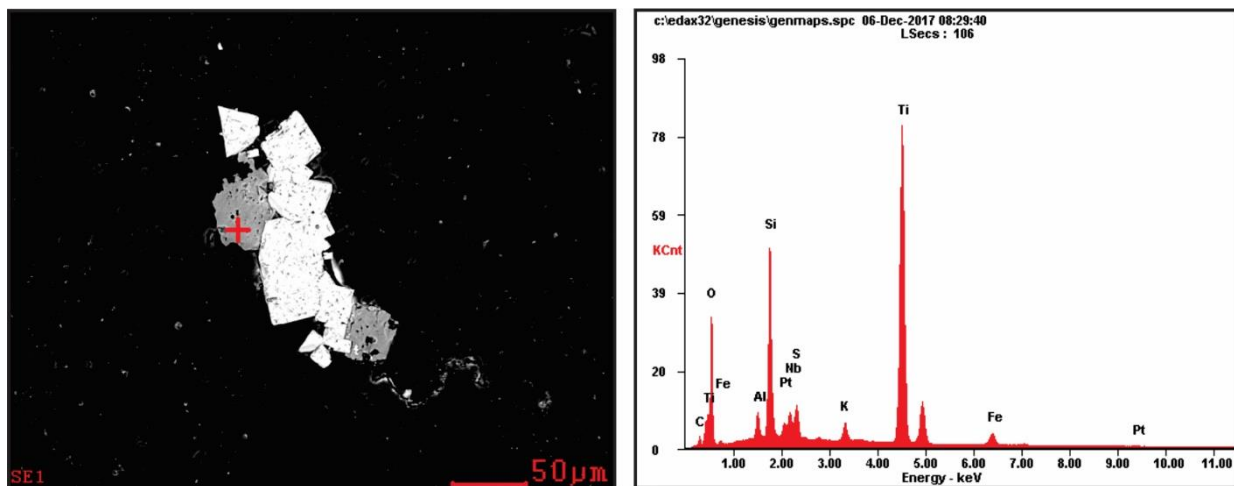
Figura 15. Morfología y diagrama de dispersión de elementos del mineral leucita, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido-UIS.

- **PLY-03-02**

En la muestra PLY-03-02 se analizaron cuatro minerales distintos, clasificados de la siguiente manera:

**(1) PLY-03-02-A**

La asociación más probable entre los elementos de mayor porcentaje en peso (Wt%) es Ti y O, que corresponde al mineral anatasa o brookita.



*Figura 16.* Morfología y diagrama de dispersión de elementos que pertenecen al mineral anatasa o brookita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.

**(2) PLY-03-02-B**

Según este espectro de elementos, este mineral se asocia a un sulfuro de hierro denominado pirita.

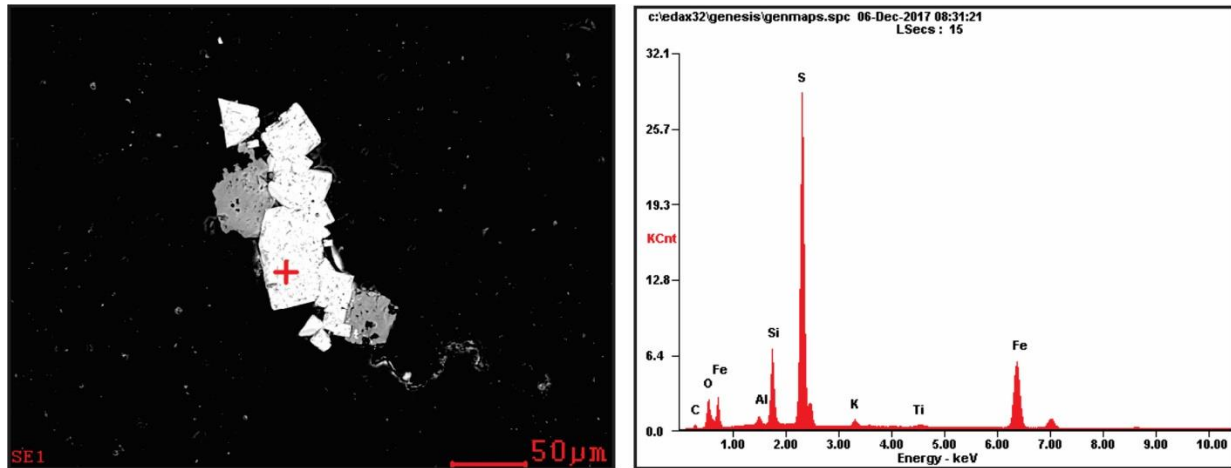


Figura 17. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral pirita, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido-UIS.

### (3) PLY-03-02-C

El esquema de elementos químicos muestra un posible sulfuro de plomo llamado galena.

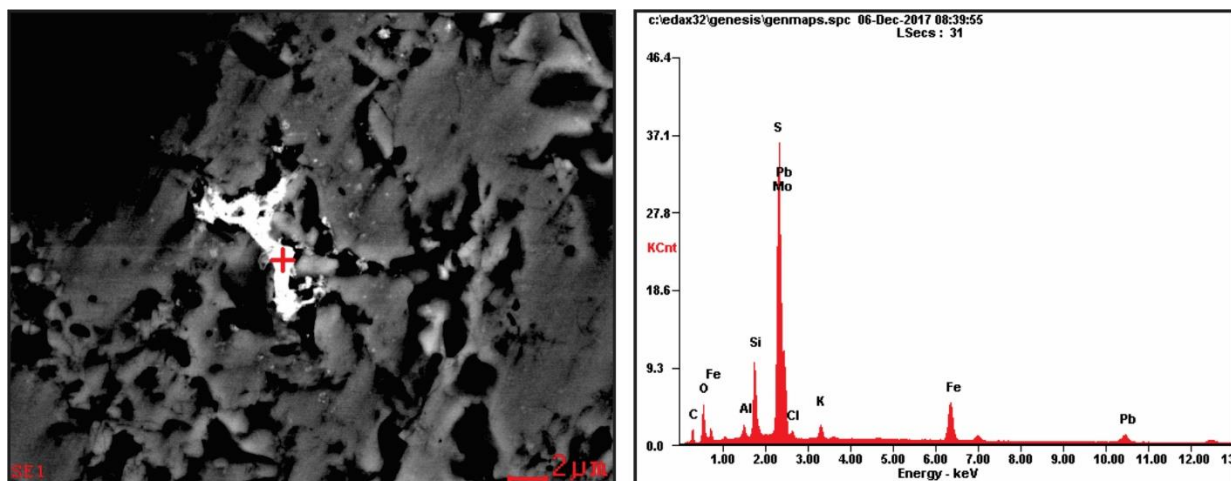


Figura 18. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral galena, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido-UIS.

### PLY-03-02-D

Según el espectro químico de elementos se considera que este mineral es un anfíbol de tipo kaersutita.

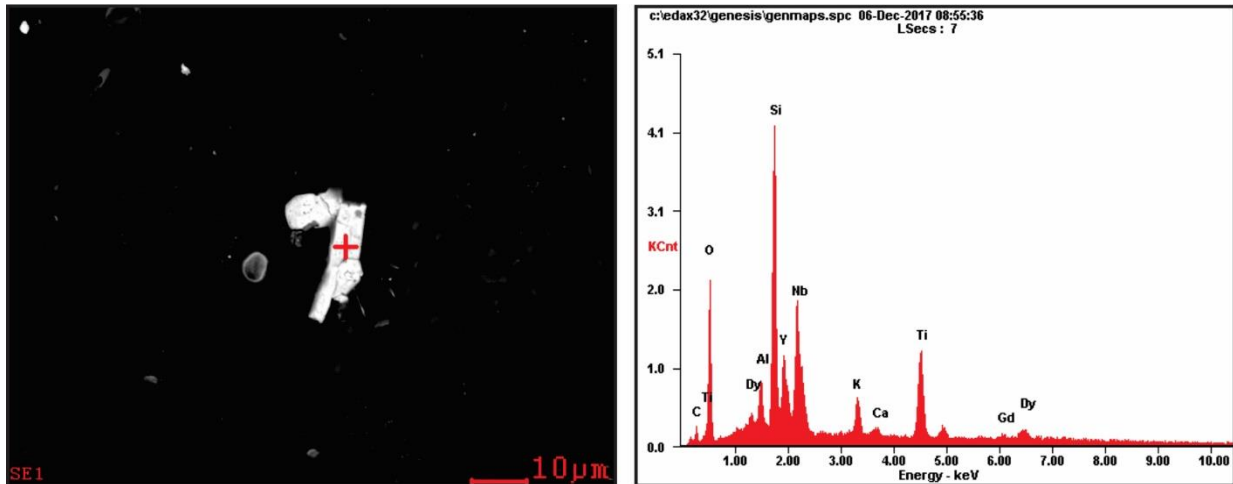


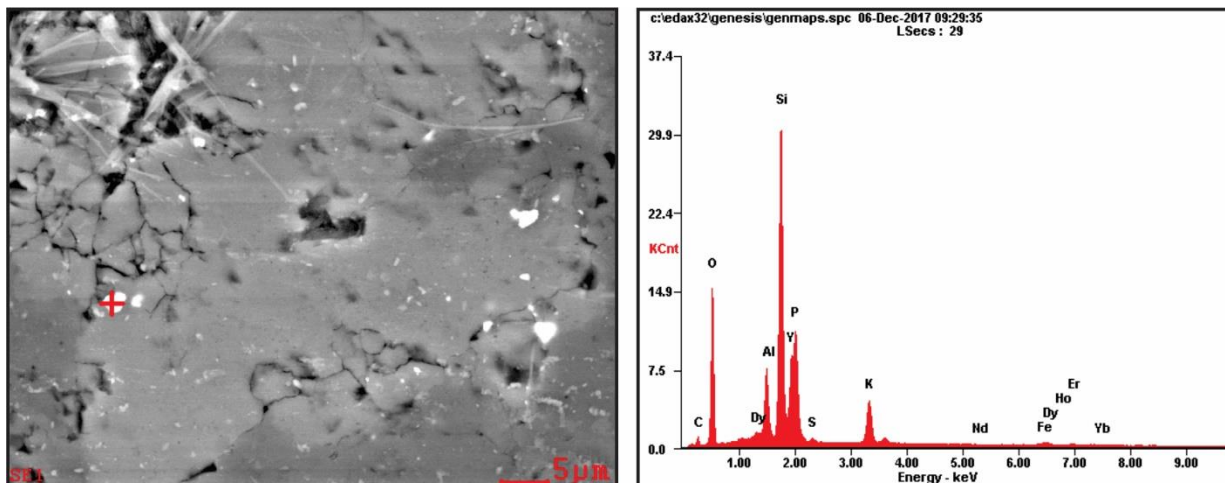
Figura 19. Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral kaersutita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.

### PLY-05-02

Se estudiaron dos minerales en la muestra PLY-05-02, los cuales fueron clasificados así:

#### PLY-05-02-A

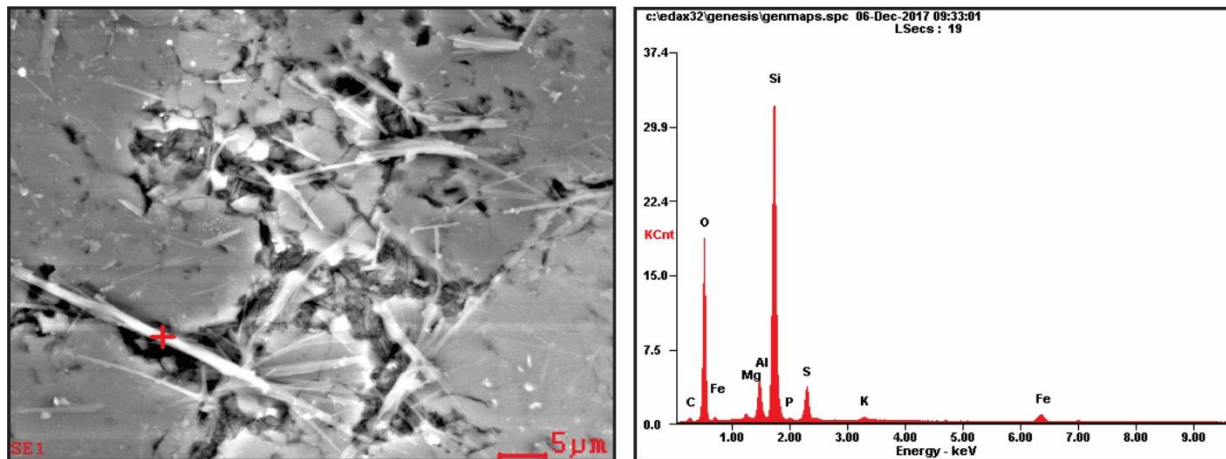
Mediante el espectro de elementos se observa la presencia de itrio, iterbio y fósforo, fundamentales para la formación del mineral xenotima, este es un mineral raro que además está asociado a sílice y elementos de las tierras raras.



*Figura 20.* Morfología y diagrama de dispersión de elementos correspondiente al mineral Xenotina, laboratorio de microscopia electrónica de barrido-UIS.

### PLY-05-02-B

Mediante la morfología y el espectro de elementos se infiere que este mineral corresponde a sillimanita debido a los altos contenidos de sílice y aluminio.



*Figura 21.* Morfología y diagrama de dispersión de elementos que pertenece al mineral sillimanita, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido-UIS.

## 6.6 Difracción de rayos X (DRX)

Para identificar las fases minerales más detalladamente y mejorar el análisis mineralógico desarrollado durante la petrografía, se realizaron cuatro tomas de microdifracción de rayos X para las muestras PLY-04-01, PLY-05-01, PLY-08-01 y PLY-09-01 en zonas de interés donde se incluyen venas, clastos y matriz de la roca.

En las Tablas 2 a la 5, se describen cada una de las fases cristalinas presentes en los especímenes seleccionados de las muestras con códigos internos 18148001, 18148002, 18148003 y 18148004. Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 del International Centre

for Diffraction Data (ICDD). Desde la Figura 22 a la 25, se muestran los perfiles de difracción obtenidos con los análisis comparativos de las fases encontradas.

### 1. PLY-08-01 (18148001)

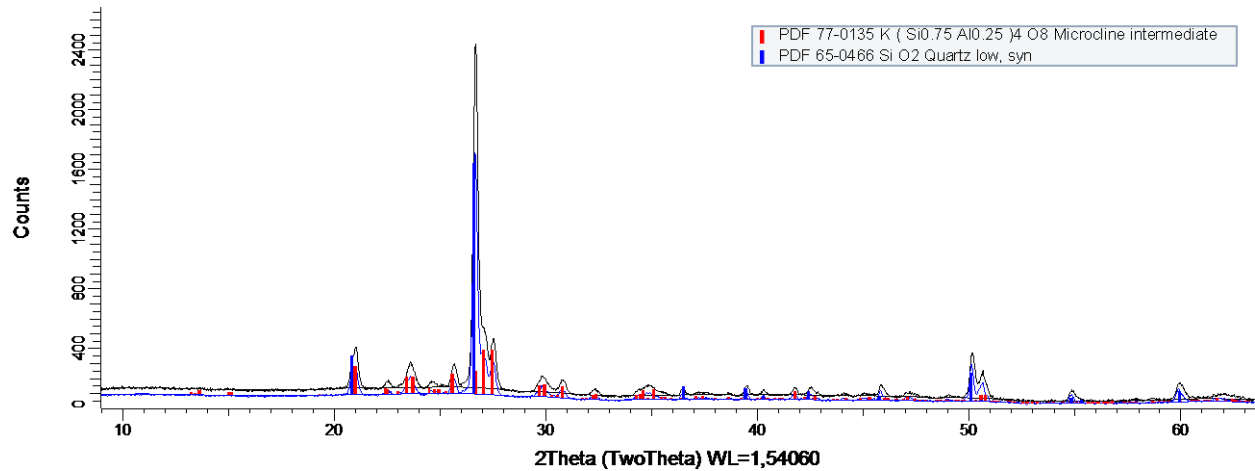


Figura 22. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148001.

Tabla 2.

Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148001.

	FASE	PDF No.	NOMBRE
Cristalino	K (SiO.75 AlO.25)4 O8	77-0135	Microclina intermedia
	Si O2	65-0466	Quartz low, syn

### 2. PLY-09-01 (18148002)

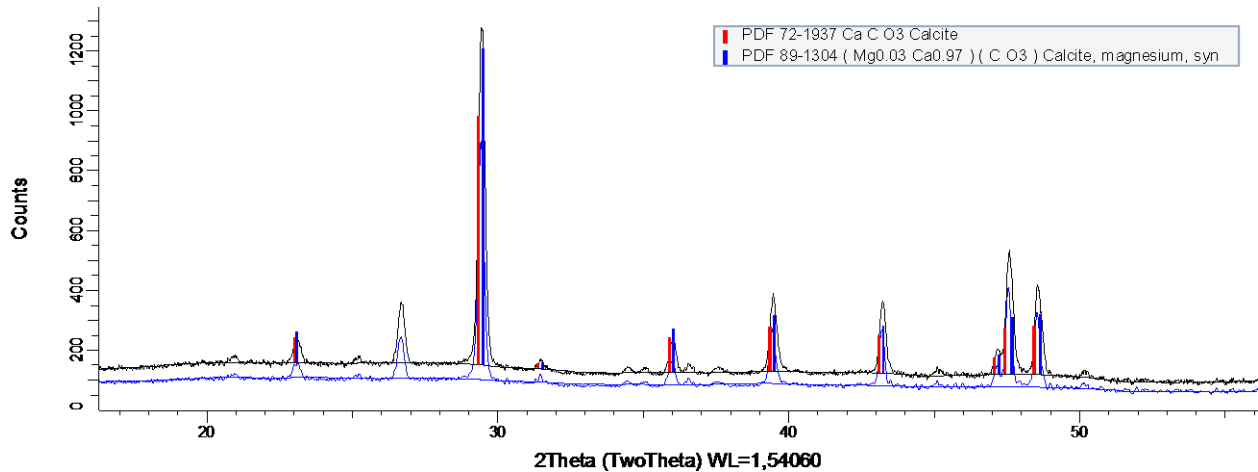


Figura 23. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148002

Tabla 3.

Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148002.

	FASE	PDF No.	NOMBRE
Cristalino	CaCO <sub>3</sub>	72-1937	Calcita
	(Mg <sub>0.03</sub> Ca <sub>0.97</sub> ) (CO <sub>3</sub> )	89-1304	Calcite, magnesium, syn

### 3. PLY-04-01 (18148003)

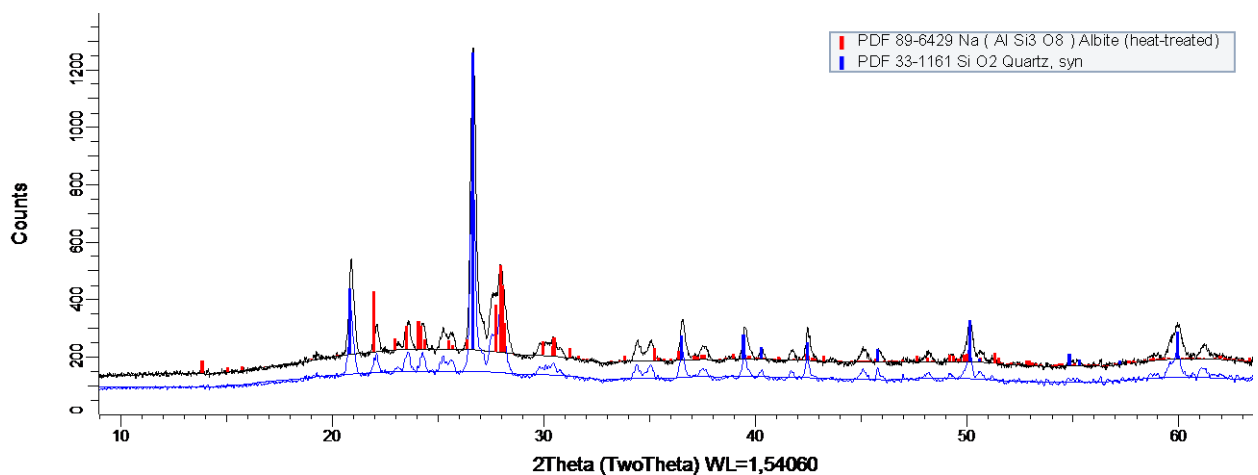


Figura 24. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148003.

Tabla 4.

Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148003.

	FASE	PDF No.	NOMBRE
Cristalino	Na (Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	89-6429	Albite (heat-treated)
	SiO <sub>2</sub>	33-1161	Cuarzo, syn

#### 4. PLY-05-01 (18148004)

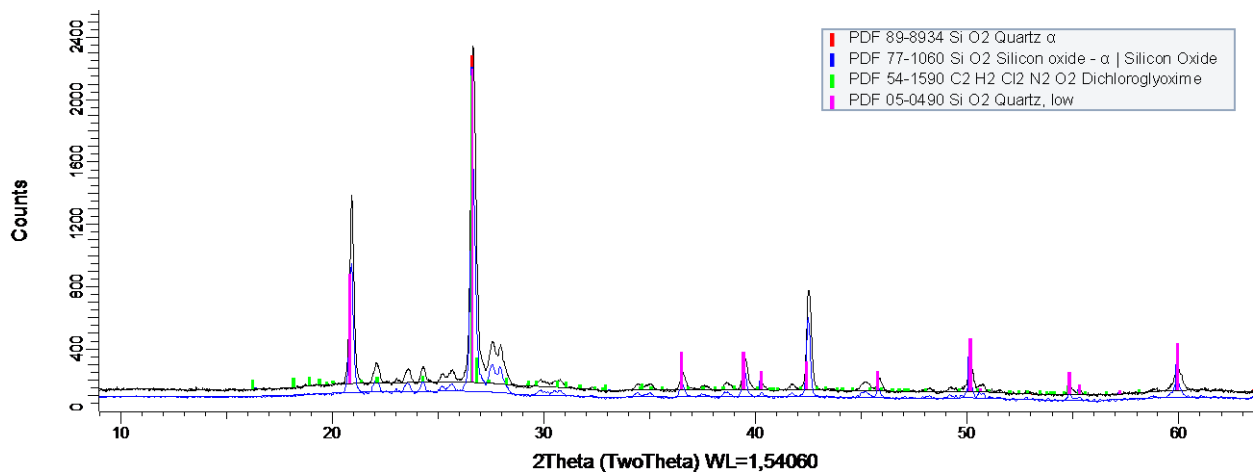


Figura 25. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148004.

Tabla 5.

*Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 18148004.*

	<b>FASE</b>	<b>PDF No.</b>	<b>NOMBRE</b>
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	89-8934	Cuarzo
	SiO <sub>2</sub>	77-1060	Silicon Oxide- $\alpha$
	C2 H2 Cl2 N2 O2	54-1590	Dichloroglyoxime
	SiO <sub>2</sub>	05-0490	Cuarzo, low

Para la muestra PLY-08-01 se registraron fases de microclina perteneciente al grupo de feldspatos con la tarjeta PDF 77-0135 y de cuarzo con tarjeta PDF 65-0466, las cuales se encuentran rellenando una vena con bordes de alteración, cuya mineralogía no pudo ser identificada en sección delgada.

La muestra PLY-09-01 presenta una gran variedad de clastos, que no pudieron ser identificados mineralógicamente en sección delgada, por ende, se determinaron fases de calcita con tarjeta PDF 72-1937 y de calcita, magnesium, syn con tarjeta PDF 89-1304 para un clasto específicamente.

Se definieron fases minerales para las muestras PLY-04-01 y PLY-05-01 correspondientes a la composición en la matriz por su dificultad de identificación en sección delgada. Fases de albita perteneciente al grupo de las plagioclasas con tarjeta PDF 89-6429 y de cuarzo con tarjeta PDF 33-1161 se reconocieron en la muestra PLY-04-01. Por otra parte, fases de cuarzo con tarjeta

PDF 89-8934, Silicon Oxide-  $\alpha$  con tarjeta PDF 77-1060, Dichloroglyoxime con tarjeta PDF 54-1590 y cuarzo, low con tarjeta PDF 05-0490 fueron identificadas en la muestra PLY-05-01.

### **6.7 Geocronología U-Pb en zircones detríticos**

Con el fin de determinar la temporalidad de los eventos sedimentarios, magmáticos y de brechificación en el sector Rionegro - El playón, se recolectaron dos muestras:

La primera muestra pertenece a la Formación Bocas (Ward et al., 1973), se localiza en el carreteable que comunica Rionegro - El playón y que comprende una carretera destapada hacia Algarrobo. Esta muestra está documentada con el código PLY-01-02 y fue clasificada como una arenisca de grano fino limosa. La otra muestra corresponde a un cuerpo brechificado (Ward et al., 1973) ubicada en el mismo carreteable, está documentada con el código PLY-04-01 y fue clasificada en sección delgada como una toba lapilica.

Para el evento magmático se usó la datación de U-Pb propuesta por Van Der Lelij (2013), obteniendo como resultado Triásico Temprano, siendo más específico en el Olenekian ( $250.7 \pm 4.3$  Ma).

Este estudio se realizó mediante geocronología U-Pb en zircones detríticos. A continuación, la Tabla 6 describe los resultados obtenidos.

Tabla 6.

*Resumen de datos geocronológicos recopilados durante este estudio. Códigos de muestra completos y localización geográfica de las muestras, utilizadas para datación U-Pb en zircones detríticos.*

Datos Muestra			Coordenadas		Coordenadas locales			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (zircón) Dato
Muestra	Tipo de Roca	Localización geográfica	Latitud	Longitud	X	Y	Z (msnm)	Age $\pm 2\sigma$ (Ma)
PLY-01-02	Arenisca de grano fino limosa	Via Rionegro-El Playón, desvío hacia Algarrobo	7° 26' 25"	73° 13' 45"	1'315.789	1'096.981	467	254 $\pm$ 7,4 (Ma)
PLY-04-01	Toba lapilica	Via Rionegro-El Playón, desvío hacia Algarrobo	7° 28' 58"	73° 15' 11.8"	1'314.971	1'094.756	504	256 $\pm$ 8,5 (Ma)

*Nota:* \*Coordenadas datum MAGNA-SIRGAS.

\*\* Coordenadas planas con Datum Bogotá (Bogotá 1975/ Colombia Bogotá zone (21897)).

Doscientos veinte y ocho (228) análisis fueron llevados a cabo en zircones detríticos extraídos de las siguientes muestras:

La muestra PLY-01-02 comprende una arenisca de grano fino limosa perteneciente a la Fm. Bocas, a la cual se le realizaron ciento seis (106) análisis, obteniendo edades entre 243,4  $\pm$  7,4 Ma y 2696,6  $\pm$  16,4 Ma (Ver Apéndice C). Existen picos prominentes en las edades de 254, 470, 588, 1018 y 1185 Ma; entre otros picos menos predominantes (Ver figura 26).

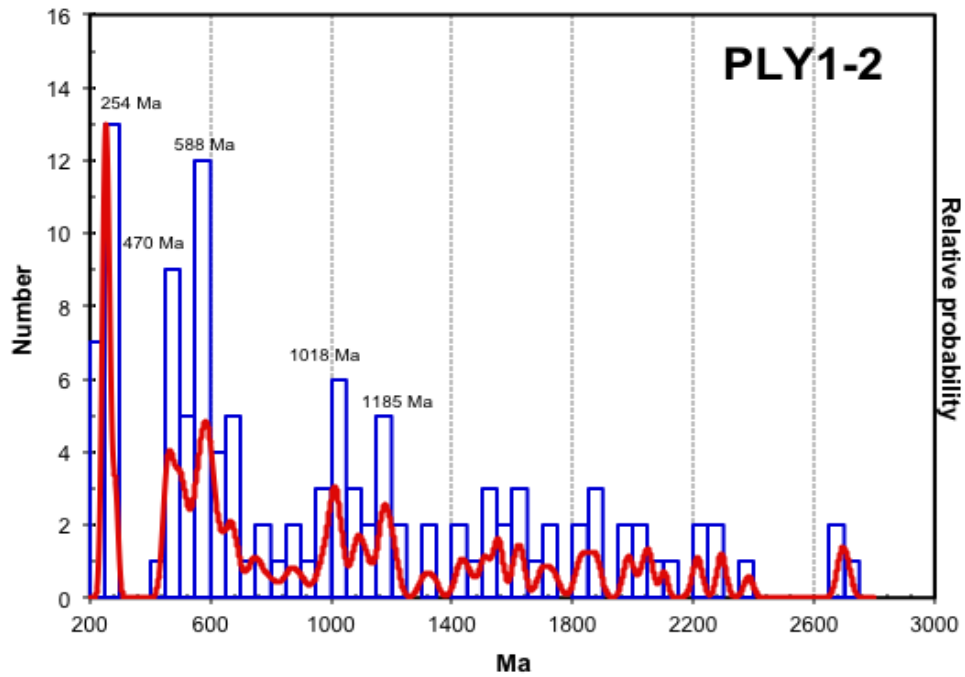


Figura 26. Gráfica de densidad para datos U-Pb en zircones detríticos de la muestra PLY-01-02.

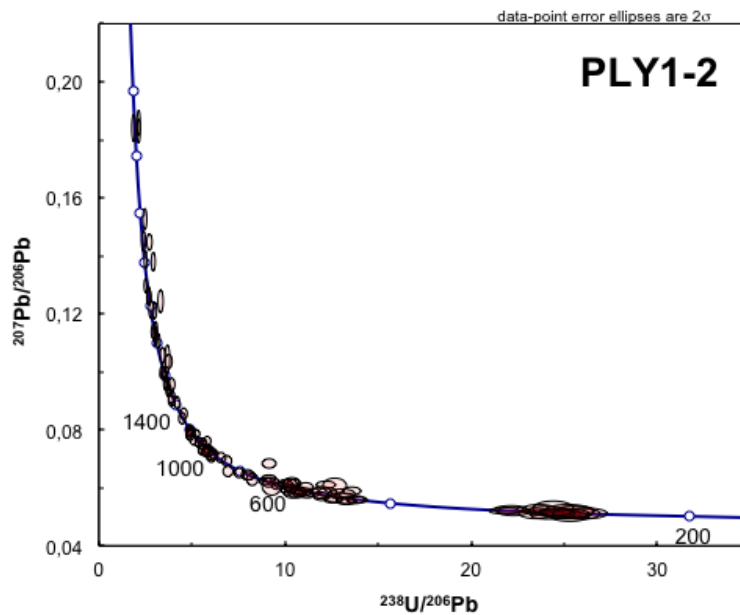


Figura 27. Gráfico de datos de concordia obtenidos a partir de la arenisca de la Fm. Bocas, PLY-01-02. Error de elipses es  $\pm 2\sigma$ .

Según los resultados obtenidos (Ver figura 26, 27 y Anexo C), la máxima edad de depositación de las arenicas de la Fm. Bocas corresponde a finales del Pérmico, específicamente en el Changhsingian (254 Ma), tomando como referencia el pico prominente con edades más recientes.

La muestra PLY-04-01 es un cuerpo brechificado (Riolita de la Fm. Bocas), en esta muestra se realizaron ciento veintidós (122) análisis, donde se obtuvieron edades entre  $249,7 \pm 7,4$  Ma y  $2171,1 \pm 13,8$  Ma (Ver Apéndice C). Además, se hallan picos predominantes con edades de 256, 582, 1012, 1180 y 1580 Ma; entre otros picos menos predominantes (Ver figura 28).

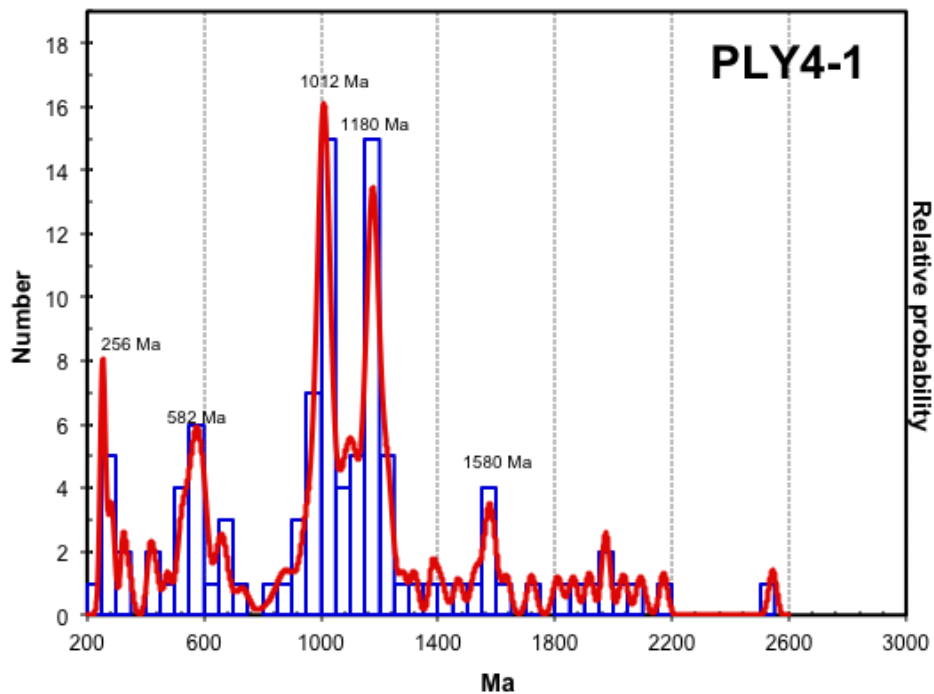


Figura 28. Gráfica de densidad para datos U-Pb en zircons detríticos en la muestra PLY-04-01.

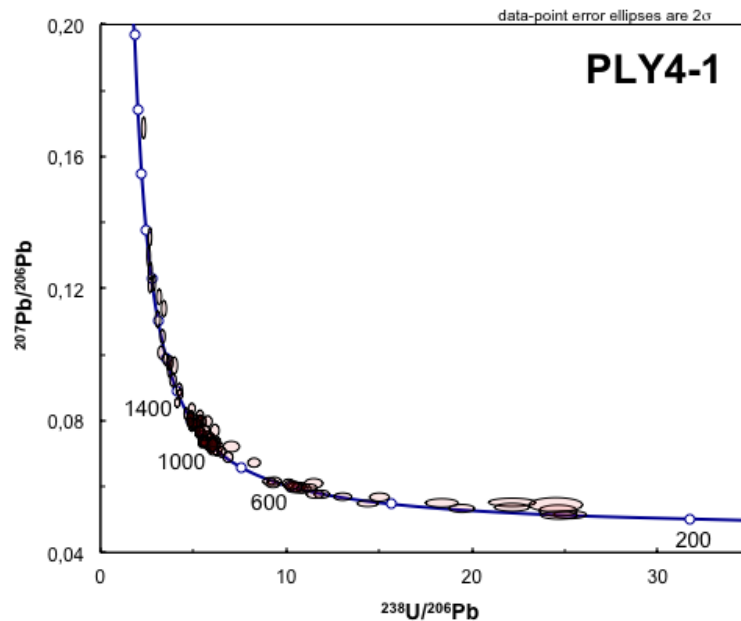


Figura 29. Gráfico de datos de concordia obtenidos a partir de las brechas, PLY-04-01. Error de elipses es  $\pm 2\sigma$ .

Mediante los resultados obtenidos anteriormente (Ver Figura 28 y 29, Apéndice C), la edad del magmatismo perteneciente a las riolitas de las Fm. Bocas es del pérmico tardío más específicamente del Wuchiapingian (256 Ma), tomando como referencia el pico predominante con edades más recientes.

### 6.8 Modelo de evolución geológica

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se propone un modelo geológico – geocronológico para la zona estudiada, desde el sector Algarrobo - La Llandada (Entre los municipios de Rionegro - El Playón, Departamento de Santander) y sus proximidades. Basado en lo anteriormente referido, se generó un esquema geológico de la zona (Ver Figura 30), en donde se separan las unidades de Formación Bocas y Riolita dependiendo de su litología y evento de formación.

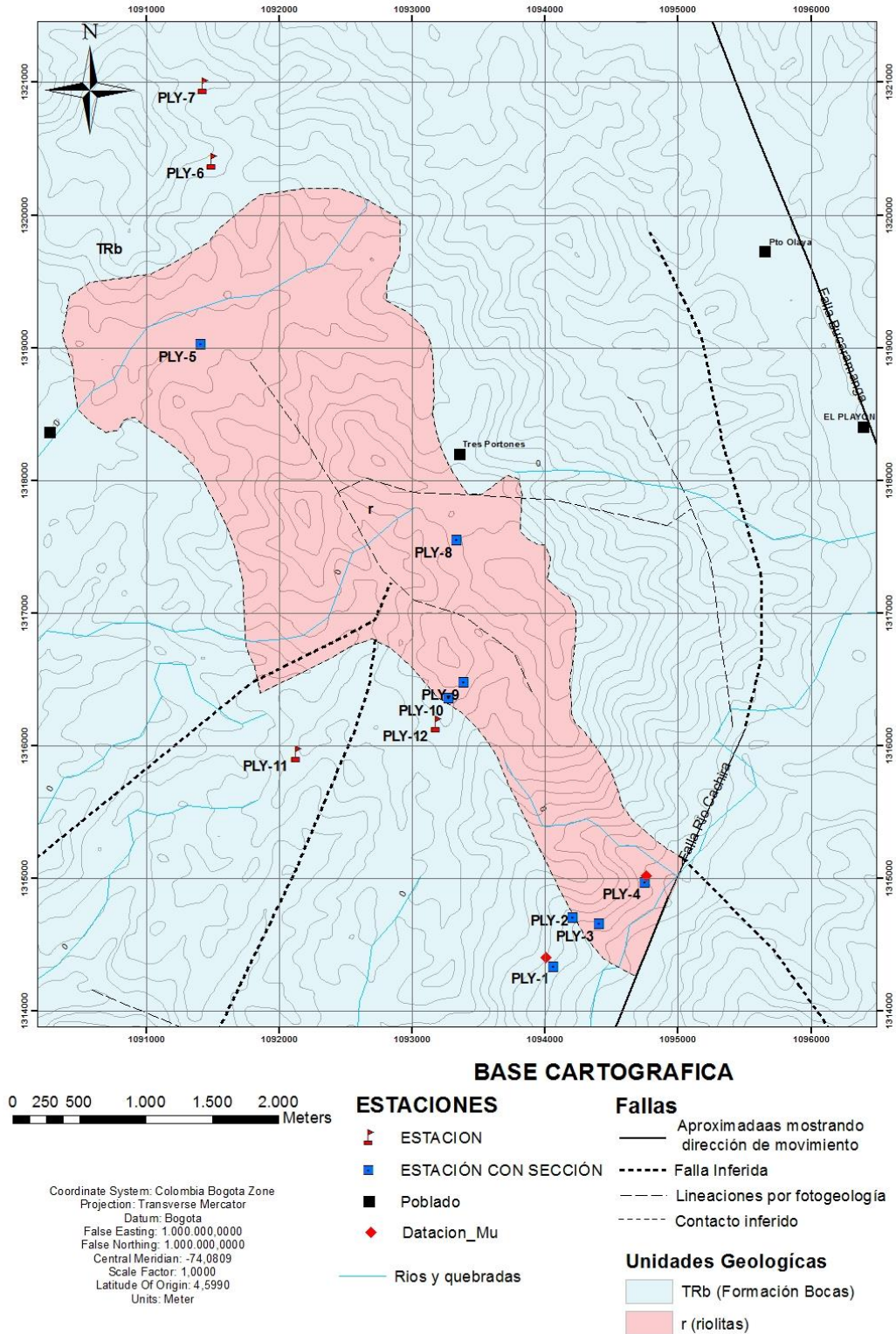


Figura 30. Esquema geológico del área de estudio. Modificado del mapa geológico de Colombia cuadrángulo H12 de Bucaramanga a escala 1:100000 (Ward et al., 1973).

Se plantea una evolución geológica del área basada en los eventos paragenéticos reconocidos durante las fases de campo, petrografía, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, ligados a las edades adquiridas por los estudios geocronológicos y a las estructuras superficiales que afectan dichas rocas y que finalmente dieron lugar a lo que hoy en día son la Formación Bocas y Riolitas.

Varios autores describen la depositación de la Formación Bocas en un rango desde el Carbonífero hasta el Jurásico, basados en la bioestratigrafía que presenta esta unidad. Su edad de depositación fue determinada en conodontes como Jurásico inferior (Remy et al., 1975). Por otra parte, Van der Lelij (2013) sugiere una edad Pérmica o más antigua para la Formación Bocas, si la población de circón coexistente más joven cristalizó a partir de la masa fundida riolítica; aunque un rango de edades desde el Carbonífero hasta el Jurásico se asignaron previamente a esta unidad (Ward et al., 1974; Mojica et al., 1996). En el modelo de formación para las rocas sedimentarias propuesto en este trabajo se determina que son producto de la erosión de rocas plutónicas preexistentes y tienen una edad máxima de depositación de 254 Ma para la Formación Bocas, que corresponde al Pérmico Tardío. Igualmente, se aclara que la Formación Bocas estuvo expuesta a un ambiente marino somero, evidenciado por la presencia de carbonatos de variedad calcita y dolomita en algunas muestras.

Durante el Paleozoico Tardío se inició la formación de un arco magmático a ~335 Ma al este de la Cordillera de Perú (Mišković et al., 2009), a ~293 Ma en la Sierra Nevada de Santa Marta (Cardona et al., 2010) y quizás en el Macizo de Baúl a ~294 Ma (Viscarret et al., 2009). Un arco magmático menor es reportado entre 250 a 225 Ma aproximadamente en las Islas Toal de los Andes de Perijá, en el Macizo de Santander y en los Andes de Mérida (Van der Lelij et al., 2015).

De acuerdo a los estudios de campo y geocronológicos desarrollados mediante este trabajo, correspondientes al magmatismo extrusivo riolítico, el material tobáceo y/o brechificado, se propone un modelo de formación para las rocas riolíticas que intruyen la Formación Bocas a partir del arco magmático reactivado por la zona de subducción, producto de la interacción de la Placa del Pacífico con la Placa Suramericana hacia 256 Ma durante el Paleozoico Tardío.

## 7. Discusión

Algunos autores han caracterizado desde el punto de vista estratigráfico, paleontológico y estructural los litotipos pertenecientes a la Formación Bocas y al cuerpo riolítico, que intruye y se superpone a estas rocas en el sector al oeste de la Falla de Bucaramanga y al este de la Falla de Lebrija (Ward et al., 1973), haciendo parte de un bloque de falla caído. El área se ubica geológicamente en el Macizo de Santander, el cual presenta un cambio de dirección NE a NW de la Cordillera Oriental (CO) por el movimiento lateral izquierdo de fallas como Haca, Villa Caro, El Carmen, Bucaramanga y Lebrija, las cuales definen un estilo transpresivo en este macizo, que se distingue de sus vecinos al sur (Floresta) y al norte (Perijá), donde predomina un estilo estructural compresivo con fallas inversas. La Falla de Lebrija se muestra como otra falla mayor asociada a la estructura en flor de Bucaramanga y se propone como el límite occidental del Macizo de Santander (Velandia et al., 2017).

La cartografía base que se utilizó fue el mapa geológico de Colombia cuadrángulo H12 de Bucaramanga a escala 1:100.000 (Ward et al., 1973) en el sector norte de la plancha entre los Municipios de Rionegro y El Playón. En este trabajo, se realizó una cartografía más detallada a

escala 1:2500, donde se observa la Formación Bocas y se confirma la extensión de las riolitas de la Formación Bocas en el sentido NNW.

La Formación Bocas ha sido descrita como una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris oscuras con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, fosilíferas, limolitas gris oscuras a rojo grisáceas, levemente calcáreas (Clavijo y Royero, 2001). Sin embargo, mediante este proyecto se caracterizaron las areniscas pertenecientes a la Formación Bocas, las cuales presentan un ligero aporte calcáreo (calcita y dolomita). Por otro lado, su edad de depositación fue determinada bioestratigráficamente en conodontes como Jurásico Inferior (Remy et al., 1975). Van der Lelij (2013) sugiere para la Formación Bocas una edad Pérmica o más antigua, si la población de circón coexistente más joven cristalizó a partir de la masa fundida riolítica, aunque un rango de edades desde el Carbonífero hasta el Jurásico se asignó previamente a esta unidad (Ward et al., 1974; Mojica et al., 1996). La muestra PLY-01-02 corresponde a la Formación Bocas y fue datada mediante U-Pb en zircones detríticos, dando como resultado una edad máxima de depositación de  $254 \pm 7.4$  Ma, específicamente del Changhsingian.

Cuerpos tabulares de riolita aparentemente intrusiva, granófira y brecha se encuentran dentro de la Formación Bocas en la parte norte del cuadrángulo H12, al oeste de la Falla de Bucaramanga (Ward et al., 1973).

Van der Lelij et al. (2015) reportan un dique de riolita porfirítica gris vesicular que atraviesa la Formación Bocas al oeste de la Falla de Santa Marta-Bucaramanga de naturaleza tensada; algunos granos de cuarzo en comparación con la forma generalmente redonda de las vesículas lo cual sugiere que esta roca estaba contaminada por material más antiguo, lo que se refleja en las

edades de zircón U-Pb. Los zircones coetáneos más jóvenes obtuvieron una edad ponderada de  $206\text{Pb} / 238\text{U}$  de  $250.7 \pm 4.3$  Ma, específicamente de Olenekian y 10 granos heredados tienen edades que oscilan entre  $449.9 \pm 9.7$  Ma y  $1316.9 \pm 25.7$  Ma.

Durante la fase de campo se observó el punto de datación de las riolitas reportado por Van der Lelij (2013), donde se halló el dique riolítico en contacto con areniscas ligeramente calcáreas pertenecientes a la Formación Bocas, destacando la presencia de textura peperítica. En cercanías a la vereda Tres Portones se observó nuevamente el cuerpo de riolitas, las cuales fueron analizadas petrográficamente y se determinaron como riolitas desvitrificadas con estructuras de esferulitos reportadas anteriormente por Ward et al. (1973).

Ward et al. (1973) describen dentro del cuerpo riolítico la presencia de brechas que poseen fragmentos de riolitas y brechas con fragmentos sedimentarios. Durante la caracterización petrográfica del presente proyecto, se clasificaron brechas y/o tobas de diferentes variedades teniendo en cuenta su contenido de cristales, vidrio y líticos y también según el tamaño de los fragmentos. Brechas polimícticas, tobas líticas, tobas cristalinas, entre otras son las variedades más comunes que hacen parte del cuerpo de riolitas cartografiado. La muestra PLY-04-01 pertenece al cuerpo de riolitas, clasificada como toba lapilica y fue datada mediante U-Pb en zircones detríticos, dando como resultado una edad máxima de depositación de  $256 \pm 8.5$  Ma, que corresponde al Pérmico Tardío, específicamente del Wuchiapingian.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto, se propone una temporalidad coetánea para los eventos que dieron lugar a las litologías presentes en el área de trabajo, siendo éstas las rocas sedimentarias de la Formación Bocas, las riolitas y las rocas volcanosedimentarias descritas por Ward et al. (1973) en el cuerpo riolítico. Para determinar esta

temporalidad se basó en las dataciones U-Pb en zircones detríticos realizadas en este trabajo y también en la datación dada por Van der Lelij (2013) para las riolitas.

## 8. Conclusiones

- El área del proyecto se localiza en un bloque caído al oeste de la Falla Bucaramanga y al este de la Falla de Lebrija donde se caracterizaron mineralógica - petrográficamente rocas sedimentarias, volcánicas y volcanosedimentarias.
- Localmente se observan afectadas tectónicamente las secuencias de la Formación Bocas constituidas por las intercalaciones de areniscas, areniscas ligeramente calcáreas con aporte volcánico, lodolitas y arcillolitas, las cuales se encuentran en contacto con riolitas microporfiríticas desvitrificadas y variedades de brechas y/o tobas. Dentro de las variedades de brechas y tobas se clasifican brechas polimícticas, tobas líticas, tobas cristalinas, entre otras.
- Mediante relaciones de campo, petrografía, microdifracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido (SEM) y geocronología se determinaron 4 eventos paragenéticos, denominados como: (1) evento sedimentario, (2) evento magmático extrusivo, (3) evento volcanosedimentario, los cuales presentan coetaneidad y un posterior (4) evento hidrotermal.
- Los resultados de geocronología de U-Pb en zircones detríticos dieron edades de  $254 \pm 7.4$  Ma para la Formación Bocas y de  $256 \pm 8.5$  Ma para las rocas volcanosedimentarias definidas como toba lapílica, por tanto, se asignan edades pérmicas pertenecientes al Changhsingian y Wuchiapingian respectivamente.

## 9. Recomendaciones

- Realizar un estudio geológico estructural en la zona a nivel regional y local para determinar la importancia de la Falla Bucaramanga y la Falla Lebrija en la formación de las rocas aflorantes en el sector Algarrobo - La Llandada (Entre los municipios de Rionegro- El Playón, Departamento de Santander).
- Desarrollar un estudio genético de las brechas y/o tobas para determinar los procesos de formación de estas.
- Reconstruir un modelo de depositación de la Formación Bocas para establecer la proveniencia de este material.

### Referencias bibliográficas

- Alemán, A., y Ramos, V. (2000). *The Northern Andes. In Tectonic Evolution of South America, Cordani UG, Milani EJ, Thomaz Filho A, Campos DA (eds). 31st International Geological Congress: Río de Janeiro, 453–480.*
- Amaya, S. (2012). *Caracterización petrográfica y petrológica de los neises, migmatitas y granulitas del neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, departamento de Santander.* Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Maestría. Pp. 1-116.
- Arias, A & Vargas, R. (1978). *Geología de las planchas 86 Abrego y 97 Cáchira. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS.*
- Cardona, A., Valencia, V., Garzón, A., Montes, C., Ojeda, G., Ruiz, J., Weber, M., (2010). *Permian to Triassic I to S-type magmatic switch in the northeast Sierra Nevada de Santa Marta and adjacent regions, Colombian Caribbean: Tectonic setting and implications within Pangea paleogeography. Journal of South American Earth Sciences 29 (4), 772–783.*
- Clavijo, J., et al., (1993). *Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes. Cuarto Simposio de Geología Regional. Ingeominas. Documento interno, 99 p. Bucaramanga.*
- Elplayon-santander.gov.co. (2017). *Nuestro Municipio. [online] Available at: [http://www.elplayon-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.elplayon-santander.gov.co/informacion_general.shtml) [Accessed 2 Jun. 2017].*
- Folk, R. (1954). *Petrology of sedimentary rocks. 182 págs. Herphill, Pulishing Co. Austin, Texas.*

- Gansser, A., (1973a), *Facts and theories on the Andes: Journal of the Geological Society, London, v. 129, p. 93–131.*
- Goldsmith, R. MAarvin, R. & Mehnert, H. (1971), *Radiometric ages in the Santander massif, Eastern cordillera, Colombian andes, Geological survey. Pp.44-49.*
- Hall, R. et al., (1972). *Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona IIA). Bol. Geol. Ingeominas, 20(1): 85. Bogotá.*
- Mantilla, L., Mendoza, H., Bissing, T., & Craig, H. (2011). *Nuevas evidencias sobre el magmatismo mioceno en el distrito minero de Vetas-California (macizo de Santander, cordillera oriental, Colombia). Boletín De Geología, 33(1), 43-58.*
- Mišković, A., Spikings, R.A., Chew, D.M., Košler, J., Ulianov, A., Schaltegger, U., (2009). *Tectonomagmatic evolution of Western Amazonia: geochemical characterization and zircon U–Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. Geological Society of America Bulletin 121 (9–10), 1298–1324.*
- Mojica, J., Kammer, A., y Ujueta, G. (1996). *El Jurásico del sector noroccidental de Suramérica y guía de la excursión al Valle Superior del Magdalena (Nov. 1-4/95), regiones de Payande y Prado, Departamento del Tolima, Colombia. En: Geología Colombiana. vol. 21, p. 3-41.*
- Moreno-Sánchez, M., Toro-Toro, L.M., Gómez-Cruz, A., y Ruiz, E. (2016). *Formación Nogontova, una nueva unidad litoestratigráfica en la Cordillera Oriental de Colombia. Boletín de Geología, 38(2): 55-62.*

- Murcia, H., Borrero, C., Pardo, N., Alvaro, G., Arnosio, M., y Scolamacchia, T. (2013): *Depósitos volcanoclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español.- Rev. Geol. Amér. Central, 48: 15-39.*
- Pennington, W. (1981). *Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. Jour Geoph. Res., V. 86, B11., Pp. 753 -770.*
- Remy, W., Remy, R., Pfefferkorn, H.W., Volkheimer, W., and Rabe, E. (1975). *Neueinstufung der Bocas-Folge (Bucaramanga, Kolumbien) in der unteren Jura anhand einer Phlebopteris-branneri- und Classopollis-Flora: Argumenta Paleobotánica, 4: 55-75.*
- Royero, J., y Vargas, R. (1999). *Geología del Departamento de Santander. INGEOMINAS, Bogotá.*
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). *Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Bogota. INGEOMINAS. PP 13-25.*
- S. McLoughlin, S. Lindström, A.N. Drinnan. (1997). *Gondwanan floristic and sedimentological trends during the Permian–Triassic transition: new evidence from the Amery Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica Antarctic Science, 9 , pp. 281-298.*
- Severin, K. (2004). *Energy dispersive spectrometry of common rock forming minerals (pp. 1-223). Fairbanks: Kluwer academic publishers.*
- Schmid, R., (1981) Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUSG Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.- *Geology, 9: 41-43.*

- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W. and Beate, B. (2015). *The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75Ma)*. *Gondwana Research*, 27(1), pp.95-139.
- Streckeisen, A. (1979). *Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melititic rocks: recommendations and suggestions of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks*. *Geology*, 7. Pp. 331-335.
- Toussaint, J. y Restrepo, J. (1976). *Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. Publicación Especial Geología. Universidad nacional de Colombia, Medellin, No 12: Pp 1-11.*
- TSCHANZ, CH., et al., (1974). *Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, NorthEastern Colombia. Bulletin Geological Society of America*, (85) : 273-284. Colorado. UDDEN, J.A., 1914. Mechanical composition of clastic sediments.- *Geol. Soc. Amer. Bull.* 25: 655-744.
- Van der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Mora, A. (2015). *Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans*. *Gondwana Research*, 31, pp.271-294.
- 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. Thèse de doctorat : Univ. Genève, 2013, no. 4581.*

- Velandia, F., García, H., López, J., Bermúdez, M., Zuluaga, C., & Taboada, A. (2017). *Modelo estructural del macizo de Santander y zonas adyacentes. In XVI congreso Colombiano de geología y III simposio de exploradores (pp. 994-1000). Santamarta: Julian Andres Lopez Isaza. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/320004238>*
- Viscarret, P., Wright, J., Urbani, F., (2009). *New U–Pb zircon ages of El Baúl Massif, Cojedes State, Venezuela. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia 32 (3), 210–221.*
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., & Restrepo, H., (1973). *Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. US Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, 21(1-3), Pp. 1-132.*
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Jaime, B., and Restrepo, H.A., (1974). *Geology of quadrangles H-12, H-13, and parts of I-12 and I-13, (zone III) in northeastern Santander Department, Colombia: U.S. Geological Survey.* WENTWORTH, C.K., 1922: A scale of grade and class terms for clastic sediment. *J. Geology*, 30: 377-392.
- Wentworth, C. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal Of Geology*, 30(5), 377-392. doi: 10.1086/622910.