

Ocurrencia de Sillimanita en rocas de la Unidad Esquistos del Silgará: Evidencia de
Metamorfismo Regional tipo Buchan o Metamorfismo de Contacto?

María Paula Rey Román y Jose Jaime Martínez Vertel

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Carlos Alberto García Ramírez

Geólogo PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

DEDICATORIA

A mis dos grandes Pilares:

Mi padre Jorge Rey por ser mi guía e inspiración en la geología y la vida.

*Mi madre Sandra Victoria Román por su apoyo incondicional, motivación, y enseñanza
constante durante todo este proceso.*

María Paula Rey Román

DEDICATORIA

A mi padre Jaime de la Cruz por ser mi ejemplo de vida e inspiración.

*A mi madre Margarita Rosa por su dedicación, enseñanza y consejos de vida que me
ha formado como persona y Profesional.*

A mi hermano por su apoyo y compañía incondicional.

Jose Jaime Martínez Vertel

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento al profesor Carlos Alberto García Ramírez por su apoyo, dedicación y compromiso con nuestro proyecto de grado; además de ser un ejemplo a seguir como profesional y ser una persona maravillosa.

A la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de sus profesores que hicieron parte de mi proceso de formación profesional.

A la profesora Rocío Bernal Olaya por ser una inspiración para la comunidad femenina de la geología.

A mi familia por su amor, orientación y motivación, en especial a mis padres y mi hermano Jorge Luis Rey.

A mis dos grandes compañeros Camilo Guzmán y Tatiana Suarez con quienes aprendí y me forme como profesional. Agradezco de todo corazón sus consejos, paciencia, comprensión y acompañamiento durante estos cinco años.

A mis amigos más cercanos que contribuyeron en mi proceso de formación profesional y personal.

Al grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de sus instalaciones y equipos.

Al laboratorio de preparación de muestras geológicas de la Escuela de Geología, en especial a Luis Fernando Anaya por su colaboración en la preparación de las secciones delgadas utilizadas en este proyecto.

María Paula Rey Román

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento al profesor Carlos Alberto García Ramírez por su apoyo, dedicación y compromiso con nuestro proyecto de grado; además de ser un ejemplo a seguir como profesional y ser una persona maravillosa.

A la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de sus profesores que hicieron parte de mi proceso de formación profesional.

A mi familia por su amor, orientación y motivación, especialmente a mis padres y a mi hermano por su dedicación y enseñanzas para la vida.

A mis amigos más cercanos que contribuyeron en mi proceso de formación profesional y personal.

Al grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de sus instalaciones y equipos.

Al laboratorio de preparación de muestras geológicas de la Escuela de Geología, en especial a Luis Fernando Anaya por su colaboración en la preparación de las secciones delgadas utilizadas en este proyecto.

Jose Jaime Martínez Vertel

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General.....	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. Marco Geológico Regional	21
3. Metodología	24
3.1 Pre Campo:	24
3.2 Trabajo de Campo.....	24
3.3 Trabajo de Laboratorio	25
3.4 Etapa de Análisis de Datos	25
3.5 Etapa de Elaboración del Informe Final	26
4. Antecedentes	26
5. Resultados	30
5.1 Petrografía.....	31
5.1.1 Ortoneis	31
5.1.2 Esquistos del Silgará	36
5.2 Ocurrencia de sillimanita.....	41

5.2.1 Tipo 1	41
5.2.2 Tipo 2	44
6. Discusión.....	47
7. Conclusiones	54
8. Recomendaciones.....	55
Referencias Bibliográficas	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Abreviaturas de minerales utilizadas según la SCMR, 2007	26
Tabla 2. Composición mineralógica de los ortoneises estudiados.....	35; Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Composición mineralógica de la cuarcita y los esquistos estudiados...;	Error! Marcador no definido. 40

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Localización geográfica y geológica de la zona de estudio.....	20
<i>Figura 2.</i> Fotografía satelital del área de estudio, mostrando las estaciones de campo y sitios de muestreo. PDs: Esquistos del Silgará; PDO: Ortoneis. Tomado y modificado de Google Earth (2018).....	31
<i>Figura 3.</i> Características petrográficas del Ortoneis cuarzo feldespático con biotita (Muestra E10-M1). A) Foliación débil. B) Asociación mineral típica cuarzo+ ortoclasa+ biotita. C) Textura pertítica.....	32
<i>Figura 4.</i> Características petrográficas del Ortoneis cuarzo feldespático con hornblenda (Muestra E11-M1). A) Asociación mineral típica cuarzo+ plagioclasa+ biotita+ hornblenda, acompañada de goethita y titanita. B) Hornblenda zonada.....	33
<i>Figura 5.</i> Características petrográficas del Ortoneis muscovítico (Muestra E17-M1). A) Asociación mineral típica cuarzo+ muscovita+ biotita± plagioclasa, foliación S _n desarrollada B) Textura pertítica.....	34
<i>Figura 6.</i> Contenido de la sillimanita (en porcentaje %) en la zona de estudio. En la Cuchilla de Frailejones su abundancia es mayor, presentando un promedio aproximado de 25%, y en el Cerro La Ventana su abundancia es menor (alrededor del 5%).....	36
<i>Figura 7.</i> Ocurrencia de la sillimanita en esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita (Muestra E8-M1). A) Foliación S _n bien desarrollada. B) Sillimanita 2 coexistiendo con sillimanita 1.	37

<i>Figura 8.</i> Ocurrencia de sillimanita 1 en esquistos sillimaníticos (Muestra E9-M1). A) Sillimanita 1 acompañando la foliación Sn. B) Agregados de Sillimanita 1.	38
<i>Figura 9.</i> A) Ocurrencia de sillimanita tipo 1. B) Esquisto sillimanítico (Muestra E14-M1).....	41
<i>Figura 10.</i> Características petrográficas de los esquistos. A) sillimanita 1 variedad fibrolita y prismática reemplazando biotita (esquisto sillimanítico: muestra E9-M1, objetivo 4X). B) Sillimanita variedad prismática corta y C) sillimanita variedad prismática larga (esquisto cuarzo biotítico con sillimanita: muestra PCM-972, objetivo 10X).....	43
<i>Figura 11.</i> Cianita y sillimanita coexistiendo en el esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1, objetivo 10X).....	44
<i>Figura 12.</i> Muestra E3-M1. Sillimanita variedad fibrolita nucleando de forma radial, de color blanco, dentro del círculo rojo.	45
<i>Figura 13.</i> Características petrográficas de la sillimanita tipo 2 nucleando en individuos de cuarzo en: A) cuarcita muscovítica con sillimanita (muestra E3-M1, objetivo 2.5X), B) esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1, objetivo 4X), C) Venilla de Sillimanita 2 en el esquistos sillimanítico (muestra E9-M1, objetivo 4X), D) esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo de 4X).	46
<i>Figura 14.</i> Evidencias de disolución en granate y resultados de la posible reacción en esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo 10X).	48
<i>Figura 15.</i> Evidencias microestructurales desarrollo Bt 2 y Sil 1 en esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo 2.5X).	49
<i>Figura 16.</i> Evidencias texturales de reacciones locales de la reacción polimórfica cianita=sillimanita en esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1).	50

Figura 17. Mecanismos de reacción usando mica como catalizador de la reacción cianita = **Figura 1** sillimanita. Material transportado de Fe, Al y K es mostrado por las flechas entre las dos reacciones locales. Tomado de Foster (1991).....51

Figura 18. Variación en el tamaño de grano de cuarzo en rocas metapelíticas de la unidad Esquistos del Silgará. Representando la recristalización del cuarzo en las muestras E14, E8 y E3 producto de un posible evento termal. 53

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Descripción petrográfica de las muestras con sección delgada.

Apéndice B. Conteo mineral de las 12 secciones delgadas analizadas.

RESUMEN

TÍTULO: OCURRENCIA DE SILLIMANITA EN ROCAS DE LA UNIDAD ESQUISTOS DEL SILGARÁ: EVIDENCIA DE METAMORFISMO REGIONAL TIPO BUCHAN O METAMORFISMO DE CONTACTO?*

AUTORES: María Paula Rey Román, Jose Jaime Martínez Vertel**

PALABRAS CLAVE: Esquistos del Silgará, Macizo de Santander, Metamorfismo Térmico, Sillimanita.

DESCRIPCIÓN:

Las dos franjas de la unidad Esquistos del Silgará que afloran en cercanía al Corregimiento de Ranchadero se caracterizan por estar constituidas de cuarcitas y esquistos pelíticos con los contenidos más altos de sillimanita variedad fibrolita y prismática en el Macizo de Santander. En este trabajo se presentan los resultados de los estudios de campo y petrográficos para la caracterización de la sillimanita en el sector central del macizo.

En esta zona afloran dos franjas alargadas con dirección NE, de la unidad Esquistos del Silgará constituidos por: cuarcita muscovítica con sillimanita, esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita, esquistos sillimaníticos, esquistos cuarzo micáceo con sillimanita, esquistos cuarzo biotíticos con sillimanita, rodeados por grandes cuerpos de Ortoneis en contacto fallado cubierto. Dichas franjas se caracterizan por la ocurrencia de sillimanita variedad fibrolita y/o prismática, tipo 1 y tipo 2. La sillimanita 1 es producto del metamorfismo regional barroviense que caracteriza la zona central del Macizo de Santander; la sillimanita 2 ocurre nucleando al cuarzo y su desarrollo se debe a evento metamórfico de bajas presiones y altas temperaturas, ocasionado por la intrusión tardía de un cuerpo de ortoneis en el Ordovícico Tardío ($451,5 \pm 1,3$ Ma) en la fase retrógrada del metamorfismo regional.

Los estudios realizados revelan evidencias de un metamorfismo de bajas presiones y altas temperaturas sobreimpuesto al metamorfismo regional, permitiendo el desarrollo de sillimanita fibrosa radial nucleando en individuos de cuarzo, en rocas metapelíticas de la unidad Esquistos del Silgará.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: PhD Carlos Alberto García Ramírez.

ABSTRACT

TÍTULO: SILLIMANITE OCCURRENCE IN THE SILGARÁ SCHISTS ROCKS. EVIDENCE OF REGIONAL METAMORPHISM OF BUCHAN TYPE OR CONTACT METAMORPHISM?*

AUTHORS: María Paula Rey Román, Jose Jaime Martínez Vertel**

KEYWORDS: Silgará Schists, Santander Massif, Thermal Metamorphism, Sillimanite.

DESCRIPTION:

Both stripes of the Silgará Schists Unit that outcrop close to the Ranchadero town is characterized for being constituted by quartzites and pelitic schists with the highest contents of sillimanite variety fibrolite and prismatic in the Santander Massif. This document shows the results of fieldwork and the petrographic studies for the sillimanite characterization in the Central Santander Massif.

In this zone outcrop two elongated stripes with NE direction of the Silgará Schists Unit, constituted by: muscovite quartzites with sillimanite, muscovite quartz schists with kyanite and sillimanite, sillimanite schists, micaceous quartz schist with sillimanite biotitic quartz schists with sillimanite, surrounded by big bodies of the Orthogneiss Unit, in faulted covered contact. Those stripes are characterized by the occurrence of sillimanite variety fibrolite and/or prismatic, type 1 and type 2. Sillimanite 1 is the result of the barrovian metamorphism that is typically in central zone of the Santander Massif. Sillimanite 2 occur nucleating quartz and its development is due to a late intrusion of an orthogneiss body in the Late Ordovician ($451,5 \pm 1,5$ Ma) in the retrograde phase of the regional metamorphism.

The studies carried out reveal evidences of a low pressure and high temperature metamorphism superimposed on regional metamorphism, allowing the development of radial fibrous sillimanite nucleating in quartz individuals, in metapelitic rocks of the Silgará Schists Unit.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: PhD. Carlos Alberto García Ramírez

Introducción

La unidad Esquistos del Silgará, al ser parte del basamento cristalino del Macizo de Santander, son importantes para el entendimiento de su evolución tectono-metamórfica, uno de los más septentrionales de los Andes. En este trabajo se presentan los resultados de un estudio petrográfico realizado en rocas de los Esquistos del Silgará aflorantes en el Cerro La Ventana y la Cuchilla de Frailejones, localizados cerca al Corregimiento Ranchadero, Municipio de Santo Domingo de Silos (Norte de Santander) (ver Figura 2).

En este sector, los Esquistos del Silgará se encuentran en contacto fallado con la unidad Ortoneis, por la Falla de Ventanas, la cual desplaza el Ortoneis sobre los Esquistos del Silgará, y se presentan como dos franjas alargadas, constituidas por cuarcitas y esquistos cuarzo-moscovíticos con los contenidos más altos de sillimanita variedad fibrolita y prismática en el Macizo de Santander.

La ocurrencia de sillimanita en la unidad Esquistos de Silgará no ha sido estudiada en detalle y en consecuencia en este trabajo se efectúa su caracterización para definir su ocurrencia en campo, su relación con el Ortoneis y el tipo de metamorfismo que la desarrolló. Dicho metamorfismo puede estar asociado a un metamorfismo de bajas presiones y altas temperaturas, producido por el emplazamiento sintectónico de masas de ortoneises que rodean estas franjas de esquistos y cuarcitas; o un metamorfismo tipo buchán sobreimpuesto al metamorfismo barroviense regional de la zona.

Los estudios realizados para la caracterización de la sillimanita incluyeron la recolección de muestras de roca en campo y la observación de la relación entre la unidad Esquistos de Silgará y

el Ortoneis, análisis petrográficos para establecer la mineralogía, relaciones texturales y paragenéticas de cada muestra.

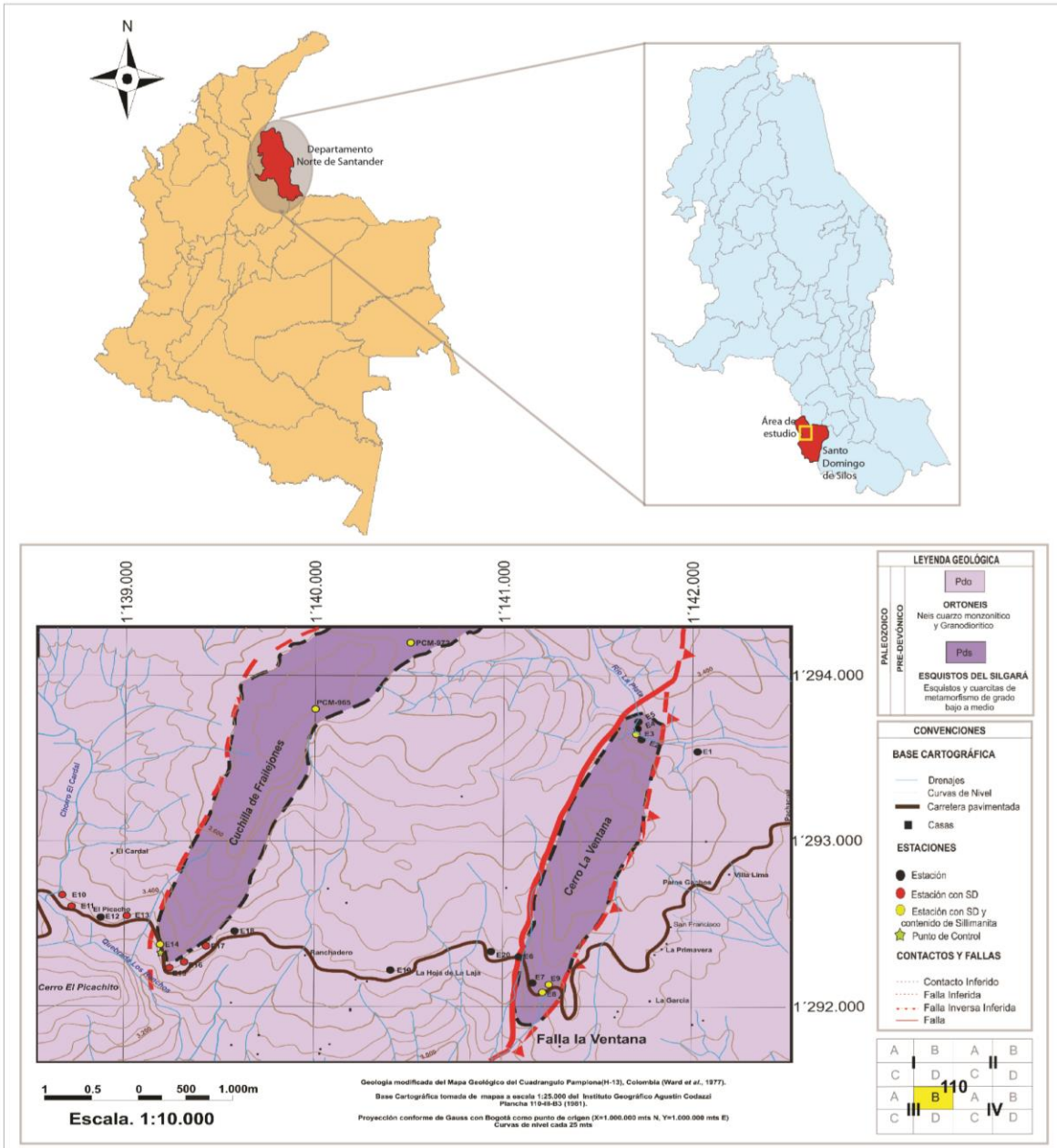


Figura 2. Localización geográfica y geológica de la zona de estudio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar la ocurrencia de sillimanita en rocas de la Unidad Esquistos del Silgará en el sector de Cerro Ventanas, Macizo de Santander

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la ocurrencia de los Esquistos de Silgará y su relación con los ortoneises.
- Determinar la ocurrencia de la sillimanita en campo.
- Realizar estudios petrográficos de los Esquistos de Silgará y Ortoneis para establecer las relaciones texturales y paragenéticas de la sillimanita.

2. Marco Geológico Regional

El Macizo de Santander es la continuación norte de la Cordillera Oriental, parte de los Andes colombianos, y forma el margen suroeste del Bloque Triangular de Maracaibo (Van Der Lelij, *et al.*, 2015), se caracteriza por su complejidad geológica y dinámica estructural.

Estructuralmente es un bloque levantado, limitado en la margen occidental por el sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta con una tendencia NNW (Van Der Lelij *et al.*, 2015), y limitado en el margen oriental por el sistema de fallas Pamplona – Cubogón – Mercedes (García *et al.*, 2005). Las foliaciones presentes en el Macizo de Santander presentan una tendencia N-S, que tiende a ser paralela al eje de la Cordillera Oriental (García *et al.*, 2005).

El basamento cristalino del Macizo de Santander comprende rocas metamórficas de origen sedimentario e ígneo de edad Precámbrica a Paleozoica, las cuales son intruidas por rocas ígneas de edad Paleozoico, Triásico a Cretácico y Mioceno (Goldsmith *et al.*, 1971 y Mantilla *et al.*,

2013). Las unidades metamórficas en el macizo son: Neis de Bucaramanga, Esquistos del Silgará, Esquistos del Chicamocha, nombre dado por Mantilla *et al.*, (2016 a-b) a los esquistos y cuarcitas que afloran al SW del Macizo de Santander en los sectores aledaños a Pescadero y Aratoca (García *et al.*, 2017), Ortoneis y Filitas de San Pedro (Ward *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 2001; Mantilla *et al.*, 2016 a-b). Adicionalmente, otros autores refieren rocas de bajo grado de metamorfismo, como las Metasedimentitas de Guaca – La Virgen (Royero y Clavijo, 2001), Formación Floresta Metamorfoseado y Formación Mogotes (Moreno *et al.*, 2005).

Neis de Bucaramanga, término propuesto por Ward *et al.* (1973) para referirse a una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias con alto grado de metamorfismo, correspondiente a la zona de la sillimanita en facies anfibolita (García *et al.*, 2005). Por otra parte, Royero y Clavijo (2001) proponen llamarla Complejo Bucaramanga debido a su variación en las características litológicas y a la compleja evolución de la unidad. Esta unidad corresponde al Proterozoico, determinado por dataciones radiométricas de Rb/Sr y K/Ar (945 ± 40 Ma) en roca total (Ward *et al.*, 1973), y a partir de estudios de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (668 ± 9 y 574 ± 8 Ma) (Restrepo-Pace, 1995).

Esquistos del Silgará, término informal dado a la unidad definida como Formación Silgará por Ward *et al.*, (1973) y redefinida por Mantilla *et al.*, (2016-a) quienes proponen la escisión de esta formación, planteando tres unidades diferentes: Esquistos del Silgará, Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro. Litológicamente, la unidad Esquistos del Silgará está compuesta por filitas, cuarcitas, esquistos, metarenitas y metagrauvas (Ward *et al.*, 1973). Corresponde a un metamorfismo de bajo a medio grado, perteneciente a la zona del granate en facies esquistos verdes, sin embargo, en los sectores central y NE el grado de metamorfismo es mayor, correspondiendo a la zona de la sillimanita, facies anfibolita, compuesta principalmente

por esquistos micáceos y granatíferos con estauroлита ±cianita ±sillimanita y también cuarcitas (García *et al.*, 2005; Castellanos *et al.*, 2008). Esta unidad es el objetivo central del presente trabajo, por lo cual se tratará en detalle más adelante.

Esquistos del Chicamocha, se caracterizan por ser una sucesión de cuarcitas y metapelitas, que afloran en el Cañón del Río Chicamocha y en la vía Piedecuesta – Aratoca, con una edad máxima de depositación del Cámbrico Medio, aproximadamente 500 Ma (Mantilla *et al.*, 2016 a), y metamorfismo de alto grado, zona de sillimanita, en facies anfíbolitas (Ríos *et al.*, 2003); litológicamente son esquistos micáceos con granate, estauroлита, cianita/andalucita y sillimanita y también presenta metabasitas (García *et al.*, 2017).

Filitas de San Pedro, inicialmente se consideraba como parte constituyente de la Formación Silgará; sin embargo, edades U-Pb en circones detríticos muestran que su máxima edad es Ordovícico Tardío (~450 Ma); litológicamente se caracteriza por filitas cloríticas y metareniscas (Mantilla *et al.*, 2016 a-b).

Ortoneis, se caracteriza por su composición cuarzo-feldespática, pelítica y en menor proporción, máficos y anfíbolíticos, estructura neísica, con foliaciones y lineaciones definidas. Su protolito está compuesto de granito, tonalita, diorita, cuarzomonzonita y granodiorita. Estas rocas se emplazaron de forma sintectónica durante el Evento Famatiniano Principal, en el Ordovícico Temprano y posiblemente Tardío (480-472 Ma), y presentan metamorfismo de facie anfíbolita, zona de Andalucita-Almandino a Sillimanita baja (Restrepo-Pace y Cediél, 2010; Mantilla *et al.*, 2012; Van Der Lelij, 2013; Rey, 2015; García *et al.*, 2017).

Las rocas del Ortoneis fueron metamorfoseadas al mismo tiempo que los Esquistos del Silgará y se ha reportado que en el sector central del Macizo de Santander estas rocas se emplazaron en

el pico metamórfico de los Esquistos del Silgará de forma sintectónica (Ward, *et al.*, 1973; García *et al.*, 2005; Castellanos *et al.*, 2008, García *et al.*, 2017).

A escala local, la zona de estudio encuentra localizada en la Cuchilla de Frailejones y el Cerro La Ventana, cerca al Corregimiento Ranchadero, del Departamento Norte de Santander. En este sector afloran dos franjas alargadas en dirección NE pertenecientes a la unidad Esquistos del Silgará, que están en contacto fallado cubierto (dos fallas indefinidas y la Falla de Ventanas) con el Ortoneis (ver Figura 3). Estas dos fallas son paralelas a la Falla de Ventanas, siguiendo la dirección de las franjas alargadas (NE). La Falla de Ventanas se caracteriza por poner en contacto el Ortoneis con la unidad Esquistos del Silgará, hacia la zona del Cerro La Ventana al norte del Río Caraba (Ingeominas 1973).

3. Metodología

El desarrollo del presente trabajo contempló las siguientes etapas:

3.1 Pre Campo

Búsqueda y análisis de artículos científicos y trabajos de grado relacionados con el tema, junto con la compilación de los mapas geológico y topográfico, con el fin de plantear y organizar el trabajo de campo.

3.2 Trabajo de Campo

Se realizaron dos campañas de campo y se registraron un total de 20 estaciones para la recolección de datos geológicos y muestras de mano, identificando las variaciones litológicas y/o mineralógicas, contacto entre unidades, y macroestructuras. Cada estación se ubicó geográficamente en el mapa de acuerdo con las coordenadas obtenidas por GPS y se recolectaron 10 muestras de roca, considerando el menor grado de meteorización posible y contenido de

sillimanita en los esquistos y cuarcitas. Especial énfasis se hizo en los contactos Ortoneis – Esquistos del Silgará.

3.3 Trabajo de Laboratorio

En esta etapa se realizó la descripción y análisis macroscópico de las muestras, caracterizando el tipo de roca, su color, composición mineralógica y estructura; teniendo en cuenta esta descripción, se procedió a la selección de muestras de roca para la elaboración de 10 secciones delgadas que se realizaron en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

En total se analizaron 12 secciones delgadas: 10 fueron realizadas en este proyecto de grado y 2 (PCM 972 y PCM 965) de proyectos anteriores del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA). El análisis petrográfico se desarrolló en el Laboratorio del grupo GIGBA en la sede de Guatiguará (Piedecuesta), utilizando los microscopios de luz transmitida NIKON y LEICA, modelos Labophot y DM750P, respectivamente. El estudio petrográfico se realizó siguiendo el Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica de García (2007), e incluye un conteo promedio de 300 puntos por sección para determinar su contenido y tipo de roca. El registro microfotográfico se obtuvo mediante el sistema de fotografía digital MC120HD, acoplado al microscopio LEICA.

3.4 Etapa de Análisis de Datos

Consistió en la recolección de datos obtenidos en el trabajo de laboratorio y en campo. Datos que fueron analizados e interpretados para adquirir resultados de acuerdo con los objetivos planteados.

3.5 Etapa de Elaboración del Informe Final

Esta etapa comprendió la organización de resultados y compilación de información adquirida en la bibliografía revisada, para la elaboración de mapas, tablas y catálogos que estructuran el informe final.

Tabla 1.

Abreviaturas de minerales utilizadas según la SCMR, 2007

Abreviaturas Minerales Utilizadas (<i>según la SCMR, 2007</i>).			
Mineral	Abreviatura	Mineral	Abreviatura
Biotita	Bt	Muscovita	Ms
Caolín	Kln	Opacos	Op
Cianita	Ky	Ortoclasa	Or
Clorita	Chl	Óxidos	Ox
Cuarzo	Qtz	Plagioclasa	Pl
Feldespato		Sericita	Ser
Potásico	Kfs		
Goethita	Gt	Sillimanita	Sil
Granate	Grt	Titanita	Ttn
Hematita	Hem	Turmalina	Tur
Hornblenda	Hbl	Zircón	Zrn

4. Antecedentes

El Macizo de Santander ha sido objeto de estudios cartográficos, estructurales, tectónicos, petrográficos, geoquímicos, geocronológicos y geológicos continuos por parte de investigadores nacionales e internacionales (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973; Clavijo, 1994; Restrepo-Pace *et al.*, 1997; Garcia y Campos, 2000; Royero y Clavijo, 2001; Ríos *et al.*, 2003; García *et al.*, 2005; Ordoñez, 2006; Amaya, 2012; Van Der Lelij *et al.*, 2015; Castellanos y Ríos, 2015; Mantilla *et al.*, 2016 a-b; Zuluaga *et al.*, 2017).0

Estudios anteriores registran la ocurrencia de sillimanita en las unidades Neis de Bucaramanga y Esquistos del Silgará, distinguiéndose por las concentraciones que presentan, de acuerdo con el esquema zonal del metamorfismo.

En los sectores de Vetas, Berlín y Cepitá, afloran esquistos micáceos al igual que neises micáceos y cuarzo-feldespáticos (Ureña, 2014), con intercalaciones composicionales de biotita, presentando desarrollo de sillimanita como prismas elongados y/o agregados fibrosos en las zonas de alta abundancia de biotita, manifestándose a lo largo de los bordes de dicho mineral (Zuluaga *et al.*, 2017).

En los Esquistos del Silgará, las rocas pelíticas son las más abundantes, compuestas principalmente por muscovita, biotita, cuarzo y plagioclasa; ocasionalmente el contenido de sillimanita y estauroлита varía, siendo minerales accesorios o fases principales (García y Campos, 2000; García *et al.*, 2005).

Las rocas metamórficas de los Esquistos del Silgará evidencian minerales típicos de un metamorfismo tipo barroviense en condiciones de presión media y alta temperatura (facie anfibolita superior), durante la Orogenia Caledoniana, desarrollando una secuencia de zonas metamórficas de biotita, granate, estauroлита y sillimanita (Castellanos *et al.*, 2008; Ríos y Castellanos, 2014; Ríos y Castellanos, 2016).

El grado de metamorfismo regional de los Esquistos del Silgará en la zona Central del Macizo de Santander (CMS) incrementa hacia el noreste, iniciando en la zona de biotita, a través de la zona del granate y la zona de la estauroлита-cianita, hasta la zona de sillimanita; éstas definen la estructura termal regional de las rocas metamórficas del área (García y Campos, 2000; García *et al.*, 2005; Castellanos *et al.*, 2008). Las asociaciones minerales de las rocas pelíticas y

semipelíticas, pertenecen a la zona estaurolita-cianita y sillimanita en el esquema zonal barroviense (García *et al.*, 2005).

Los esquistos pelíticos aflorantes al suroeste del área de estudio de Castellanos *et al.*, (2008) presentan una asociación mineral cuarzo+ plagioclasa+ biotita+ muscovita, asociada con sillimanita variedad fibrolita; esta se desarrolla a manera de agregados fibrosos foliados, reemplazando la biotita, la mica blanca y la cianita. También ocurre reemplazando los bordes de la estaurolita o como inclusión en el cuarzo, la plagioclasa y las micas. El reemplazamiento de cianita por sillimanita, indica un probable descenso en la presión (cercano a los 600°C). Ríos *et al.*, (2003) también menciona el reemplazamiento de muscovita y granate por sillimanita variedad fibrolita, al suroeste del Macizo de Santander (MS) en rocas pelíticas. Por otra parte, García *et al.*, (2005) describe el reemplazamiento de muscovita y cianita por sillimanita. No obstante, Ríos y García (2001) reportan la coexistencia de cianita y sillimanita en algunas rocas asociadas a la transición entre las zonas estaurolita-cianita y sillimanita.

Sin embargo, la ocurrencia de la sillimanita en el MS también se atribuye a eventos sobreimpuestos al metamorfismo regional tipo barroviense. Ríos y Castellanos (2016) consideran la sillimanita variedad fibrolita una fase mineral tardía junto con la andalucita, la cual puede atribuirse a un evento térmico superpuesto al metamorfismo regional barroviense.

Castellanos y Ríos (2015) en la zona Norte del Macizo de Santander (NMS) sugieren un metamorfismo regional en el esquema zonal tipo buchan perteneciente a la zona andalucita-cordierita, sobreimpuesto al metamorfismo barroviense que caracteriza al macizo; identificando el aumento del grado de metamorfismo siguiendo las zonas desde la biotita hasta la sillimanita. Esta última zona es representada por la ocurrencia de esquistos sillimaníticos, que pertenecen a

la facie anfibolita y las subfacies sillimanita, almandino-ortoclasa, con paragénesis mineral sillimanita+ granate+ ortoclasa+ plagioclasa+ biotita+ cuarzo.

La sillimanita es común en rocas metamórficas pelíticas ricas en Al (Best, 2003); su ocurrencia se puede atribuir al metamorfismo de contacto, metamorfismo regional tipo buchan y barroviense. La diferencia entre el metamorfismo regional tipo buchan y de contacto se hace en base a criterios de tipo espacial, cinético y textural, y no en base a las condiciones o la trayectoria P-T (i Draper, 2003).

Miyashiro (1994) define dos categorías para metamorfismo regional (tipo buchan y barroviense) en relación con la estabilidad de los polimorfos de Al_2SiO_5 , siendo: a) Serie andalucita-sillimanita (Baja P/T), en la cual la andalucita es estable a temperaturas bajas y la sillimanita es estable a temperaturas más altas, la región original del tipo de esta serie es el cinturón metamórfico de Ryoke en Japón, sin embargo la región de Buchan de las Scottish Highlands también hace parte de esta serie; b) Serie cianita-sillimanita (Medio P/T), en la cual la cianita es estable a temperaturas bajas y la sillimanita es estable a temperaturas más altas, un ejemplo documentado de esta serie es la región barroviense de las “*Scottish Highlands*”.

A nivel mundial, la ocurrencia de sillimanita variedad fibrolita ha sido relacionada a eventos de metamorfismo de contacto (Smith, 1945; Hash y Van Horn, 1951; Douglass y Brew 1985; Kerrick, 1987; Dusel-Bacon *et al.*, 1996; Stowell y Crawford, 2000; Stowell y Tinkham, 2003; Homam y Ghaemi, 2008), y metamorfismo regional tipo buchan (Miyashiro, 1994; Best, 2003; Wang *et al.*, 2013). Muchos autores han afirmado que la nucleación y el crecimiento de sillimanita se asocian comúnmente con biotita; esta puede actuar como mineral catalizador que acelera las reacciones de formación de sillimanita en pelitas de alto grado (Chinner, 1961; Vernon y Flood, 1977; Foster, 1991; Kerrick, 1987; Homam y Ghaemi, 2008).

Al sudeste de Alaska a lo largo del flanco oeste de la zona central de las Montañas Coast, cerca al Río Stikine, las rocas conservan evidencia de un metamorfismo de contacto asociado con el emplazamiento de plutones, caracterizado por la presencia de aureolas de contacto con biotita+ granate+ estauroлита y presencia de andalucita localmente, o con cianita+andalucita+sillimanita, o sillimanita (Dusel-Bacon *et al.*, 1996; Stowell y Crawford, 2000; Stowell y Tinkham, 2003). Según Stowell y Crawford (2000), los polimorfos de Al_2SiO_5 , ocurren en algunas aureolas, reflejando diferencias en la profundidad del metamorfismo de contacto a lo largo del cinturón de Gravina.

Al suroeste de los Estados Unidos, en el Piedemonte del cinturón de Carolina del Sur y Georgia, la sillimanita ocurre en esquistos cuarzosos y micáceos, en donde la biotita es generalmente más abundante que la muscovita. Según Smith (1945), la sillimanita se ha formado a partir de la biotita debido a la acción de las intrusiones graníticas; ocurre comúnmente como agregados fibrosos intercrecido con micas; y en ocasiones se presenta como cristales prismáticos; en algunas localidades la sillimanita está acompañada de pequeñas cantidades de cianita (Espenshade y Potter, 1960). Espenshade y Potter (1960), indican que los depósitos de sillimanita fueron formados por el metamorfismo de rocas sedimentarias ricas en aluminio, acompañado por un pequeño cambio químico durante la recristalización.

5. Resultados

La sillimanita estudiada se presenta en rocas metamórficas de la unidad Esquistos del Silgará, aflorando en dos franjas paralelas con leve orientación hacia el NE, en el Cerro La Ventana y La Cuchilla de Frailejones (ver Figura 3), en contacto fallado cubierto, con la unidad Ortoneis.

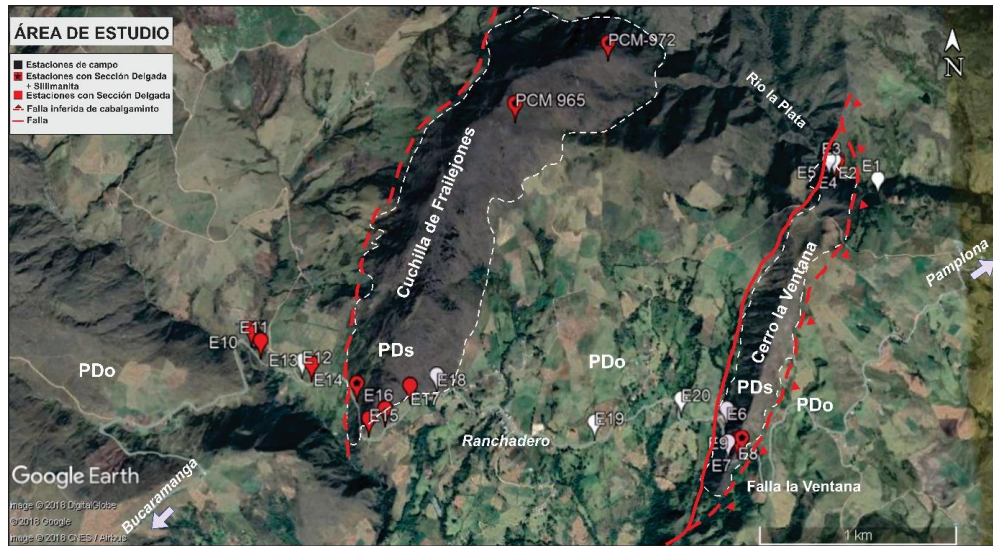


Figura 3. Fotografía satelital del área de estudio, mostrando las estaciones de campo y sitios de muestreo. PDs: Esquistos del Silgará; PDo: Ortoneis. Tomado y modificado de Google Earth (2018).

5.1 Petrografía

Las características composicionales, microestructurales y texturales del Ortoneis y los Esquistos del Silgará son descritos a continuación:

5.1.1 Ortoneis

La unidad Ortoneis está constituida principalmente por rocas cuarzo-feldespáticas (neises cuarzo-feldespáticos con biotita: muestras E10-M1 y E13-M1 y neises biotíticos con hornblenda: muestra E11-M1), rocas metapelíticas (neises muscovíticos: muestras E15-M1, E16-M1, E17-M1), ver Tabla 2.

En el flanco oeste de la Cuchilla de Frailejones predominan ortoneises cuarzo-feldespáticos con biotita y ortoneises biotíticos con hornblenda, mientras que al flanco este los ortoneises son muscovíticos. La zona intermedia entre la Cuchilla de Frailejones y Cerro La Ventana está constituida por ortoneises biotíticos (ver Figura 3).

Los ortoneises cuarzo-feldespáticos con biotita (ubicados en el flanco oeste de la Cuchilla de Frailejones), son de color rosado con tonalidades grisáceas a marrón claro, con tamaño de grano medio a grueso. Se caracterizan por ser débilmente foliados y su paragénesis: cuarzo+ ortoclasa+ plagioclasa+ biotita; la textura principal de estas rocas es lepidogranoblástica y con presencia de texturas pertítica y mirmequítica (ver Figura 4).

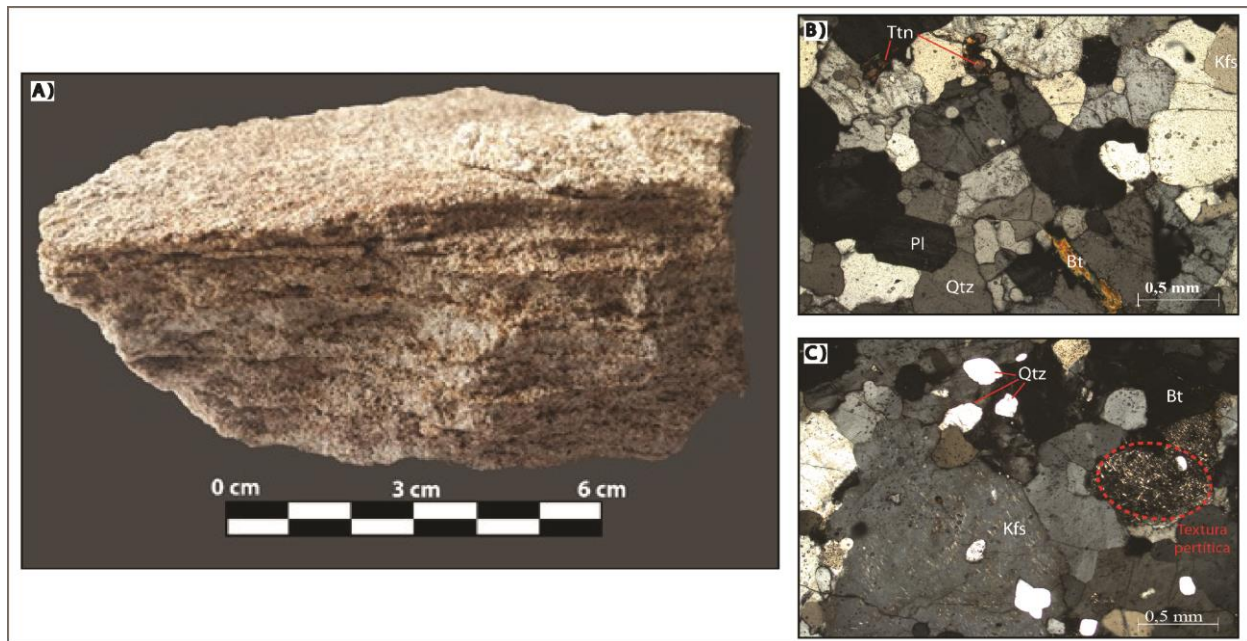


Figura 4. Características petrográficas del Ortoneis cuarzo feldespático con biotita (Muestra E10-M1). A) Foliación débil. B) Asociación mineral típica cuarzo+ ortoclasa+ biotita. C) Textura pertítica.

El ortoneis cuarzo-feldespático con hornblenda está intercalado con los ortoneises cuarzo-feldespáticos con biotita en el flanco este de la Cuchilla de Frailejones (ver Figura 3), de color rosado con porfidoblastos de color negro a verde oscuro y presenta tamaño de grano medio a grueso. Son débilmente foliados y su paragénesis: ortoclasa+ cuarzo+ plagioclasa+ hornblenda+ biotita, es común encontrar los cristales de hornblenda acompañados de titanita y rodeados por biotita. La textura principal de esta roca es lepidogranoblástica, y con presencia de textura local nematogranoblástica (ver Figura 5).

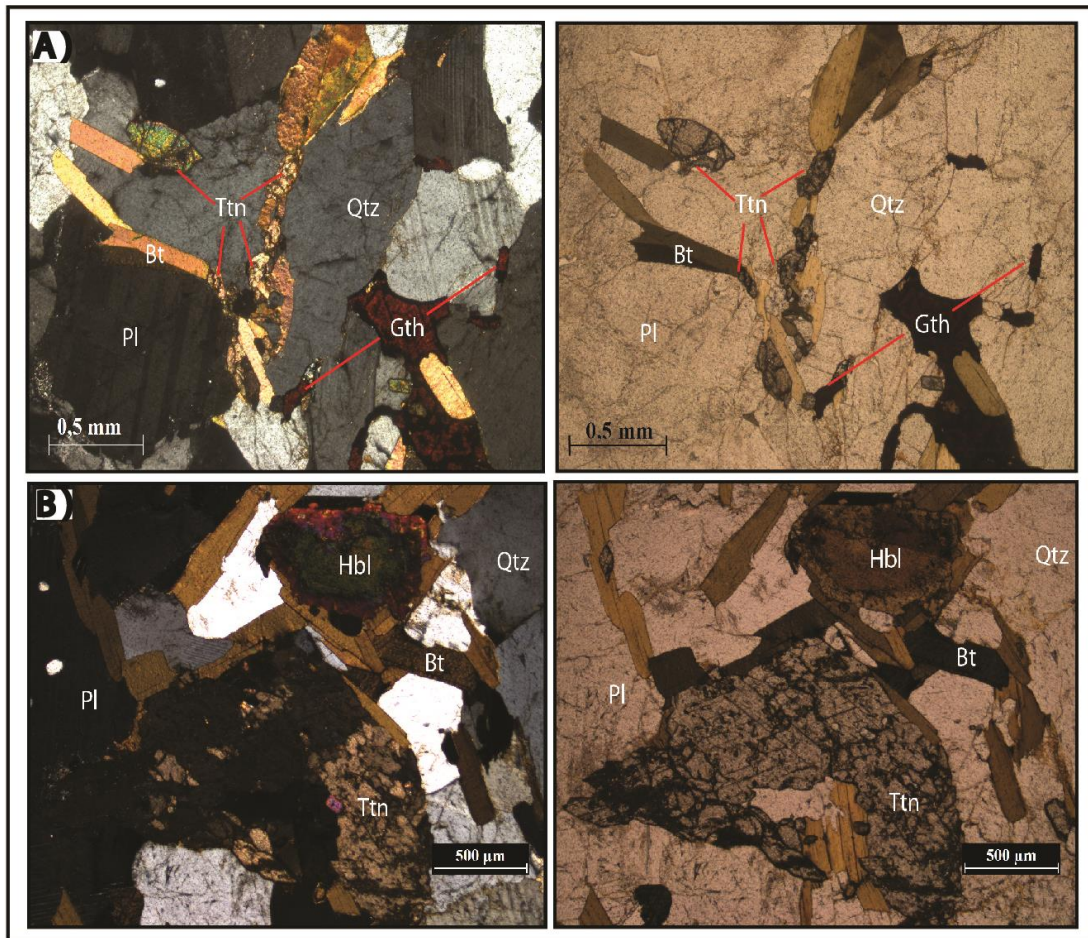


Figura 5. Características petrográficas del Ortoneis cuarzo feldespático con hornblenda (Muestra E11-M1). A) Asociación mineral típica cuarzo+ plagioclasa+ biotita+ hornblenda, acompañada de goethita y titanita. B) Hornblenda zonada.

A diferencia de las rocas cuarzo feldespáticas, los ortoneises muscovíticos se caracterizan por presentar una foliación S_n bien desarrollada. Están localizados al oeste de la Cuchilla de Frailejones, son de color rosado con tonalidades grisáceas y porfidoblástos negros. Su paragénesis es cuarzo+ muscovita+ biotita± plagioclasa (ver Figura 6). La presencia de muscovita en estas rocas genera tonalidades grisáceas a los ejemplares y su desarrollo puede asociarse a la intrusión de un cuerpo diferente con características más básicas (enriquecido en Al

y K). Al igual que los anteriores ejemplares, su tamaño de grano varía de medio a grueso y en algunas localidades, manifiesta un tamaño de grano fino.

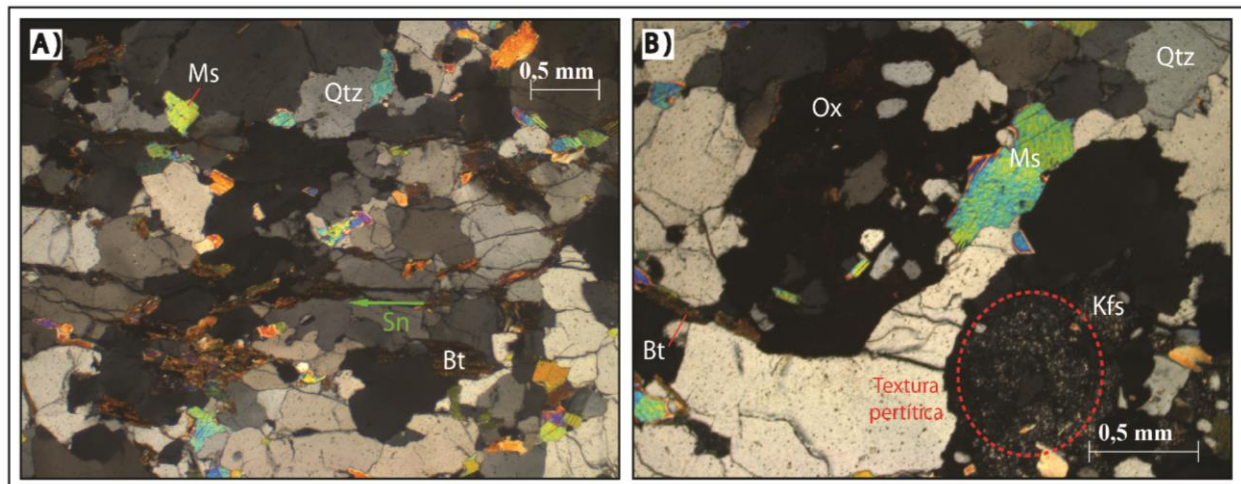


Figura 6. Características petrográficas del Ortoneis muscovítico (Muestra E17-M1). A) Asociación mineral típica cuarzo+ muscovita+ biotita± plagioclase, foliación Sn desarrollada B) Textura perítica.

Tabla 2.
Composición mineralógica de los ortoneises estudiados.

NOMBRE DE LA ROCA	N° MUESTRA	COMPOSICIÓN MINERAL (%)											PARAGÉNESIS MINERAL	TEXTURA			
		Qtz	Pl	Or	Bt	Ms	Hbl	Tm	Tur	Gt	Ox	Op			Zrn		
Ortoneis cuarzo- feldespático con biotita	E10-M1	31	13	47	7	1	0.5	0.3	0.2	Cuarzo+ortoclasa+plagioclasa+biotita							Lepidograno blástica
Ortoneis biotítico con hornblenda	E11-M1	10	12	44	12	10.5	9	1	0.5	1.							Lepidograno blástica
Ortoneis cuarzo- feldespático con biotita	E13-M1	35	24	33	4	2	1	1									Lepidograno blástica
Ortoneis muscovítico	E15-M1	67	5	24					0.1	0.6	3	0.3					Lepidograno blástica
Ortoneis muscovítico	E16-M1	68	4	24							3	1					Lepidograno blástica
Ortoneis muscovítico	E17-M1	70	4	3	21				0.7	1	0.3						Lepidograno blástica

Nota: Qtz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Or: ortoclasa; Bt: biotita; Ms: muscovita; Hbl: hornblenda; Tm: titanita; Tur: turmalina; Gt: goetita; Ox: óxidos; Op: opacos; Zrn: zircón.

5.1.2 Esquistos del Silgará

La unidad Esquistos del Silgará está constituida por rocas metapelíticas (cuarcitas muscovíticas con sillimanita: muestra E3-M1; esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita: muestra E8-M1; esquistos sillimaníticos: muestra E9-M1; esquistos cuarzós micáceos con sillimanita: muestra E14-M1; esquistos cuarzo biotíticos con sillimanita: muestra PCM-965 y PCM-975), ver Tabla 3. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

En la zona norte del Cerro La Ventana en el Río La Plata afloran cuarcitas muscovíticas con sillimanita, mientras que al sur están localizados los esquistos sillimanítico y los esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita. Al norte de la Cuchilla de Frailejones predominan esquistos cuarzo biotíticos con sillimanita y al sur esquistos cuarzo micáceos con sillimanita (ver Figura 7).

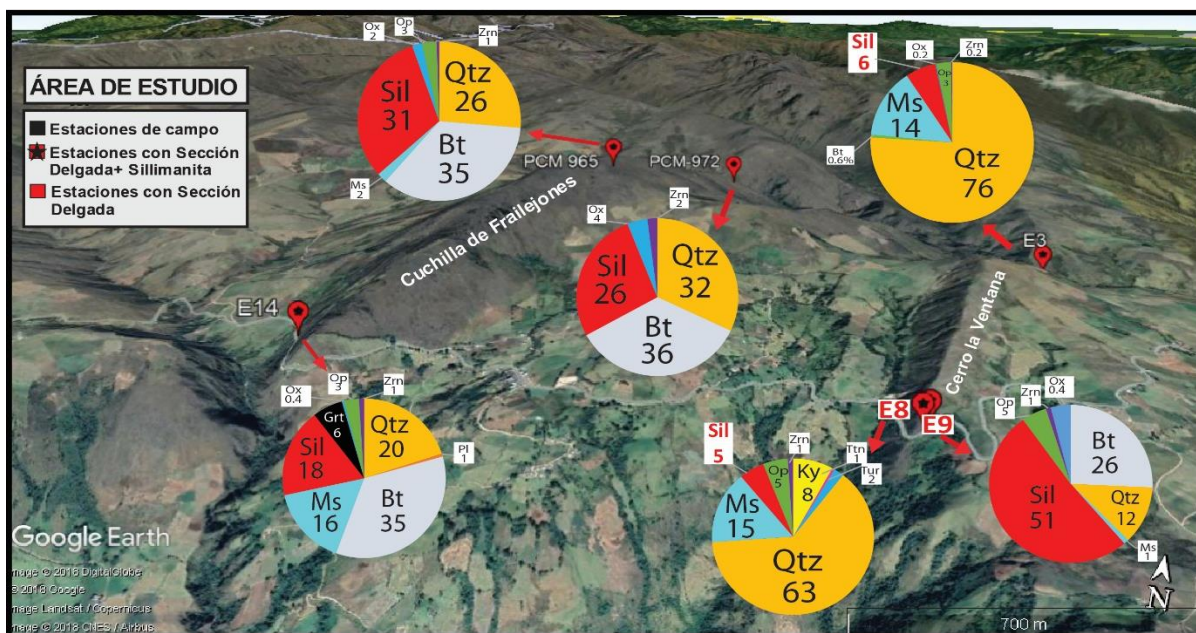


Figura 7. Contenido de la sillimanita (en porcentaje %) en la zona de estudio. En la Cuchilla de Frailejones su abundancia es mayor, presentando un promedio aproximado de 25%, y en el Cerro La Ventana su abundancia es menor (alrededor del 5%).

Las cuarcitas muscovíticas con sillimanita (ubicadas en el Rio La Plata), son de color gris a blanco con tonalidades amarillas y tamaño de grano medio. Se caracterizan por exhibir sillimanita nucleando en individuos de cuarzo (ver Figura 13), ser débilmente foliada y su paragénesis: cuarzo+ muscovita+ biotita y sillimanita 2 (tardía); la textura principal de estas rocas es lepidogranoblástica.

Los esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (localizados al sur del Cerro La Ventana), son de color gris con tonalidades amarillas y tamaño de grano fino a medio. Se caracteriza por la coexistencia cianita y sillimanita, asociadas a muscovita, las cuales marcan la foliación Sn (ver Figura 8 A). La textura principal de estas rocas es lepidogranoblástica y su paragénesis: cianita+ sillimanita 1+ cuarzo+ muscovita y sillimanita 2 (tardía).

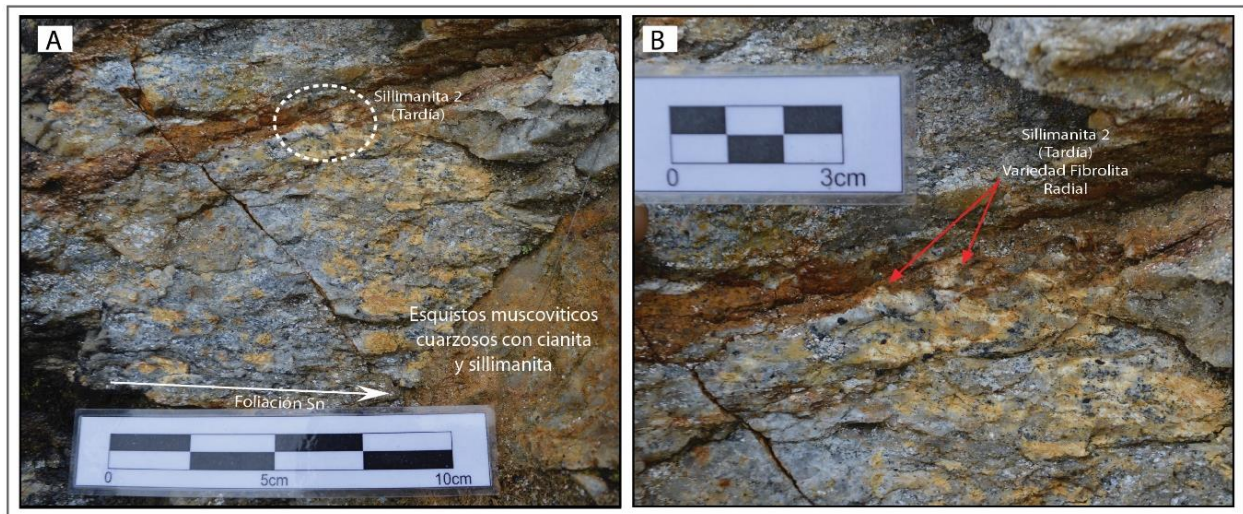


Figura 8. Ocurrencia de la sillimanita en esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita (Muestra E8-M1). A) Foliación Sn bien desarrollada. B) Sillimanita 2 coexistiendo con sillimanita 1.

Los esquistos sillimaníticos (localizados al sur del Cerro La Ventana), son de color marrón claro con bandas grises y blancas de sillimanita (fibrolita reemplazando biotita) ver Figura 9 A, con tamaño de grano muy fino. Su foliación Sn está marcada principalmente por individuos de

biotita y sillimanita (ver Figura 9 B). La textura principal de estas rocas es granolepidoblástica y su paragénesis: biotita+ muscovita+ cuarzo+ plagioclasa+ sillimanita 1.

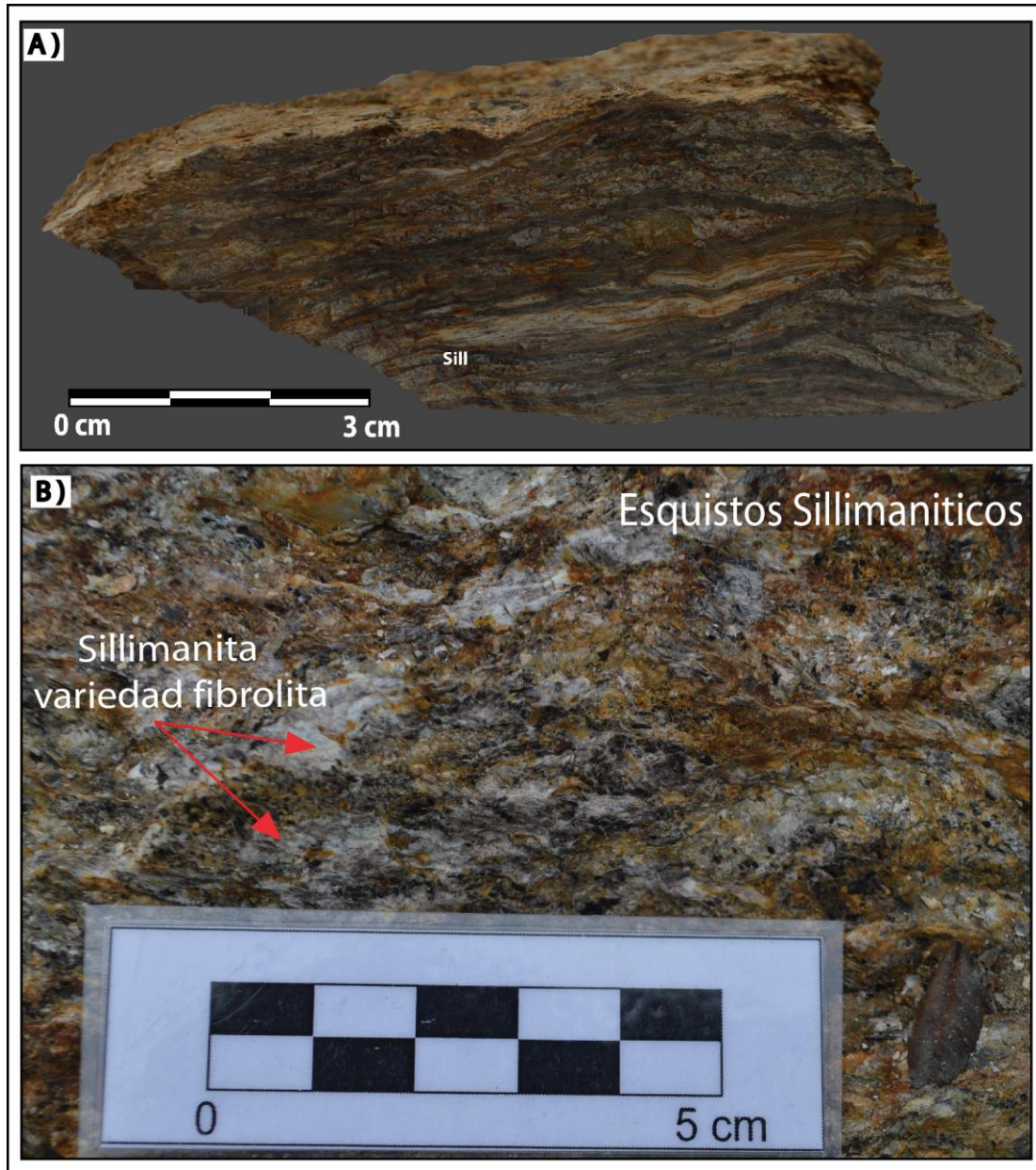


Figura 9. Ocurrencia de sillimanita 1 en esquistos sillimaníticos (Muestra E9-M1). A) Sillimanita 1 acompañando la foliación Sn. B) Agregados de Sillimanita 1.

Los esquistos cuarzo biotíticos con sillimanita: (ubicados al Norte de la Cuchilla de Frailejones), se caracterizan por el total reemplazamiento de biotita por sillimanita prismática

(ver Figura 11 B y C) y evidencias de deformación (pliegues tipo kink en biotitas). Su textura es granolepidoblástica y paragénesis: sillimanita 1+ cuarzo+ biotita± muscovita.

Los esquistos cuarzo micáceos con sillimanita (ubicados al sur de la Cuchilla de Frailejones), son de color gris oscuro con bandas blancas de sillimanita (fibrolita reemplazando biotita), con tamaño de grano muy fino a fino (ver Figura 9). Presenta evidencias de disolución en granate y biotita. La textura principal de estas rocas es granolepidoblástica, y con presencia de textura poiquiloblástica. La asociación es: cuarzo+ biotita+ muscovita+ plagioclasa+ granate+ sillimanita 1. Se evidencia mezcla de magmas en la muestra E14-M1, distinguiendo esquistos y relictos de material pegmatítico.

Tabla 3.
Composición mineralógica de la cuarcita y los esquistos estudiados.

NOMBRE DE LA ROCA	Nº MUESTRA	COMPOSICIÓN MINERAL (%)													TEXTURA	
		Qz	Pl	Bt	Ms	Sil	Ky	Tun	Tur	Grt	Ox	Op	Zrn			
Cuarcita muscovítica con sillimanita	E3-M1	76		0.6	14	6						0.2	3	0.2	Cuarzo+muscovita+biotita Sillimanita 2 (tardía)	Lepidogranoblástica
Esquisto muscovítico cuarzo con cianita y sillimanita	E8-M1	61		2	15	5	8	1	2				5	1	Cianita+Sillimanita 1+Cuarzo+Muscovita Sillimanita 2 (tardía)	Lepidogranoblástica
Esquisto sillimanítico	E9-M1	12	5 (Ser)	26	1	52						4		1	Biotita+Muscovita+Cuarzo+Plagioclasa Sillimanita 1	Granolepidoblástica
Esquisto cuarzo micáceo con sillimanita	E14-M1	20	0.6	35	16	18				6	0.4	3	1		Cuarzo1+Biotita1+Muscovita+Plagioclasa+Granate Sillimanita 1+Biotita 2+Cuarzo 2	Granolepidoblástica
Esquisto cuarzo biotítico con sillimanita	PCM-965	32		35		27						3	2	1	Biotita+Cuarzo+Muscovita Sillimanita 1	Granolepidoblástica
Esquisto cuarzo biotítico con sillimanita	PCM-972	27		36	2	32						0.5	2	0.5	Cuarzo+Biotita Sillimanita 1	Granolepidoblástica

Nota: Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Bt: biotita; Ms: muscovita; Tun: titanita; Tur: turmalina; Grt: granate; Ox: óxidos; Op: opacos; Zrn: Zircón.

5.2 Ocurrencia de sillimanita

De acuerdo con la ocurrencia, morfología y asociación mineral, se definieron dos tipos de sillimanita:

5.2.1 Tipo 1

Ocurre como bandas de agregados fibrosos con tonalidades blancas y grisáceas, siguiendo la foliación de la roca (definida por la orientación de muscovita y/o biotita). Este tipo de sillimanita está presente en: esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita (muestra E8-M1); esquistos sillimaníticos (muestra E9-M1); esquistos cuarzo micáceos con sillimanita (muestra E14-M1) y esquistos cuarzo biotíticos con sillimanita (muestras PCM-965 y PCM-975).



Figura 10. A) Ocurrencia de sillimanita tipo 1. B) Esquisto sillimanítico (Muestra E14-M1).

La sillimanita tipo 1 ocurre reemplazando biotita, y se presenta como variedad fibrolita y/o prismática. Este reemplazamiento es más intenso en los planos de exfoliación o en los bordes de la biotita (Figura 11 A); cuando el reemplazamiento es completo la sillimanita variedad prismática corta es de tamaño de grano muy fino (0.02-0.04 mm), mientras que la prismática alargada es de tamaño de grano muy fino a medio (0.01/0.08mm y 0.04/0.86 de ancho y largo respectivamente) ver Figura 11 B y C. La presencia de este tipo de sillimanita indica condiciones del pico térmico del metamorfismo regional barroviense que afectó la unidad Esquistos del Silgará. Esto se corrobora por la presencia de la asociación cianita+ sillimanita+ muscovita+ cuarzo, presente en el esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1) ver Figura 12 y Tabla 3. Los minerales de esta asociación definen la foliación principal de la roca Sn. En esta misma muestra se observa la presencia del tipo 2 de la sillimanita la cual ocurre como agregados fibrosos radiales sin orientación asociados espacialmente a cuarzo (ver descripción tipo 2 de sillimanita).

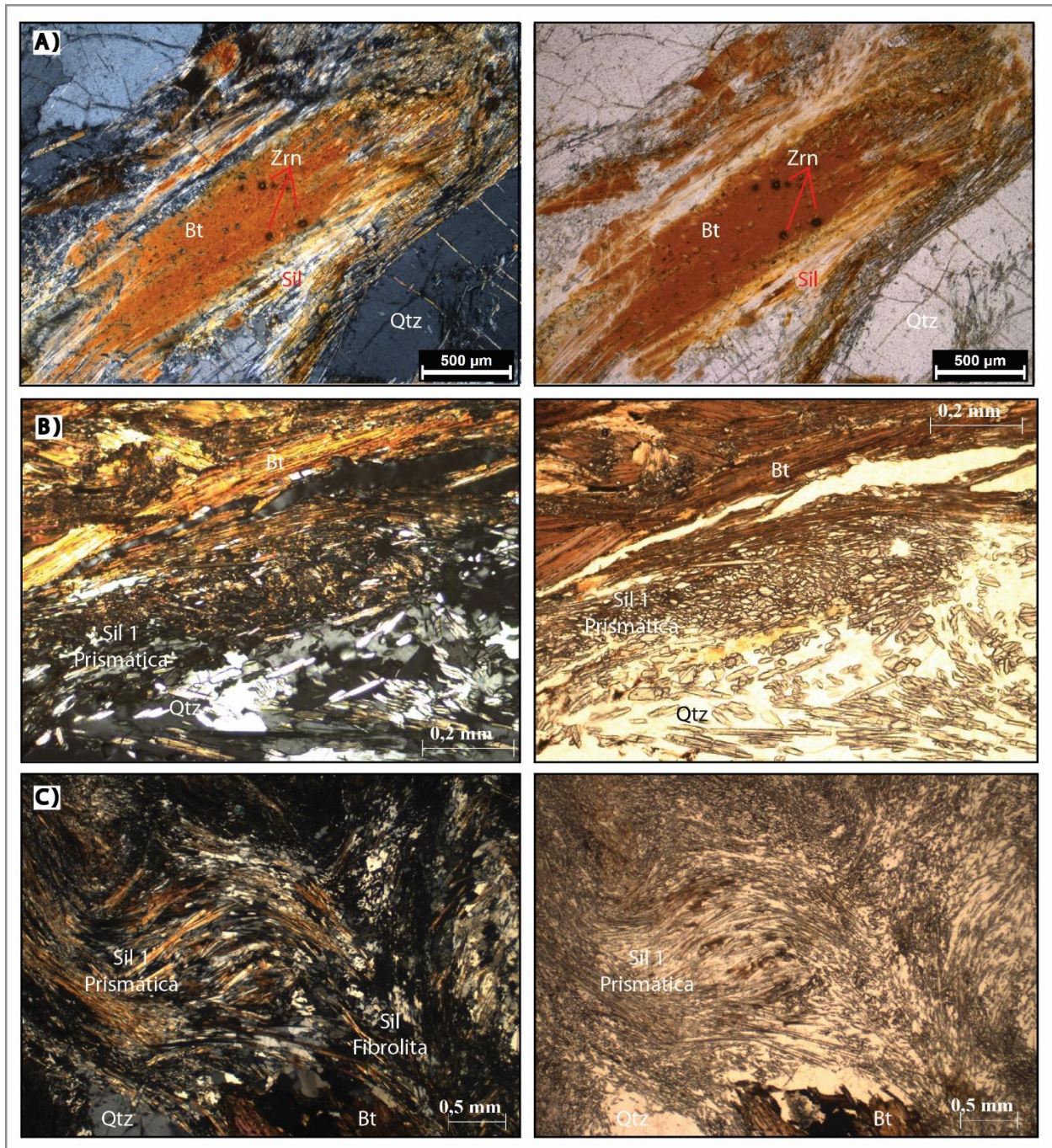


Figura 11. Características petrográficas de los esquistos. A) sillimanita 1 variedad fibrolita y prismática reemplazando biotita (esquisto sillimanítico: muestra E9-M1, objetivo 4X). B) Sillimanita variedad prismática corta y C) sillimanita variedad prismática larga (esquisto cuarzo biotítico con sillimanita: muestra PCM-972, objetivo 10X)

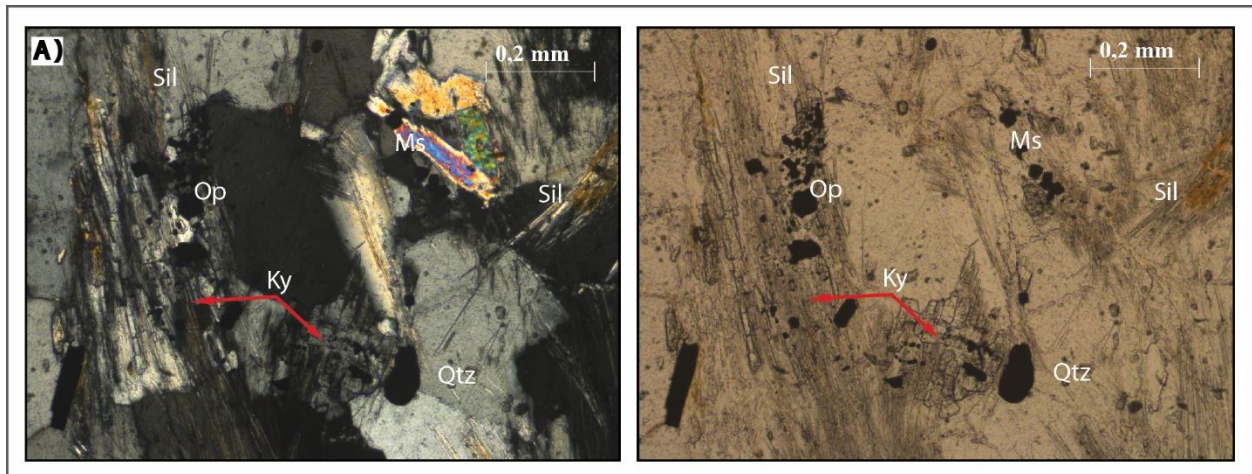


Figura 12. Cianita y sillimanita coexistiendo el esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1, objetivo 10X)

5.2.2 Tipo 2

Ocurre de forma radial con tonalidades blancas y amarillas, nucleando en cristales de cuarzo (de forma aleatoria). Su desarrollo se da en rocas metapelíticas del Cerro La Ventana: cuarcitas muscovíticas con sillimanita (muestra E3-M1), esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita (muestra E8-M1); también en el material pegmatítico de los esquistos cuarzo-micáceos con sillimanita (muestra E14-M1).



Figura 13. Muestra E3-M1. Sillimanita variedad fibrolita nucleando de forma radial, de color blanco, dentro del círculo rojo.

La sillimanita tipo 2 ocurre como agregados fibrosos nucleando de forma radial el cuarzo. En ocasiones coexiste con la sillimanita tipo 1 en los ejemplares E8-M1, E9-M1 y E14-M1. Su presencia indica un metamorfismo de bajas presiones y altas temperaturas, sobreimpuesto al metamorfismo barroviense regional que afectó esta zona central del MS. Esto se evidencia al no estar asociada con los minerales que componen la paragénesis de las rocas metapelíticas; además, los agregados fibrosos radiales no presentan una orientación definida, indicando que el desarrollo de la sillimanita 2 ocurre posteriormente (ver Figura 14-A y B). Para el caso de la muestra E14-M1, esta sillimanita se desarrolla en cuarzos pertenecientes a material pegmatítico transportado (ver Figura 14 D). Por otra parte, en los esquistos sillimaníticos (muestra E9-M1) se identificaron venillas de sillimanita 2 cortando de manera perpendicular cortando los agregados fibrosos de sillimanita 1 (ver Figura 14 C).

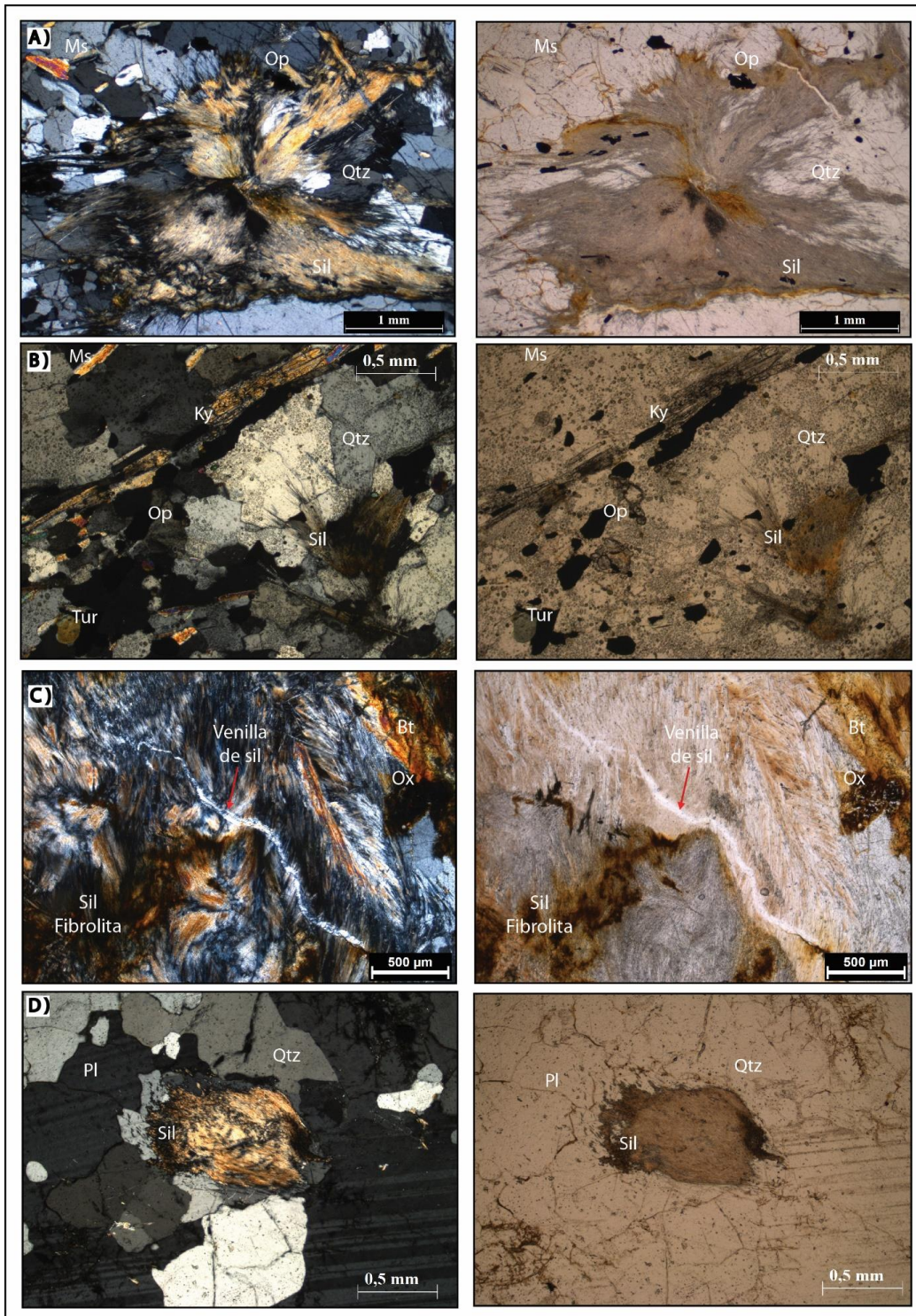


Figura 14. Características petrográficas de la sillimanita tipo 2 nucleando en individuos de cuarzo en: A) cuarcita muscovítica con sillimanita (muestra E3-M1, objetivo 2.5X), B) esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita

y sillimanita (muestra E8-M1, objetivo 4X), C) Venilla de Sillimanita 2 en el esquisto sillimanítico (muestra E9-M1, objetivo 4X), D) esquisto cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo de 4X).

6. Discusión

Las dos franjas de la unidad Esquistos del Silgará estudiadas en este trabajo, se diferencian de las demás rocas de esta unidad por su abundante contenido en sillimanita en la zona central del MS.

Se diferencian dos tipos de sillimanita, ocurriendo como variedad fibrolita y/o prismática y fibroso-radial (fibrolita). Su coexistencia en algunos sectores indica dos posibles eventos metamórficos: metamorfismo regional barroviense (presiones intermedias, altas temperaturas) y metamorfismo de contacto (presiones bajas, altas temperaturas). La sillimanita 1 variedad fibrolita y/o prismática, es el resultado del remplazamiento de la biotita; la sillimanita 2 variedad fibrolita, se desarrolla en forma radial nucleando en cuarzo.

La presencia de la sillimanita 1 en los Esquistos del Silgará ha sido reportada anteriormente en el sector suroccidental del MS por Ríos y García (2001) y Ríos *et al.*, (2003); y en el sector central del MS hacia el suroeste de Pamplona por García *et al.*, (2005) y Castellanos *et al.*, (2008). Para este tipo de sillimanita es clara su relación con el metamorfismo barroviense que ha sido definido como el principal evento metamórfico de esta zona de edad Ordovícico Temprano, 471 y 479 Ma (Mantilla *et al.*, 2012; Van der Lelij *et al.*, 2013; García y Rey, 2017).

Las evidencias petrográficas en los Esquistos del Silgará sugieren la producción de sillimanita 1 a través de las siguientes reacciones:

- 1) En los esquistos cuarzo micáceos con sillimanita (muestra E14-M1) los porfidoblastos de granate presentan evidencias de disolución (bordes corroídos), inclusiones de cuarzo y coronas

de reacción compuestas por biotita 2. En la Figura 15 y Figura 16, se observan evidencias de una reacción que podría haber formado biotita 2, cuarzo 2 y sillimanita 1.

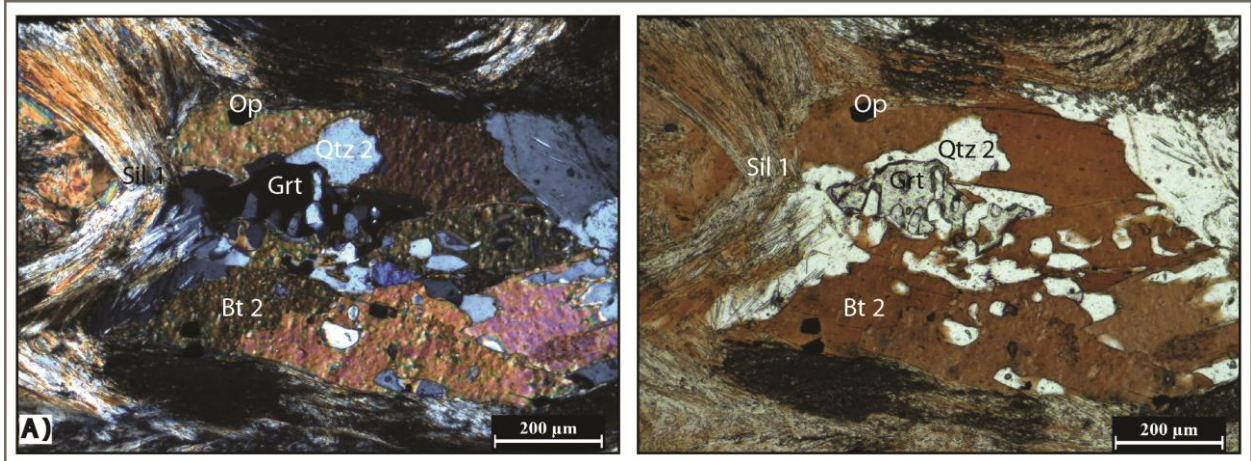


Figura 15. Evidencias de disolución en granate y resultados de la posible reacción en esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo 10X).

Según Zhao y Cawood (1999), la ocurrencia de sillimanita variedad fibrolita + biotita formando pseudomorfos posteriores a los porfidoblastos de granate, indica que la sillimanita es generada por la reacción: Granate + muscovita = sillimanita + biotita + cuarzo (1).

Las evidencias texturales (Figura 15 y Figura 16) presentes en el esquistos cuarzo micáceo (muestra E14-M1) sugiere que el desarrollo de la sillimanita 1 es generado por la reacción (1) descrita por Zhao y Cawood (1999), teniendo en cuenta que la disponibilidad del reactante de muscovita en esta roca es poca (muestra E14-M1), debido a que es consumida para generar los productos de sillimanita 1, biotita 2 y cuarzo 2.

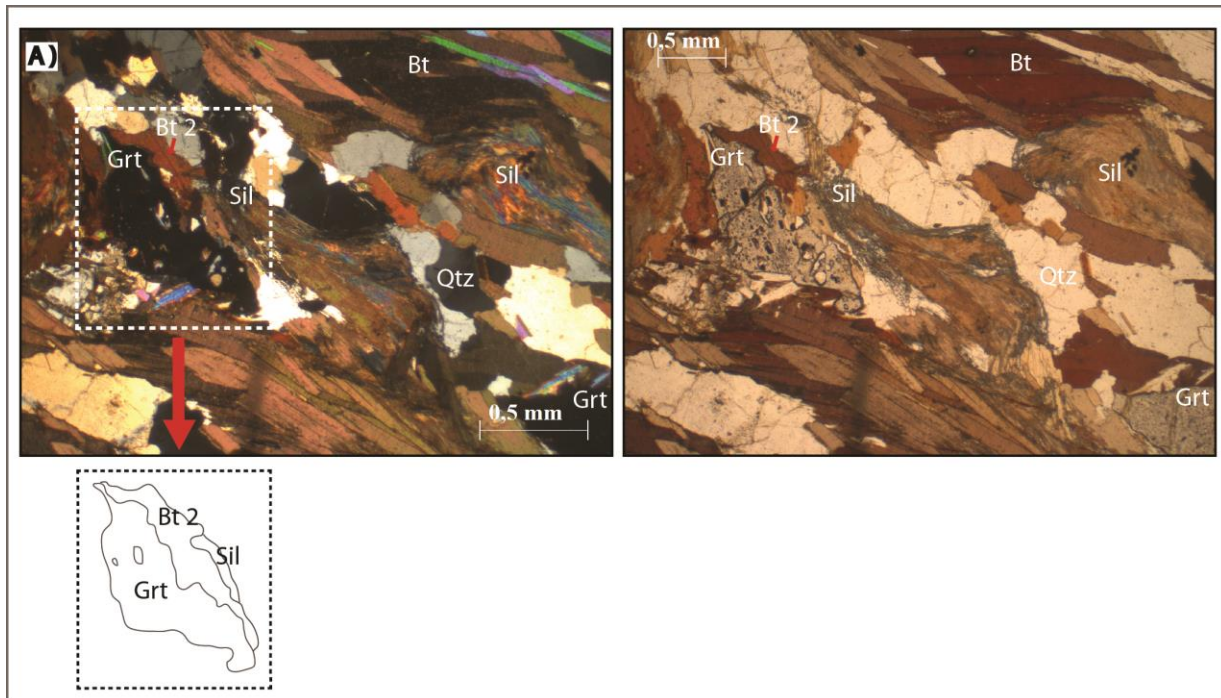


Figura 16. Evidencias microestructurales desarrollo Bt 2 y Sil 1 en esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1, objetivo 2.5X).

2) El esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1), evidencia dos reacciones locales: porfidoblastos de cianita con inclusiones de cuarzo desarrollando muscovita alrededor de la cianita (ver Figura 19 A) y biotita reemplazada por agregados de sillimanita variedad fibrolita (ver Figura 19 B). En la muestra E8-M1 la cantidad de biotita es poca debido a que es consumida casi en su totalidad para generar la sillimanita 1.

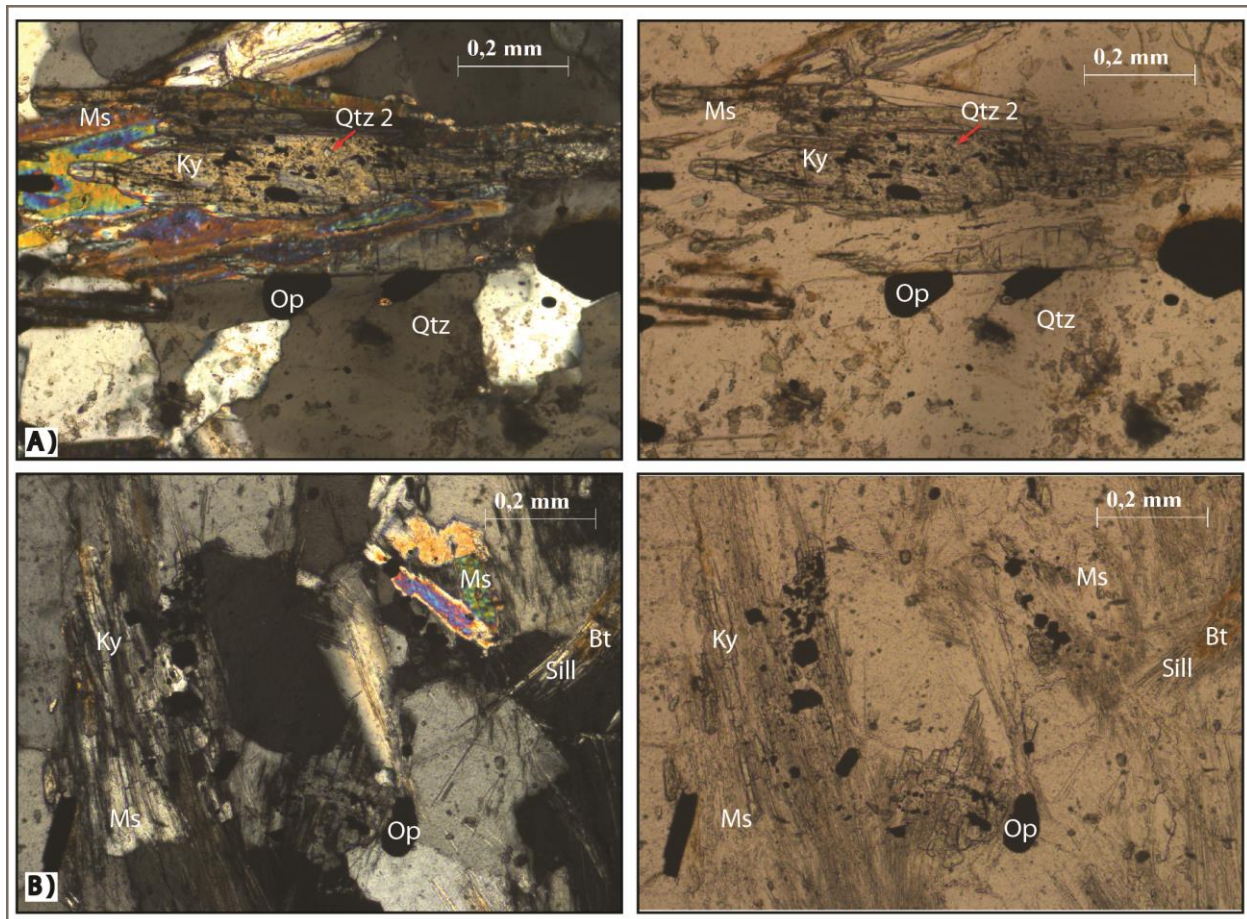


Figura 17. Evidencias texturales de reacciones locales de la reacción polimórfica cianita=sillimanita en esquistos muscovítico cuarzoso con cianita y sillimanita (muestra E8-M1).

Evidencias texturales del reemplazamiento de sillimanita en biotita y el reemplazamiento muscovita en cianita indican el desarrollo de reacciones locales de la reacción polimórfica cianita= sillimanita (Foster, 1991) ver Figura 18. Además, autores como Chinner (1961), Kerrick (1990) y Foster (1991) indican que la nucleación y crecimiento de la sillimanita es común encontrarla asociada a la biotita, que es un mineral catalizador que acelera la reacción de formación de la sillimanita en pelitas de alto grado.

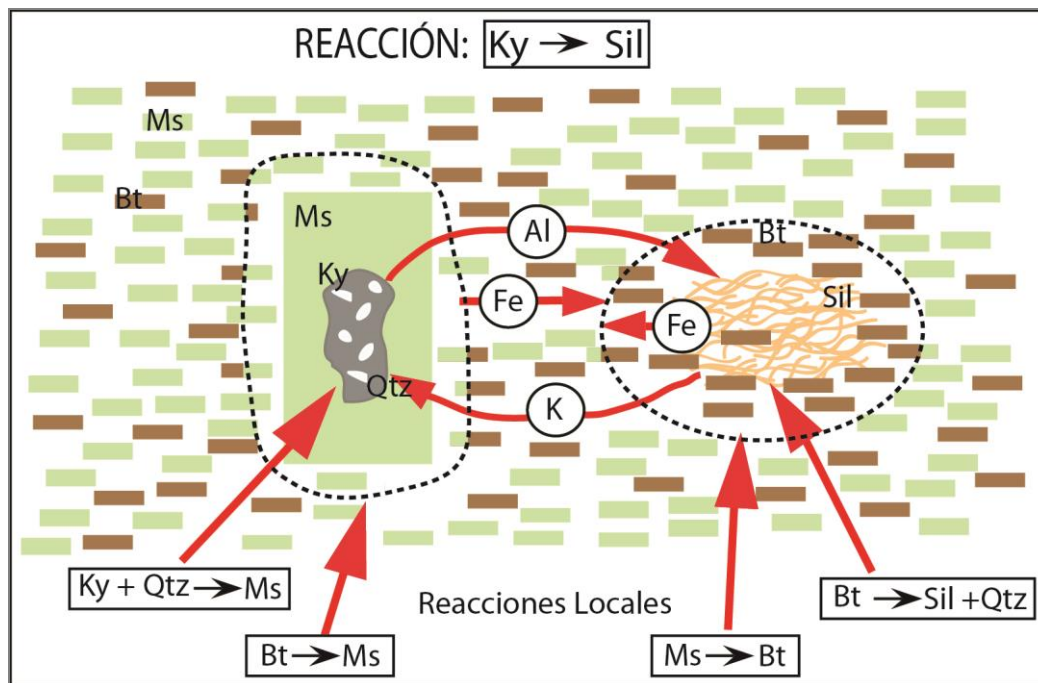


Figura 18. Mecanismos de reacción usando mica como catalizador de la reacción cianita = sillimanita. Material transportado de Fe, Al y K es mostrado por las flechas entre las dos reacciones locales. Tomado de Foster (1991).

Resulta más problemático explicar la ocurrencia de la sillimanita 2 caracterizada por no presentar orientación, morfología fibroso radial, y no estar asociada a las fases minerales que normalmente ocurren en las rocas metapelíticas de los Esquistos del Silgará; sin embargo, siempre se encuentra asociada al cuarzo y no evidencia asociación a minerales indicadores de metamorfismo. La ocurrencia de este tipo de sillimanita no ha sido reportada por estudios anteriores en otros sectores del Macizo de Santander ni en las dos franjas delgadas de los Esquistos del Silgará, que están rodeadas por grandes masas de ortoneises.

A nivel mundial la ocurrencia de sillimanita con características muy similares, ha sido relacionada a eventos termales, ya sea metamorfismo de contacto (Smith, 1945; Hash y Van Horn, 1951; Douglass y Brew 1985; Kerrick, 1987; Dusel-Bacon *et al.*, 1996; Stowell y

Crawford, 2000; Stowell y Tinkham, 2003; Homam y Ghaemi, 2008) o metamorfismo regional tipo buchán (Miyashiro, 1994; Best, 2003; Wang *et al*, 2013). Según Best (2003), para el metamorfismo regional tipo buchán existe una clara similitud con las asociaciones de minerales pelíticos en aureolas metamórficas de contacto desarrolladas alrededor de intrusiones magmáticas en la corteza superficial (<10 km).

La hipótesis del segundo evento metamórfico (bajas presiones y altas temperaturas) es soportado también por las variaciones en el tamaño de grano del cuarzo en la cuarcita muscovítica con sillimanita (muestra E3-M1), esquistos muscovíticos cuarzosos con cianita y sillimanita (muestra E8-M1) y esquistos cuarzo micáceo con sillimanita (muestra E14-M1), ver Figura 19, donde se observan dos poblaciones de muestras de tamaño de cuarzo. La población de tamaño de grano que varía entre muy fino a medio, se asocia al tamaño de grano promedio de las rocas metapelíticas de la zona. La otra población cuyo tamaño de cuarzo varía de medio a grueso, evidencia un posible proceso de recristalización como reflejo de un evento termal.

Las relaciones de campo, las variedades de sillimanita y su ocurrencia apuntan a un posible metamorfismo de bajas presiones y altas temperaturas sobreimpuesto, que pudo haber sido ocasionado por el emplazamiento de un ortoneis en un evento posterior al pico metamórfico en el inicio de la etapa retrograda del metamorfismo regional barroviense; coincidiendo con los datos obtenidos para el ortoneis del Ordovícico Tardío ($451,5 \pm 1,3$ Ma) descrito por Van der Lelij (2013), distinguido por presentar una foliación débil respecto a otros ortoneises del MS.

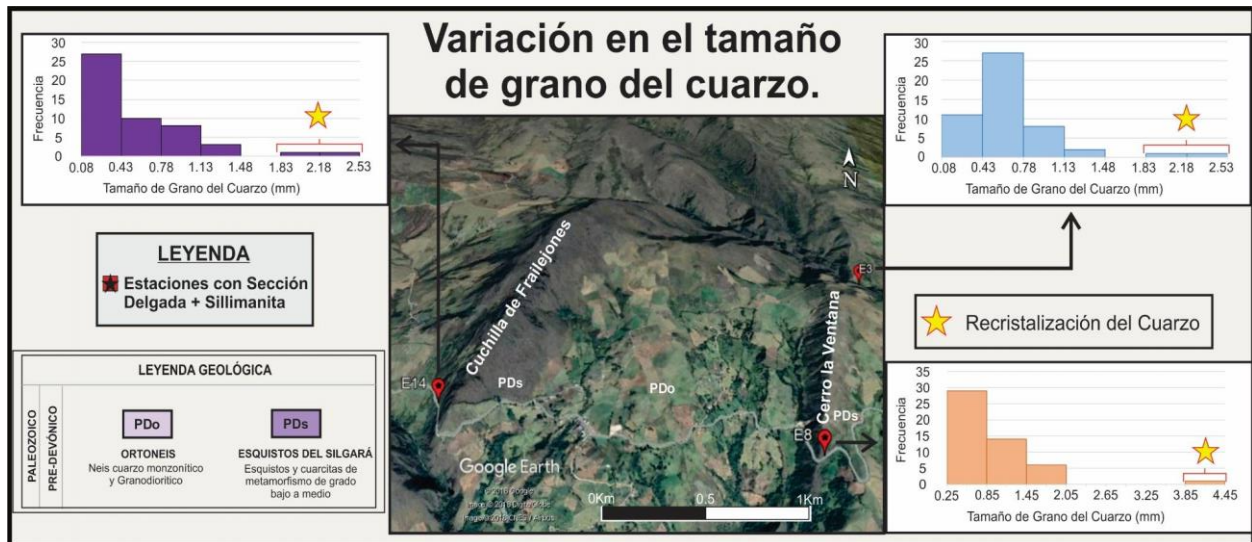


Figura 19. Variación en el tamaño de grano de cuarzo en rocas metapelíticas de la unidad Esquistos del Silgará.

Representando la recristalización del cuarzo en las muestras E14, E8 y E3 producto de un posible evento termal.

7. Conclusiones

- El alto contenido de sillimanita en rocas metapelíticas se manifiestan en los denominados Cuchilla de Frailejones y Cerro La Ventana, pertenecientes a la unidad Esquistos del Silgará. Estas dos franjas alargadas con dirección NE están en contacto fallado cubierto con la unidad Ortoneis.

- Se definieron dos tipos de sillimanita de acuerdo con su ocurrencia, morfología y asociación mineral. La sillimanita tipo 1 variedad fibrolita y/o prismática, ocurre como bandas de agregados fibrosos siguiendo la foliación que acompaña los esquistos, siendo el resultado del reemplazamiento de la biotita por el metamorfismo regional barroviense. La sillimanita tipo 2 variedad fibrolita, se desarrolla como agregados fibrosos con forma radial nucleando el cuarzo, como producto de un evento térmico (alta temperatura y baja presión) posterior al metamorfismo barroviense (alta temperatura-presión intermedia). Este evento térmico post-barroviense podría atribuirse a un metamorfismo de contacto o metamorfismo regional tipo buchán (alta temperatura-baja presión).

- El desarrollo de la sillimanita 2 y el aumento del comportamiento promedio del tamaño de grano de cuarzo en las rocas metapelíticas (muestras E3, E8 y E14), respaldan la hipótesis de un metamorfismo térmico, generado por el emplazamiento de ortoneises en un evento posterior ocurrido en el Ordovício Tardío durante la etapa retrógrada del metamorfismo regional barroviense que afectó las rocas de la zona central del Macizo de Santander.

8. Recomendaciones

- Realizar estudios geotermobarométricos para determinar las condiciones de temperatura y presión del metamorfismo que afectaron las rocas de los Esquistos del Silgará y del Ortoneis.
- Desarrollar estudios geocronológicos para definir la edad de los cuerpos de Ortoneis, los esquistos y del metamorfismo térmico.

Referencias Bibliográficas

- Amaya, S. (2012). *Caracterización Petrográfica y Petroológica de los Neises, Migmatitas y Granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamento de Santander* (Tesis de Maestría en Geología). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology*. Malden, USA: Blackwell Science Ltd.
- Castellanos, O. M., Ríos, C. A., y Takasu, A. (2008). A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with P-T paths of the Barrovian-type Silgará Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Earth Sciences Research Journal*, 12 (2), 125-155.
- Castellanos, O. M., y Ríos, C. A. (2015). A case of regional metamorphism of Buchan type (andalusite-cordierite) in the Northern Santander Massif, Eastern Cordillera (Colombia). *Ciencias de la Tierra*, 39 (152), 416-429.
- Chinner, G. A. (1961). The origin of sillimanite in Glen Clova, Angus. *Journal of Petrology*, 2(3), 312–323.
- Clavijo, J. (1994). Mapa geológico generalizado del departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. *Informe interno INGEOMINAS*, 67.
- Cordani, U. G., Cardona A., Jimenez, D. M., Liu, D., y Nutman, A. P. (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 246(1), 329-346.
- Dusel-Bacon, C., Brew, D., y Douglass, S. (1996). *Metamorphic Facies Map of Southeastern Alaska- Distribution, Facies, and Ages of Regional Metamorphosed Rocks*. (No. 1497–D).

Washington.

Douglass, S.L., y Brew, D.A. (1985). Polymetamorphism in the eastern part of the Petersburg map area, southeastern Alaska, in Bartsch-Winkler. *U.S. Geological Survey*, 967, 89-92.

Espenshade, G. H., y Potter, D. B. (1960). *Kyanite, Sillimanite, and Andalusite Deposits of the Southeastern States* (No. 336). Washington.

Foster, C. T. (1991). The role of biotite as a catalyst in reaction mechanisms that form sillimanite. *Canadian Mineralogist*, 29, 943–963.

García, C. A., y Campos, N. O. (2000). Composición química y mineralogía de las biotitas metamórficas del sector central del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología*, 22(37), 18-28.

García, C. A., Ríos, C. A., y Castellanos, O. (2005). Medium- pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 27 (2), 44-68.

García, C. (2007). *Manual de prácticas de petrología metamórfica*. Colombia, Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.

García, C. A., Rey, V., y Valencia, V. (2017). Ortoneises en la Franja Silos-Babega, Macizo de Santander, Colombia: evidencias de la orogenia famatiniana en los Andes del norte. *Andean Geology*, 44(3), 307-327.

Goldsmith, R., Marvin, R.F., y Mehnert, H.H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Geological Survey Research*, 750-D, 44-49.

Hash, L. J., y Van Horn, E. C. (1951). *Sillimanite deposits in North Carolina*. (No. 61). North Carolina.

Homam, S. M., Boyle, A. P., y Atherton, M. P. (2002). Syn- To Post-Kinematic Fibrolite-Biotite

- Intergrowths in the Ardara Aureole , NW Ireland. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 13(4), 327–337.
- Homam, S. M., y Ghaemi, F. (2008). The mechanism of fibrolite formation in the contact aureole of Mashhad granite. *Iranian Jpurnal of Crystallography an Mineralogy*, 16(1), 2008.
- i Draper, J. C. M. (2003). Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada (Vol. 1). Edicions Universitat Barcelona.
- Kerrick, D. M. (1987). Fibrolite in contact aureoles of Donegal, Ireland. *American Mineralogist*, 72(3–4), 240–254.
- Mantilla, L., Bissig, T., Cottle, J.M. and Hart, C. (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences*, 38, 1-12.
- Mantilla, L., Bissig, T., Valencia, V. y Hart, C. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235-249.
- Mantilla, L. C., García, C. A., y Valencia, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada “Formación Silgará” (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38 (1), 33-50.
- Mantilla, L. C., García, C. A., y Valencia, V. A. (2016). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la Formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Ciencias de la tierra*, 40 (155), 320-336.
- Miyashiro, A. (1994). Evolution of Metamorphic Belts. *Journal of Petrology*, 2 (3), 277-311.
- Moreno, M., Gomes, A., Castillo, H. (2005) La “Formación Floresta Metamorfoseada” (sensu

- Ward *et al.*, 1973) no es la Formación Floresta sin metamorfosear. *X Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá, Memorias CD, 1-7.
- Ordoñez, C.O., Restrepo, J.J., Pimentel, M.M. (2006). Geochronological and isotopic review of pre-Devonian crustal basement of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 372–382.
- Restrepo-Pace, P. A. (1995). *Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data* (Tesis de pregrado). University of Arizona, Tucson, Estados Unidos.
- Restrepo-Pace, P.A. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of Americas. *Earth and Planetary Science Letters*, 155, 427-441.
- Restrepo-Pace, P.A., y Cediel, F. (2010). Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 764-771.
- Rey, V. (2015). *Estudio de las rocas de la unidad Ortoneis en el Macizo de Santander: consideraciones petrológicas y geoquímicas* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Ríos, C. A., y García, C. A. (2001). Primera ocurrencia de los tres polimorfos de Al_2SiO_5 en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, región Suroccidental del Macizo de Santander. *Boletín de Geología*, 23(38), 51–59.
- Ríos, C. A., García, C. A., y Takasu, A. (2003). Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation Metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 133-154.

- Ríos, C. A., y Castellanos, O. M. (2014). First occurrence and significance of the staurolite-bearing amphibolites between marbles and garnet micaschists of the Silgará Formation at the Central Santander Massif. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(149), 417.
- Ríos, C. A., y Castellanos, O. M. (2016). Petrologic significance of Fe-rich staurolite in pelitic schists of the Silgará Formation, Santander Massif Significado Petrológico de Estaurolita Rica en Fe en Esquistos Pelíticos de la Formación Silgará , Macizo de Santander. *Earth Sciences Research Journal*, 20(1), 1–7.
- Royero, J. y Clavijo, J. (2001). Memoria Explicativa del Departamento de Santander. Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander. Escala 1:400.000. *Ingeominas*.
- Smith, L. (1945). Sillimanite in South Carolina. *Economic Geology*, 40, 298–304.
- Stowell, H. H., y Crawford, M. L. (2000). Metamorphic history of the Coast Mountains orogen, western British Columbia and southeastern Alaska. *Geological Society of America Special Paper*, 343(January), 257–278.
- Stowell, H. H., y Tinkham, D. K. (2003). Integration of phase equilibria modelling and garnet Sm-Nd chronology for construction of P-T-t paths: examples from the Cordilleran Coast Plutonic Complex, USA. *Geological Society, London, Special Publications*, 220(1), 119–145.
- Stowell, H., Taylor, D. L., Tinkham, D. L., Goldberg, S. A., y Ouder Kirk, K. A. (2001). Contact metamorphic $P \pm T \pm t$ paths from Sm \pm Nd garnet ages , phase equilibria modelling and thermobarometry : Garnet Ledge , south-eastern Alaska , USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 19, 645–660.
- Urueña, C. L. (2014). *Metamorfismo, exhumación y termocronología del Neis de Bucaramanga*.

- (*Macizo de Santander, Colombia*) (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Van Der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., y 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, 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* (Tesis de doctorado). Université de Genève, Suiza.
- Vernon, R. H., y Flood, R. H. (1977). Interpretation of metamorphic assemblages containing fibrolitic sillimanite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 59(3), 227–235.
- Wang, W., Wei, C., Zhang, Y., Chu, H., Zhao, Y., y Liu, X. (2014). Age and origin of sillimanite schist from the Chinese Altai metamorphic belt: implications for late Palaeozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *International Geology Review*, 56(2), 224–236.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, R., Gruz, A., Restrepo, J., y Gómez, E. (1973). MEMORIA EXPLICATIVA: Mapa Geológico de Colombia Plancha 109 y 110. *Boletín Geológico*, 21, 1–132.
- Zuluaga, C. A., Amaya, S., Urueña, C., y Bernet, M. (2017). Migmatization and low-pressure overprinting metamorphism as record of two pre-Cretaceous tectonic episodes in the Santander Massif of the Andean basement in northern Colombia (NW South America). *Lithos*, 274–275, 123–146.

Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca

UIS)

Apéndice A. Descripción petrográfica de las muestras con sección delgada.

Apéndice B. Conteo mineral de las 12 secciones delgadas analizadas.