

**PETROGÉNESIS DE LAS ROCAS CALCOSILICATADAS QUE OCURREN
COMO BANDAS DE REACCIÓN ENTRE MÁRMOLES Y ROCAS
METAPELÍTICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ, REGIÓN CENTRAL DEL
MACIZO DE SANTANDER**

**GUILLERMO ANTONIO AVILA CALAO
SERGIO IVÁN GÓMEZ VALDERRAMA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2006

**PETROGÉNESIS DE LAS ROCAS CALCOSILICATADAS QUE OCURREN
COMO BANDAS DE REACCIÓN ENTRE MÁRMOLES Y ROCAS
METAPELÍTICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ, REGIÓN CENTRAL DEL
MACIZO DE SANTANDER**

GUILLERMO ANTONIO AVILA CALAO

SERGIO IVÁN GÓMEZ VALDERRAMA

Trabajo de grado como requisito para optar al título de: GEÓLOGO

Director

CARLOS ALBERTO RIOS REYES

Geólogo, MSc.

Codirector

OSCAR MAURICIO CASTELLANOS ALARCÓN

Geólogo, Msc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2006

DEDICATORIA

A:

Dios por ser el motor y razón de mi existencia.

*Mi mamá "naná", por ser el sol de mi vida,
mi mayor apoyo y ejemplo a seguir.*

A papá.

*Mis hermanos Ana, Laura, Carlos, Andrea, por estar siempre
pendientes de mis pasos y alegrarse por mis triunfos y sentirlos
como suyos.*

A Marcela por estar a mi lado y crecer juntos.

*A mis amigos y a todos los que me brindaron un gesto de aliento,
un llamado de atención y una ayuda desinteresada.*

DEDICATORIA

*... A Dios, por permitirme ser un destello más del brillo que
alcanza su
gloria y la vida en compañía de seres tan queridos como mi
Madre, mi
Esposa
y mi Hijo, quienes con amor y paciencia han iluminado siempre el
camino.
También a la memoria de mi abuelo Samuel Gómez Silva y el
Maestro
Leonardo
Gómez Silva, dos grandes ejemplos de rectitud y principios que
vivirán
en mí
para siempre.*

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por el soporte para el desarrollo de los trabajos de campo, así como a los estudiantes que llevaron a cabo la recolección de parte del material geológico objeto del presente estudio. Al grupo de investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica "MINPETGEO" de la Escuela de Geología por permitirnos el uso del equipo de microscopía de luz transmitida.

CONTENIDO

Pag.

INTRODUCCION.....	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. GENERAL.....	17
1.2. ESPECIFICOS.....	17
2. GENERALIDADES.....	19
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
2.2. GEOMORFOLOGIA.....	20
2.3. DRENAJE.....	20
2.4. CLIMA Y VEGETACION.....	21
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
4. JUSTIFICACIÓN.....	24
5. METODOLOGIA DE INVESTIGACION.....	26
5.1. FASE DE RECOPIACION Y REVISION BIBLIOGRAFICA.....	26
5.2. FASE DE CAMPO.....	26
5.3. FASE DE LABORATORIO.....	27
5.4. FASE DE ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS.....	29
5.5. ETAPA DE ESCRITURA DEL INFORME FINAL.....	29
6. ESTADO DEL ARTE.....	30
7. GEOLOGÍA REGIONAL.....	35

7.1.	TECTONICA.....	39
8.	GEOLOGIA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	41
8.1.	ESTRATIGRAFÍA.....	43
8.1.1.	Ortoneis.....	43
8.1.2.	Formación Silgará.....	44
8.1.3.	Formación Floresta.....	45
8.1.4.	Formación Diamante.....	46
8.1.5.	Depósitos aluviales.....	46
8.2.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	47
9.	OCURRENCIA EN CAMPO	49
9.1.	COLUMNA LITOESTRATIGRAFICA DE LA QUEBRADA VALEGRA.....	52
9.2.	RASGOS MACROSCOPICOS DE LAS ROCAS METACARBONATADAS Y ROCAS RELACIONADAS	61
10.	PETROGRAFIA	67
10.1.	ZONAS DE REACCIÓN PROPUESTAS POR RÍOS & CASTELLANOS.....	67
10.1.1.	Zona I.....	67
10.1.2.	Zona II.....	68
10.1.3.	Zona III.....	68
10.1.4.	Zona IV.....	69
10.1.5.	Zona V.....	69
10.1.6.	Zona VI.....	70
10.1.7.	Zona VII.....	70
10.2.	ZONAS DE REACCION IDENTIFICADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO.....	70
10.2.1.	Zona I.....	73
10.2.2.	Zona II.....	76
10.2.3.	Zona III.....	83
10.2.4.	Zona IV.....	92

10.2.5. Zona VII.	98
10.3. PARAGÉNESIS MINERALES IDENTIFICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO	102
11. ASPECTOS PETROGENÉTICOS DE LAS ZONAS DE REACCIÓN..	103
12. DISCUSION	106
13. CONCLUSIONES	110
14. BIBLIOGRAFIA.....	113

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Abreviaturas de los minerales (según Kretz, 1983)	22
Tabla 2. Rasgos petrográficos, minerales y zonas de reacción	66
Tabla 3. Paragénesis minerales identificadas en el estudio	96

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Ubicación del área de estudio.	13
Figura 2. Panorámica del la zona donde se observa la Formación Silgará.	16
Figura 3. Mapa de ubicación del Macizo de Santander.	29
Figura 4. Mapa geológico estructural de la zona de estudio.	36
Figura 5. Afloramientos ubicados en la cantera de Mármol de Curpagá y Quebrada Valegrá.	44
Figura 6. Afloramiento ubicado en la cantera de mármol de Curpagá.	45
Figura 7. Columna litoestratigráfica en los alrededores de la Quebrada Valegrá.	47
Figura 8. Afloramientos correspondientes a la secuencia metamórfica levantada en los alrededores de la Quebrada Valegrá.	48
Figura 9. Niveles de esquistos pelíticos.	50
Figura 10. Niveles de anfíbolita.	52
Figura 11. Niveles de mármol.	53
Figura 12. Muestras de mano en las que se exhiben los contactos entre esquistos pelíticos y anfíbolita.	55
Figura 13. Muestras de las rocas metacarbonatadas y asociadas.	57
Figura 14. Fotografías en superficie pulida de algunos ejemplos de rocas calcosilicatadas	59
Figura 15. Fotografía en superficie pulida de la muestra RCS-12 y diagrama esquemático.	61
Figura 16. Microfotografías de la muestra RCS-9 y RCS-12R . ZONA I	67
Figura 17. Microfotografías tomadas a muestra RCS-9. ZONA I	69
Figura 18. Microfotografías de la muestra RCS-19 y RCS-32. ZONA II	71
Figura 19. Microfotografías de la muestra RCS-19 y RCS-15R. ZONA II	76
Figura 20. Microfotografías de la muestra RCS-13, RCS-32. ZONA III.	78
Figura 21. Microfotografías de la muestra RCS-32, RCS-13 y RCS-16.	86

ZONA III.

Figura 22.	Microfotografías de la muestra RCS-15R.	87
Figura 23.	Microfotografías de la muestra RCS-15R y RCS-12C.	91
Figura 24.	Microfotografías de la muestra RCS-16.	92
Figura 25.	Microfotografías de la muestra RCS-16 y RCS-27	94
Figura 26.	Diagrama esquemático que ilustra el comportamiento de la fase fluida regional.	99
Figura 27.	Esquema de corte de las capas metacarbonatadas que ilustran procesos de infiltración	103

RESUMEN

TÍTULO: PETROGÉNESIS DE LAS ROCAS CALCOSILICATADAS QUE OCURREN COMO BANDAS DE REACCIÓN ENTRE MÁRMOLES Y ROCAS METAPÉLÍTICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ, REGIÓN CENTRAL DEL MACIZO DE SANTANDER.*

AUTORES: ÁVILA CALAO, Guillermo Antonio y GÓMEZ VALDERRAMA, Sergio Iván**

PALABRAS CLAVE: Rocas calcosilicatadas, Rocas metapelíticas, metasomatismo, zonas de reacción, Formación Silgará, skarns.

DESCRIPCIÓN: Las rocas metacarbonatadas (mármoles puros e impuros, rocas carbonato-silíceas, rocas calcosilicatadas y rocas silicatadas que contienen carbonatos), forman un grupo muy complejo dentro de la secuencia metamórfica de la formación silgará en la región central del macizo de Santander.

Estas rocas se derivan de una secuencia sedimentaria (que incluye dolomita, calizas, areniscas, margas, y sedimentos evaporíticos y marlstones) afectado por un metamorfismo regional isoquímico. Aparecen usualmente como intercalaciones desde un milímetro hasta un metro de escala, dentro de las rocas pelíticas de alto grado, en la parte más baja de la sección metamórfica, aunque la proporción de las rocas metacarbonatadas puede ser más alta y diferente en capas de mármoles que son explotados en esta región.

Reportamos la primera ocurrencia de la "reacción exoskarn cálcica" correspondiente a la secuencia de la formación silgará, tomando en cuenta que los skarn pueden formarse durante un metamorfismo regional o de contacto y por una variedad de procesos metasomáticos. Los skarn pueden ser encontrados adyacentes a plutones, a lo largo de fallas y zonas de cizalla, en sistemas geotermales poco profundos, entre otros. Lo que enlaza tales ambientes y que define una roca como skarn es su mineralogía, la cual incluye una amplia variedad de minerales calcosilicatados y minerales asociados, pero usualmente están dominados por granates y piroxeno.

De esta manera enfocamos atención a la presencia de zonas de reacción, las cuales muestran un contacto gradacional desde rocas pelíticas que contienen granates hasta a los mármoles o rocas silíceo-carbonatadas, colocando especial atención en las rocas calcosilicatadas, las cuales están caracterizadas por la presencia de granos alargados de hornblenda y/o diopsido, y granate sectorizado.

* Trabajo de Investigación.

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Carlos Alberto Ríos y Oscar Mauricio Castellanos.

SUMARY

TITLE: PETROGENESIS OF THE CALCOSILICATES ROCKS THAT HAPPENS AS BANDS OF REACTION BETWEEN MARBLES AND METAPELITICS ROCKS OF SILGARÁ FORMATION, CENTRAL REGION OF SANTANDER MASIF.*

AUTHORS: ÁVILA CALAO, Guillermo Antonio and GÓMEZ VALDERRAMA, Sergio Iván**

KEY WORDS: Calcosilicates rocks, metapelitics rocks, metasomatism, reaction zones, Silgará Formation, skarns.

DESCRIPTION: Metacarbonate rocks (pure and impure marbles, carbonate-silicate rocks, calc-silicate rocks and carbonate-bearing silicate rocks) form a very complex group within the metamorphic sequence of the Silgará Formation at the central Santander Massif (CSM).

These rocks are interpreted as derived from a sedimentary sequence (including limestone and dolostone, carbonate-bearing mudstones, sandstones, tuffaceous and evaporitic sediments and marlstones) overprinted by near-isochemical regional metamorphism. They usually appear as scarce intercalations from millimeter up to meter scale, within the high-grade pelitic rocks, in the lower part of the metamorphic section, although the proportion of metacarbonate rocks can be higher and different marble layers are exploited in this region.

We report for the first time the occurrence of a “reaction calcic exoskarn”, corresponding to the metacarbonate sequence of the Silgara Formation, taking into account that skarns can form during regional or contact metamorphism and from a variety of metasomatic processes, they can be found adjacent to plutons, along faults and major shear zones, in shallow geothermal systems, and another, and what links such environments and what defines a rock as skarn, is the mineralogy, which includes a wide variety of calc-silicate and associated minerals but usually is dominated by garnet and pyroxene.

Therefore, we focus attention to the presence of reactions zones, which shows a gradational contact from garnet-bearing pelitic rocks to marbles or carbonate-silicate rocks, giving particular attention to the calc-silicate rocks, which are characterized by the presence of elongated grains of diopside and/or hornblende, and scattered sector-zoning garnets.

* Investigation Work.

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Carlos Alberto Ríos y Oscar Mauricio Castellanos.

INTRODUCCION

El presente estudio corresponde al trabajo de grado desarrollado en la modalidad de investigación, como requisito para optar al título de Geólogo; este consiste en un estudio mineralógico y petrográfico de las rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción entre meta pelitas y mármoles de la Formación Silgará, región central del Macizo de Santander.

Esta unidad geológica fue afectada por un metamorfismo regional caledoniano desarrollando una zonación metamórfica desde la zona Biotita hasta las zonas Granate y Cianita-Estaurolita y un típico esquema zonal barroviense desarrollado en condiciones de presión medias.

En este estudio se detallan las principales características de las rocas calcosilicatadas a escala de afloramiento, muestra de mano y sección delgada, relacionando además sus rasgos macroscópicos, microscópicos y texturales con aspectos petrogenéticos que involucran procesos de metamorfismo isoquímico y de transferencia metasomática, que han jugado un papel muy importante en la formación de las rocas estudiadas.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

Llevar a cabo un estudio petrogenético de las rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción en las rocas metamórficas de la Formación Silgará, región central del Macizo de Santander, a partir de la identificación de evidencias que permitan dilucidar su origen, contribuyendo así al entendimiento de la geología en terrenos metamórficos con presencia de este tipo de rocas.

1.2. ESPECIFICOS

Realizar una inspección de afloramientos en el área de estudio con el fin de establecer la ocurrencia y distribución de las rocas metacarbonatadas y rocas relacionadas.

Llevar a cabo el levantamiento de una columna litoestratigráfica en la zona de mayor interés con el fin de determinar niveles guía, así como un muestreo de cada uno de los mismos.

Llevar a cabo una caracterización de los rasgos texturales y estructurales a nivel macroscópico de los afloramientos y de las muestras de interés, llevando a cabo un registro fotográfico de los mismos.

Realizar la preparación de las diferentes secciones delgadas para luego efectuarles su respectivo análisis petrográfico.

Determinar tanto la ocurrencia de las fases minerales como los rasgos microestructurales y texturales en las rocas calcosilicatadas, así como las bandas de reacción presentes y sus paragénesis minerales.

Determinar el significado petrogenético de las rocas metacarbonatadas y rocas relacionadas, así como su relación con las rocas metamórficas dentro de las cuales se encuentran.

2. GENERALIDADES

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Corresponde a un área de 32 KM² ubicada al SW del departamento de Norte de Santander específicamente hacia el Norte de la Cabecera Municipal de Mutiscua, se incluyen los sectores conocidos como La Loma, La Vega, Curpagá, Sucre, Las Tiendas, Alto el Salado, Las Peñas, y el Manzano, el cual corresponde al límite Norte del área de estudio. (Figura 1 y Figura 2).

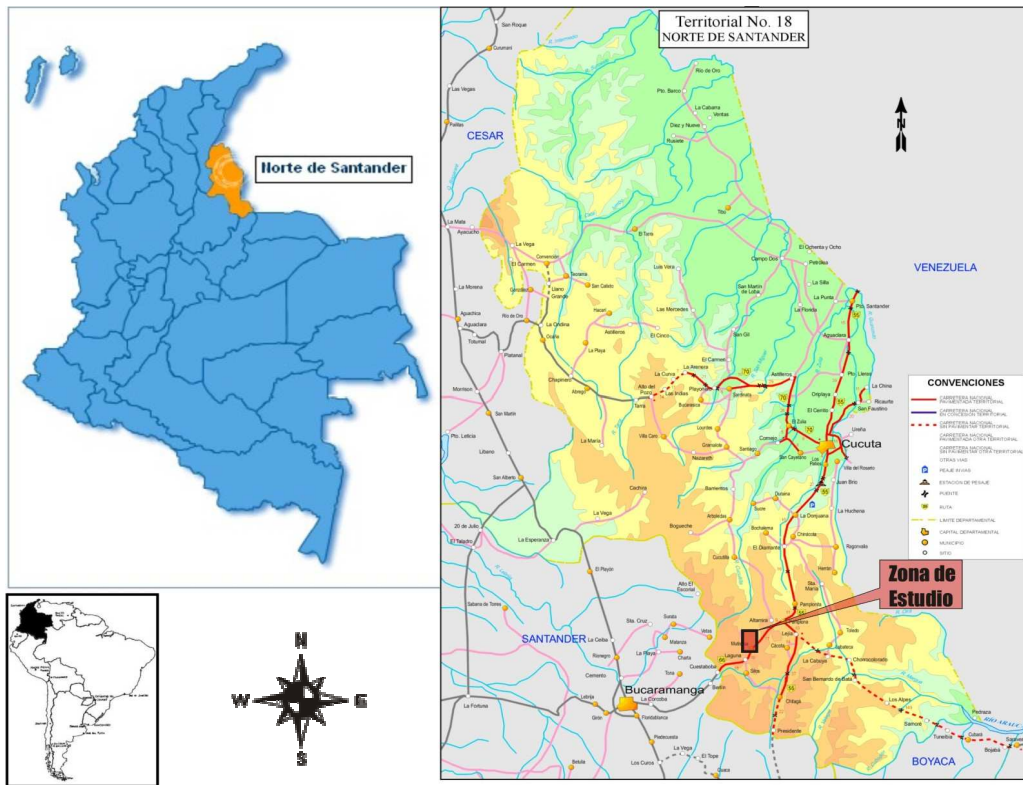


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Se observan las principales vías de acceso a la Cabecera Municipal de Mutiscua Norte de Santander, modificado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Las principales vías de acceso a la zona de estudio son: La carretera Bucaramanga-Cúcuta, de la cual parte un ramal que conduce al Municipio de Mutiscua, los carreteables que comunican a dicho Municipio con Sucre y El Manzano.

2.2. GEOMORFOLOGIA

Se caracteriza por presentar zonas de relieve moderadamente suaves a zonas de relieves abruptos con cerros escarpados. En el área se presentan elevaciones que fluctúan entre los 2400 y 3400 m.s.n.m. (Figura 2)

La meteorización es poco intensa en los cerros Relumbrante Y Ventanas pero hacia las pendientes suaves, la meteorización se hace más notoria donde los afloramientos no son muy buenos para el estudio.

Hacia el este existe una zona baja que corresponde al valle del Río La Plata, que está delimitado por dos montañas altas a lado y lado, lo que muestra el alto grado de disectación causado por el río. En la mayoría de la zona se tienen unidades geomorfológicas tipo S (de origen denudacional-estructural), ya que la topografía es ondulada, con sistemas de drenajes predominantemente relacionados a fallas, patrones de esquistosidad y contactos litológicos.

2.3. DRENAJE

Los principales ríos que recorren el área de estudio siguen una dirección general oeste –este a noreste llevando sus aguas hacia el límite oriental de la zona. De acuerdo a su importancia, se nombran a continuación:

El río la plata, el cual constituye el drenaje principal del área, tiene una dirección oeste-este hacia la parte sur y cambia su curso en cercanías de Mutiscua para seguir con dirección sur – norte.

La región norte se encuentraavenada por la quebrada Potreritos, esta inicialmente posee una dirección noreste la cual cambia a oeste – este en los alrededores del sitio Suaque, siguiendo hasta su desembocadura en el río la plata; la quebrada la Isadora es su tributario principal y corre con dirección noreste a lo largo del contacto entre la formación Silgará y el Ortoneis.

Los tributarios principales del río la plata, los cuales tienen en general una dirección oeste – este son: la quebrada Valegrá, quebrada el Chorrerón y quebrada llano de burro.

2.4. CLIMA Y VEGETACION

Las lluvias por lo general, son del orden de 2.000 mm. Se tiene un piso bioclimático frío a paramuno, que influye en el tipo de vegetación; son suelos desarrollados en laderas de relieve quebrado a escarpado, correspondiente a los bosques subandino y andino con cobertura vegetal permanente. Los suelos pobres en bases, se han desarrollado en laderas con fuerte pendiente, aptos para la conservación del bosque en las partes altas, y para cultivos permanentes y semipermanentes en las partes medias. Esta región es esencialmente agrícola, observándose principalmente cultivo de leguminosas, hortalizas y verduras. La vegetación es típica de bosque húmedo montañoso y está representada por árboles maderables y malezas, frailejones hacia las partes de mayor altitud.



Figura 2. Panorámica del la zona donde se observa la Formación Silgará. Fotografía tomada en dirección E en la que se exhibe la geomorfología para la Formación Silgará. Pendientes altas, cambios de vegetación por diferencias litológicas en algunos sectores y por efectos de parcelación para cultivos en zonas habitadas. Unidad geomorfológica de origen estructural denudacional. Topografía montañosa ondulada con sistemas de drenaje predominantemente relacionados a contactos de paquetes, fallas o patrones de esquistosidad. Grado medio de disectación en los drenajes y vertientes de tipo convexo (superficie)-rectilíneo (perfil).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La propuesta de investigación que aquí se plantea está enmarcada dentro del campo de estudio de la petrología metamórfica, específicamente enfocada al estudio de rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción entre niveles de mármol y rocas pelíticas de la Formación Silgará, siendo de gran valor como monitores del flujo de fluidos y de la interacción fluido-roca en la corteza terrestre. Numerosos estudios han demostrado que el flujo de fluidos a nivel regional que transportan volátiles que incluyen H₂O y CO₂ es una parte integral del metamorfismo regional prógrado. La movilidad y el ciclo geoquímico de otros elementos durante el metamorfismo de rocas carbonatadas, aunque ha sido difícil de determinar, ya que este tipo de rocas están comúnmente en desequilibrio químico, al menos en parte con las litologías circundantes tales como las rocas metapelíticas. Por lo tanto, el estudio de las rocas calcosilicatadas presenta un interés tanto de carácter científico como de carácter académico.

4. JUSTIFICACIÓN

Una de las principales razones por las cuales se justifica la realización del presente proyecto de investigación es que la secuencia metamórfica de la Formación Silgara, en el contexto regional de nuestro país, constituye un ejemplo excepcional para el entendimiento de los mecanismos de emplazamiento de terrenos metamórficos durante la evolución de cinturones orogénicos.

Como otra razón importante y consecutiva para la elaboración de este proyecto es la relacionada con la importancia de las rocas metacarbonatadas (cuyo término incluye a las rocas calcosilicatadas), en el ámbito económico, ya que la formación de este tipo de rocas involucran posiblemente procesos metasomáticos y de skarns, que normalmente está acompañado de una mineralización metálica de composición muy variable (Pb, Zn, Cu, Co, Au, Ag, Bi, Sn, W, Be, etc), en muchas ocasiones de interés monetario (Delgado et al, 1997).

Los skarns (que poseen una relación estrecha con este tipo de rocas) en su mayoría, se forman a partir de una serie de reacciones metasomáticas sobre un protolito carbonatado. (Enaudi et al, 1981).

Como argumento, se puede discutir las Mineralizaciones de wolastonita de la Sierra de Aroche (Huelva), ya que las rocas calcosilicatadas forman parte de una unidad cartográfica muy compleja desde el punto de vista tectono-stratigráfico, que engloba granulitas y gneises calcosilicatados, gneises cuarzo-feldespáticos, localmente biotíticos, junto con numerosos niveles de mármoles wolastoníticos, y en menor proporción olivínicos, originados por metamorfismo isoquímico de calizas impuras. La asociación mineralógica más común de las granulitas calcosilicatadas está compuesta por diopsido +

plagioclasa + titanita ± cuarzo ± feldespato potásico ± wolastonita, mientras que los gneises calcosilicatados se caracterizan por la asociación diopsido + cuarzo + feldespato potásico + titanita ± plagioclasa ± escapolita ± granate (Fernández Caliani et al., 2001).

El presente estudio es de gran importancia desde el punto de vista académico y científico, ya que contribuye, entre otros aspectos, al fortalecimiento del grupo de investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica “MINPETGEO” de la Universidad Industrial de Santander, la formación de estudiantes de pregrado en el estudio de cinturones orogénicos, quienes no solo suministrarán nuevos datos en la región sino también podrán crecer desde el punto de vista científico, al aprovechamiento del recurso humano y analítico con los cuales cuentan los grupos de investigación de la Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander, y a la generación de valiosa información acerca del origen de las rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción en las rocas metamórficas de la Formación Silgará, lo cual es de gran importancia para la formulación de nuevas investigaciones.

5. METODOLOGIA DE INVESTIGACION

El desarrollo del presente trabajo de investigación se basa en la planificación y ejecución de las fases descritas a continuación.

5.1. FASE DE RECOPIACION Y REVISION BIBLIOGRAFICA

Durante esta fase se lleva a cabo una recopilación y análisis de la bibliografía pertinente a la temática de investigación, tomando como base estudios realizados en contextos regionales similares al que contiene las rocas de interés en el presente trabajo, como quiera que existe escasa información por no decir que nula con relación al estudio de rocas calcosilicatadas. Para la recopilación de la información bibliográfica se acude a las siguientes instituciones: INGEOMINAS (Regional Bucaramanga), Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Universidad Industrial de Santander, recurriendo a publicaciones geológicas especializadas, informes internos y tesis de grado. De igual manera se realiza una búsqueda en la web.

5.2. FASE DE CAMPO

La fase de campo se inicia con el reconocimiento de afloramientos de interés en el área de estudio, con base en el material geológico recolectado por estudiantes de la Escuela de Geología, quienes desarrollaron previamente trabajos de campo. De esta manera se define como la zona de mayor interés para el levantamiento de la columna litoestratigráfica, los alrededores de la quebrada Valegrá, en el corte del carreteable que conduce de Mutiscua a Sucre. Sin embargo, se realiza un estudio de afloramientos en algunas minas de mármol, en donde es posible establecer la relación entre las rocas

calcosilicatadas y la secuencia metapelítica en las cuales se encuentran. En cada afloramiento de interés, así como en cada uno de los niveles guía de la columna levantada se toman datos estructurales, describiendo la geometría de los niveles de rocas calcosilicatadas, y se recolectan muestras de los mismos para su análisis petrográfico, tomándose fotografías de los sitios de muestreo, y documentándose detalladamente el material recolectado.

5.3. FASE DE LABORATORIO

Esta fase principia con la preparación no solo del material geológico previamente recolectado en trabajos de campo desarrollados por estudiantes de Geología, en los cuales participamos quienes realizamos el presente estudio, sino también del recolectado durante el levantamiento de la columna litoestratigráfica y dentro de los frentes de explotación en las minas de mármol, durante algunas visitas de campo realizadas bajo la orientación del Dr. O. Castellanos. El material geológico recolectado fue identificado de la siguiente manera: Para las muestras recolectadas durante los trabajos de campo realizados por la Escuela de Geología y posteriores visitas por parte de los autores del presente estudio, el código asignado a cada muestra comienza con el sufijo RCS (haciendo referencia a roca calco-silicatada) seguido por el número consecutivo de la muestra. (Figura 2)

A cada una de las muestras se les realiza un corte con el fin de llevar a cabo su fotografía como base del análisis macroscópico. Posteriormente, en el Laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander se efectúa la elaboración de secciones pulidas con el fin de escanear sus principales rasgos macroscópicos y se elaboran secciones delgadas para examinarlas bajo el microscopio petrográfico.

Un detallado estudio mineralógico y petrográfico de secciones delgadas se realiza en el laboratorio de microscopía de luz transmitida del Grupo de

Investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica “MINPETGEO” de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará, utilizando un microscopio triocular de luz transmitida LABOPHOT2-POL (marca NIKON). El estudio petrográfico consiste en la determinación de la mineralogía de las rocas metacarbonatadas y rocas relacionadas, así como sus rasgos microestructurales y texturales.

En la Tabla 1 se presentan las abreviaturas sugeridas por Kretz (1983), las cuales fueron utilizadas en el presente estudio para hacer referencia a los minerales identificados en sección delgada.

Tabla 1. Abreviaturas (según Kretz, 1983) de los minerales identificados en sección delgada.

Abreviatura	Mineral
Ab	Albita
Amp	Anfíbol
Ap	Apatito
Bt	Biotita
Cal	Calcita
Chl	Clorita
Czo	Clinozoicita
Zo	Zoicita
Di	Diopsido
Ep	Epídota
Grt	Granate
Hbl	Hornblenda
Ilm	Ilmenita
Pl	Plagioclasa
Qtz	Cuarzo
Rt	Rutilo
St	Estaurolita
Ttn	Titanita
Zrn	Circón

5.4. FASE DE ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS

Durante esta fase se llevo a cabo la interpretación de los resultados obtenidos.

5.5. ETAPA DE ESCRITURA DEL INFORME FINAL

Durante esta fase se realizará el informe final del estudio realizado, con los resultados obtenidos, así como algunas recomendaciones para el desarrollo de futuros estudios. Para una mejor organización del presente estudio se plantean a continuación las definiciones propuestas por la subcomisión para la nomenclatura de las rocas metamórficas (SCMR), (una rama de la comisión IUGS sobre la sistemática en petrología), que expone la nomenclatura sistemática para las rocas metamórficas y específicamente a las rocas metacarbonatadas y relacionadas.

MARMOL

Roca metamórfica que contiene más de 50% vol. de minerales carbonatados (calcita y/o aragonito y/o dolomita). El *mármol puro* es el que contiene más del 95% vol. de minerales carbonatados; un mármol que contiene menos del 95% vol. de minerales carbonatados es considerado como *mármol impuro*.

ROCA CARBONATO-SILICATADA

Roca metamórfica compuesta principalmente por minerales silicatados (incluyendo minerales silicatados ricos en Ca) y que contiene entre el 5% y el 50% vol. de minerales carbonatados (calcita y/o aragonito y/o dolomita).

ROCA CALCOSILICATADA

Roca metamórfica compuesta principalmente por minerales silicatados ricos en Ca y que contiene menos del 5% vol. de minerales carbonatados (calcita y/o aragonito y/o dolomita).

6. ESTADO DEL ARTE

La región central del Macizo de Santander ha sido durante los últimos diez años de gran atractivo científico para el Grupo de Investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica "MINEPETGEO" de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, como quiera que esta región es fundamental para el entendimiento de la compleja evolución de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos.

Los primeros estudios realizados acerca de la geología del Macizo de Santander fueron realizados por Julivert (1958, 1959, 1961a, 1961b, 1963), y más tarde Ward et al. (1969a, 1969b, 1970) desarrollaron un plan de cartografía que permitió la publicación de los mapas geológicos a escala 1:100.000 de varias regiones del macizo, aportando importantes bases para el conocimiento de la evolución geológica de esta parte de la Cordillera Oriental.

Un estudio detallado de cartografía, geología e investigaciones de campo fue desarrollado entre octubre de 1965 y septiembre de 1968 por el INGEOMINAS y el U.S. Geological Survey, con el apoyo del Gobierno de Colombia y la Agency for International Development, U.S. Department of State. Los resultados de dicho estudio se resumen en Ward et al. (1973).

La cartografía detallada a escalas 1:10.000 y 1:25.000 en diferentes áreas del macizo de Santander, incluyendo el área de interés para el presente estudio, ha venido realizándose desde hace una década por parte de profesores y estudiantes de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

Goldsmith et al. (1971), Ward et al. (1973), Boinet et al. (1985), Dörr et al. (1995), Restrepo-Pace (1995), Cardona (2003), y Ordóñez (2003), reportan edades isotópicas en el Macizo de Santander, las cuales han sido de gran

utilidad para delinear los principales eventos magmáticos y metamórficos y dilucidar mas cuidadosamente la historia geológica del macizo junto con evidencia consignada en el registro sedimentario y paleontológico.

Estudios de geología estructural han sido desarrollados por Julivert (1970), Forero (1990), y Kammer (1993), los cuales aunque están generalmente relacionados con trabajo estratigráfico, también abordan las relaciones entre basamento y cubierta sedimentaria, ya que éstas determinan los principales rasgos estructurales de la Cordillera Oriental. Algunos trabajos (e.g., Campbell, 1965; Irving, 1971; Boinet, 1988; González & Quintero, 1990; Pinto & Téllez, 1999; Beltrán & Rey, 2002) han estado orientados al estudio del comportamiento de la Falla Bucaramanga - Santa Marta, la cual representa uno de los rasgos tectónicos más importantes del Macizo de Santander.

Diferentes estudios petrológicos han sido desarrollados sobre la geología del basamento cristalino del Macizo de Santander que han aportado un excelente material para el entendimiento del mismo: (e.g., Restrepo-Pace, 1995; Schafer et al. 1998; García y Ríos, 1997, 1999; García y Castellanos, 1998; Castellanos, 1999; Ríos, 1999; Ríos & Takasu, 1999; Campos, 1999; Montenegro & Barragán, 1999; García & Castellanos, 1999; García y Ríos, 1999; García y Campos, 2000; Castellanos, 2001; Ríos, 2001; Ríos & García, 2001a,b; Ordóñez & Cepeda, 2001; Gelvez & Márquez, 2002; Ríos et al. 2003a,b; Cardona, 2003; Ordóñez; 2003; Castellanos et al., 2004), presentando resultados de estudios mineralógicos, petrográficos, geoquímicos, termobarométricos, y geocronológicos de las rocas del basamento en diferentes regiones del macizo, los cuales son un aporte al conocimiento del metamorfismo y magmatismo en un sector de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. Castellanos en su tesis de maestría concluye que las rocas metamórficas de la Formación Silgará en el área de Mutiscua sufrieron un metamorfismo regional prógrado, generado por el incremento en las condiciones de P-T. Este desarrollo se efectúa durante las diferentes etapas de transporte tectónico del volumen de roca (protolito) hacia la corteza, ya que fue

enterrado como consecuencia de la evolución geológica de la Cordillera Oriental de Colombia.

De acuerdo a las reacciones metamórficas y al modelo de evolución de P-T propuesto en su estudio, la primera asociación mineral observada fue la coexistencia de la biotita+moscovita, la cual probablemente toma lugar muy cerca a los 400°C y 4 kbars o menos. La coexistencia del granate en las asociación mineral con la biotita ocurre aproximadamente a los 460 °C y 4.5 kbars. Las condiciones para la primera aparición de la estauroлита, son más cercanas que las condiciones para la cianita, incrementando probablemente el pico de presión (550 °C y 5.5 kbars estauroлита) y (570 °C y 6.5 kbars cianita). La cianita se convierte en silimanita y el pico de temperatura para esta reacción fue estimado alrededor de los 600°C. En adición, el feldespato k no fue encontrado, sugiriendo que las condiciones de T no fueron suficientemente altas para su formación.

También expresa que la Formación Silgará en el área de Mutiscua exhibe un metamorfismo retrógrado con ocurrencia de andalucita, acompañados por zonación inversa hacia el borde de los granates, y procesos de cloritización y sericitización. Diversos cálculos en las muestras arrojan eventos de metamorfismo retrógrado. Pero no hay evidencia de un contacto metamórfico durante el emplazamiento de los complejos intrusivos cerca de la secuencia metamórfica.

Basado en rasgos texturales y zonación química, halla dos diferentes tipos de granates que fueron reconocidos en la muestra PCM-618; granate sector zonado y granate poiquiloblástico, estos últimos en algunos casos exhibiendo también una ligera zonación. Los procesos de crecimiento para los granates sector zonados pueden ser interpretados como una etapa de no equilibrio de metamorfismo progresivo, seguidos por el crecimiento de granate poikiloblástico en la última etapa de este evento. Otra textura observada en el granate fue la textura dendrítica la cual sugiere una rata rápida de crecimiento.

La tesis de pregrado de José Enrique Arenas Mosquera quien elabora un proyecto de investigación titulado: Litología y Petrología de las Metamorfitas Carbonatadas y Metasedimentitas Asociadas de la Formación Silgará, Faja Noreste de Mutiscua (Macizo de Santander), Norte de Santander.

Como uno de los antecedentes más relevantes para emprender esta investigación se relaciona con la experiencia del curso de campo II del primer semestre del año 2002, el cual fue dirigido por el profesor Carlos Alberto Ríos, y consistía en el levantamiento cartográfico y toma de muestras sobre un área de estudio que incluía una parte de la región Central del Macizo de Santander (desde La Laguna hasta el Manzano N.S).

Con base en lo expuesto anteriormente, todos los estudios realizados fueron concebidos con respecto al basamento cristalino del Macizo de Santander, pero ninguno de los estudios realizados ha tenido en cuenta lo que se expone en el presente estudio.

Con respecto a la ocurrencia de rocas metacarbonatadas y asociadas en otras partes del mundo se evidencian procesos muy relacionados al contexto geológico de la zona del presente proyecto y constituyen la principal referencia para el entendimiento e interpretación de los estudios realizados durante esta investigación.

Algunos de estos procesos hacen referencia a los gradientes en la composición del fluido a través de las capas metacarbonatadas del esquisto de Wepawaug, Connecticut USA, donde expone que las zonas de minerales índice metamórfico, condiciones de presión y temperatura y composiciones en el fluido $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ fueron determinados para las capas metacarbonatadas dentro del esquisto de Wepawaug. Ague J, (2001). Además la infiltración de fluido y transporte de elementos mayores, menores, traza durante el metamorfismo regional de rocas carbonatadas en el esquisto de Wepawaug, Connecticut, USA, donde se comenta sobre alteraciones geoquímicas de las rocas

metacarbonatadas debido a la infiltración de fluido durante las facies esquistos verdes y anfibolita basados en 149 análisis de Whole-rock en el esquisto de Wepawaug. Ague J, (2003)

7. GEOLOGÍA REGIONAL

El Macizo de Santander forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, y está situado en donde esta Cordillera cambia de rumbo de Noreste a Norte bifurcándose en dos ramales, uno en dirección NE-SW que corresponde a la Serranía de Perijá y otro en dirección ENE-WSW que constituye la Cordillera de Mérida en Venezuela. (Figura 3).

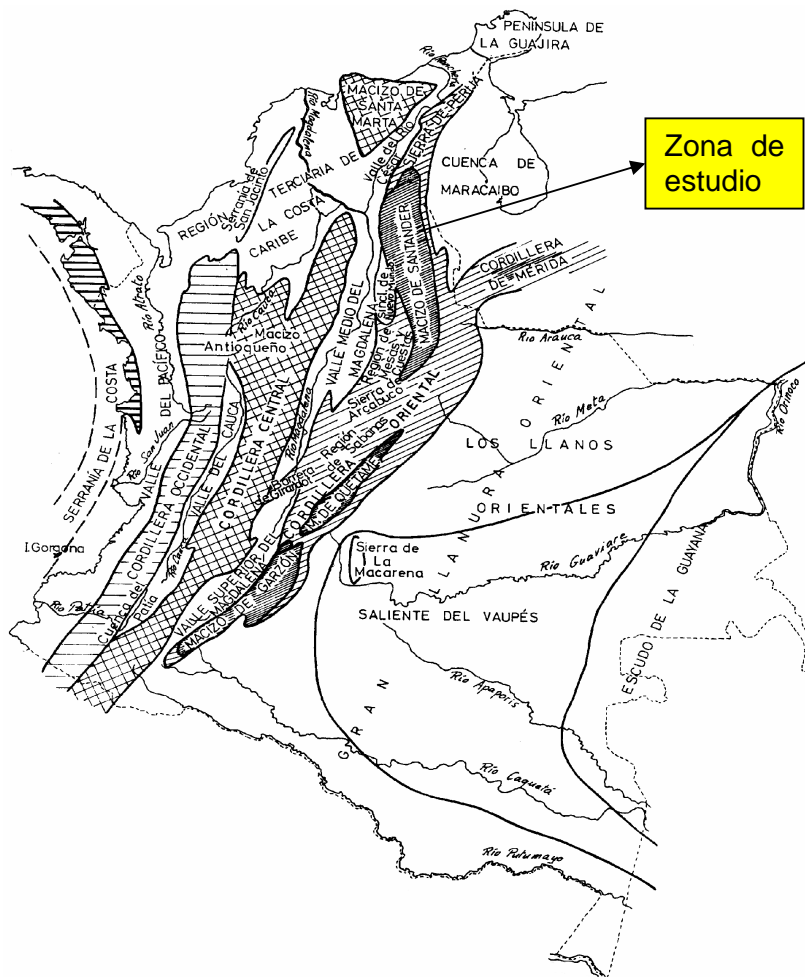


Figura 3. Mapa de ubicación del Macizo de Santander, en el contexto de los Andes Colombianos. WC, Cordillera Occidental; CC, Cordillera Central; EC, Cordillera Oriental; SNSM, Sierra Nevada de Santa Marta; SP, Serranía de Perijá. Tomado del léxico estratigráfico de Julivert 1995

El complejo metamórfico pre-Devónico del Macizo de Santander ha sido clásicamente dividido en tres unidades litoestratigráficas en orden ascendente de nivel tectono-estratigráfico: Complejo Neis de Bucaramanga (CNB), Formación Silgará (FS), y Ortoneis (O), las cuales son cortadas por cuerpos intrusivos principalmente de edad Paleozoica a Jurásica (e.g., Goldsmith et al., 1971). Sin embargo, algunos intrusivos, principalmente diques, son de edad Cretácea.

El CNB consiste principalmente de neises pelíticos, con menores cantidades de anfibolita y ortoneis. Estas rocas fueron metamorfoseadas a altas temperaturas, siendo en parte migmatíticas. Goldsmith et al. (1971) reportan varias edades para las rocas metamórficas e ígneas del Macizo de Santander. Estas edades son recalculadas por Ordóñez (2003) a las constantes de desintegración K-Ar estándar recomendadas por la subcomisión sobre geocronología de la IUGS compiladas por Steiger & Jager (1977). Las edades Rb-Sr en roca total de Goldsmith et al. (1971) no fueron tenidas en cuenta debido a que sus relaciones iniciales fueron asumidas. De esta manera, una edad K-Ar en hornblenda de 954 ± 40 Ma fue producida para el CNB. Hasta la fecha esta es la edad más antigua reportada en el Macizo de Santander. Esta edad puede registrar una edad de enfriamiento y como tal es más reciente que el metamorfismo del CNB, por lo cual es necesario conducir nuevos estudios geocronológicos para establecer la edad del evento metamórfico. Estudios geocronológicos en otros macizos de Colombia, tales como Garzón y Santa Marta, han reportado edades de 1100 Ma en rocas correlacionables con el CNB (e.g., Priem et al., 1989; Restrepo-Pace et al., 1997). Es probable que el metamorfismo del CNB haya ocurrido hace 1100 Ma y que esta unidad metamórfica sea parte de un cinturón orogénico Precámbrico que se extiende desde el Macizo de Santa Marta hasta el Sur de Colombia en el Macizo de Garzón como fue sugerido por Restrepo-Pace et al. (1997). Por otra parte, este cinturón quizás sea parte de un cinturón metamórfico Precámbrico de la misma edad expuesto discontinuamente en Perú, sur de Bolivia y norte de Argentina (Litherland et al., 1985; Restrepo-Pace et al., 1997).

La FS es una secuencia metamórfica de grado medio, la cual consiste principalmente de rocas pelíticas con intercalaciones de rocas semipelíticas, carbonatadas y máficas que sufrieron metamorfismo regional, al cual se ha sobreimpuesto un evento térmico relacionado con el emplazamiento de granitoides y gabros. Goldsmith et al. (1971) han reportado edades K-Ar en roca total de 225 ± 8 Ma y 202 ± 8 Ma de las filitas de esta unidad metamórfica. Estas edades no datan el metamorfismo pero probablemente reflejan un evento termal tardío relacionado al plutonismo Mesozoico. Masas de ortoneis generalmente muestran una foliación y lineación similar con relación a aquellas de las rocas metamórficas del Complejo Neis de Bucaramanga y la Formación Silgará. Una edad K-Ar en hornblenda de 421 ± 30 Ma (Goldsmith et al., 1971) producida por una metadiorita sugiere un evento magmático durante el Ordovícico tardío o Silúrico temprano en el Macizo de Santander.

El metamorfismo de la FS pudo ocurrir durante este tiempo (Goldsmith et al., 1971). La orogenia Caledónica en los Andes Colombianos tuvo lugar al final del Silúrico y fue caracterizada por plegamiento, metamorfismo y levantamiento. La ausencia de metamorfismo regional de las unidades sedimentarias del Devónico medio sugiere que el último evento metamórfico en los Andes Colombianos ocurrió antes del comienzo de la depositación de las capas del Emsiano Superior (Forero, 1990). Fósiles del Silúrico, representados por el braquiópodo *Aenigmastrophia* sp. (Ludlowvian), están presentes en rocas metamórficas de bajo grado del Macizo de Santander cerca a Guaca (Forero, 1990).

El basamento del Macizo de Santander está inconformemente suprayacido por rocas no metamorfoseadas de la Formación Floresta del Devónico Medio. Sedimentos clásticos a calcáreos del Carbonífero y Pérmico suprayacen inconformemente esta unidad. Debido a eventos erosivos pre-Cretáceos, estas secuencias Paleozoicas ocurren en forma restringida (Kammer, 1993).

Goldsmith et al. (1971) y Boinet et al. (1985) reportan edades K-Ar y Rb-Sr indicando un evento magmático Paleozoico (350-465 Ma) en el Macizo de Santander. Sin embargo, poco es conocido acerca de este episodio magmático debido a la falta de trabajo geocronológico y petrológico. Un extenso magmatismo calco-alcalino fue desarrollado, siguiendo el evento orogénico del Paleozoico tardío. La edad de este magmatismo fue establecida como Triásico-Jurásico por Goldsmith et al. (1971) y más tarde soportada por Dörr et al. (1995) y Ordóñez (2003). Las edades para los plutones y stocks individuales como lo reportan los autores arriba mencionados varían de 176 a 210 Ma.

Según Ordóñez & Mantilla (2004), las rocas ígneas en el Macizo de Santander registran tres importantes eventos magmáticos desarrollados durante Triásico tardío - Jurásico medio, Cretáceo temprano, y Cretáceo tardío - Terciario temprano. El evento Triásico tardío - Jurásico medio es principalmente de origen plutónico y está representado por stocks y plutones de composición diorítica y granítica (Goldsmith et al., 1971; Ward et al., 1973; Polanía, 1980). Estas rocas plutónicas fueron denominadas por Ward et al. (1973) como Grupo Plutónico de Santander (GPS). La actividad magmática del Cretáceo temprano está representada en el macizo por diques de composición riolítica y textura porfirítica (Goldsmith et al., 1971; Restrepo et al., 1984), y probablemente por diques de microgabro (diabasa).

Ordóñez & Mantilla (2004) reportan una edad Rb-Sr en roca total-mineral de 129 ± 8 Ma para el Plutón de Pescadero, interpretada por estos autores como una edad de reajuste isotópico que data un evento hidrotermal del Cretáceo temprano (Valanginiano-Barremiano) registrado en la región suroccidental del Macizo de Santander, el cual no estaría asociado con la actividad magmática del plutón sino con la paleo-elevación del macizo.

El magmatismo Cretáceo tardío - Terciario temprano ha sido reconocido en el distrito minero de California (parte central del Macizo de Santander), el cual es un evento registrado por cuerpos ígneos (pórfido dacítico y granodiorita) de textura porfirítica (Polanía, 1980; Mathur et al., 2003).

Sedimentos post-Paleozoicos, los cuales suprayacen sedimentos marinos del Paleozoico Superior, incluyen las formaciones Bocas, Jordán y Girón.

Rocas sedimentarias del Cretáceo ocurren alrededor del Macizo de Santander y son preservadas como relictos erosionales.

7.1. TECTONICA

La tectónica regional, en el Macizo de Santander, es de tipo compresional, donde se exhibe un desarrollado límite de fallamiento inverso desde sus cuencas adyacentes como la del Valle Medio y la de Maracaibo. Los límites están representados por las fallas de Labateca y Chucarima hacia el este y la Falla de Bucaramanga hacia el oeste, la cual presenta un desplazamiento horizontal sinistral de aproximadamente 110 Km. (Pindell, 1998).

La Falla de Bucaramanga es la estructura trascendental del Macizo, localizándose hacia el flanco occidental del mismo, obteniendo un rumbo noroeste. Este rumbo ejerce un control estructural sobre la orientación general del Macizo y de otras estructuras como el alto de Málaga, el domo de Vetas y los sinclinales de Matanza y Suratá. Sobre la Falla de Bucaramanga se ha suscitado gran cantidad de conjeturas, las últimas en relación al levantamiento del Macizo. Otras fallas de importancia se ubican hacia el lado oriental de la Falla de Bucaramanga, en la parte centro-oriental del Macizo y en general poseen un rumbo nor-noreste con algunas anomalías como la Falla del río Charta la cual exhibe un rumbo noroeste a este.

La falla de Mutiscua se extiende desde la parte norte del estudio cruzando cerca del municipio de Mutiscua y prolongándose hacia el sur en extensión con el río de la plata para culminar al Noroeste de Silos. En la parte sur en extensión con el río de la plata la falla de Mutiscua se encuentra seccionando la Formación Silgará.

La falla de Pamplona presenta una dirección sur-suroeste y un buzamiento hacia el este. Se encuentra localizada al oeste de Pamplona y termina intersectada por la falla de Morro Negro. Coloca en manifiesto secuencias sedimentarias del cretáceo con el ortoneis en el sector norte y atraviesa el Granito de Durania apelando como límite entre esta unidad y la Formación Silgará hacia el oeste. Hacia la parte norte de la falla esta tiene un cambio de rumbo Norte-Sur y se halla en contacto con rocas del Ortoneis.

8. GEOLOGIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La geología del área de estudio cuenta con formaciones geológicas correspondientes a rocas metamórficas de alto y bajo grado, las cuales constituyen la Formación Silgará y el Ortoneis. De igual manera ocurren rocas con bajo grado de metamorfismo, que conforman las metasedimentitas de las Formaciones Floresta y Diamante. La zona es afectada por eventos tectónicos evidenciados por patrones de diaclasamiento, sistemas de fallas, grandes deformaciones, y análogamente el metamorfismo regional de las rocas (Figura 4).

Para definir las unidades aflorantes, se cita a los autores Ward et al, (1973); Campos, (1999), entre otros.

MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

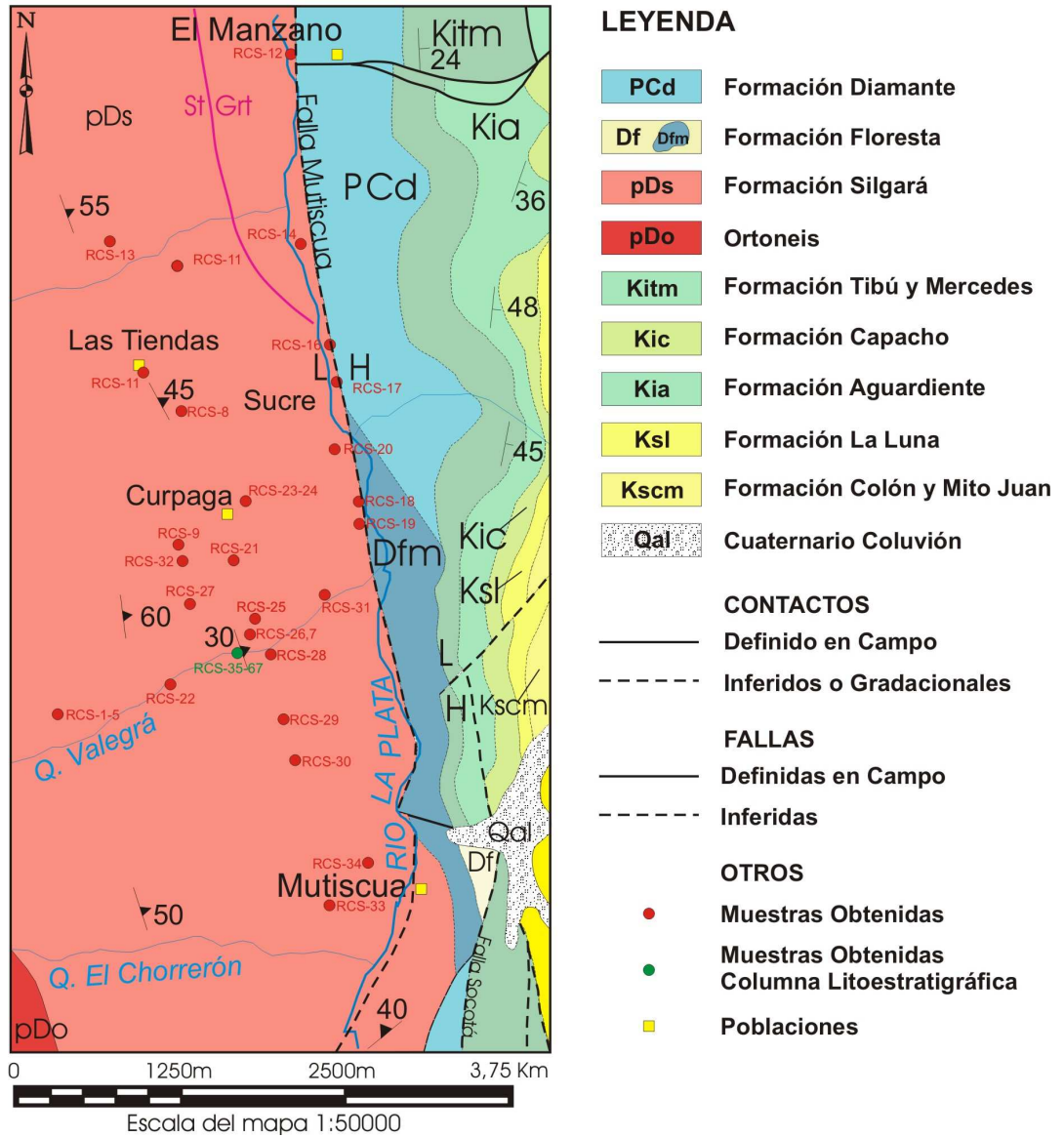


Figura 4. Mapa geológico estructural de la zona de estudio con la ubicación de las muestras recolectadas en campo

8.1. ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio afloran rocas metamórficas de la Formación Silgará y del Ortoneis, las cuales exhiben un grado de metamorfismo relativamente medio-alto; rocas de carácter pegmatítico cortando las dos primeras unidades mencionadas; además se exponen rocas de carácter principalmente sedimentario como son la Formación Floresta y la Formación Diamante. Las formaciones mencionadas se han visualizado teniendo en cuenta que a medida que se asciende estratigráficamente surge la secuencia: Ortoneis, Formación Silgará, Formación Floresta y Formación Diamante.

8.1.1. Ortoneis.

Según Ward et al, (1973), el Neis cuarzo feldespático desde granito a tonalita, está ampliamente distribuido en las rocas metamórficas de alto y medio grado de metamorfismo de edad pre-Devónico que forman el núcleo del macizo.

El aspecto masivo de estas rocas, la falta general de estratificación, excepto en escala total, la presencia de inclusiones endógenas y el hecho de que las composiciones correspondan a rocas magmáticas han conducido al uso del nombre para estas rocas, y la comparación de estas características con las rocas halladas en el campo evidencian que corresponde a esta unidad

La paragénesis mineral y el grado de recrystalización concuerdan en modo considerable con el grado de metamorfismo de las rocas adyacentes. La mayor parte del Ortoneis es bien pre- o sin- metamórfico o ambos a la vez. Algunas rocas cartografiadas como Ortoneis pueden ser en algunos sitios intrusivas, más jóvenes, cizalladas.

8.1.2. Formación Silgará.

Es una secuencia de rocas clásticas metamórficas, típicamente delgada y cíclicamente estratificadas que consta de variedades de cuarcitas y esquistos más o menos intercalados aumentando, transicionalmente, el contenido de esquistos de base a techo; siendo los esquistos litológicamente dominantes hacia el tope, conteniendo además intercalaciones de mármol; que en algunas ocasiones tienen delgadísimas capas de cuarcita. En ocasiones, se observan cuerpos pegmatíticos de afinidad granítica, emplazados de manera concordante o discordante con la dirección de foliación; al igual que venas de cuarzo generalmente concordantes con la foliación y que, en algunos casos, en contacto con esquistos micáceos, tienen mineralizaciones de cianita.

El contacto con la unidad de Ortoneis se encuentra bien expuesto paralelamente a la margen occidental de la quebrada la Isadora, en los alrededores de la Reforma, al occidente del morro Ventanas, sobre el camino que conduce de Sucre a los Salados en cercanías de las Lajas y en cercanías de la Laguna Colorada en el Pico de Relumbrante.

Litológicamente, hacia la base de la unidad se encuentra una secuencia de cuarcitas de aproximadamente unos 300 metros de potencia, con menores intercalaciones de esquistos, la cual forma un escarpe pronunciado y característico. De base a techo esta secuencia consta de cuarcitas de color blanco a crema claro, de estructura masiva a esquistosidad grosera, compuesta principalmente de cuarzo, moscovita y granate. Ascendiendo estratigráficamente, los niveles de cuarcita se encuentran intercalados con niveles delgados de esquisto con grafito y esquisto con moscovita, biotita, granate y estaurolita en porfidoblastos que alcanzan hasta 3 cm de largo.

Los esquistos son rocas de color gris a gris verdoso, con tonalidades pardo rojizas a pardo amarillentas por la meteorización, presentan una estructura esquistosa bien desarrollada o slaty cleavage, están compuestos

principalmente por cuarzo, plagioclasa, muscovita, biotita y estaurolita y granate en cantidades variables así como sillimanita en algunas ocasiones. Las intercalaciones de cuarcitas se presentan como bandas de poco espesor, de color gris verdoso, con estructura bandeada o slaty cleavage grosero, compuestas principalmente de cuarzo de cuarzo, biotita, muscovita, plagioclasa y granate. (Campos, 1998)

El mármol se encuentra intercalado, con esquistos de color gris verdoso y ocasionalmente con niveles de cuarcita; son de color gris, rosado o blanco, compuestos principalmente de calcita, Los afloramientos de mármol más representativos se localizan en la mina de la vereda Sucre, en la mina cerca de Curpagá y en la intersección de la quebrada Valegrá con la carretera que conduce de Mutiscua a las Tiendas. Este mármol presenta tonalidades rosadas, grises, naranjas y violetas.

Estudios realizados en la Formación Silgará en el año 1997 y tomando como base estudios geoquímicos y geotermobarométricos en las anfibolitas en el área de Pescadero-Aratoca, se obtiene datos geocronológicos, llegando a la conclusión que para esta Formación se asumen edades precámbricas, afectada por sobreimposición de eventos metamórficos y procesos de exhumación durante el silúrico. (Schäfer; Gröser; y Rodríguez, 1998)

8.1.3. Formación Floresta.

Se localiza en el costado oriental de la zona de estudio. Se encuentra en contacto fallado con la Formación Silgará a lo largo de la Falla de Mutiscua. Esta unidad esta conformada por una secuencia de calizas fosilíferas micríticas con menores intercalaciones de areniscas cuarzosas blancas de grano fino y niveles de shales; donde las calizas y las areniscas están algo recristalizadas. (Campos, 1999)

8.1.4. Formación Diamante.

Según Ward et al (1973), la Formación Diamante tiene un espesor de aproximadamente 440 mts en la localidad tipo. Los 139 mts. Inferiores son areniscas de grano fino a medio, color púrpura, dureza variable y con intercalaciones de arcillolitas de color semejante. Una sección media de 9 mts de shale gris oscuro con intercalaciones de caliza del mismo color en la mitad inferior, y arcillolita gris verdosa en la superior. La sección superior es de 204 mts. de caliza cristalina de grano fino a medio, ligeramente arcillosa, color gris oscuro con pequeñas cantidades de arcillolita limosa o arenisca arcillosa intercaladas en algunos niveles. Las calizas muestran evidencias de recristalización a calcita más gruesa que tiende a ocultar los rasgos más finos de los fósiles.

Cerca de Mutiscua, la recristalización a calcita es más fuerte y la roca muestra texturas parecidas a las del mármol en algunos shales filíticos en el tope de Diamante que infrayacen las rocas del Cretáceo. La Formación Diamante está aparentemente inconforme con la Formación Floresta, pero el límite no está definido con claridad.

8.1.5. Depósitos aluviales.

Los depósitos aluviales son escasos y están limitados a las márgenes de los drenajes principales. El principal es el encontrado en las bordes del río la plata al norte de Mutiscua y está compuesto por bloques y cantos de rocas metamórficas sedimentarias y pegmatíticas, de forma subdredondeada y dispuestos en una matriz arenolodosa.

8.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las diferentes unidades litológicas que afloran en la región central del Macizo de Santander sugieren que este se ha estructurado a partir de múltiples procesos geotectónicos como la colisión de masas continentales que ha dado como consecuencia el metamorfismo Barrowiense característico de la región, el establecimiento de una zona de subducción que originó el magmatismo Triásico-Jurásico de la Cordillera Oriental, el desarrollo de un rift continental que permitió la depositación de sedimentos Cretáceos.

Las características estructurales del área de estudio se definen básicamente por la foliación de las unidades metamórficas y las fallas presentes como resultado de los eventos tectónicos que han afectado a las unidades relacionadas con anterioridad. Las estructuras de deformación se enmarcan dentro de contextos dúctiles y frágiles claramente diferenciables a escala de afloramiento. Estructuras en contextos dúctiles corresponden principalmente a la esquistosidad de la roca, lineaciones minerales, venas de cuarzo concordantes con la esquistosidad, pliegues, boudines y ojos de cuarzo.

Estructuras en contextos frágiles corresponden a diaclasas, fallas menores y mayores, así como venas de cuarzo que cortan la esquistosidad. Otros procesos de menor escala pero no menos importantes, están representados por venas y filones hidrotermales que cortan las unidades aflorantes en esta región. Estas estructuras han llamado últimamente la atención debido a su potencial económico.

El principal accidente tectónico en la zona de estudio corresponde a la falla de Mutiscua, la cual posee en general un rumbo Nor-noroeste y se extiende desde el sector norte de Mutiscua hacia el sur hasta el Municipio de la Laguna, colocando en contacto las rocas del Cretáceo hacia el lado oriental con rocas del precretáceo hacia el occidente (Figura 4). El trazo de la falla se evidencia por cambios bruscos en la dirección de foliación, el lineamiento del río La Plata,

el intenso fracturamiento, el enfrentamiento de las litologías de la Formación Silgará hacia el oeste y de la Formación Floresta hacia el este y la presencia de brechas de falla a ambos lados de la misma las cuales presentan bloques correspondientes tanto a la unidad más antigua (esquistos y cuarcitas), como a la más reciente (metacalizas, calizas y lodolitas); con base en estos criterios se puede definir que el movimiento de esta falla es inverso ya que hacia el bloque occidental levanta una litología de edad más antigua que el bloque oriental.

En la zona centro del área se encuentra una pequeña falla anastomosada a la falla de Mutiscua denominada falla de la Quebrada Valegrá y se evidencia por el lineamiento de la quebrada del mismo nombre y por el fuerte escarpe de falla que se presenta hacia el bloque norte. De manera similar se presenta hacia la zona sur del área de estudio, como una pequeña falla anastomosada a la falla de Mutiscua la falla del Chorrerón, evidenciada por el control estructural, el fracturamiento y el lineamiento de la Quebrada El Chorrerón.

9. OCURRENCIA EN CAMPO

Las rocas metacarbonatadas y rocas relacionadas aflorantes en el área de estudio ocurren como intercalaciones de variable morfología y espesores, desarrollando bandas discontinuas y cuerpos de geometría lenticular, dentro de la secuencia metamórfica de la Formación Silgará (Figura 5).



a



b.

Figura 5. (a) Afloramiento ubicado en la cantera de mármol de Curpagá a 200 m de la vía Mutiscua-Sucre. Nótese la geometría, disposición y espesores de los niveles pelíticos, anfibolíticos y de mármol dentro de los cuales ocurren las rocas calcosilicatadas. (b) Afloramiento ubicado en los alrededores de la Quebrada Valegrá, donde se observan alternancia de niveles anfibolíticos de color verde oscuro y niveles de mármol de aspecto lenticular de color claro y espesores promedio de 1 m.

Los mármoles muestran una transición a rocas carbonatosilicatadas, y estas a su vez pasan a rocas calcosilicatadas y rocas silicatadas con presencia de carbonatos. Finalmente, cuando los carbonatos tienden a desaparecer en estos dos últimos tipos de rocas, estas pasan a esquistos pelíticos y anfibolitas. Las rocas calcosilicatadas, de interés en el presente estudio, muestran una mineralogía muy compleja y ocurren más comúnmente como zonas de reacción de color verde de escala milimétrica a centimétrica a lo largo del contacto entre niveles de mármol o de rocas Carbonatosilicatadas y niveles

pelíticos, y su distribución regional es difícil de evaluar debido a los pocos afloramientos que existen. Los mármoles ocurren como capas de color blanco, gris, rosado, anaranjado o verde pálido que alternan con esquistos pelíticos, anfibolitas y rocas calcosilicatadas, y son de escala centimétrica a métrica (Figura 6).



Figura 6. Afloramiento ubicado en la cantera de mármol de Curpagá a 200 m de la vía Mutiscua-Sucre, en el cual se observan niveles de mármol de hasta 1 m de espesor alternando con niveles de esquistos pelíticos y anfibolitas. Nótese las diversas tonalidades de color (gris, blanco, rosado o anaranjado) que exhibe el mármol.

La fabrica de estas rocas esta caracterizada por un bandeado débil a fuerte que define su foliación, y es comúnmente afectada por pliegues isoclinales. El bandeado composicional esta caracterizado por la alternancia de bandas ricas en carbonatos con bandas pelíticas y/o calcosilicatadas.

9.1. COLUMNA LITOESTRATIGRAFICA DE LA QUEBRADA VALEGRA

En el presente apartado se presenta la información correspondiente a la columna litoestratigráfica levantada en el presente estudio, la cual forma parte de la secuencia metamórfica aflorante en los alrededores de la Quebrada Valegrá (Figura 7)



COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA EN AFLORAMIENTO SOBRE LA QUEBRADA VALEGRÁ

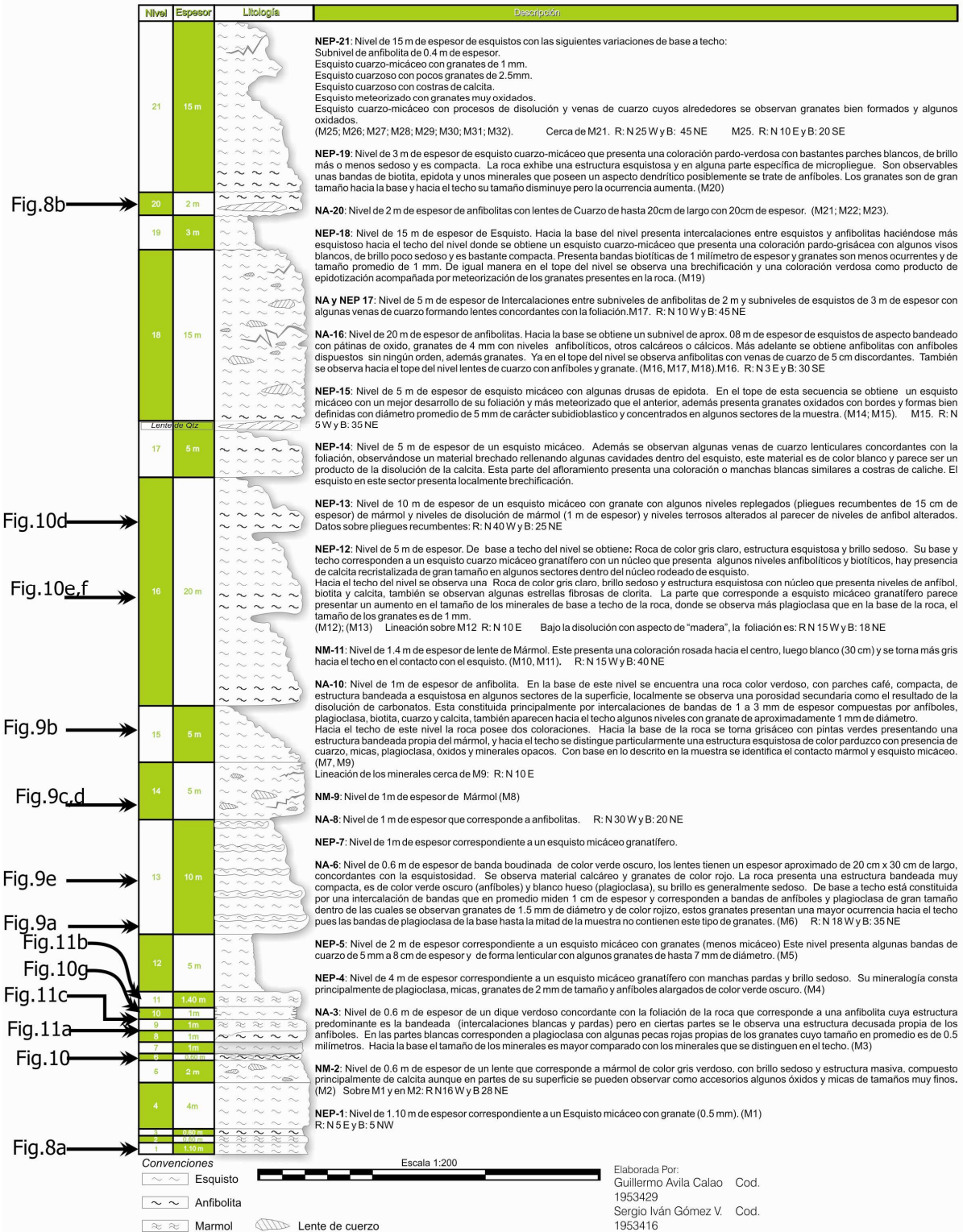


Figura 7. Columna litoestratigráfica en los alrededores de la Quebrada Valegrá.

El levantamiento realizado fue la base para el estudio sistemático de las rocas calcosilicatadas, reconociéndose en el segmento estratigráfico levantado niveles pelíticos (NP), de anfibolitas (NA) y de mármol (NM), dentro de los cuales ocurren las rocas calcosilicatadas. Estos niveles presentan espesores que varían desde 60cm hasta 20m, sus contactos son irregulares y discontinuos, caracterizándose por presentar geometrías lenticulares, acuñadas, boudinajes, replegamientos y otros exhibiendo meteorización a causa del intemperismo.

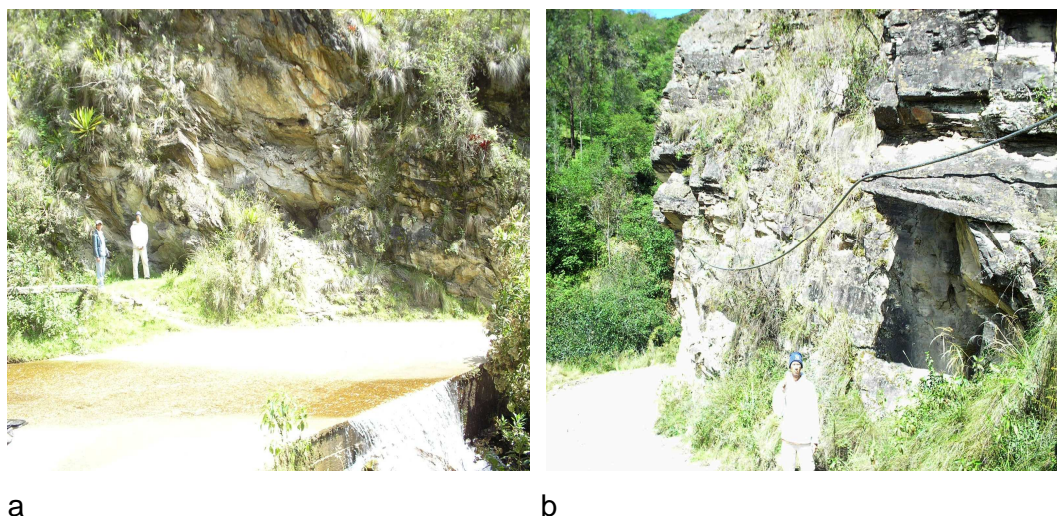


Figura 8. Afloramientos correspondientes a la secuencia metamórfica levantada en los alrededores de la Quebrada Valegrá sobre la vía de Mutiscua-Sucre.

(a). Afloramiento ubicado hacia la base de la secuencia litoestratigráfica, en donde es observable los niveles NEP-1, NM-2 y NA-3 junto al corte de la Quebrada Valegrá con el carretable que conduce de Mutiscua a Sucre.

(b). Afloramiento ubicado hacia el tope de la secuencia litoestratigráfica, en el cual se pueden observar los niveles potentes de anfibolitas y esquistos.

Los niveles pelíticos constan principalmente de esquistos micáceos, cuarzomicáceos y cuarzosos (Figura 9a) con espesores que varían desde 1 m hasta 15 m con presencia de porfidoblastos de granates reconocibles a simple

vista con un tamaño entre 0.5 mm y 7.0 mm. Algunos de estos niveles presentan venas de cuarzo de forma lenticular concordantes con la foliación (Figura 9b). Generalmente el granate se concentra adyacente a estas venas, en algunos casos exhibiendo contornos euhedrales (hexagonal o pentagonal), aunque se encuentran totalmente oxidados.

Los niveles más potentes se encuentran hacia el tope de la secuencia, en donde se presentan esquistos micáceos, esquistos cuarzo-micáceos, y esquistos cuarzosos. Es común observar dentro de estos niveles pelíticos algunos procesos de brechificación (Figura 9c) probablemente asociados al evento estructural de la Falla de la Quebrada Valegrá, así como procesos de disolución evidenciados por la presencia de costras de calcita recristalizada procedente de los niveles carbonatados (Figura 9d). En algunos niveles se aprecian pliegues recumbentes (Figura 9e) cuyos datos estructurales son R: N40°W y B: 25°NE.

También se observan procesos de meteorización e intemperismo con mayor intensidad en los niveles ricos en filosilicatos. El patrón estructural predominante en estos niveles es R: 5°-15°NW y B: 30°-45°NE.



a



b



c



d



e

Figura 9. (a) Afloramiento correspondiente a un nivel de esquisto pelítico. (b) Venas de cuarzo lenticulares concordantes con la esquistocidad. (c) Procesos de brechificación en nivel de esquisto pelítico. (d) Costras de caliche en nivel de esquisto pelítico. (e) Pliegues recumbentes de 15 cm de espesor en esquisto pelítico.

Los niveles de anfibolita poseen espesores que varían desde 0.6 m hasta 20 m (Figura 10a). Dentro de estos niveles ocurren bandas de color verdoso, las cuales se disponen concordantes con la foliación, y presentan una estructura bandeada compuesta por una alternancia de bandas blancas ricas en plagioclasa con bandas ricas en granate de 0.5 mm de diámetro promedio. También pueden ocurrir como bandas boudinadas, concordantes con la

esquistocidad, de color verde oscuro y cuyo espesor es de aproximadamente 15 cm, con una longitud de 30 cm (Figura 10b).

La mayoría de estos niveles presentan intercalaciones de bandas de 1.0 a 3.0 mm de espesor compuestas por anfíbol, plagioclasa, biotita, cuarzo y calcita. Por otra parte, es común la presencia de venas de cuarzo, las cuales pueden ser concordantes (Figura 10c) o discordantes (Figura 10d) con la foliación metamórfica. Estas venas son generalmente de geometría lenticular, y en algunos casos es posible observar nematoblastos de anfíbol con orientación al azar (Figura 10e y 10f).

En algunas partes donde la meteorización ha sido intensa las anfibolitas exhiben un aspecto astilloso (Figura 10g).

El patrón estructural en estos niveles es R: 20°-30°NW y B: 20°-35°NE.



a



b



c



d



e



f



g

Figura 10. (a) Afloramiento correspondiente a un nivel de anfibolita. (b) Banda boudinada de anfibolita. (c) Vena de cuarzo concordante. (d) Venas de cuarzo discordantes. (e) y (f) Nematoblastos de anfíbol con orientación al azar. (g) Anfíbol exhibiendo aspecto astilloso producto de intensa meteorización de la roca.

Los niveles de mármol poseen un espesor promedio de 1 m, y se caracterizan por presentar un color blanco, gris, rosado o anaranjado (Figura 11). Se encuentran en contacto directo con los niveles pelíticos y de anfibolita, exhiben estructura masiva y geometría lenticular, disponiéndose concordante con la foliación metamórfica de las rocas adyacentes. Estos niveles están compuestos en su mayoría por calcita y menos común dolomita, aunque se pueden identificar algunos óxidos y micas como minerales accesorios.



a



b



c

Figura 11. (a) Afloramiento en el cual se observa un contacto entre anfibolita de color verde oscuro (abajo) y mármol (arriba). Nótese la coloración rosada en el centro del nivel de mármol y en los alrededores blanco. (b) Nivel de mármol, en el cual se observa la variedad en su coloración. (c) Contacto entre anfibolita verde oscura (arriba) y mármol anaranjado (abajo).

9.2. RASGOS MACROSCÓPICOS DE LAS ROCAS METACARBONATADAS Y ROCAS RELACIONADAS

Para definir los rasgos macroscópicos de las rocas estudiadas se dio especial atención a las zonas de reacción, las cuales exhiben un contacto gradacional generalmente desde niveles de esquistos pelíticos hasta niveles de mármol o rocas carbonato-silicatadas. Por lo tanto, el presente apartado hace referencia a las rocas calcosilicatadas.

Las rocas calcosilicatadas, las cuales ocurren como zonas de reacción, son paralelas a la foliación metamórfica y en muchos casos se deforman con esta. Los contactos gradacionales entre las rocas calcosilicatadas con las rocas adyacentes son observados y son abundantes especialmente en rocas fuertemente deformadas, donde las zonas de reacción pueden tener una forma muy irregular y espesor variable (hasta varios centímetros).

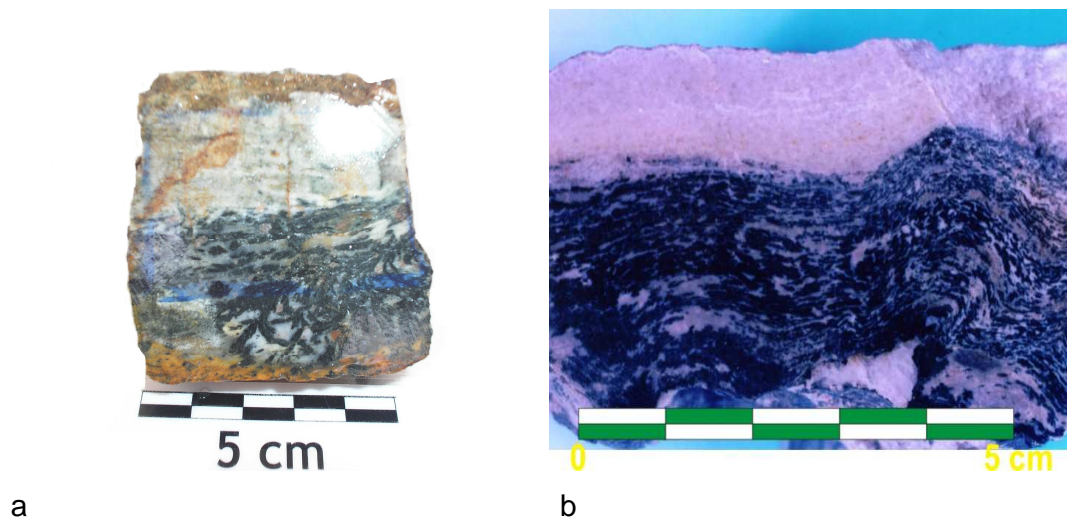


Figura 12. (a) Muestra de mano RCS-37 en la que se exhibe el contacto entre el esquivo pelítico de color claro y la anfibolita, esta última presentando una coloración verde oscura debido a la presencia de anfíboles algunos dispuestos al azar conformando localmente una textura decusada y otros orientados con la foliación de la roca. Estos anfíboles se encuentran acompañados principalmente por plagioclasa. Nótese la ocurrencia de los granates de 0.5 mm

en el contacto de la parte pelítica y anfibolítica. La coloración pardo amarillenta hacia el borde corresponde a pátinas de óxido a causa del intemperismo. La estructura que se exhibe en toda la muestra es la bandeada. (b) Muestra de mano RCS-27 en la que se exhibe el contacto entre la anfibolita (abajo) y el mármol (arriba). Nótese la estructura de micropliegue en la parte de la anfibolita y masiva en la parte del Mármol.

Dentro de los principales rasgos macroscópicos de las rocas calcosilicatadas se pueden destacar las intercalaciones entre bandas de variada coloración y composición, constituidas por minerales anfibolíticos, pelíticos y carbonatados. La ocurrencia minera a nivel macroscópico consta de Amp, Pl, Ep, Qtz, Grt, St, Bt, Ms, Cal respectivamente (Figura 12, 13, 14, 15).

La estructura predominante en algunos sectores de las rocas calcosilicatadas es la bandeada con contactos plano-paralelos (Figura 12), aunque en una misma muestra se puede observar estructuras de micropliegue, esquistosa y masiva con contactos discontinuos e irregulares (Figura 12, 13).

Es común localizar hacia los contactos entre las bandas y en los alrededores de las venas de Qtz, un aumento en la ocurrencia y tamaño de algunos minerales, particularmente el Grt (Figura 12, 13, 15).

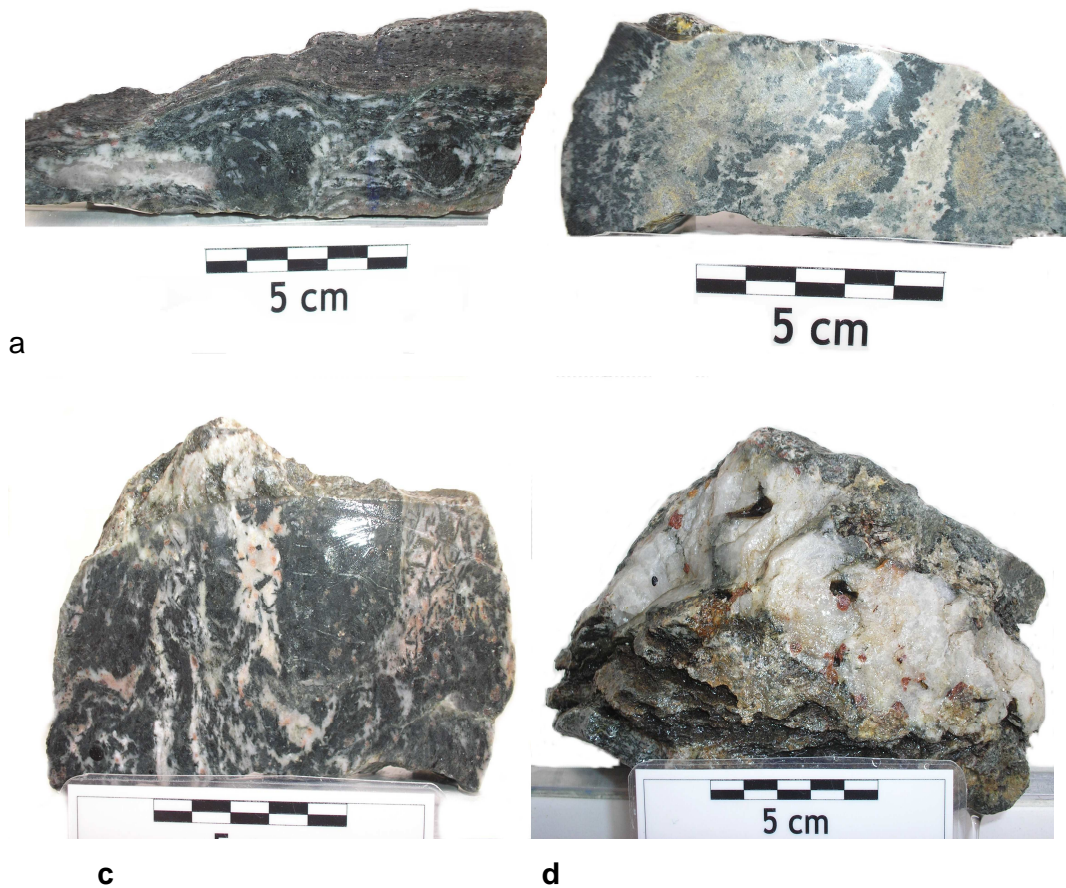


Figura 13. (a) Muestra de mano RCS-46 en la que se exhibe el contacto entre el esquistos pelítico de color claro y la anfibolita, esta última presentando una coloración verde oscura (presencia de anfíboles) con intercalaciones blancas (presencia de plagioclasa). Nótese la estructura de pliegue en la parte anfibolítica y presencia de unos granates dispuestos hacia el contacto con el esquistos pelítico, cuyo tamaño promedio es de 0.5mm. En la parte superior de la muestra se observa el esquistos pelítico conformado principalmente biotitas que se alinean siguiendo una dirección preferente. La ocurrencia del granate es mucho mayor en esta parte de la muestra.

(b) Muestra de mano RCS-40 en la que se exhibe perfectamente la estructura bandeada las cuales se componen principalmente de anfíboles, plagioclasa, y en menor proporción calcita. Nótese la ocurrencia de los granates en los contactos entre bandas cuyo tamaño promedio es de 0.2 mm.

(c) Muestra de mano RCS-55 que corresponde a una anfibolita la cual exhibe una textura decusada hacia la parte derecha de la misma. Nótese la disposición de los granates asociados siempre a plagioclasa y cuarzo.

(d) Muestra de mano RCS-52 en la cual se observa una vena de cuarzo de 5 cms de grosor concordante con la foliación de la roca. Nótese la ocurrencia de los granates sectorizándose en los alrededores de la vena y el aumento de tamaño que alcanzan hasta los 0.8 mm

La coloración de estas rocas es muy variada, presentándose respectivamente los colores pardos, claros y verdes principalmente.

En algunas rocas se observan patrones de disolución y meteorización producto del intemperismo. Ríos & Castellanos (comunicación personal) sugieren denominar "zonas de reacción" a las bandas de rocas calcosilicatadas que ocurren dentro de la secuencia metamórfica de la Formación Silgara. Dentro de estas zonas de reacción, estos autores reportan por primera vez la presencia de diopsido y escapolita, los cuales pueden estar asociados a hornblenda y granate sector zonado.

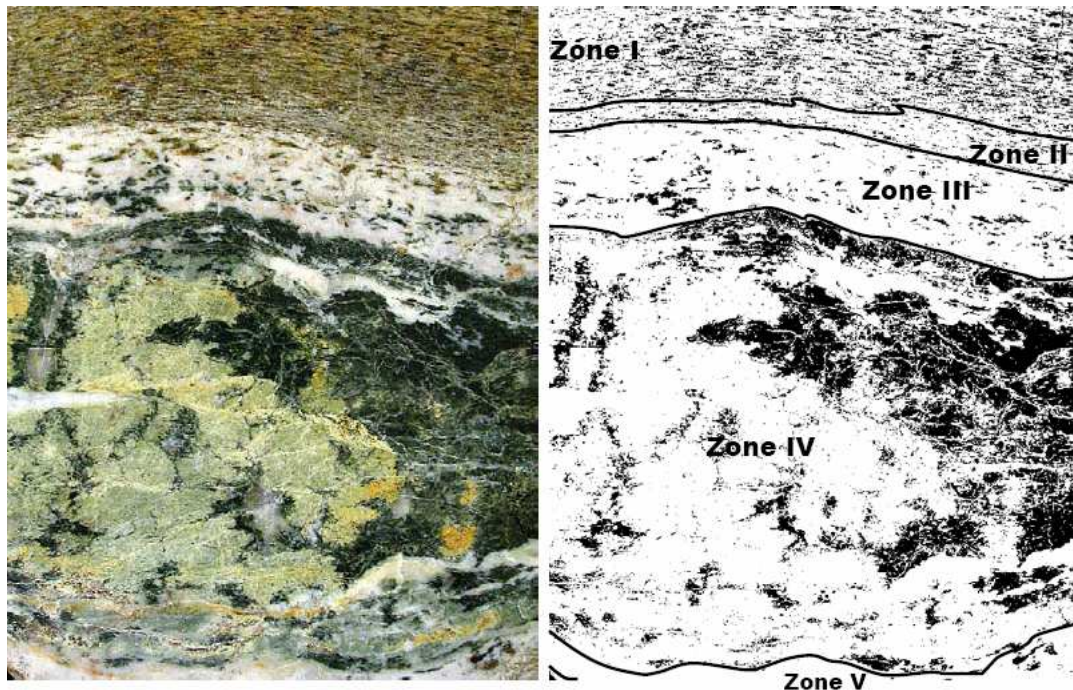
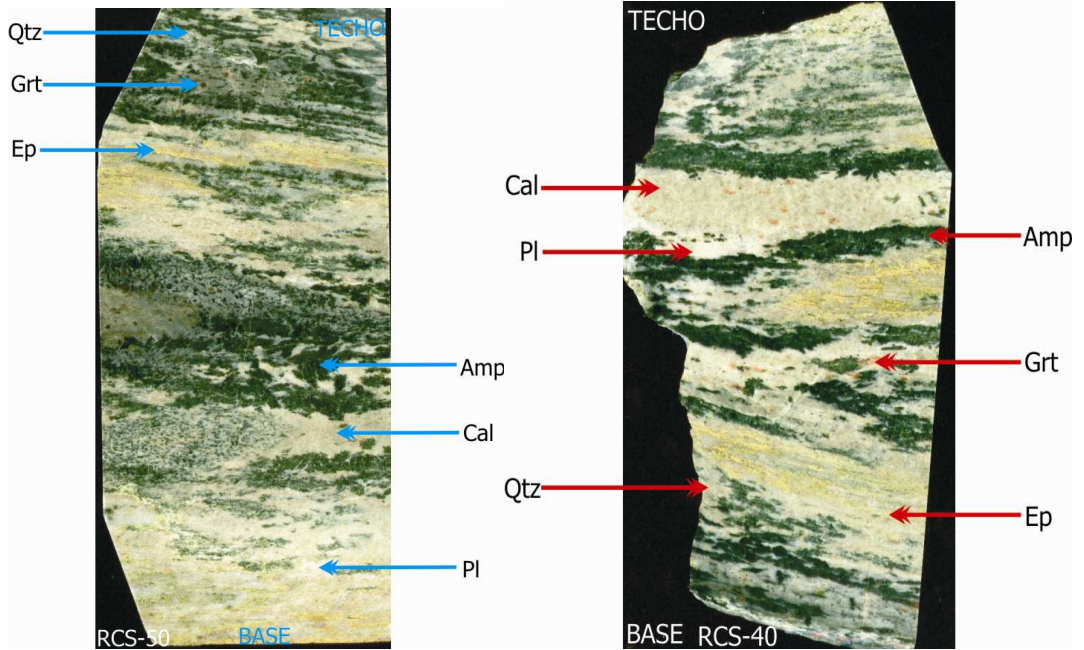


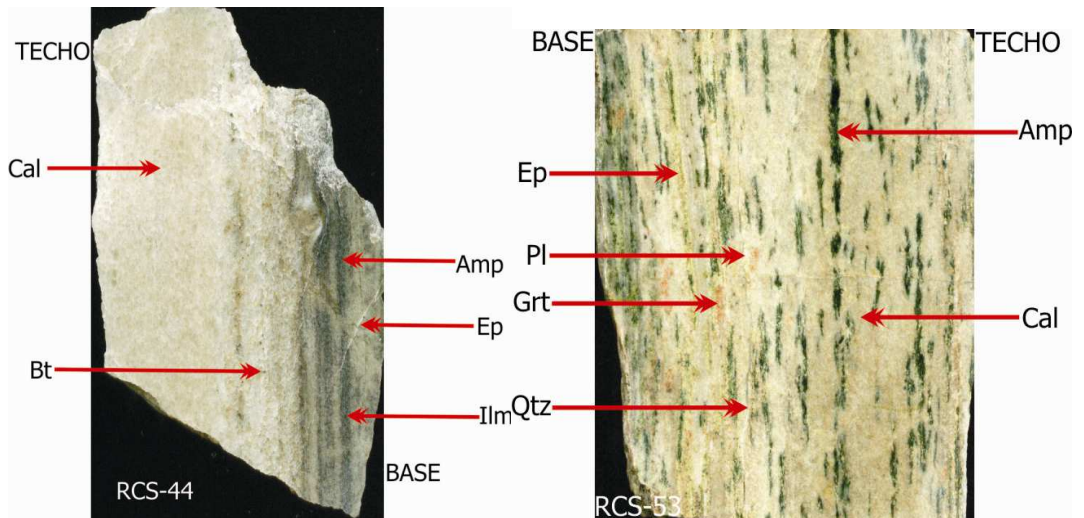
Figura 14. Fotografía en superficie pulida de la muestra RCS-12 (izquierda) y diagrama esquemático (derecha), indicando las zonas de reacción de acuerdo con las asociaciones

minerales en contactos gradacionales. Ríos & Castellanos (comunicación personal) han identificado las siguientes zonas de reacción: Zona I. Esquisto pelítico. Zona II. Esquisto con contenido de biotita y anfíbol. Zona III. Roca calcosilicatada con contenido de biotita y anfíbol. Zona IV. Roca calcosilicatada con contenido de anfíbol, diopsido y escapolita. Zona V. Zona rica en calcita.



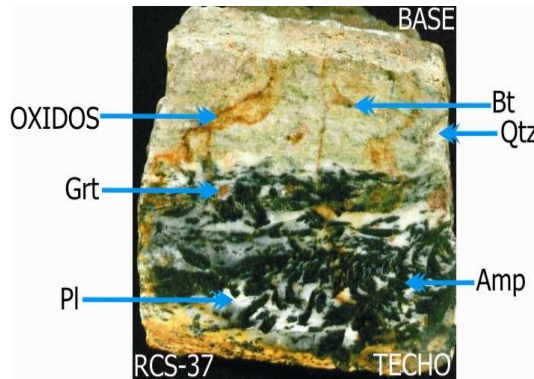
a

b

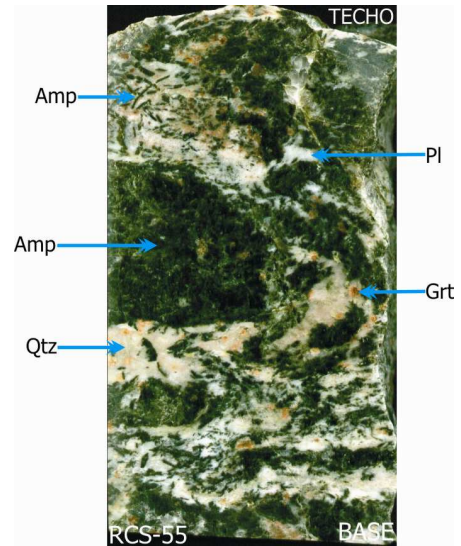


c

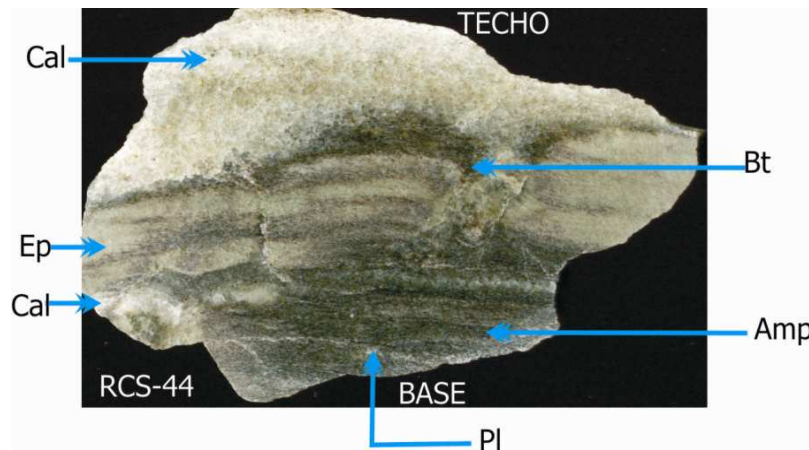
d



e



f



g

Figura 15. Fotografías en superficie pulida de algunos ejemplos de rocas calcosilicatadas y rocas asociadas que ocurren dentro de la secuencia metamórfica de la Formación Silgará. Nótese el cambio en la forma de los minerales en el límite de las zonas. (a) RCS-50 (b) RCS-40 (c) RCS-44 (d) RCS-53 (e) RCS-37 (f) RCS-55 (g) RCS-44

10. PETROGRAFIA

El análisis petrográfico se realiza en 19 secciones delgadas, algunas de las cuales se subdividieron con el fin de observar en detalle el contacto entre las diferentes bandas de reacción, así como aquel con los niveles adyacentes. Durante el análisis petrográfico se identificaron diferentes bandas de reacción, con base en su compleja mineralogía. En el Anexo 1 se presenta el formato de captura de datos para la descripción petrográfica de las bandas de reacción observadas en las secciones delgadas analizadas.

10.1. Zonas de reacción propuestas por Ríos & Castellanos (comunicación personal)

En el presente apartado se describen las zonas de reacción propuestas por Ríos & Castellanos (comunicación personal) y que han sido observadas en las rocas metacarbonatadas y rocas relacionadas que afloran en el área de estudio.

10.1.1. Zona I.

Esquisto pelítico con granate. En esta zona se observa un buen desarrollo de la esquistocidad y está caracterizada por la presencia de granate en algunos casos sector-zonado asociado a cuarzo, plagioclasa y biotita, con circón, apatito, turmalina, ilmenita, calcita y moscovita como minerales accesorios. El granate puede ser poiquiloblástico (con un patrón de inclusiones de cuarzo, plagioclasa e ilmenita paralela a la foliación principal de la roca) y esqueletal.

10.1.2. Zona II.

Roca calco-silicatada con Bt-Amp. Esta zona corresponde a la interface entre las zonas I y III marca la aparición abrupta de anfíbol con biotita relíctica, la cual muestra la misma orientación que el anfíbol y en algunos casos estos dos minerales se encuentran desarrollando intercrecimientos asociados a granate. Esta zona muestra una disminución en biotita, aunque es más drástica en cuarzo y plagioclasa. Los minerales accesorios son ilmenita y titanita. Los minerales del grupo epidota también ocurren en esta zona. Hay una paragénesis mineral inusual caracterizada por Qtz+Pl+Bt+Hbl+St, con ilmenita y turmalina como accesorios.

Esta zona está definida igualmente por la desaparición de biotita pardo-amarillenta y la ocurrencia de hornblenda verde pálida junto con granate en bandas con textura nematoblástica. La paragénesis mineral en esta zona de reacción es Qtz + Pl + Hbl +Grt + Ttn + Zrc + Ap + Ilm (roca calco-silicatada).

9.1.3. Zona III. Roca calco-silicatada rica en anfíbol. Esta zona exhibe una textura granonematoblástica, y está definida por la desaparición de biotita pardo-amarillenta y la ocurrencia de hornblenda junto con granate. El granate es poiquiloblástico (con un patrón de inclusiones de cuarzo y plagioclasa paralelo a la foliación principal de la roca), aunque también es esqueletal. En esta zona también se presenta cuarzo, plagioclasa, minerales del grupo de la epidota, con ilmenita, titanita, calcita y dolomita como accesorios.

10.1.3. Zona III.

Roca calco-silicatada rica en anfíbol. Esta zona exhibe una textura granonematoblástica, y está definida por la desaparición de biotita pardo-amarillenta y la ocurrencia de hornblenda junto con granate. El granate es poiquiloblástico (con un patrón de inclusiones de cuarzo y plagioclasa paralelo a la foliación principal de la roca), aunque también es esqueletal. En esta zona

también se presenta cuarzo, plagioclasa, minerales del grupo de la epidota, con ilmenita, titanita, calcita y dolomita como accesorios.

10.1.4. Zona IV.

Roca calco-silicatada con Amp-Di. Esta zona exhibe una textura granoblástica, la cual está dominada por la presencia de diopsido seguido en abundancia modal por hornblenda. Esta zona muestra una aparición abrupta de diopsido y zoicita, así como una disminución en hornblenda, marcando igualmente la tendencia a la desaparición de granate. El granate es poiquiloblástico (con inclusiones de cuarzo, zoicita? y calcita?) y también esqueletal, y puede ser reemplazado por zoicita y calcita o de forma no muy común por cuarzo, calcita, diopsido y hornblenda desarrollando pseudomorfos. Existe un intercrecimiento entre hornblenda y diopsido, los cuales están asociados a cuarzo, plagioclasa, granate, minerales del grupo de la epidota (principalmente zoicita), calcita y titanita. Es común observar cuarzo+zoicita±calcita dentro de esta zona. En algunos casos, también ocurre actinolita probablemente formada a expensas del diopsido.

10.1.5. Zona V.

Roca calco-silicatada rica en diopsido, con escapolita. Esta zona no está directamente en contacto con mármol (zona VII), presenta una textura granoblástica, la cual está caracterizada por un alto contenido de diopsido, acompañado de escapolita. El diopsido usualmente ocurre como poiquiloblastos agrupados con inclusiones de anfíbol, cuarzo, titanita y calcita o como bandas masivas. Algunas veces está sobrecrecido por hornblenda en sus bordes, puede estar parcial o completamente alterado a una masa de grano muy fino de clorita, en algunos casos junto con calcita. En ambos casos la abundancia de diopsido y plagioclasa están inversamente relacionadas. Pequeños cristales de diopsido también pueden ocurrir en contacto con

plagioclasa y hornblenda. El cuarzo está raramente en contacto con calcita y es usualmente observado en el núcleo del diopsido.

10.1.6. Zona VI.

Roca calco-silicatada con Ep+Clz+Zo. El límite entre las zonas V y VII está caracterizado por la presencia de epidota, clinozoicita y zoicita. Los minerales del grupo de la epidota están asociados con cuarzo, titanita y calcita como accesorios, hay desaparición de granate.

10.1.7. Zona VII.

Mármol. Esta zona exhibe una textura granoblástica-poligonal y consiste de calcita basta recristalizada y en menor cantidad dolomita. La wolastonita o escapolita no han sido identificadas en las muestras de mármol analizadas.

10.2. ZONAS DE REACCION IDENTIFICADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO

A continuación se describen en detalle las zonas de reacción identificadas durante el estudio petrográfico realizado, junto con algunas descripciones petrográficas detalladas de las muestras más representativas. Como este tipo de rocas se forman como bandas de reacción, y generalmente cada muestra contiene más de dos bandas, estas en si son las que se clasifican dentro de las zonas de reacción. Por lo tanto, esta sección hace referencia a las zonas de reacción observadas en las secciones delgadas analizadas con base en las zonas de reacción descritas con anterioridad.

La petrografía de las secciones delgadas analizadas se sintetiza en la Tabla 2, incluyendo información con relación al número de muestra, su mineralogía, zonas de reacción, numero de bandas de reacción y tipo.

Tabla 2. Petrografía de las zonas de reacción identificadas en el presente estudio.

Tipos de roca: **EG**: roca calco-silicatada con minerales del grupo de la Ep. **AG**: roca calco-silicatada con AmP-Grt. **P**: esquistos pelíticos. **AB**, roca calco-silicatada con Amp-Bt. **A**: anfibolita. **DA**: roca calco-silicatada que contiene Di-Amp. **M**: mármol

MUESTRA	BANDA	ZONA	TIPO	Cal	AmP	Bt	St	Grt	Di	Ep	Czo/Zo	PI	Qtz	Ttn	Ms	Zn	ILm	Tur	Op	Dol	Rut
RCS-19	1	II	AB		X	X				X		X	X	X		X	X				
RCS-9	1	I	P	X		X	X						X	X	X		X	X			
RCS-13	1	III	AG		X			X		X	Zo	X	X	X							
RCS-15 R	1	III	A	X	X					X	Czo	X	X	X							
	2	IV	DA	X	X				X	X	Czo										
	3	III	A		X					X	Czo			X							
	4	II	AB		X	X				X		X	X	X			X		X		
	5	II	AB		X	X				X	Czo	X	X				X				
	6	III	A		X					X	Czo/Zo	X	X			X					
RCS-15 C	9	III	A	X	X					X	Czo/Zo	X	X			X			X		
	10	III ó VI ?	A ó EG ?	X	X					X	Czo/Zo	X	X	X					X		
	11	III	A	X	X					X	Czo/Zo	X	X	X					X		
MUESTRA	BANDA	ZONA	TIPO	Cal	AmP	Bt	St	Grt	Di	Ep	Czo/Zo	PI	Qtz	Ttn	Ms	Zn	ILm	Tur	Op	Dol	Rut
RCS-16	1	VII	M	X																	X
	2	III	A	X	X						Czo/Zo		X	X							X
	3	III	A		X						Czo/Zo		X								
RCS-25	1	III	AG		X			X		X	Zo	X	X	X					X		
RCS-31	1	III	AG		X			X		X		X	X	X			X		X		
	2	III	AG		X			X				X	X								
	3	III	AG		X			X				X	X	X						X	
RCS-34	1	III	AG		X			X			Zo		X	X							
	2	III	AG		X			X		X	Czo/Zo		X								
RCS-7	1	I	P			X								X			X				
	2	III	AG		X			X		X		X	X	X							
	3	III	AG	X	X			X			Czo/Zo	X	X	X							
	4	?	?	X							Zo	X									
	5	III	AG	X	X			X			Zo	X			X						
	6	III	AG	X	X			X			Czo/Zo	X									
MUESTRA	BANDA	ZONA	TIPO	Cal	AmP	Bt	St	Grt	Di	Ep	Czo/Zo	PI	Qtz	Ttn	Ms	Zn	ILm	Tur	Op	Dol	Rut
RCS-32	1	III	A		X					X	Czo		X								X
	2	II	AB		X	X				X	Czo		X								
RCS-8	1	II	AB		X	X	X					X					X	X			
RCS-12 R	1	I	P			X						X	X				X				
	2	III	A	X	X			X				X	X	X		X					
RCS-12 C	1	IV	DA	X	X				X			X	X								
	2	IV	DA	X	X				X			X	X	X							
RCS-27	1	VII	M	X	X								X								X
	2	III	AG	X	X			X		X	Czo/Zo	X	X	X							

10.2.1. Zona I.

Esta zona de reacción (Tabla 2) ha sido identificada en esquistos pelíticos como tipo P y cuya descripción petrográfica se resume a continuación.

En la Figura 16 se ilustra un ejemplo de una textura lepidogranoblástica, la cual es característica en esta zona de reacción

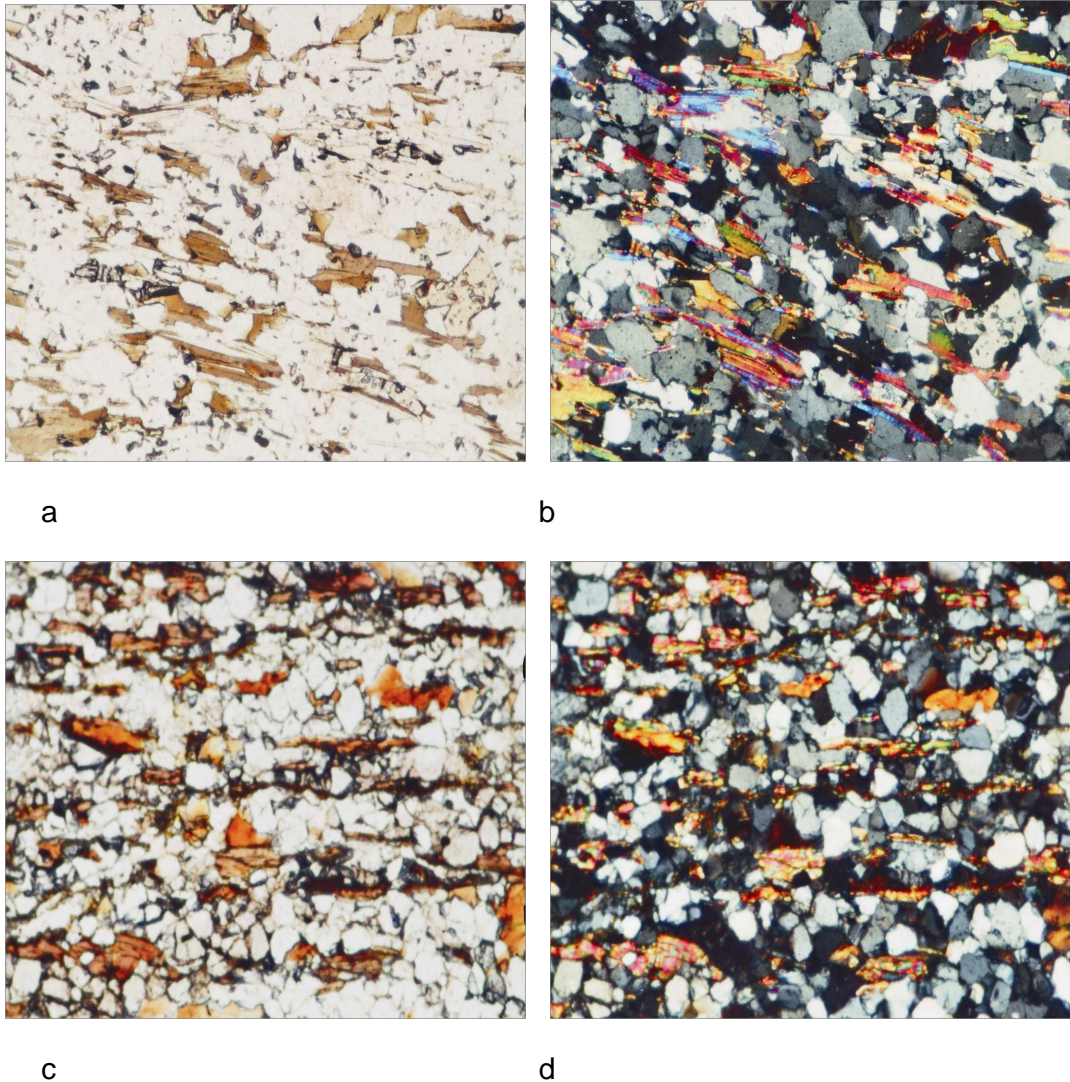


Figura 16. (a) y (b). Microfotografía de la muestra RCS-9, tomadas en nícoles paralelos y cruzados respectivamente que corresponden a la Zona I Tipo P, observándose textura lepidogranoblástica predominante. Aumento 8x. Nótese la disposición de los filosilicatos concordantes con la principal dirección de esquistocidad. (c) y (d). Microfotografía de la muestra RCS-12R, tomadas en nícoles paralelos y cruzados respectivamente que

corresponden a la Zona I Tipo P, observándose textura lepidogranoblástica predominante. Aumento 8x.

La composición mineralógica determinada en bandas correspondientes a la zona I consta generalmente de Qtz y Bt como minerales principales; Pl, St, Ilm, Tur, Ms a manera de minerales menores y Chl (Bt.), Ser (Pl) como secundarios.

-Cuarzo: Ocurre como individuos homeoblásticos, xenoblásticos de tamaño fino comúnmente asociado y en contacto neto con la biotita, en algunas bandas se observan inclusiones de ilmenita orientadas con la principal dirección de esquistocidad (Figura 16).

-Biotita: Ocurre en forma de agregados hojosos constituidos por individuos heteroblásticos, subidioblásticos de hábito laminar asociada al cuarzo. Es de color marrón a pardo amarillento. Estas biotitas se orientan conformando la principal dirección de esquistocidad, sin embargo, es posible observar localmente a algunos individuos orientados diagonalmente a esta dirección de esquistocidad, los cuales exhiben birrefringencias de tonalidad más verdosa y brillante reflejando una alteración moderada a muy fuerte a clorita, aunque a veces esta alteración es de carácter incipiente con birrefringencias fucsias y brillantes. La ocurrencia de biotita en algunas bandas disminuye hacia el contacto con bandas anfibolíticas (Figura 16, 17).

-Clorita: como mineral se presenta en agregados fibrosos siguiendo la exfoliación y orientación de la biotita. En la roca se desarrolla desde los bordes hacia el centro de la biotita.

-Plagioclasa: Se concentra localmente en sectores de algunas bandas, asociada a biotita y en forma de agregados conformados por individuos homeoblásticos, subidioblásticos de menor tamaño que el cuarzo y alterados a sericita en algunos sectores más que en otros (Figura 16, 17).

-Sericita: aparece en agregados escamosos muy finos desarrollados a manera de parches sobre la plagioclasa.

-Estauroлита: ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos, algunos son alargados y concordantes con la esquistocidad mientras otros se observan como fragmentos casi esqueléticos y con numerosas inclusiones de cuarzo que no siguen ninguna orientación preferencial (Figura 17).

-Ilmenita: se presenta como individuos homeoblásticos, subidioblásticos, de tamaño muy fino con formas alargadas y otros perfectamente tabulares concordantes con la dirección de esquistocidad y en contacto neto con biotita (Figura 17).

-Turmalina: Individuos heteroblásticos, xenoblásticos de tamaño fino promedio con formas redondeadas, en contacto con el cuarzo, biotita (Figura 17).

-Moscovita: se presenta como individuos homeoblásticos, subidioblásticos, de tamaño muy fino con formas alargadas y otros perfectamente fibrosos concordantes con la dirección de esquistocidad y en contacto neto con biotita.

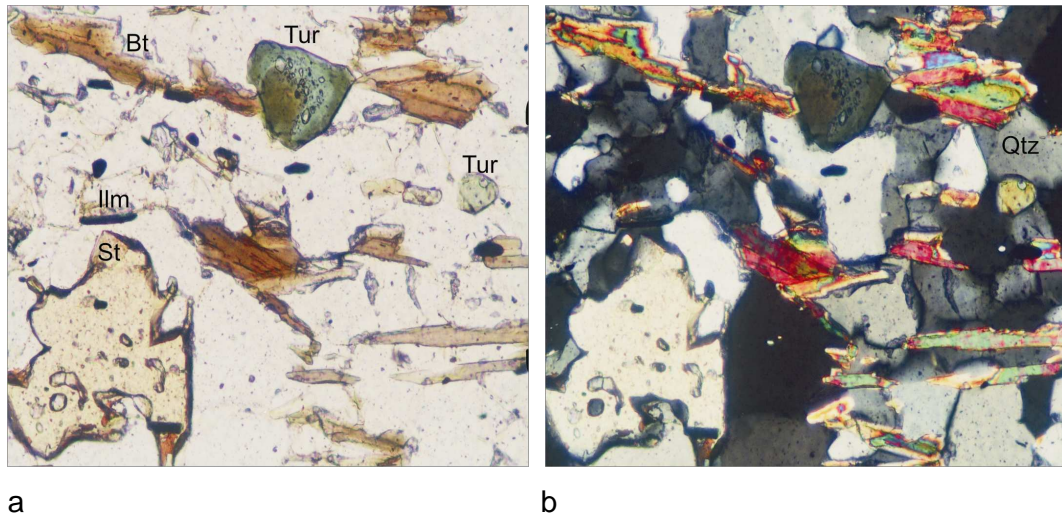
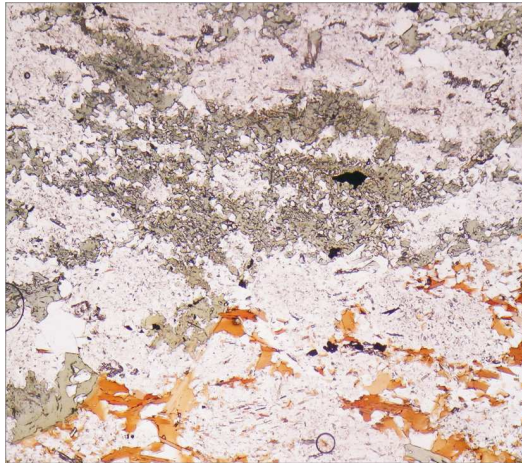


Figura 17. Microfotografías de la muestra RCS-9. (a) y (b) En nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Nótese la mineralogía representativa de la Zona I Tipo P, la cual comprende el Qtz, St, Bt, Pl, Ms, Tur. Aumento 20x.

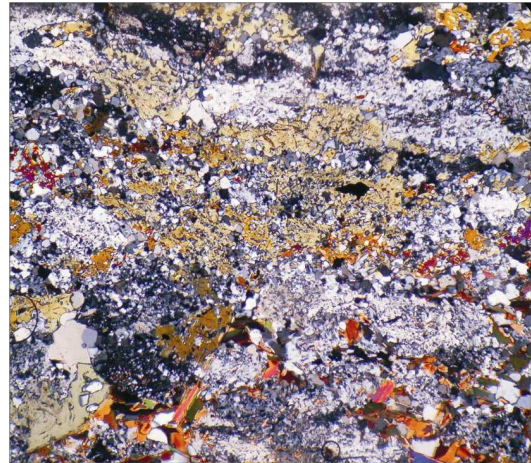
10.2.2. Zona II.

Esta zona de reacción (Tabla 2) ha sido identificada rocas calco-silicatadas que contienen anfíbol y biotita, denominadas como tipo AB y cuya descripción petrográfica se resume a continuación.

En la Figura 18 se ilustra un ejemplo de textura lepidogranoblástica, la cual es característica en esta zona de reacción, aunque también se pueden observar texturas granoblásticas



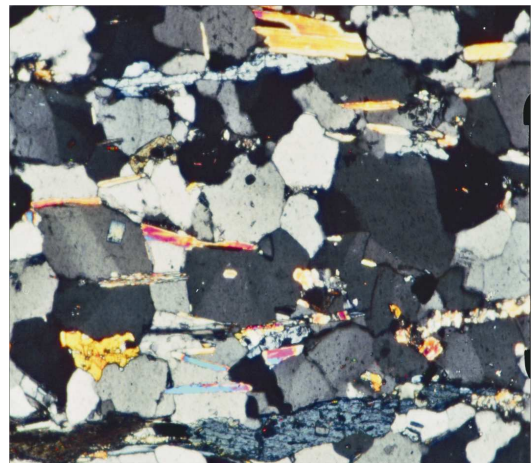
a



b



c



d

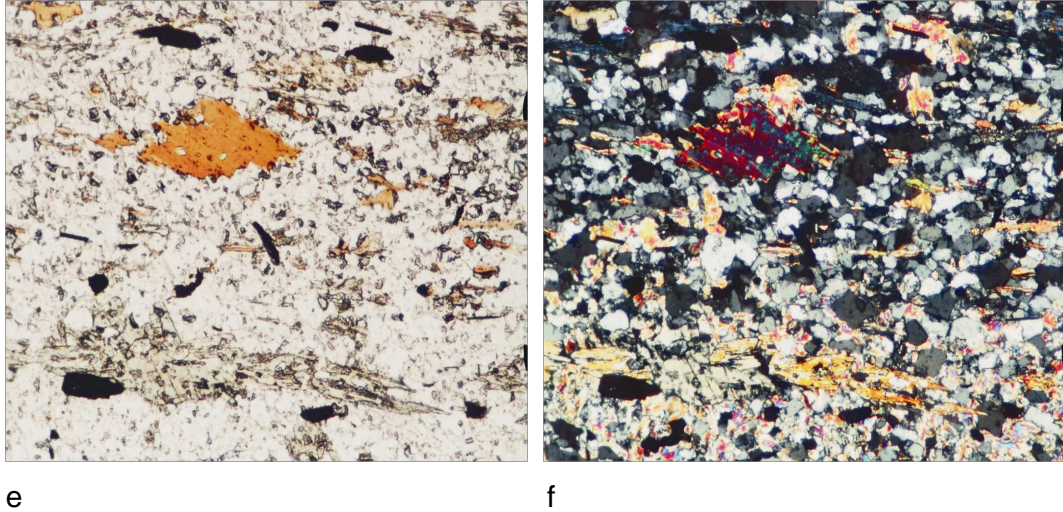


Figura 18. (a) y (b) Microfotografías tomadas a muestra RCS-19 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente en la cual se observa hacia la parte superior la textura nematogranoblástica, conformada por anfíboles alargados definiendo la foliación de la banda correspondiente a la Zona II Tipo AB. Aumento 5x. (c) y (d) Microfotografías tomadas a muestra RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Véase la textura lepidogranoblástica. Aumento 8x (e) y (f). Microfotografías tomadas RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados. Obsérvese la textura lepidogranoblástica y el contacto con la Zona I. Aumento 8x.

La composición mineralógica analizada en bandas correspondientes a la zona II consta generalmente de Bt, Act, Pl, Ep, Zo como minerales principales; Qtz, Hbl, Tit, Ilm, St, Tur, Zrn a manera de minerales menores y Chl (Act, Bt), Ser (Pl), Cli(Hbl) como secundarios.

-Biotita: Habitualmente ocurre como agregados de color marrón con fuerte pleocroismo (en algunas bandas), constituidos por individuos heteroblásticos, xenoblásticos y subidioblásticos de hábito laminar. La mayoría de cristales se orientan de forma concordante con la principal dirección de foliación y otras veces se encuentran orientados al azar. Su distribución es comúnmente homogénea y algunos de estos cristales poseen bordes irregulares, en ocasiones presentan fuerte alteración a clorita, además se encuentran asociados con Pl(ser)+Qtz+Act (Figura 18, 19).

-Actinolita: Generalmente ocurre en forma de Individuos heteroblásticos, xenoblásticos, de tamaño fino y como porfidoblastos de hábito tabular a acicular de color verde claro con moderado pleocroismo, presentan bordes irregulares y algunos de estos cristales son alargados y concordantes con la principal dirección de la foliación, otros se orientan perpendicular a esta, también es posible observarlos orientados al azar en algunas bandas, en las cuales su distribución es homogénea y de mayor ocurrencia que en otras. Se pueden encontrar diferentes asociaciones en contacto neto como por ejemplo: Qtz+Bt+Pl(ser)+Tit; Ep+Pl(ser)+Hbl+Bt. y Pl(ser)+Ep+Zo. Algunos de los cristales de Act exhiben alteración a clorita. (Figura 18, 19)

-Plagioclasa: La ocurrencia de este mineral disminuye en comparación con la zona I y además presenta una intensa alteración a sericita. Corrientemente se encuentra a manera de individuos heteroblásticos, xenoblásticos, de aspecto bastante moteado con bordes irregulares, a veces indistinguibles al igual que su orientación, su birrefringencia es débil a moderada. Es posible encontrarla en diferentes asociaciones como por ejemplo: Qtz+Act+Bt; Bt(chl)+Act+Hbl+Pl(ser)+Qtz+Ep+Tit y Ep+Zo Qtz+Act+Bt(Chl) (Figura 18).

-Epidota: Se presenta como individuos homeoblásticos, subidioblásticos casi incoloros, aunque exhibiendo débil pleocroismo. Los bordes del mineral son curvilíneos y un poco fracturados, algunos individuos presentan zonación, el hábito es granular a alargado concordante con la esquistocidad principal. Poseen birrefringencia bastante fuerte y su distribución es homogénea. Se pueden encontrar diferentes asociaciones en contacto neto como por ejemplo: Pl(ser)+Act+Bt y Act+Zo+Pl(ser). La ocurrencia del mineral es menor respecto a bandas anfíbolíticas de la zona III (Figura 18).

-Zoicita: Individuos homeoblásticos, xenoblásticos, incoloros de alto relieve, presentan colores de birrefringencia azul de segundo orden bajo. Algunos de estos cristales son de forma tabular concordante con la esquistocidad principal. En algunas bandas llega a ser abundante y distribuida

homogéneamente. Se encuentra comúnmente asociada a $Ep+Act+Pl(\text{ser})+Qtz$ (Figura 19).

-Cuarzo: Se pueden presentar hasta dos generaciones en una misma banda, de la siguiente manera:

-Cuarzo(1): Como individuos heteroblásticos, xenoblásticos y ocasionalmente subidioblásticos, con bordes irregulares, de hábito granular el más frecuente y otros alargados en dirección de la esquistocidad principal. Su distribución es comúnmente homogénea y presentan extinción ondulosa, Se asocia principalmente con la $Pl(\text{ser})+Act+Bt.$ en contacto neto y otras veces con $Pl(\text{ser})+Hbl.$

-Cuarzo(2): Se presenta en agregados rellenando venillas, homeoblástico, xenoblástico de hábito casi granular (Figura 19)

-Hornblenda: Individuos, heteroblásticos, de color verde oliva, verde amarillento o pardo claro, algunos presentan geometrías pseudo hexagonales con bordes moderadamente regulares y una dirección de exfoliación en ángulo de 60° , otros son xenoblásticos con bordes irregulares y pueden presentar una exfoliación. Varios cristales se encuentran orientados, algunos verticales a la esquistocidad principal y otros orientados al azar. Su distribución es esporádica en algunas bandas y se asocian principalmente a la $Act+Pl(\text{ser})+Bt.$

Se pueden presentar hasta dos generaciones de hornblenda en una misma banda (1, siguiendo la foliación de la roca y 2, como porfidoblastos que han sobrecrecido a dicha foliación). Algunas veces ocurre la hornblenda exhibiendo alteración a clinocloro. (Figura 19)

-Titanita(esfena): Individuos heteroblásticos, xenoblásticos, de color marrón claro, con pleocroismo moderado y birrefringencia débil. Algunos presentan hábito granular con bordes curvilíneos y otras veces los cristales son

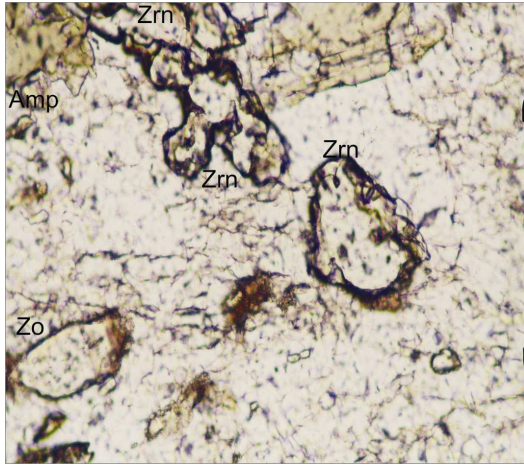
alargados, en todos los casos se orientan al azar. Su tamaño es de grano fino y la distribución es homogénea. Se asocia principalmente con el Qtz+Pl(ser).

-Ilmenita: Individuos homeoblásticos, subidioblásticos, de hábito tabular y bordes rectos, color negro y relieve bajo. Los cristales se orientan concordantes con la esquistocidad. Su distribución es a veces homogénea y en ocasiones heterogénea localizada preferentemente hacia los extremos de las bandas, asociada habitualmente en contacto neto con Zo+Ep+Pl(ser)+Qtz+Bt. (Figura 19)

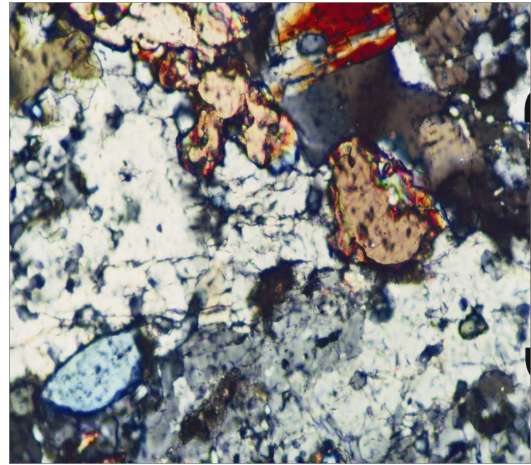
-Estaurolita: La estaurolita exhibe maclado cruciforme y se presenta en tres generaciones (1, siguiendo la foliación de la roca, 2, como cristales que han crecido perpendicular a dicha foliación, y 3, a manera de cristales que han crecido al azar. En algunas muestras es común observar intercrecimientos entre estaurolita y hornblenda, aunque también inclusiones de St en Hbl o como relicto en Hbl.

-Turmalina: la turmalina desarrolla localmente agregados y ocurre incluida en hornblenda, plagioclasa y estaurolita.

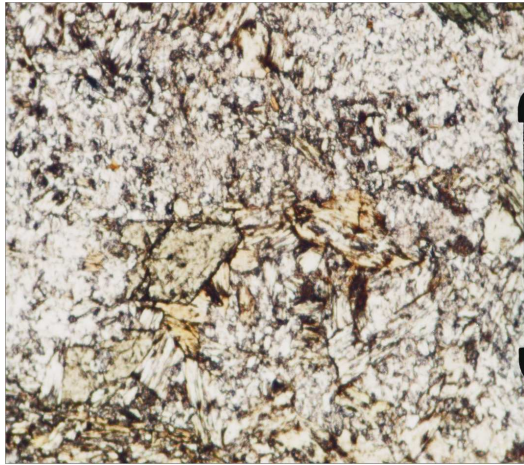
-Zircón: Individuos subidioblásticos, heteroblásticos casi incoloros con alto relieve y birrefringencia moderada a fuerte. Algunos de estos individuos presentan un hábito granular. Se asocian principalmente con el Amp, Bt, Qtz (Figura 19)



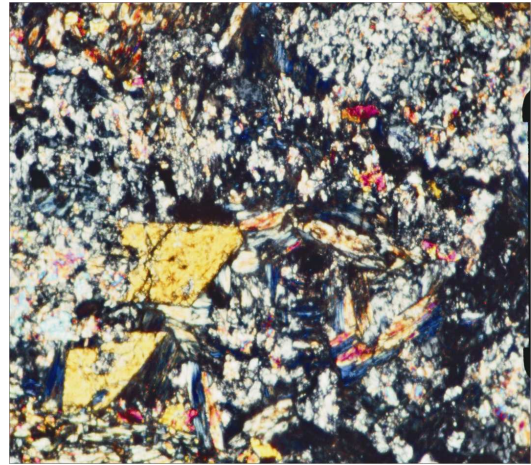
a



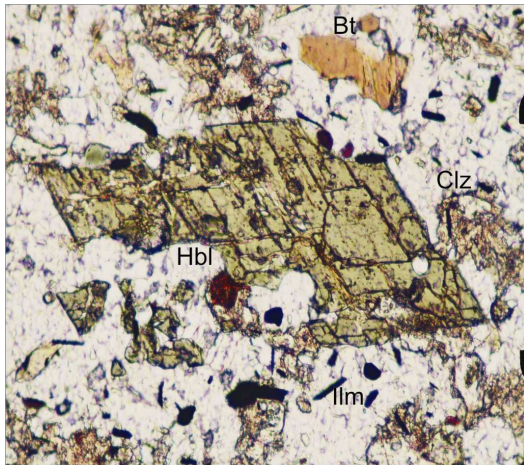
b



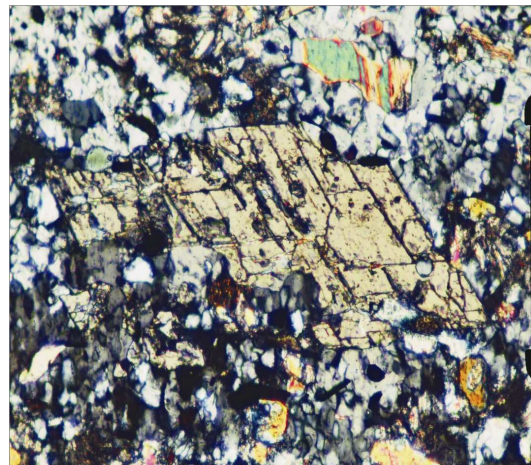
c



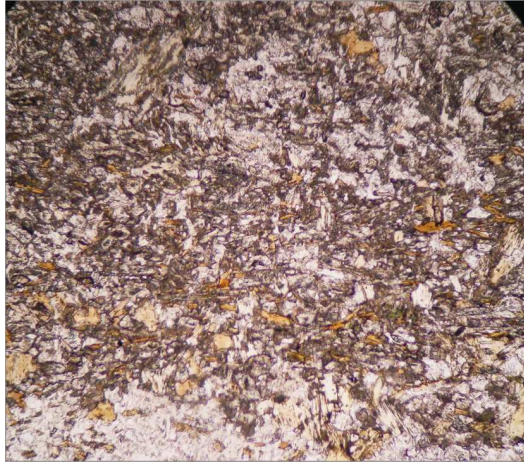
d



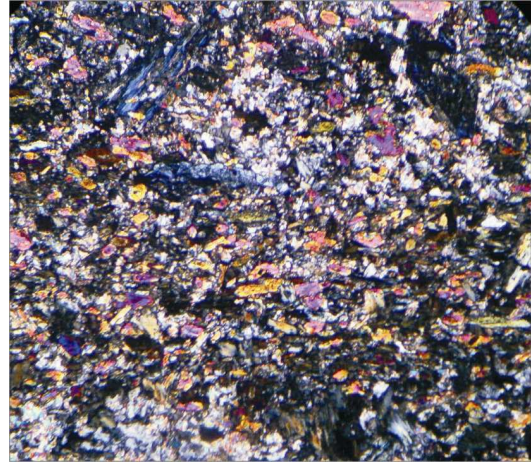
e



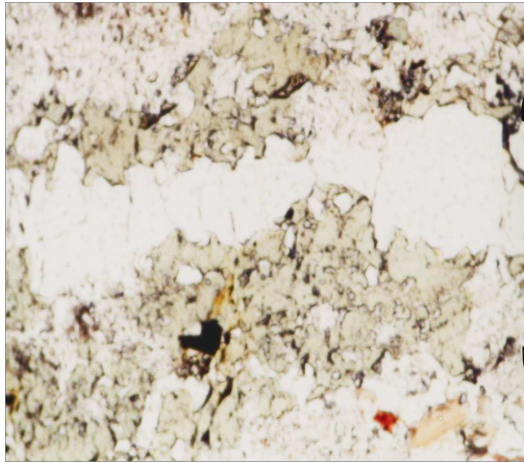
f



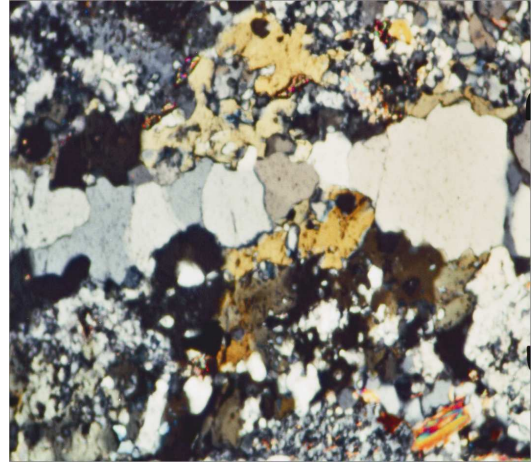
g



h



i



j

Figura 19. Microfotografías correspondientes a la Zona II, Tipo AB. (a) y (b). Microfotografía de la muestra RCS-19 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Nótese la mineralogía típica de la correspondiente Zona II, exhibiéndose minerales accesorios. Aumento 20x. (c) y (d). Microfotografías correspondientes a la muestra RCS-15R en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Se observa un individuo de Amp subidioblástico, Bt algunas alterándose y Pl alterada. Aumento 8x. (e) y (f). Microfotografías de la muestra RCS-15R en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Nótese el porfidoblasto de Hbl idioblástico, con exfoliación perfecta a 60°. Como minerales principales se pueden observar el Amp, Bt, Pl (ser), Qtz y minerales accesorios como la Ilm, Clz y Ep. Aumento 20x. (g) y (h). Microfotografía de la muestra RCS-15R en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Se observa Bt de color pardo amarillento alargada en dirección de la foliación, Amp y epidota con birrefringencia fucsia brillante. (i) y (j). Microfotografía de la muestra RCS-19 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Se observa Qtz conformando venas concordantes con la foliación. Aumento 8x.

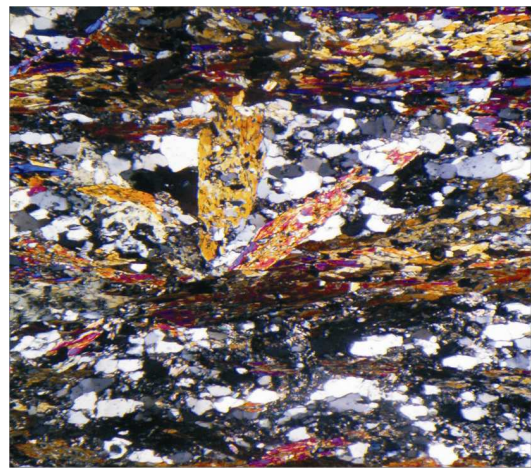
10.2.3. Zona III.

Esta zona de reacción (Tabla 2) ha sido identificada en anfibolitas, denominadas como tipo A y en rocas calco-silicatadas que contienen anfíbol y granate, denominadas como tipo AG, cuya descripción petrográfica se resume a continuación.

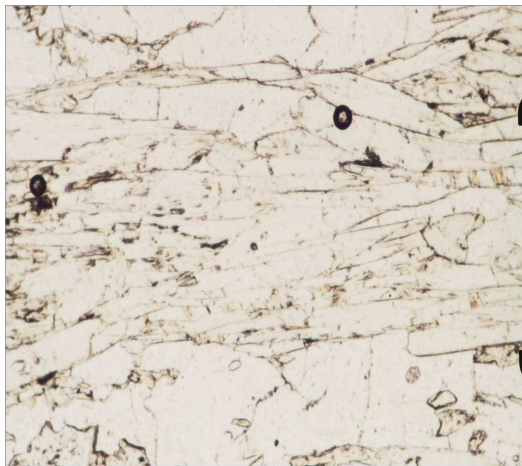
En la Figura 20 se ilustra un ejemplo de una textura nematogranoblástica, la cual es característica en esta zona de reacción aunque localmente se puede observar textura granoblástica.



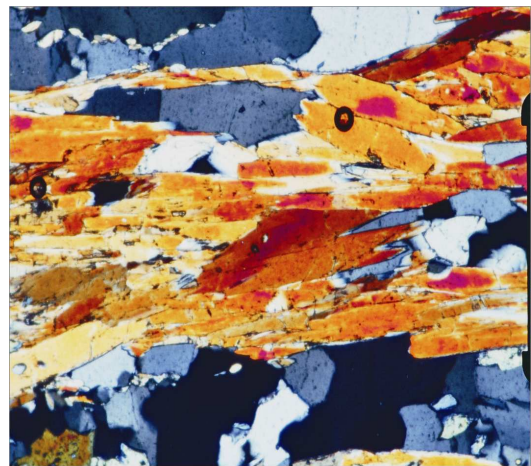
a



b



c



d

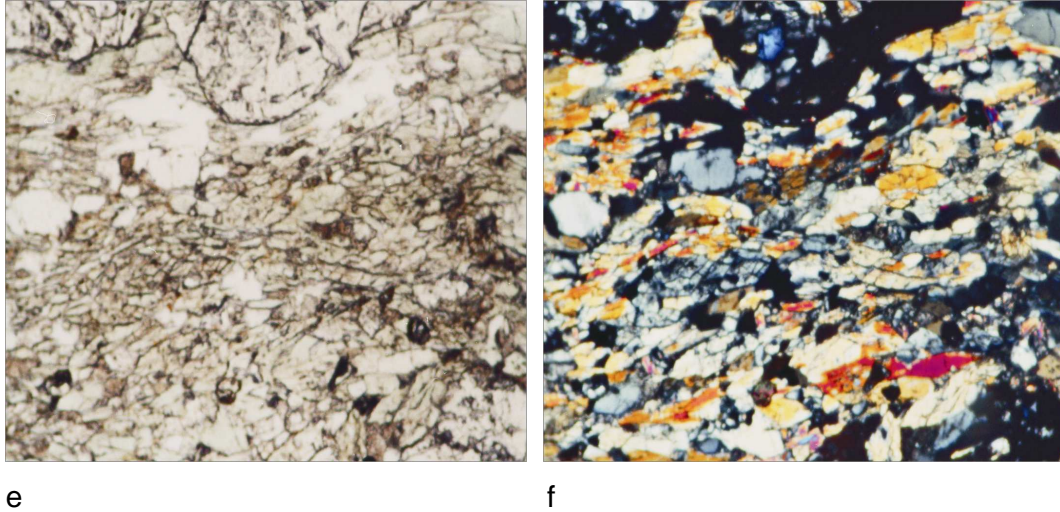


Figura 20. (a) y (b) Microfotografías de la muestra RCS-13 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Textura nematogranoblástica predominante en zona III tipo AG Nótese Amp dispuesto concordante con la foliación principal y en la parte superior orientado diagonal y perpendicular a esta. Aumento 8x. (c) y (d) Microfotografías de la muestra RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Textura nematogranoblástica típica de la Zona III tipo AG, con anfíboles casi incoloros. Aumento 8x. (e) y (f). Macrofotografías de la muestra RCS-13 en nícoles paralelos y cruzados. Se observa la textura nematogranoblástica con ocurrencia de Grt poiquiloblástico (parte superior) con inclusiones de Qtz, Zo. Aumento 8x.

La composición mineralógica determinada en bandas correspondientes a la zona III consta generalmente de Act, Grt, Pl, Qtz, Hbl, Ep, Clz, Zo como minerales principales; Cal, Tit, Ilm, Op, Zrn, Rut a manera de minerales menores y Ser (Pl) como secundarios.

-Actinolita: Este mineral corrientemente se presenta en forma de individuos heteroblásticos, xenoblásticos de color verde, no obstante, es posible observar a algunos individuos homeoblásticos, subidioblásticos e incluso idioblásticos de habito tabular, a fibroso, exhibiendo cierto maclado, con birrefringencia más débil y de color verde pálido casi incoloro, también a manera de porfidoblastos y como agregados aciculares. La mayoría de cristales son concordantes con la foliación de la roca, algunos de estos presentan inclusiones de Qtz orientadas con dicha foliación, también pueden ocurrir orientados de forma diagonal y

perpendicular a esta, estos últimos suelen corresponder a cristales tabulares casi incoloros de birrefringencia gris suave que se encuentran rodeados por zoicita y contienen con frecuencia inclusiones de Qtz orientados con la foliación. La Act de aspecto fibroso presenta una birrefringencia más fuerte, así como zonación en sus colores de interferencia.

En términos generales, la actinolita ocurre con relativa abundancia y distribución homogénea en la mayoría de las bandas, aunque con algunas variaciones en su tamaño entre una banda y otra. Comúnmente se encuentra asociada en contacto neto con Qtz, Ep, Clz, Tit, Zo, Cal, Grt y en ocasiones parece como si envolviera a este último (Figura 20, 21).

-Granate: El granate en esta zona ocurre principalmente como individuos homeoblásticos, subidioblásticos a idioblásticos (porfidoblastos hexagonales), la mayoría presentan bordes bien definidos y son de tipo poiquiloblástico, algunos con inclusiones de Qtz, Pl (ser), Zo, Ep, casi siempre orientadas con la foliación principal de la roca. Otras veces las inclusiones suelen corresponder a Act, Qtz, Zo, Ep, Tit y finalmente pueden ocurrir reemplazados casi en su totalidad por numerosas inclusiones de Qtz presentando además bordes muy irregulares y corroídos con un tamaño promedio de 1.5 mm.

También es posible que ocurra, aunque con menor frecuencia, granate esquelético reemplazado generalmente por Qtz, Cal, Pl (ser), Zo y Clz. Algunos de los granates en forma de porfidoblastos hexagonales presentan pseudomorfismo a causa de actinolita. La distribución de los granates dentro de las bandas es comúnmente homogénea, sin embargo su ocurrencia puede ser esporádica, por ejemplo: en una banda se observan tan solo a tres porfidoblastos de granate dispersos a manera de individuos heteroblásticos, xenoblásticos y en un sector de otra banda se pueden localizar apenas a dos granates idioblásticos a subidioblásticos de tamaño fino (Figura 20, 21).

-Plagioclasa: Ocurre habitualmente como individuos heteroblásticos, xenoblásticos de aspecto moteado, raramente homeoblásticos. Presenta

bordes irregulares y constante alteración a sericita. Se puede encontrar orientada con la foliación principal de la roca y en ocasiones no es distinguible una orientación debido a su intensa alteración. Generalmente se puede observar asociada con Qtz, Act, Clz, Zo, Ep y Grt. Su distribución en la mayoría de bandas es homogénea, sin embargo puede existir una mayor ocurrencia hacia los extremos de ciertas bandas con algunas variaciones en sentido lateral. También es posible que se distribuya conformando ocasionalmente una especie de matriz muy fina y de aspecto moteado, en la cual crecen individuos heteroblásticos, subidioblásticos de actinolita concordante con la foliación (Figura 21).

-Cuarzo: En esta zona se puede ver como ocurre la mayor variedad de formas y tamaños de este mineral, así como un mayor número de generaciones (hasta tres) dentro de una misma banda.

En resumen, el cuarzo se presenta en primer lugar como individuos heteroblásticos (predominando los de mayor tamaño), xenoblásticos raramente fracturados y con bordes irregulares, la mayoría de hábito granular y otros un poco alargados siguiendo la foliación de la roca, generalmente se distribuyen de forma homogénea, asociados con Pl (ser), Act, Tit, Zo, y Ep en contacto neto. Con frecuencia ocurre a manera de inclusiones dentro de Grt principalmente, en porfidoblastos de Act y en Hbl.

En segundo lugar ocurre en forma de agregados compuestos por individuos homeoblásticos, xenoblásticos de aspecto limpio conformando venillas verticales, algunas cortando a la foliación de la roca y en la misma dirección de la actinolita. En otra generación ocurre de menor tamaño y formas alargadas concordantes con la foliación asociado a Clz y Zo en contacto neto, conformando sub-bandas y localmente venillas y lentes (Figura 21).

-Hornblenda: La Hbl ocurre generalmente como individuos heteroblásticos, xenoblásticos de gran tamaño, color verde pálido, con inclusiones de Qtz que siguen la foliación principal, aunque en ocasiones no siguen ninguna

orientación preferencial. En algunas bandas se presenta a manera de individuos de gran tamaño, forma tabular alargada y dispuestos al azar. Corrientemente se distribuyen de manera homogénea, sin embargo hay ciertas bandas, en las cuales ocurre como individuos dispersos, heteroblásticos, xenoblásticos asociados principalmente a Pl(ser) (Figura 20).

-Epidota: Este mineral ocurre con relativa frecuencia, aunque con notables variaciones de su tamaño y abundancia entre una banda y otra. Se presenta principalmente como individuos heteroblásticos, xenoblásticos con bordes irregulares y generalmente en contacto neto con el Qtz, Act, Pl (ser) y Zo, no obstante, puede ocurrir también a manera de individuos homeoblásticos, subidioblásticos, casi incoloros, con débil pleocroismo y bordes bien definidos, algunas veces presentan formas alargadas en dirección a la foliación principal y en pocas ocasiones dispuestas al azar, aumentan su tamaño y cambian a un habito granular hacia los extremos de una misma banda, así como alrededor de los contactos con otras bandas. Los cristales de este tipo se asocian generalmente con Act, Clz, Tit, Cal, Pl(ser). Finalmente, es común observar zonación en la mayoría de cristales (Figura 21).

-Clinzoicita: Predominan los individuos heteroblásticos, xenoblásticos, casi incoloros de alto relieve y de colores de birrefringencia azul de segundo orden bajo. Algunos presentan forma alargada concordante con la foliación principal, pero la mayoría poseen habito granular orientados al zar. También ocurren, aunque con menor frecuencia individuos homeoblásticos, subidioblásticos de forma tabular concordantes con la foliación. Finalmente, es posible observarlos como inclusiones en los porfidoblastos de Act y entre las bandas de cristales alargados de Act, a manera de individuos heteroblásticos dispersos que contienen inclusiones de Qtz orientadas con la foliación, en especial los de mayor tamaño. Generalmente se encuentran asociados con Ep, Tit, Act, Cal, Qtz, Pl(ser) y Zo en contacto neto (Figura 21).

-Zoicita: Predominan los individuos heteroblásticos, subidioblásticos, alargados y concordantes con la foliación, distribuidos homogéneamente, algunos presentan un considerable tamaño y está generalmente asociada con Qtz, Act, Pl (ser) en contacto neto. En segundo orden, ocurren a manera de individuos homeoblásticos, xenoblásticos de tamaño fino dispersos y ocasionalmente como inclusiones dentro del granate. A veces se pueden observar concentradas en algunos bordes de ciertas bandas presentando un mayor tamaño y abundancia junto a las actinolitas diagonales y casi verticales (Figura 21).

-Calcita: habitualmente ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos dispersos y ocasionalmente ubicados hacia los bordes y contactos de algunas bandas, sin embargo, es posible que ocurran a manera de individuos heteroblásticos, subidioblásticos, con algunos porfidoblastos de 1 mm en promedio de su tamaño, exhibiendo bordes bien definidos y buen maclado, la mayoría de hábito granular y con menor frecuencia de forma elongada siguiendo la foliación principal. Generalmente asociada con Ep, Pl (ser), Act, Clz, Zo, Op en contacto neto. También es posible observar en algunas bandas calcita en forma de agregados que en ocasiones conforman sub-bandas de hasta 2 mm de espesor, rodeadas de Pl (ser), y Zo marcando el contacto con otra banda anfíbolítica, así como lentes y venillas que se orientan en la misma dirección de la actinolita. En otra banda se encuentran los agregados rellenando los espacios y fracturas que se abren en la parte inferior de un granate de gran tamaño (5 mm), el cual se encuentra rodeado por Act en dirección diagonal y por calcita granular en la parte superior (Figura 21).

-Titanita: Predominan los individuos heteroblásticos, xenoblásticos, presentando bordes irregulares, habitualmente alargados en dirección de la foliación principal, no obstante, Se observan algunos cristales de hábito granular y otros de aspecto alargado, en ambos casos dispuestos al azar. Se asocia generalmente con Ep+Act+Clz, Qtz en contacto neto. En ciertas bandas ocurren a manera de individuos heteroblásticos, subidioblásticos, exhibiendo

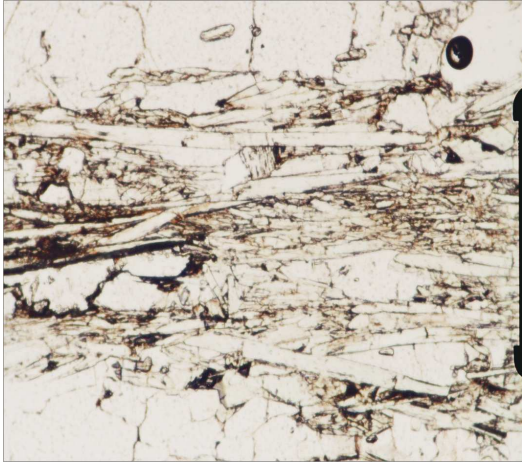
formas similares a puntas de flechas y comúnmente asociados a Grt, Zo, Act, Qtz. La ocurrencia de titanita varía algunas veces en sentido lateral dentro de ciertas bandas donde su contenido aumenta hacia los contactos, así como su tamaño llega a ser mayor hacia los extremos de algunas bandas, aunque por lo general predominan aquellas de grano fino con relativa distribución homogénea.

-Ilmenita: La ilmenita ocurre a manera de individuos homeoblásticos, subidioblásticos de forma tabular, algunos orientados con la foliación y otros perpendiculares a esta (Figura 21).

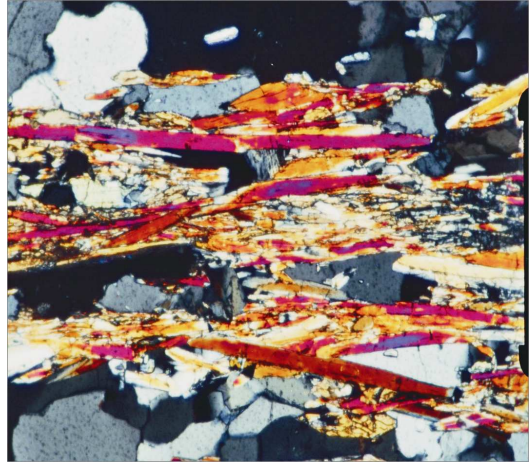
-Minerales opacos: Los Opacos están orientados al azar, son individuos heteroblásticos xenoblásticos, que ocurren dentro de los cristales de Cal principalmente. También ocurren como individuos homeoblásticos de geometrías variadas, además de presentarse como inclusiones en Grt y asociado a Qtz (Figura 20, 21).

-Zircón: Individuos subidioblásticos, heteroblásticos casi incoloros con alto relieve y birrefringencia moderada a fuerte. Algunos de estos individuos presentan un hábito granular. Se asocian principalmente con el Amp, Bt, Qtz. (Figura 21)

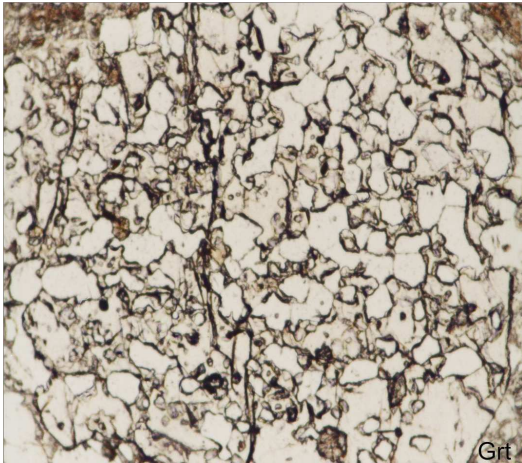
-Rutilo: su ocurrencia es muy escasa y a manera de individuos heteroblásticos, subidioblásticos (tabular) de color marrón oscuro y como inclusiones de aspecto alargado dentro de granate orientados con la foliación principal (Figura 21).



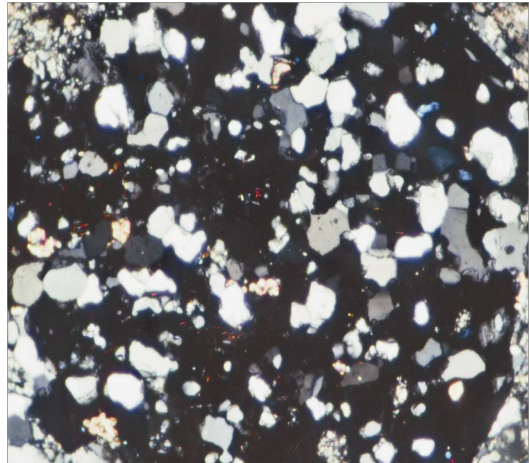
a



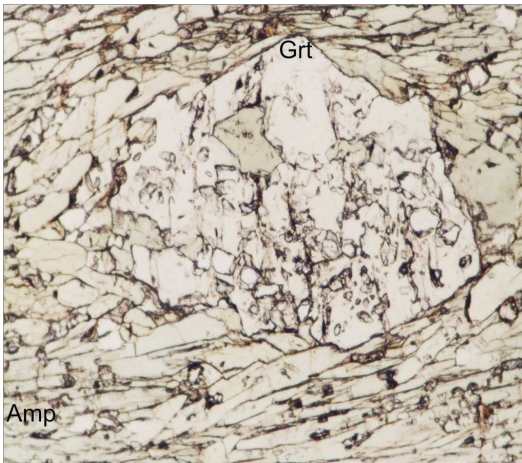
b



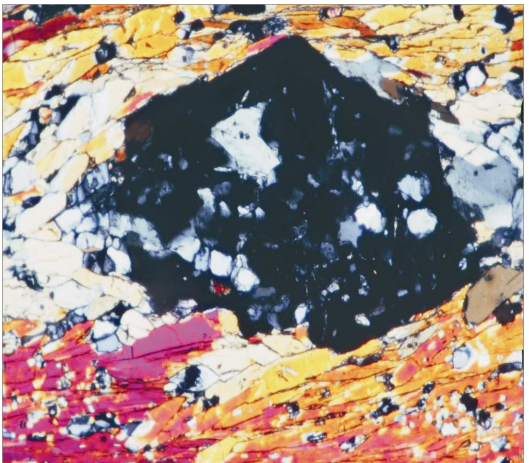
c



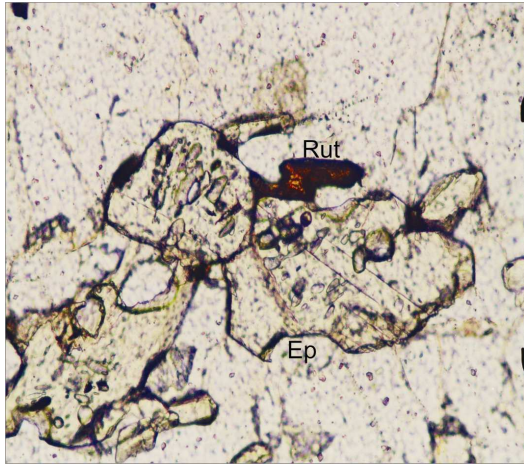
d



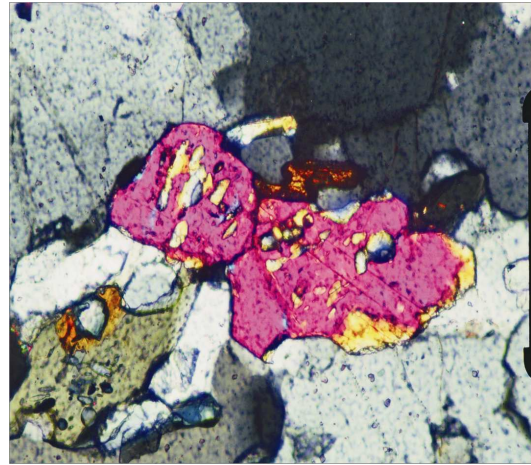
e



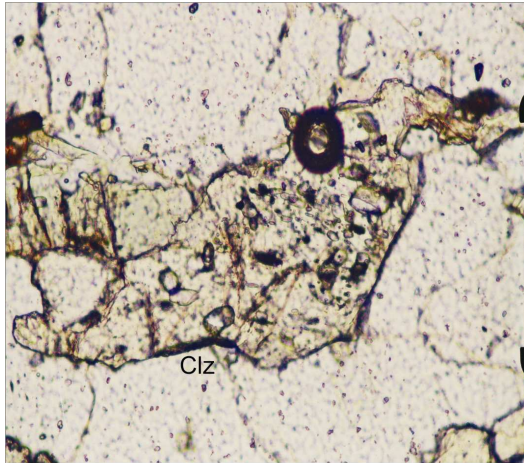
f



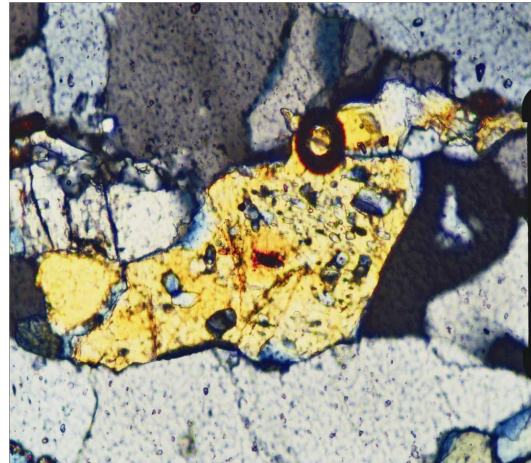
g



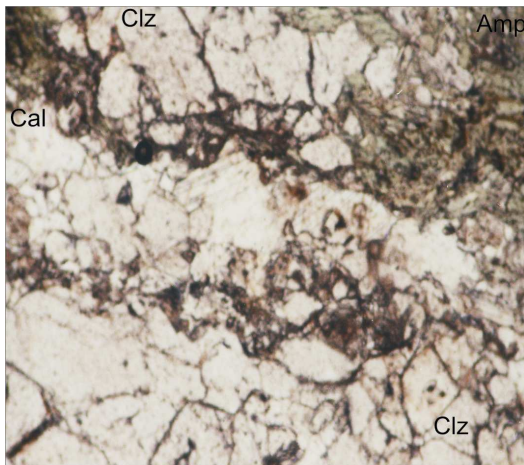
h



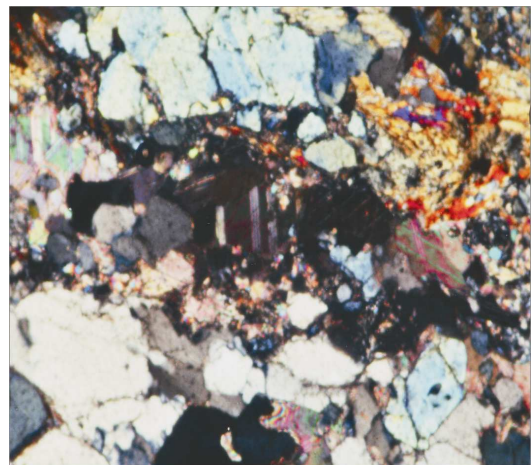
i



j



k



l

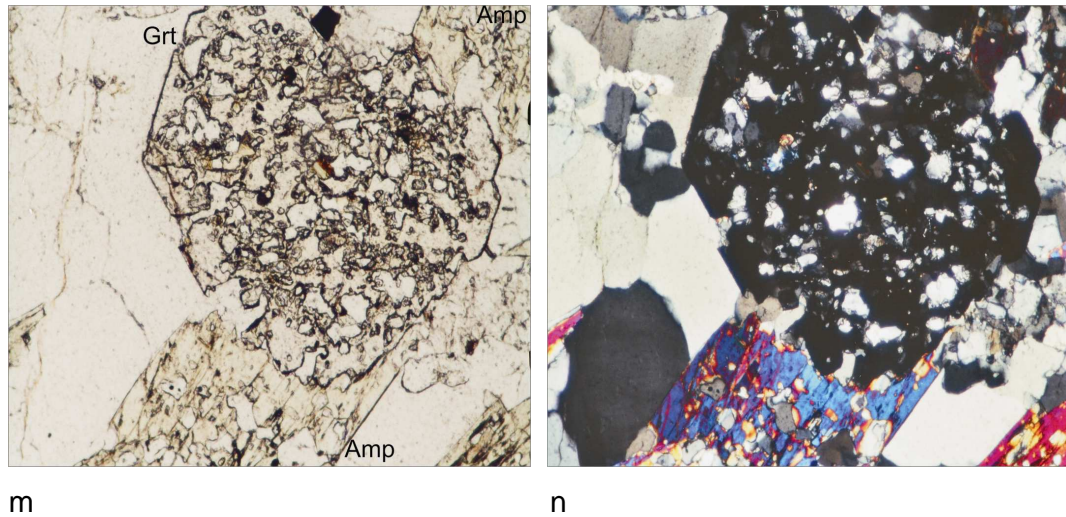


Figura 21. (a) y (b) Microfotografías de la muestra RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Cristales alargados de Act orientados en contacto con la Bt y Qtz. Aumento 8x. (c) y (d) Microfotografías de la muestra RCS-13 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Porfidoblasto de Grt, tipo poiquiloblástico con inclusiones de Qtz, Rut de color marrón, y Zo orientados con la foliación principal. Aumento 8x. (e) y (f) Microfotografías de la muestra RCS-13 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Minerales alargados de Act envolviendo a porfidoblastos de Grt tipo poiquiloblástico con numerosas inclusiones de Qtz y Zo. Aumento 8x. (g) y (h) Microfotografías de la muestra RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Cristales de Ep en contacto con Rut, Qtz y Zo. Aumento 20x. (i) y (j) Microfotografía de la muestra RCS-32 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Cristal de Clz en contacto con Qtz. Aumento 8x. (k) y (l). Microfotografía de la muestra RCS-16 en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Obsérvese la mineralogía de la Zona III tipo AG donde se identifica la Cal, Clz y el Amp en la parte superior derecha. Aumento 8x. (m) y (n). Microfotografía de la muestra RCS-16. Porfidoblasto de Grt con inclusiones de Qtz, Zo en contacto directo con el Amp el cual está dispuesto concordante con la foliación principal. Aumento 8x.

10.2.4. Zona IV.

En esta zona de reacción (Tabla 2) ha sido identificada en rocas calcosilicatadas que contienen diopsido y anfíbol denominadas como tipo DA y cuya descripción petrográfica se resume a continuación.

En la Figura 22 se ilustra un ejemplo de textura granoblástica, la cual es característica en esta zona de reacción, aunque también se puede observar textura nematogranoblástica.

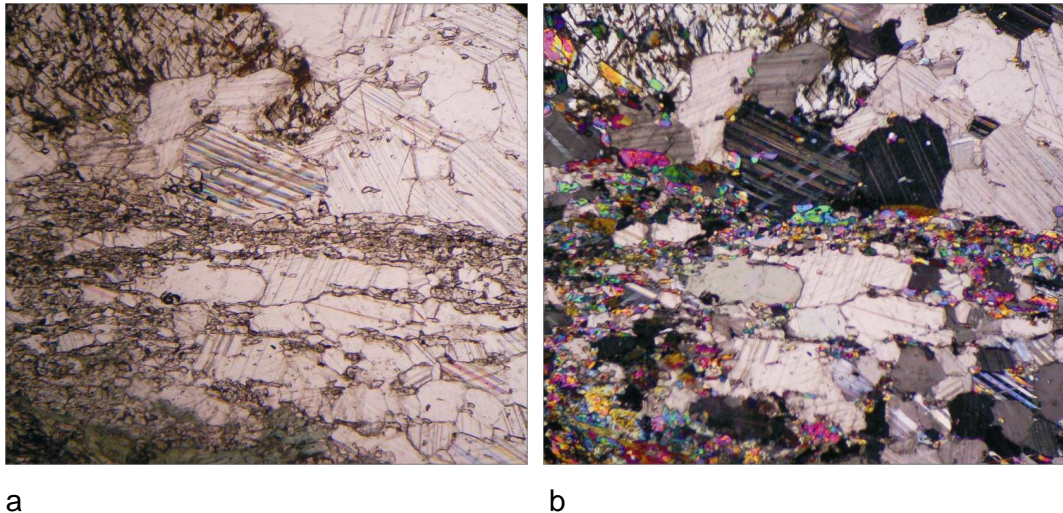


Figura 22. (a) y (b) Microfotografías de la muestra RCS-15R correspondientes a la zona IV tipo DA en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Se observa textura granoblástica conformada por individuos de Di y Cal. Localmente se aprecia textura nematogranoblástica con presencia de Amp y minerales alargados del grupo de la epidota concordantes con la foliación principal.

La composición mineralógica analizada en bandas correspondientes a la zona IV consta generalmente de Di, Act, Cal, Pl, Ep como minerales principales; Qtz, Clz, Tit, Hbl, a manera de minerales menores y Ser (Pl) como secundario.

-Diopsido: El diopsido ocurre como individuos de gran tamaño, presentando birrefringencias altas de color azul brillante y bajas de color crema suave, algunos ocurren como porfidoblastos, subidioblásticos que exhiben una excelente exfoliación a 90°, de bordes rectos y dispuestos al azar. Algunos contienen inclusiones de cuarzo y algunas fracturas muy pequeñas en ocasiones rellenas de calcita. Generalmente se asocia con Ep+Act+Cal+Clz. Dentro de las bandas y cuando ocurre conformando un núcleo aparece

acompañado de Cal, Act y Pl (ser), donde todos parecen estar dispuestos al azar y con un mayor tamaño de grano (Figura 22, 23).

-Actinolita: Predominan los individuos heteroblásticos, xenoblásticos, de hábito tabular a hojoso, de color verde claro, con débil pleocroísmo, con birrefringencias pardo amarillentas y otras azul verdosa. La mayoría se orientan concordantes con la foliación principal, aunque en ocasiones ocurren orientados perpendiculares a esta e incluso dispuestos al azar. Generalmente se encuentra asociada a Di+Ep+Clz. En algunos cristales es posible encontrar inclusiones de Qtz sin orientación preferencial (Figura 22, 23).

-Calcita: habitualmente ocurre como Individuos xenoblásticos, heteroblásticos, con bordes rectos a moderadamente irregulares y de hábito granular. Es frecuente la macla polisintética y exfoliación romboédrica. Algunos cristales de calcita se encuentran alargados concordantes con la foliación principal. Su distribución es homogénea y está asociada principalmente a la Act, Ep, Di y Pl(ser) en contacto neto. La calcita ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos. También ocurre, aunque con menor frecuencia rellenando fracturas (Figura 22, 23).

-Plagioclasa: ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos, comúnmente exhibe un débil maclado y leve coloración verdosa. En algunos casos se encuentra totalmente alterada a sericita, los que no se están alterados siguen presentando maclado. En ocasiones se presenta muy fracturada, con algunas de estas fracturas rellenas de sericita. También es posible observar a algunos (dos) individuos idioblásticos con geometría rectangular dentro de una matriz de calcita. Es común encontrarla en contacto con grandes cristales de diopsido (Figura 23).

-Sericita: Se presenta con aspecto moteado, principalmente rellenando fracturas, en ocasiones verticales.

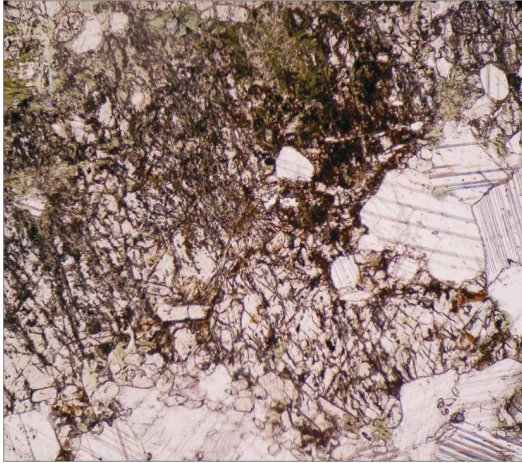
-Epidota: Ocurre a manera de Individuos heteroblásticos, xenoblásticos, incoloros de alto relieve, con pleocroismo moderado. Varios de ellos presentan zonación, bordes rectos, algunos de los cristales poseen hábito casi granular, otros ocurren como cristales alargados concordantes con la foliación principal. Su aumento de tamaño de grano y su mayor ocurrencia se observa en los alrededores del Di hacia los extremos y contactos con ciertas bandas. La Epidota se encuentra asociada principalmente a la Clz y Act (Figuras 22, 23).

-Cuarzo: El cuarzo en esta zona se presenta en poca cantidad y ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos dispersos, ocasionalmente ocurre concentrado en sectores muy locales de algunas bandas, asociado al diopsido. También como inclusiones en diopsido, actinolita y finalmente rellenando algunas fracturas.

-Clinzoicita: Individuos heteroblásticos, xenoblásticos, casi incoloros, con birrefringencia moderada, de grano fino, algunos alargados concordantes con la foliación principal. Se asocia principalmente al Di, Ep, Act. Aumenta su tamaño y ocurrencia a medida que se ubica en los alrededores del Di (Figura 23).

-Titanita: La titanita ocurre como individuos homeoblásticos, subidioblásticos dispersos y asociados principalmente a calcita y Pl (ser).

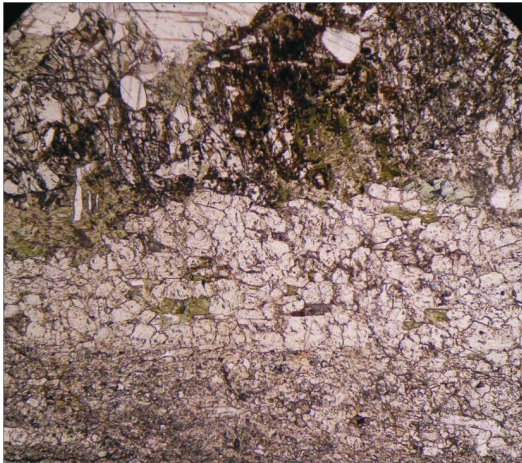
-Hornblenda: Aparece en contacto neto con Act, Cal y diopsido (Figura 23).



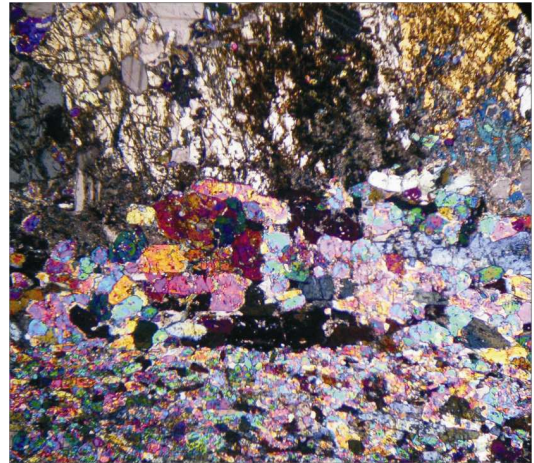
a



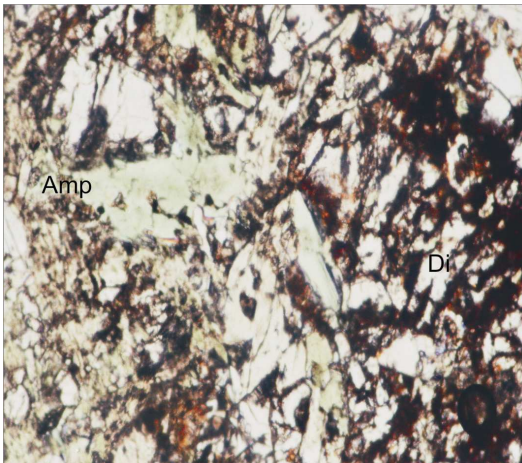
b



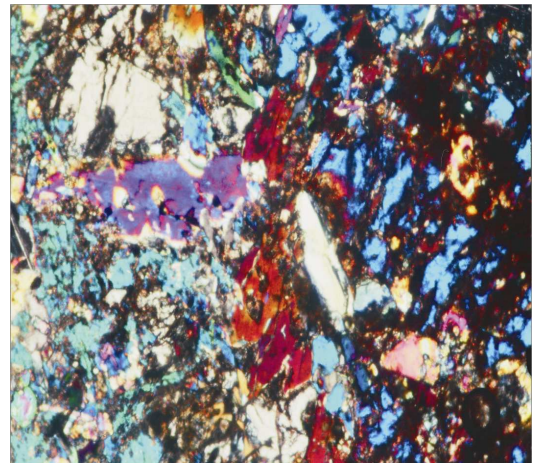
c



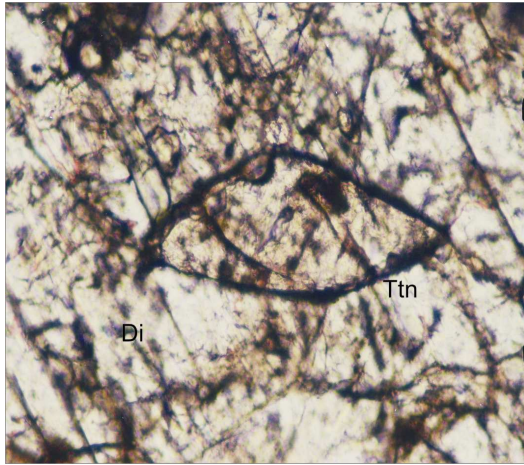
d



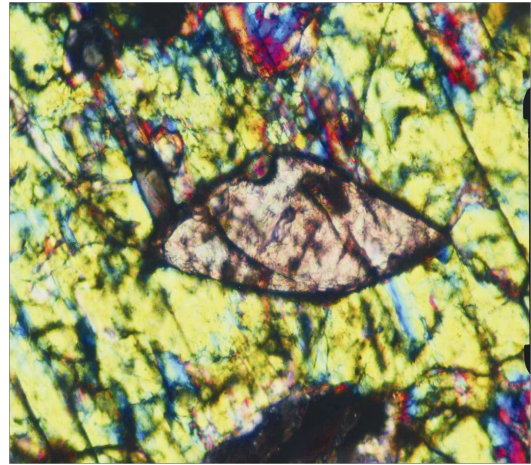
e



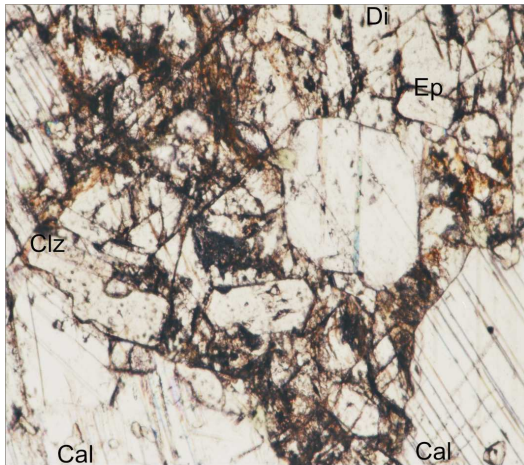
f



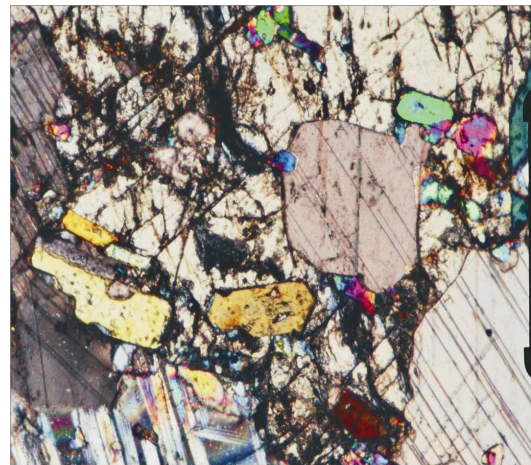
g



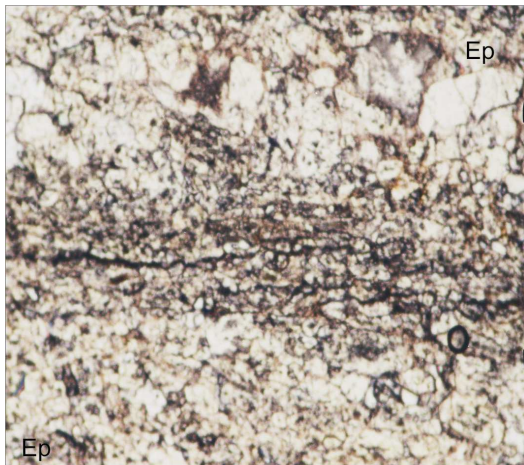
h



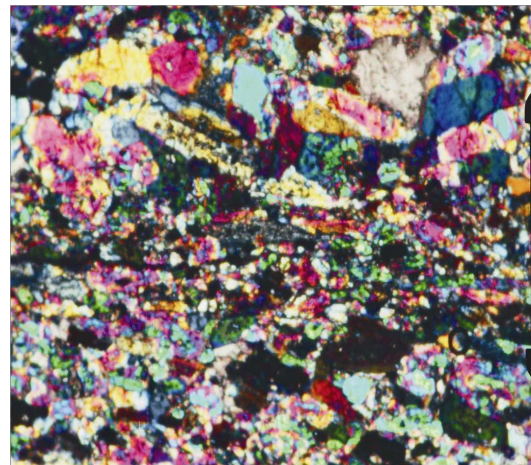
i



j



k



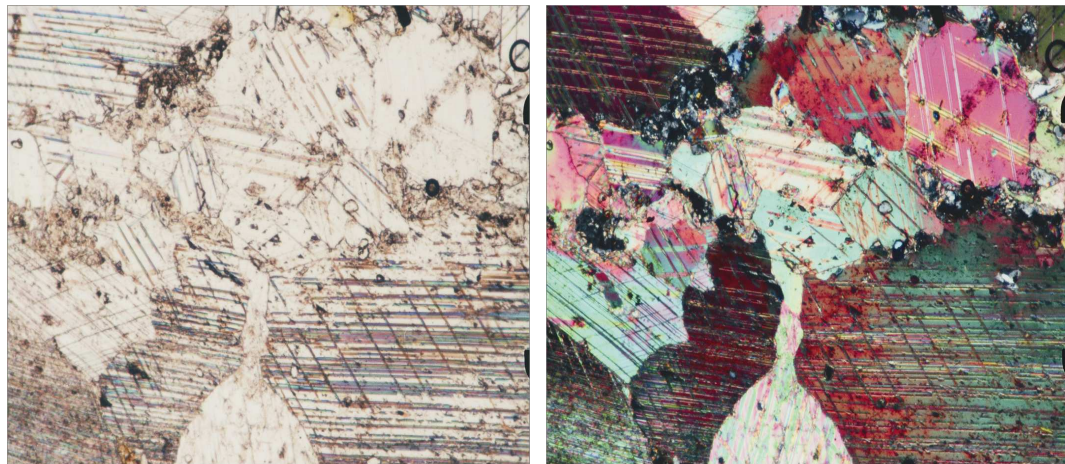
l

Figura 23. (a) y (b) Microfotografías de la muestra RCS-15R correspondientes a la zona IV tipo DA en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Diopsido como individuos de gran tamaño, presentando birrefringencias altas de color naranja brillante y bajas de color crema suave, nótese la exfoliación perfecta a 90°. Se observa en menor cantidad Cal exhibiendo maclado y exfoliación romboédrica, Amp de color verde y minerales del grupo de la epidota. Aumento 8x. (c) y (d) Microfotografía de la muestra RCS-15R en nícoles paralelos y cruzados respectivamente. Se observa el contacto entre banda de la zona III tipo A (abajo) y banda de la zona IV tipo DA (arriba), nótese el aumento de los minerales del grupo de la epidota justo hacia el contacto. Aumento 8x. (e) y (f). Microfotografías de la muestra RCS-15R en la cual se observa el diopsido con colores de birrefringencia azules en contacto con el Amp. Aumento 8x. (g) y (h). Microfotografías de la muestra RCS-12C en la cual se observa un individuo de Ttn con un alto relieve y birrefringencia moderada. En los alrededores se observa el Di con colores de birrefringencia fuertes y presentando una traza de exfoliación. Aumento 20x. (i) y (j). Microfotografías de la muestra RCS-15R en la cual se observa la mineralogía típica de la Zona IV. Nótese la disposición de la Ep, Cal, Clz y Di. Aumento 8x. (k) y (l). Microfotografías de la muestra RCS-15R. Nótese aumento en el tamaño de las epidotas justo hacia el contacto entre las zonas de reacción III y IV. Aumento 8x.

10.2.5. Zona VII.

Esta zona de reacción (Tabla 2) ha sido identificada en mármoles denominados como tipo M, cuya descripción petrográfica se resume a continuación.

En la Figura 24 se ilustra un ejemplo de textura granoblástica, la cual es característica en esta zona de reacción.



a

b

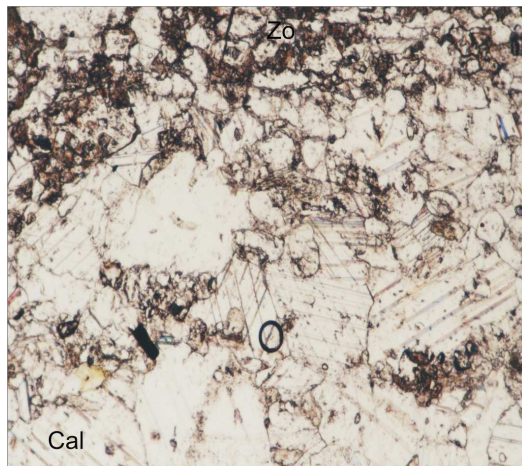
Figura 24. Microfotografías correspondientes a la muestra RCS-16 en donde se observa la típica textura granoblástica correspondiente a la zona VII tipo M. Aumento 8x.

La composición mineralógica analizada en bandas correspondientes a la zona VII consta generalmente de Cal, Dol (en menor proporción) a manera de minerales principales y Act como mineral menor.

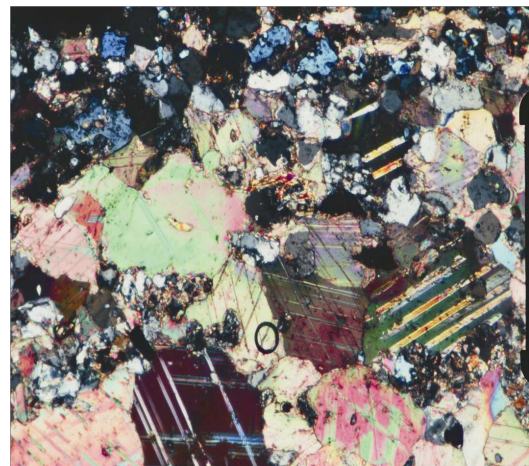
-Calcita: ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos de 1 mm los más pequeños hasta 3 mm los de mayor tamaño, el cual aumenta a medida que se acerca al contacto con bandas anfibolíticas de la zona III. Sin embargo es posible que ocurra Cal subidioblásticas de bordes rectos y contacto neto aunque predominan los bordes irregulares en los cristales dispuestos al azar. (Figura 24, 25).

-Dolomita: Ocurre como individuos heteroblásticos, xenoblásticos, predominando los de mayor tamaño y alcanzando hasta los 3.5 mm, está en contacto neto con la calcita, dentro de la cual se observan algunas inclusiones de Qtz sin ninguna orientación preferencial.

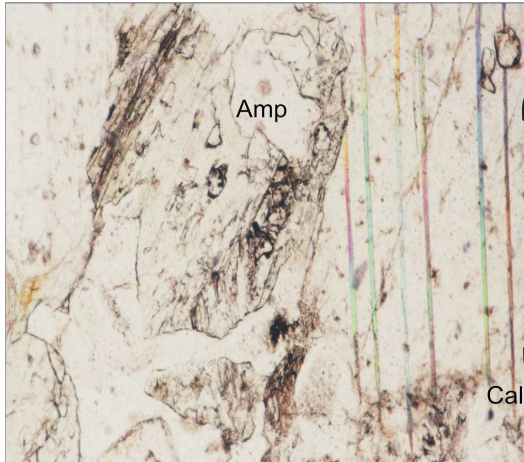
-Actinolita: Ocurre localmente en dos sectores de la muestra como individuos alargados tabulares en contacto neto con calcita y cuarzo con algo de Pl(ser) que se observa como rellenando espacios entre la Cal y Dol (Figura 25).



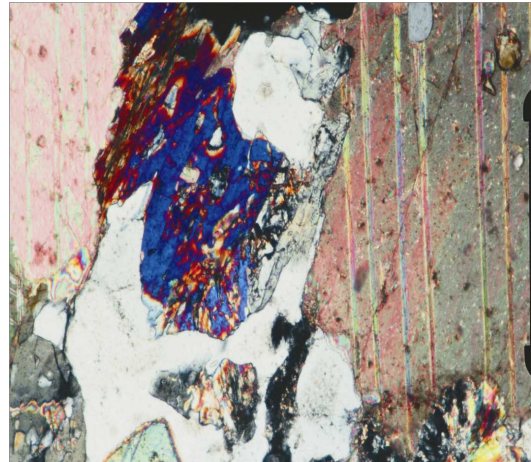
a



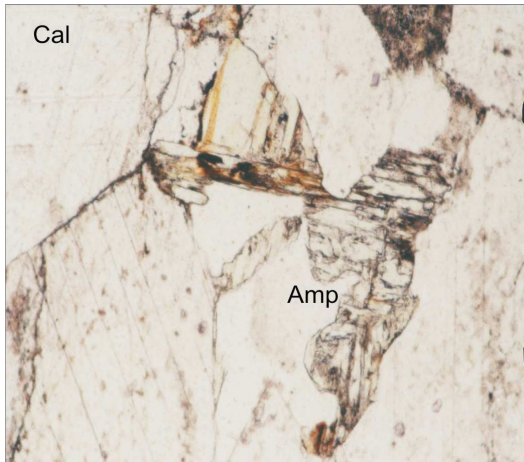
b



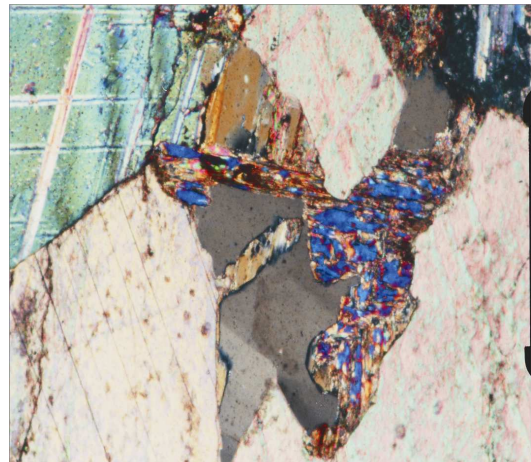
c



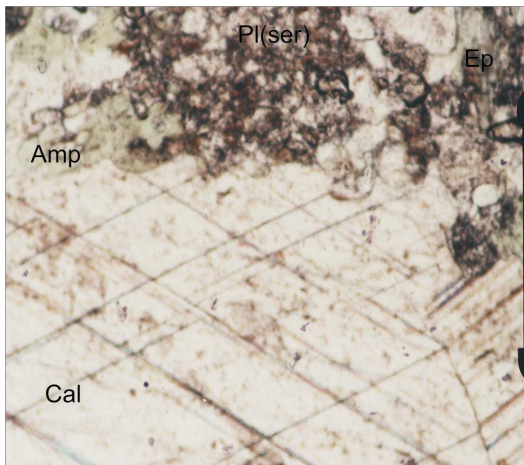
d



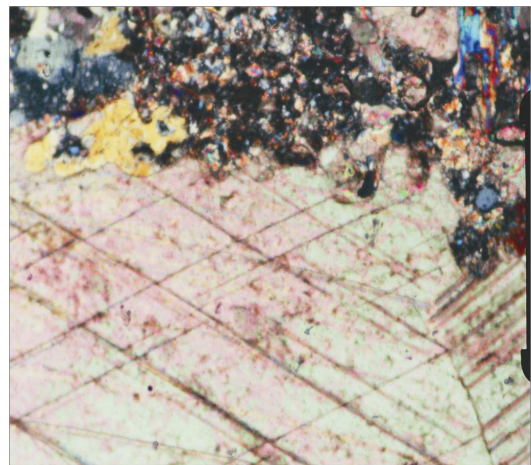
e



f



g



h

Figura 25. (a) y (b). Microfotografías de la muestra RCS-16. Se observa en la parte inferior Cal, PI algunas alteradas, y hacia la parte superior se observa la Zo en contacto con el Qtz. Aumento 8x. (c) (d) y (e) (f). Microfotografías de la muestra RCS-27 donde se identifica la Cal asociada con el Amp. Aumento 8x. (g) y (h). Microfotografía de la muestra RCS-27 en donde se observa el contacto de la Zona VII y la Zona III. Nótese en la parte inferior de la muestra Cal y hacia la parte superior se observa PI alterada a sericita, minerales del grupo de la Ep, Amp.

10.3. PARAGÉNESIS MINERALES IDENTIFICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

En la Tabla 3 dada a continuación se sintetizan las paragénesis minerales registradas en el presente estudio, así como las correspondientes zonas de reacción.

ZONAS DE REACCIÓN	PARAGÉNESIS MINERALES
Zona I.	Qtz+Pl+Bt+Ilm±Ms Qtz+Bt+Ms
Zona II.	Qtz+Pl+Bt+Fe-Hbl+Grt+Tit Qtz+Pl+Bt+Fe-Hbl+Grt+Tit Qtz+Pl±Bt±Act+Ilm+Tit±Ep±Clz±Rut Qtz+Pl+Bt+Hbl+St+Ilm
Zona III.	Qtz+Pl+Fe-Hbl+Grt+Tit Qtz+Pl+Act+Grt+Zo±Clz±Ep+Tit Cal+Act+Tit±Qtz±Pl±Clz±Ilm Qtz+Pl+Act+Tit±Grt±Ep±Clz Zo+Clz+Act+Qtz±Cal±Dol
Zona IV.	Qtz+Pl+Fe-Hbl+Di+Grt ±Zo+Tit±Cal Cal+Act+Ep+Clz+Zo+Tit±Qtz±Pl±Di±Grt
Zona VII	Cal+Dol

Tabla 3. Zona I: esquistos pelíticos; Zona II: Roca calcosilicatada con contenido de Bt-Amp; Zona III: Roca calcosilicatada rica en Amp; Zona IV: Roca calcosilicatada con contenido de Amp-Di; Zona VII: Mármol

11. ASPECTOS PETROGENÉTICOS DE LAS ZONAS DE REACCIÓN

Los carbonatos y carbonatos silíceos forman tan solo una pequeña fracción de la corteza, pero su metamorfismo es muy importante debido a que pueden revelar información significativa acerca de la composición de la fase fluida metamórfica, así como de las condiciones de P-T. La evolución de paragénesis minerales calcosilicatadas constituye el principal monitor de la cantidad de fluido infiltrado en la roca. Mientras que en el metamorfismo de pelitas y metabasitas envuelve únicamente H₂O durante el metamorfismo prógrado, las rocas metacarbonatadas involucran H₂O y CO₂ siendo estas rocas la fuente más importante del CO₂ involucrado durante el metamorfismo regional, debido a esto el entendimiento del metamorfismo de estas rocas requiere un análisis de equilibrio de fase en presencia de una mezcla de H₂O-CO₂ fluida, aunque halla una incertidumbre considerable que permanece con los procesos de liberación de fluidos y transporte (Ague, 2002).

Como un primer aspecto a ser considerado tiene relación con la pérdida de volátiles en secuencias metasedimentarias, como un proceso que ocurre durante el metamorfismo regional jugando así un rol muy importante dentro del ciclo de volátiles a través de la Tierra. De tal manera, la desvolatilización resultó del calentamiento y flujo de fluidos durante la dinámica regional de la Fm Silgará y estas zonas de reacción calcosilicatadas ocurren en esta unidad metamórfica conteniendo paragénesis minerales que representan las mayores cantidades de desvolatilización en reacciones prógradas, (Ríos & Castellanos, comunicación personal), las cuales han sido documentadas hacia los bordes de las capas metacarbonatadas en contacto con los alrededores de esquistos pelíticos y reacciones en bordes adyacentes a venas de Qtz. Muchas RCS estudiadas, especialmente las que contienen diopsido, aparecen definiendo de manera clara zonas de reacción con una composición mineral que se despliega desde esquistos pelíticos hasta mármoles. Esta secuencia de zonas es similar

a las descritas en otras zonas de reacción calcosilicatadas (ej: Thompson, 1975; Kerrick, 1977; Ague, 2002, 2003).

Se estima que las composiciones de los fluidos en rocas metacarbonatadas presta particular atención a las zonas de reacción de Diopsido, las cuales muestran las composiciones más altas ricas en H₂O, como es lo requerido por la topología de las reacciones que producen diopsido (Ague, 2003). Algunos cálculos revelan pocas diferencias en XCO₂ (fracción molar de CO₂) entre capas metacarbonatadas y las zonas de reacción que aumentan hacia los contactos litológicos o en bordes de venas de acuerdo a la composición química (Ague & Rye 1999).

Se han inferido grandes cambios en XCO₂ a través de una zona de reacción adyacente a venas de Qtz (Tracy et al, 1983). No hay duda que las reacciones prógradas y pérdida de CO₂ han ocurrido en las capas metacarbonatadas de la secuencia metamórfica de la Fm Silgará después de la infiltración de H₂O, la cual se pudo haber generado por deshidratación en torno a los esquistos pelíticos (ej: Hewitt, 1973; Ague y Rye, 1999; Ague, 2002) o por fuentes externas para las rocas metasedimentarias (Tracy et al, 1983; Ague y Rye, 1999).

El CO₂ producido es transportado a través de las capas por dispersión hidrodinámica, pero también puede ser transportado por advección (flujo de fluido) inferida paralela a las capas (Ague, 2003) (Figura 26). La baja XCO₂ del fluido de las zonas ricas en diopsido estuvo presente en condiciones con picos de P-T que no han podido ser diferenciados desde las zonas inmediatamente adyacentes, implicando que estos parámetros (P y T) no fueron las principales variables que controlaron la formación de zonas ricas en diopsido (Ague, 2003). Probablemente la baja XCO₂ de estas zonas de reacción se produjo cuando el flujo producido por la deshidratación en torno a los esquistos pelíticos combinado con un fluido externo rico en H₂O, el cual probablemente se desplegó desde magmas sinmetamórficos (masas de ortoneis) que fueron

emplazados hacia los niveles estructurales más bajos de la Fm Silgará, penetrando principalmente a lo largo de contactos y a través de fracturas.

Estas zonas de reacción se han caracterizado por la forma de los contactos y por un bajo número de fases que son estables en cada zona, cuya formación pudo ser controlada por procesos de difusión determinados por gradientes de potencial químico (Joesten, 1977). Otro posible origen para las zonas de reacción sugerido por otras RCS es por infiltración. Para las RCS examinadas aquí, hay, sin embargo, varios argumentos que sugieren una limitada influencia de este factor. Primero porque las rocas metamórficas tienen baja porosidad, entonces la circulación del fluido debió ser restringida, produciendo bandas de reacción a pequeña escala. Segundo porque los procesos de infiltración no pueden generar una distribución simétrica de bandas calcosilicatadas desde las metapelitas hacia el mármol en ambos lados de las intercalaciones metapelíticas. (Ríos & Castellanos, comunicación personal)

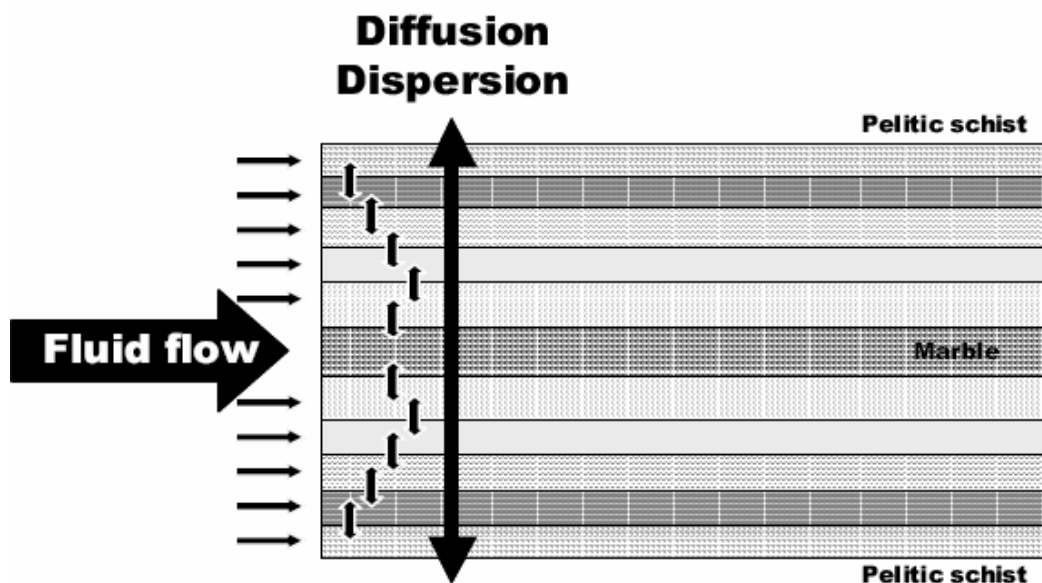


Figura 26. Diagrama esquemático que ilustra el comportamiento de la fase fluida regional, la cual es paralela a los contactos litológicos. Esquema adaptado y modificado por Ague (2003).

12. DISCUSION

La formación de rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción entre esquistos pelíticos y mármoles de la Formación Silgará, pueden producirse por metamorfismo isoquímico de rocas carbonatadas puras o bien sea por introducción metasomática de sílice o por una combinación de esos dos procesos. Las capas de mármol reconocidas en la secuencia metamórfica de la Fm Silgará, no tienen suficiente sílice para producir las RCS, a pesar de que también ocurren cuarcitas y rocas carbonatadas con algún contenido de sílice.

Se adopta el término de “barren calc-silicate rocks” para las RCS que ocurren en esta región, teniendo en cuenta que estas se caracterizan por la presencia de diopsido, aunque no contengan wolastonita, diferenciándolas de las rocas calcosilicatadas que contienen wolastonita, las cuales son producidas por metasomatismo de rocas metacarbonatadas casi puras (Ríos & Castellanos, comunicación personal). La circulación de fluidos debió reaccionar con los carbonatos convirtiéndolos en calcosilicatos, y cuando todos los carbonatos fueron consumidos, no hubo más reacciones, así que la sílice debió ser transportada a otras partes como fluidos hidrotermales donde esta es soluble.

La ausencia de rocas calcosilicatadas que contienen wolastonita, puede ser debido a que estas rocas requieren de un protolito más rico en calcita, comparado con el de las “barren calc-silicate rocks”, o pérdidas de Mg durante el metasomatismo (Ríos & Castellanos, comunicación personal). Sin embargo, si las rocas calcosilicatadas fueron producidas por metasomatismo, los efectos químicos de estos procesos deben ser explicados, fijando nuestra atención en el comportamiento y condiciones requeridas para que la acción de fluidos incorporados al proceso metasomático se constituya como una de las tesis más

relevantes en la producción de zonas de reacción dentro de las rocas calcosilicatadas.

En este orden de ideas, el flujo fluido juega un papel muy importante en el calentamiento y transporte de masa dentro de la corteza, su acción está fuertemente controlada por la estructura permeable entre capas, las cuales producen un flujo de fluido subhorizontal entre unidades litológicas altamente permeables (Cui et al, 2001). Además una componente de este flujo fluido pudo ser subhorizontal a lo largo del buzamiento, con una extensa componente que debió haber sido subvertical a través de fracturas que cortan las capas calcáreas (ej: Cui et al, 2001; Nabelek, 2002), no obstante, los efectos relacionados a cambios de permeabilidad transitoria asociados con reacciones minerales sobre calor y flujo fluido, las cuales son muy importantes para el bandeamiento de secuencias metasedimentarias, donde las reacciones metamórficas de desvolatización probablemente son más considerables en capas calcosilicatadas que en cualquier capa de shale o limonita, no son bien entendidas (ej., Hover-Granath et al., 1983). Estos autores determinaron que aquellas reacciones metamórficas en capas de mármol, ocurren en equilibrio con una fase fluida rica en CO₂, mientras que en capas de argilitas calcáreas ocurren en presencia de fluidos progresivamente más ricos en H₂O con incrementos del grado metamórfico. El metasomatismo puede involucrar cambios de masa significativos, los cuales son una clave importante para entender su geoquímica aunque, son difíciles de cuantificar, sin embargo, se han podido establecer restricciones mediante varios argumentos estequiométricos y suposiciones geoquímicas. La wolastonita es comúnmente producida por la reacción $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$. Si toda la sílice es introducida y el dióxido de carbono es perdido, entonces la estequiometría de la reacción indica que habrá una ganancia de masa. Por lo contrario, si toda la sílice estuvo originalmente presente en el protolito, entonces deberá haber una pérdida de masa. (Ríos & Castellanos, comunicación personal).

Los incrementos en transferencia de masa metasomática hacia los contactos y venas demuestra la importancia de dispersión hidrodinámica, concordando con

los resultados del modelo reacción-transporte (Ague, 2003) (Figura 27). Las secuencias regulares de paragénesis observadas hacia contactos litológicos y en bordes de venas, las cuales no han sido aún establecidas en el MCS, son clásicos indicadores de transferencia de masa por dispersión hidrodinámica (ej., Vidale, 1969; Hewitt, 1973; Vidale & Hewitt, 1973; Joesten, 1974; Thompson, 1975; Brady 1977; Ashworth & Sheplev, 1997; Abart et al., 2001, Ague, 2003).

Ríos & Castellanos (comunicación personal), suponen que gran parte del flujo fluido regional debió ocurrir paralelo a la estratificación o a través de fracturas, lo cual es consistente con estudios previos realizados en otros cinturones metamórficos (ej., Hewitt, 1973; Rye et al., 1976; Tracy et al., 1983; Bickle & Baker, 1990; Ague, 1994b; Ferry, 1994; Ague, 2000; Ague, 2003), y que se ilustra en la Figura 28. De acuerdo con Ague (2003), una componente considerable del flujo fluido paralelo entre capas se concentró a lo largo de contactos metapelíticos-metacarbonatados separando internamente zonas de reacción con diferentes propiedades (tales como tamaño de grano y mineralogía) dentro de capas metacarbonatadas individuales, lo cual es soportado por el abatimiento de una fuente local relacionada a fracturas. Debido a que las rocas metacarbonatadas y metapelíticas tienen diferentes propiedades físicas, entonces sus contactos probablemente presentaron áreas de debilidad mecánica, en algunos casos relacionados a elevadas presiones de fluidos durante la reacción (Walther, 1996). El fracturamiento hacia los contactos litológicos incrementó la porosidad y permeabilidad (Ague, 1995). Por otra parte, reacciones conducidas por infiltración de fluidos a lo largo de contactos debieron incrementar la porosidad de la roca y permeabilidad a escala de grano, generando un flujo paralelo a las capas entre las áreas en contacto (Balashov & Yardley, 1998).

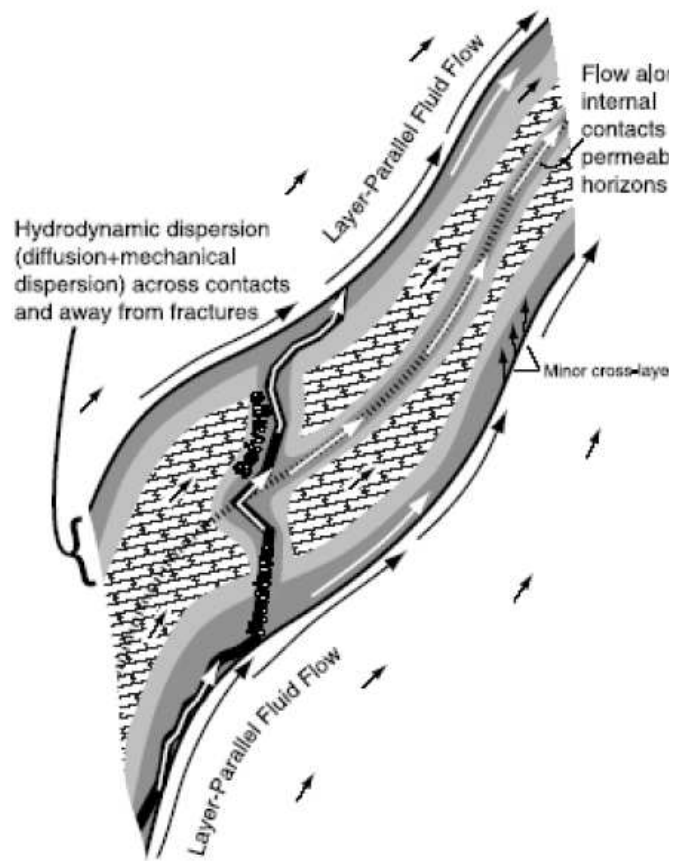


Figura 27. Esquema de corte de las capas metacarbonatadas que ilustran procesos de infiltración (Agué 2003). La mayoría del fluido circula plano paralelo a las capas o a través de fracturas. El flujo está concentrado a lo largo de los contactos litológicos y a través de las fracturas y zonas permeables. El tamaño de las flechas es cualitativamente proporcional al flujo de fluido. La mayoría de las reacciones fluido roca y metasomatismo son mostradas en el esquema como bandas de color gris oscuro, y las menores con color gris claro

13. CONCLUSIONES

Se identificaron, mediante reconocimiento en campo la ocurrencia de las rocas metacarbonatadas y asociadas y su disposición en el área de estudio. Como consecuencia de esta ocurrencia se elaboró una columna litoestratigráfica la cual arrojó la distribución de las rocas calcosilicatadas que se forman como bandas de reacción hacia el contacto entre esquisto pelíticos, anfibolitas y mármoles, enmarcadas dentro de la Fm Silgará.

Se prepararon las diferentes secciones delgadas para el respectivo análisis petrográfico y mineralógico. Con base en este análisis se pudo establecer que las rocas calcosilicatadas se forman como bandas de reacción, presentando cada sección delgada una o más bandas con una gran variedad mineralógica y por consiguiente diversas paragénesis que las identifican y las clasifican.

Con base en las diferentes paragénesis minerales se evidencia la presencia de las zonas de reacción propuestas en el estudio, las cuales suministran información valiosa sobre el comportamiento de la fase fluida durante el metamorfismo y contribuyen a un mayor entendimiento sobre la evolución metamórfica del Macizo de Santander en el contexto de los Andes Colombianos.

Una paragénesis representativa, que ocurre en el contacto entre dos zonas de reacción es la que se forma por $\text{Grt}+\text{Cpx}+\text{Amp}+\text{Pl}$, la cual podría ser estable a condiciones de $T \sim 650^\circ\text{C}$, $P = 7.4\text{-}8.2 \text{ kbar}$ y $X_{\text{CO}_2} = 0.11\text{-}0.16$, como ha sido determinado en otros contextos regionales, aunque en el área de estudio se han estimado condiciones de presión y temperatura de la secuencia metapelítica del Silgara (e.g., Garcia et al., 2005), es necesario hacer cálculos de X_{CO_2} .

Con base en el estudio mineralógico y petrográfico de las rocas estudiadas se propone una incidencia de los procesos metasomáticos combinados con los aspectos petrogenéticos asociados al metamorfismo isoquímico, pues además de los factores de P-T, se hace notable la transferencia metasomática de constituyentes por circulación de fluidos a partir de magmas sinmetamórficos, migrando a través de los contactos litológicos y fracturas por procesos de dispersión hidrodinámica y difusión, más que por procesos de infiltración.

Teniendo en cuenta los aspectos petrográficos, mineralógicos y petrogenéticos estudiados en las rocas metacarbonatadas que forman parte de la secuencia metamórfica de la Fm Silgará en el Macizo de Santander, se propone una mineralización no económica “reacción cálcica exoskarn” (excepto por la explotación de mármol). (Ríos & Castellanos, comunicación personal).

Se propone este nombre, ya que la composición y textura que caracterizan a un skarn, es compatible con este tipo de rocas, considerando además los siguientes aspectos:

Los skarn pueden formarse durante metamorfismo regional o de contacto y desde una variedad de procesos metasomáticos que involucran fluidos magmáticos, metamórficos, meteóricos y/o de origen marino; Se pueden encontrar adyacentes a plutones, a lo largo de fallas, principales zonas de cizalla, en sistemas geotermales someros, en el fondo del piso marino y en la parte más baja de la corteza en terrenos metamórficos profundamente enterrados; Lo que define una roca como skarn es su mineralogía la cual incluye una variedad de minerales calcosilicatados y asociados usualmente dominados por granate y piroxeno.

El alcance de esta investigación permitió caracterizar las rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción con base en análisis microscópicos y petrográficos vislumbrando además las principales causas y procesos que dieron origen a este tipo de rocas, a partir de contextos similares al nuestro que ocurren en otras partes del mundo, cuya relación será más consistente en

la medida que se profundice en etapas posteriores al presente estudio con la obtención de datos químicos a partir análisis de microsonda, difracción de rayos x, y en general con la química mineral, que permitan clarificar y precisar valores en cuanto a relaciones de fase y condiciones metamórficas.

BIBLIOGRAFIA

ABART R. Phase equilibrium and stable isotope constraints on the formation of metasomatic garnet-vesuvianite veins. *Contrib. Mineral. Petrol* Vol 122. SW Adamello, N Italy, pp116-133.

BERMAN, R.G. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *American Mineralogist* Vol. 75. 1990. pp. 328-344.

BRADY, J.B. Metasomatic zones in metamorphic rocks. *Geochim Cosmochim Acta* 41. 1977. pp.113-125.

CONNOLLY, J.A.D. Multivariable phase diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics. *American Journal of Science* Vol. 290. pp. 666-718.

CUI, X., NABELEK, P.I., AND MIAN, L. Heat and fluid flow in contact metamorphic aureoles with layered and transient permeability, with implication to the Notch Peak aureole, Utah. *Journal of Geophysical Research* Vol. 106. (2001). pp. 6477-6491.

DROOP, G.T.R., AND AL-FILALI, I.Y. Interaction of aqueous fluids with calcareous metasediments during high-T, low-P regional metamorphism in the Qadda area, southern Arabian Shield. *Journal of Metamorphic Geology* Vol14. 1996. pp.613-634.

JOESTEN, R. Evolution of mineral assemblage zoning in diffusion metasomatism. *Geochimica and Cosmochimica Acta* Vol. 41. 1977. pp. 649-670.

JOESTEN, R. Local equilibrium in metasomatic processes revisited: diffusion-controlled growth of chert nodule reaction rims in dolomite. *American Mineralogist* Vol. 76. 1991. pp. 743-755.

KERRICK, D.M. The genesis of zoned skarns in the Sierra Nevada, California. *Journal of Petrology* Vol. 18. 1977. pp. 144-181.

KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* Vol. 68. 1977. p. 277-279.

LEAKE, B.E. Nomenclature of amphiboles. *Canadian Mineralogist* Vol. 16. 1978. pp. 501-520.

NABELEK, P.I. Calc-silicate reactions and bedding-controlled isotopic exchange in the Notch Peak aureole, Utah: implications for differential fluid fluxes with metamorphic grade. *Journal of Metamorphic Geology* Vol. 20. 2002. pp. 429-440.

THOMPSON, A.B. Calc-silicate diffusion zones between marble and pelitic schist. *Journal of Petrology* Vol. 16. 1975. pp. 314-346.

THOMPSON, J.B., JR. Local equilibrium in metasomatic processes. *Res. Geochem* Vol. 1. 1959. p. 427-457.

BOINET, T., BOURGOIS, J., BELLON, H., AND TOUSSAINT, J. Age et repartition du magmatisme pré-mésozoïque des Andes de Colombie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles* Vol. 300(II). 1985. pp. 445-450.

BUCHER K. & FREY M, *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 6th Edition. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. 1994. 318p

CASTELLANOS, O. Chemical composition of the rock-forming minerals in the Silgará formation and P-T conditions in the Mutiscua area, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. Unpublished Master Thesis, Shimane University, Matsue (Japan). 2001. 146p.

CASTELLANOS, O., RÍOS, C., AND TAKASU, A. Chemically sector-zoned garnets in the metapelitic rocks of the Silgará Formation in the central Santander Massif, Colombian Andes: occurrence and growth history. *Boletín de Geología UIS* Vol. 26. 2004. pp 91-118.

DÖRR, W., GRÖSSER, J., RODRIGUEZ, G., AND KRAMM, U. Zircon U-Pb age of the Paramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences* Vol. 8(2). 1995. pp187-194.

GARCÍA, C. Y CASTELLANOS O. Petrografía de la Formación Silgará en la Cordillera Oriental, Colombia. X Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires, Argentina, Memorias, T.2. 1998. pp.263-268.

GARCÍA, C. Y RÍOS, C. Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe final Proyecto de Investigación. Universidad Industrial de Santander – Conciencias 1999. 191p.

GARCÍA, C. Y CAMPOS, N. Composición química y mineralogía de las biotitas metamórficas del sector central del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología*, Vol. 22 (37). 2000. pp18-27.

GOLDSMITH, R., MARVIN, R., AND MEHNERT, H. Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, Vol. 750-D. 1971. D41-D49.

JULIVERT, M. La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga. Boletín de Geología / Universidad Industrial de Santander (Colombia), Vol. 1. 1958. pp.7-44.

JULIVERT, M. Geología de la vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. Boletín de Geología / Universidad Industrial de Santander (Colombia), Vol. 3. 1959. pp.15-34.

JULIVERT, M. Las estructuras del valle medio del Magdalena y su significación. Boletín de Geología / Universidad Industrial de Santander (Colombia), Vol. 6 1961^a. pp. 33-52.

JULIVERT, M. Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga. Boletín de Geología / Universidad Industrial de Santander (Colombia), Vol. 8. 1961b. pp. 39-42.

JULIVERT, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. Boletín de Geología / Universidad Industrial de Santander (Colombia), Vol. 3, pp. 15-34.

JULIVERT, M. Cover and basement tectonics in the Cordillera Oriental of Colombia, South America, and a comparison with some other folded chains. Geological Society American Bulletin, Vol. 81. 1970. pp. 3623-3643.

KERR, P. Optical Mineralogy. McGraw-Hill, New York, 1965. 442p.

MONTENEGRO, G., BARRAGÁN, M. Metamorfismo y Evolución Metamórfica del área comprendida entre los municipios de Vetás (Santander) y Mutiscua (Norte de Santander). Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Colombia). 1999

RÍOS, C. Y GARCÍA, C. 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*, Vol. 23(38). 2001. pp. 51-59.

SCHÄFER, J., GRÖSSER, J., AND RODRÍGUEZ, G. Proterozoic Formation Silgará, Cordillera Oriental, Colombia: metamorphism and geochemistry of amphibolites. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, 1997 (3-6). 1998. Stuttgart, 531-546.

SPEAR, F. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington. 1993. DC, 799p.

YARDLEY, B., MACKENZIE, W., AND GUILDFORD, C. *Atlas of metamorphic rocks and their textures*. Longman, London. 1990. 120p.

WARD, D., GOLDSMITH, R., JIMENO, V., CRUZ, B., RESTREPO, H., AND GÓMEZ, R. *Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, Colombia*. INGEOMINAS. 1969^a.

WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., TELLEZ, I., AND JARAMILLO, C. *Mapa Geológico de San Gil y Málaga (parte de los Cuadrángulos I-12 y I-13), Colombia*. INGEOMINAS. 1969^b.

WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., JARAMILLO, C., AND VARGAS, L. *Mapa Geológico del Cuadrángulo H-13, Pamplona, Colombia*. INGEOMINAS. 1970.

WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., JARAMILLO, C., AND RESTREPO, H. *Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander*. U.S. Geological Survey e INGEOMINAS. *Boletín Geológico*, Vol. XXI(1-3). 1973. pp. 1-132.