

**ESTUDIO COMPOSICIONAL Y PARAGENETICO DE LAS TURMALINAS
PRESENTES EN ROCAS METAMORFICAS DE LA FORMACION SILGARÁ
(CERRO DE LAS ANTENAS, MUNICIPIO DE PAMPLONA):
IMPLICACIONES GENETICAS**

**CARLOS AUGUSTO QUIROZ PRADA
YENNY YULIETH HERNANDEZ DUARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO COMPOSICIONAL Y PARAGENETICO DE LAS TURMALINAS
PRESENTES EN ROCAS METAMORFICAS DE LA FORMACION SILGARÁ
(CERRO DE LAS ANTENAS, MUNICIPIO DE PAMPLONA):
IMPLICACIONES GENETICAS**

**CARLOS AUGUSTO QUIROZ PRADA
YENNY YULIETH HERNANDEZ DUARTE**

Trabajo de grado para optar al título de GEÓLOGO

Director:

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander (UIS), la Escuela de Geología. Al director del Proyecto de Investigación Luis Carlos Mantilla Figueroa por el apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto. Al grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) por permitirnos usar su laboratorio, y a la planta docente de la Escuela de Geología que contribuye con la formación de excelentes profesionales

A nuestros padres y hermanos por el apoyo y compañía incondicional que nos han brindado durante este proceso de formación académica.

A Ana Suarez, por su ayuda, compañía e incondicional apoyo en este proceso.

A todos nuestros compañeros de geología y tantas otras personas que de una u otra forma han contribuido con nuestro crecimiento personal y profesional. El primer autor agradece especialmente a Kate, a Tata y a Amarilla por estar siempre ahí.

CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN.....	14
1. ANTECEDENTES Y CONTEXTO GEOLÓGICO	16
1.1 BASAMENTO ÍGNEO-METAMÓRFICO	16
1.2 GENERALIDADES DE LAS TURMALINAS	19
2. METODOS ANALÍTICOS	21
3. RESULTADOS	23
3.1 LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS Y RELACIONES LITOLÓGICAS	23
3.2 PETROGRAFÍA DE LOS ESQUISTOS TURMALINÍTICOS Y ESQUISTOS CUARZO-MUSCOVÍTICOS	30
3.2.1 Esquistos Turmaliníticos	30
3.2.2 Esquistos Cuarzo-Muscovíticos	34
3.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	36
3.4 GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL DE LOS ESQUISTOS TURMALINÍTICOS.....	38
3.5 MICROSONDA ELECTRÓNICA.....	41
3.6 CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL DE LAS TURMALINAS POR MEDIO DEL SOFTWARE WINTCAC.....	44
4. CONCLUSIONES.....	46
5. RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estándares de calibración usados para el análisis con microsonda electrónica	22
Tabla 2. Fases cristalinas en las muestras LEA 24-M1 y LEA 24-M4 detectadas por medio del análisis de difracción de rayos X (DRX).	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: mapa geológico del macizo de Santander..	17
Figura 2: mapa de localización geográfica, vías de acceso y relación espacial con el casco urbano más cercano al área de estudio.....	19
Figura 3: mapa geológico del sector del Cerro de las Antenas.	25
Figura 4: fotografías de las pegmatitas relacionadas con el granito de durania..	26
Figura 5: fotos de afloramiento del cerro de las antenas.....	27
Figura 6: localización geográfica de las nueve (9) muestras seleccionadas para análisis de laboratorio.....	28
Figura 7: imágenes de la variación del contenido de turmalina en las muestras del presente estudio.	29
Figura 8: esquistos turmaliníticos.....	32
Figura 9: esquistos turmaliníticos. Texturas.....	33
Figura 10: esquistos cuarzo-muscovíticos.	35
Figura 11: difractogramas de las muestras lea 24-m1 (d3jb) y lea 24-m4 (dj3c).	36
Figura 12: aracnigrama de los datos geoquímicos de los esquistos turmaliníticos del ca y las metapelitas del pescadero.	39

Figura 13: arcnigrama de los datos geoquímicos de los esquistos turmaliníticos del ca y las metapelitas del pescadero-normalizados respecto al manto primitivo (mcdonough., <i>et al</i> 1992).....	40
Figura 14: imágenes de los puntos de la muestra apd 53-1 analizados por microsonda electrónica.....	41
Figura 15: imágenes de los puntos de la muestra lea 24 m1.2 analizados por microsonda electrónica.....	42
Figura 16: imágenes de los puntos de la muestra lea 34 m1.2 analizados por microsonda electrónica.....	43
Figura 17: terna de clasificación de la turmalina según la ocupancia del sitio X..	45
Figura 18: terna de clasificación de la turmalina según la ocupancia del sitio Y.	45
Figura 19: esquema interpretativo del modelo preliminar generado en este estudio para explicar la génesis de las turmalinas en los esquistos del Silgará del sector del Cerro de las Antenas.....	48

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos geoquimicos de roca total	57
Anexo B. Resultados geoquimicos de las turmalinas obtenidos por microsonda electrónica	58
Anexo C. Datos arrojados por el software WinTCac para la clasificación de las turmalinas	59

RESUMEN

TITULO:

ESTUDIO COMPOSICIONAL Y PARAGENÉTICO DE LAS TURMALINAS PRESENTES EN ROCAS METAMORFICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ (SECTOR CERRO DE LAS ANTENAS, MUNICIPIO DE PAMPLONA): IMPLICACIONES GENÉTICAS*

AUTORES:

YENNY YULIETH. HERNÁNDEZ DUARTE**; CARLOS AUGUSTO QUIROZ PRADA**

PALABRAS CLAVE: MACIZO DE SANTANDER, UNIDAD ESQUISTOS DEL SILGARÁ, TURMALINA, METASOMATISMO, GRANITO DE DURANIA.

DESCRIPCIÓN:

En la parte central del Macizo de Santander (Cordillera Oriental Colombiana) aflora una franja (Pamplona-Chitagá) de rocas metamórficas, relacionadas con la orogenia Quetame-Caparonensis (Ordovícico Temprano), las cuales están agrupadas dentro de la unidad Esquistos del Silgará. Estas rocas metamórficas son cortadas localmente por cuerpos ígneos (diques pegmatíticos, sills, lacolitos y plutones), de edad Silúrico Temprano, relacionados con la unidad ígnea denominada Granito de Durania (GD). La presencia ocasional de abundante turmalina y alteraciones tipo greisen en los diques pegmatíticos, relacionados con las facies ígneas tardías del GD (de carácter peraluminico), evidencian el desarrollo coetáneo de antiguos procesos magmático-hidrotermales.

El abundante contenido de turmalina de tamaños entre (0.04mm-1cm) principalmente en la unidad Esquistos del Silgará, en litologías denominadas Esquistos Turmaliníticos (turmalinitas), ha sido observada casi siempre limitada a su proximidad a cuerpos ígneos asociados al GD, especialmente en cercanía a los diques pegmatíticos derivados de este.

Los estudios petrográficos y de difracción de rayos X en los Esquistos Turmaliníticos antes referidos y una caracterización de las turmalinas mediante microsonda electrónica y el uso del software WinTcac; permitieron reconocer dos grupos composicionales de turmalina en estas litologías: (a) una de grano fino (<0,08 mm), predominantemente dravita, relacionada anteriormente con el desarrollo del metamorfismo regional y (b) otra de grano grueso (entre 0.4 mm y 2 cm), tipos chorlo y oxy-chorlo (corta la foliación metamórfica regional) y composicionalmente similar a las turmalinas presentes en los diques pegmatíticos antes referidos.

En el contexto anterior se formula la hipótesis de un proceso aloquímico (metasomático), como responsable de la formación de las turmalinas de grano grueso (de tipo chorlo y oxy-chorlo) presentes en los Esquistos Turmaliníticos de la unidad Esquistos del Silgará. En este mismo sentido, se sugiere que este proceso aloquímico está relacionado con el emplazamiento de las facies más tardías (hidratadas) del GD.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director. Luis Carlos Mantilla Figueroa, Geólogo. Ph.D.

ABSTRACT

TITLE:

COMPOSITIONAL AND PARAGENETIC STUDY OF THE TOURMALINE HOSTED IN THE METAMORPHIC ROCKS FROM THE SILGARÁ FORMATION (CERRO DE LAS ANTENAS AREA, MUNICIPALITY OF PAMPLONA): GENETIC IMPLICATIONS*

AUTHORS:

YENNY YULIETH. HERNÁNDEZ DUARTE**; CARLOS AUGUSTO QUIROZ PRADA**

KEY WORDS:

SANTANDER MASSIF, SILGARÁ FORMATION, TOURMALINITIC SCHIST, TOURMALINE, SCHIST, METASOMATISM, DURANIA GRANITE

DESCRIPCIÓN:

In the central zone of the Santander Massif (Colombia Eastern Cordillera) crops out a fringe (Pamplona-Chitaga) of metamorphic rocks, related to Quetame-Caparonensis orogeny (early Ordovician), which are grouped into the Schists of Silgará Unit. The metamorphic rocks are being intruded locally by igneous bodies (pegmatitic dikes, sills, laccoliths and plutons) of early Silurian age, related to the igneous unit denominated Durania Granite (GD). The occasional presence of abundant tourmaline and greisen type alterations into the pegmatitic dykes, related to the late igneous facies of GD (with peraluminous character) are evidence of the coetaneous development of magmatic-hydrothermal processes.

The abundant presence of tourmaline with sizes from around 0.04mm to 1cm in the Schists of Silgará Unit principally (restricted to the Pamplona-Chitaga fringe), in the lithology denominated Tourmalinitic schist (tourmalinites) has been almost always observed next to the GD igneous bodies, specially next to the pegmatitic dykes related to GD.

The petrographic and X-ray diffraction studies of the Tourmalinitic schists, and a tourmaline characterization using electron microprobe data in WinTCac software, allow to recognize two compositional groups of tourmaline in the Schists of Silgará unity: (a) A fine grained (<0.04mm) Dravite, previously related (in other studies) to regional metamorphism, and (b) a coarse grained (0.8 mm to 1cm) schorl and oxy-schorl type, which is tardive (cuts the regional metamorphic foliation) and is compositionally similar to the tourmaline hosted at the pegmatitic dykes referred before.

Within the context of the above mentioned it is formulated the hypothesis of an allochemical process (metasomatism) as the responsible of the coarse grained (schorl and oxy-schorl) tourmaline genesis; it is also formulated that the allochemical process is related to the emplacement of the later (hydrated) facies of GD.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director. Luis Carlos Mantilla Figueroa, Geólogo. Ph.D

INTRODUCCIÓN

La turmalina es un mineral que se forma en un extenso campo de presión y temperatura en casi todos los ambientes terrestres, y puede estar en equilibrio con fluidos terrestres de composición muy variada (Dutrow y Henry, 2011). Esto se debe principalmente a la gran flexibilidad que tiene su estructura para ajustar su composición cuando cambia el ambiente físico-químico de su entorno (Dutrow y Henry, 2011).

La presencia de turmalina relacionada a procesos magmático-hidrotermales ha sido reportada en numerosos estudios (Sillitoe *et al.*, 2003; Sillitoe 2010). Abundante turmalina se reporta en los depósitos minerales de Sn-W, relacionados con magmas reducidos, como en el caso de los depósitos Cornwall y Devon en el SW de Inglaterra (Bray y Spooner, 1983; Kettaneh y Badham, 1978). Asimismo, se reporta abundante turmalina en depósitos minerales de Cu (a manera de relleno hidrotermal, en brechas magmático-hidrotermales afectadas por alteración potásica), relacionados con magmas oxidados, como en el caso del Depósito Río Blanco-Los Bronces de Chile (Warnaars *et al.*, 1985; Frikken *et al.*, 2005).

Estudios recientes realizados en el Granito de Durania (de edad Silúrico Temprano; Botello *et al.*, 2014), que aflora en la parte central del Macizo de Santander, permitieron reconocer la presencia de rocas leucograníticas con muscovita (\pm granate), y diques pegmatíticos con turmalina y alteración tipo greisen. Estas características referidas, apuntan a que los eventos magmáticos del Silúrico Temprano en el MS se relacionan con magmas peraluminicos reducidos,

con los cuales se asocian procesos magmáticos-hidrotermales. Este hecho, sumado a la presencia de turmalinitas y esquistos turmaliníticos en las rocas metamórficas (unidad Esquistos del Silgará), circunvecinas a los diques pegmatíticos antes referidos, abre una posibilidad a la exploración mineral en el MS (Sn-W?), particularmente en lo relacionado con el magmatismo del Silúrico Temprano.

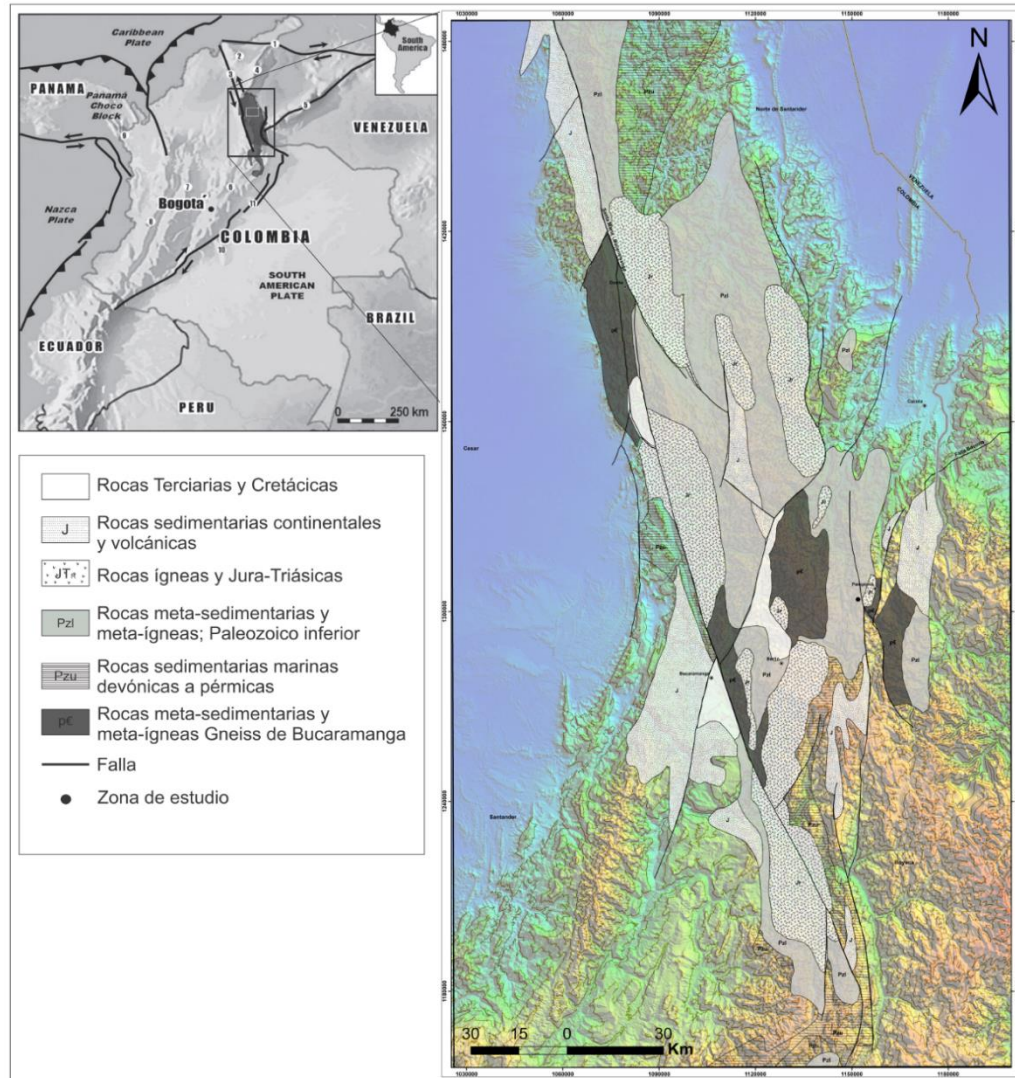
En el contexto anteriormente mencionado, se formuló el presente trabajo de tesis de pregrado 'Modalidad Investigación', con el objetivo de contribuir al conocimiento sobre las variedades composicionales de las diferentes variedades de turmalinas presentes en el sector del Cerro Las Antenas (Municipio de Pamplona). Asimismo, apoyados en ésta información, se espera poder reconocer diferencias entre aquellas turmalinas formadas en ambientes de metamorfismo isoquímico y las formadas por procesos magmático-hidrotermales (procesos aloquímicos).

1. ANTECEDENTES Y CONTEXTO GEOLÓGICO

1.1 BASAMENTO ÍGNEO-METAMÓRFICO

El área de estudio se localiza en el Macizo de Santander, el cual hace parte del Terreno Chibcha (en sentido de Restrepo 2010) y en el dominio de la subplaca de Maracaibo (en sentido de Cediél *et al.*, 2003). Desde el punto de vista tectónico, el MS se encuentra limitado al oeste por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta (SFBS), al este por el sistema de cabalgamientos Pamplona-Cobugón-Las Mercedes, al norte por la Falla Arenas Blancas y al sur por la Falla Servitá (López *et al.*, 2013; Botello., 2014). Litológicamente el MS está conformado por rocas metamórficas agrupadas en 3 unidades: (1) Gneis de Bucaramanga, el cual se compone de gneises cuarzo-feldespáticos, horbléndicos, micáceos, y granatíferos las cuales alcanzaron las facies anfibolitas, durante la Orogenia Grenviliiana (Ward *et al.*, 1973 y renombrado como Complejo Bucaramanga por Royero y Clavijo, 2001), (2) unidad Ortogneis, (3) Formación Silgará (en el sentido original de Ward *et al.*, 1973) que son rocas afectadas por condiciones de metamorfismo regional de facies esquisto verde a facies anfibolita de bajo grado. Las unidades (2) y (3) se asocian con la Orogenia Famatiniana, en Colombia llamada Quetame-Caparonensis (Ward *et al.*, 1973; Clavijo., 1994; Royero., 1997; Restrepo-pace *et al.*, 1997; García y Ríos., 1999; Cordani *et al.*, 2005; Ríos *et al.*, 2002; Mantilla *et al.*, 2012; Botello *et al.*, 2014).

Figura 1: Mapa Geológico del Macizo de Santander: se muestra de forma general la geología del macizo de Santander, y su ubicación geográfica nacional.



Fuente: Autores

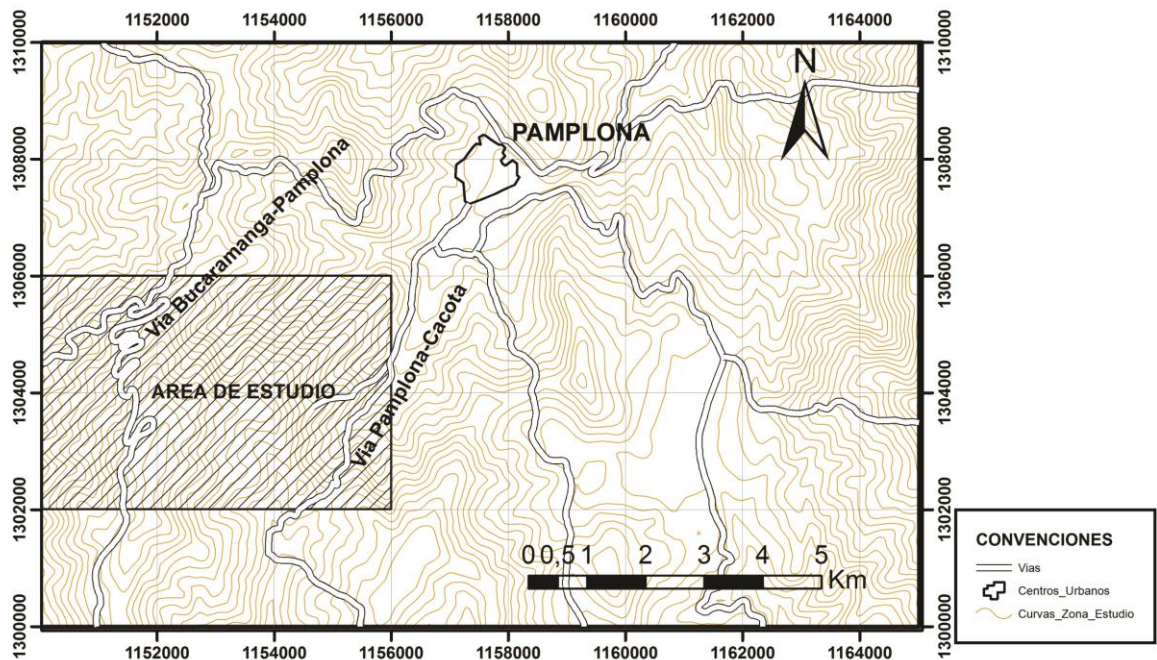
Las rocas ígneas reportadas en el MS consisten de numerosos batolitos, plutones y stocks de diversas composiciones químicas. Estos cuerpos se ubican en rangos de edades: (a) Paleozoico temprano y tardío: Batolito de Mogotes (Ward *et al.*, 1973) y granito de Durania (Botello *et al.*, 2014), (b) Triásico-Jurásico: Grupo Plutónico de Santander (Ward *et al.*, 1973, Royero y Clavijo, 2001, Van Der Lelij., 2013), (c) Cretácico inferior (?): diques riolíticos, porfiríticos y diabasas (Ward *et al.*, 1973), (d) Mioceno: cuarzomonzodioritas, granodioritas, andesitas y riolacitas (Mantilla *et al.*, 2009; Mantilla *et al.*, 2011). Las rocas sedimentarias del MS son de edades Paleozoicas (Devónico medio y superior, Carbonífero y Pérmico), Mesozoicas y Cenozoicas, y son encontradas en discontinuidad estratigráfica sobre las rocas del basamento ígneo-metamórfico (Ward *et al.*, 1973; Clavijo., 1994; Royero y Clavijo., 2001) (Figura 1).

La zona del presente estudio se localiza aproximadamente a 12 Km en dirección suroccidente del casco urbano del municipio de Pamplona, Norte de Santander, en el sector conocido como Cerro de las Antenas CA (Cerro Oriente). Desde el punto de vista tectónico el CA se ubica dentro de la faja estructural Pamplona-Chitagá en el bloque oriental del MS. El CA se encuentra limitado al este por la falla de Pamplona (y por sus fallas satélites semiparalelas orientadas en sentido N-S) y al noroeste por la falla Morro Negro.

La zona de estudio ubicada en el CA está conformada litológicamente por las siguientes unidades (Figura 2): (a) Formación Silgará, la cual se presenta como esquistos micáceos con intercalaciones menores de meta-arenisca (Ward *et al.*, 1973; Clavijo., 1994; Royero y Clavijo., 2001), debido a que dentro de la Formación Silgará solo los Esquistos contienen grandes volúmenes de Turmalina, en adelante se hará énfasis solo en ellos y serán denominados Esquistos del Silgará (ES) los cuales fueron clasificados como esquistos micáceos, cuarzo

micáceos y cuarzosos dentro de un metamorfismo regional de grado medio a alto (Ward *et al.*, 1970; Ward *et al.*, 1973; Ward *et al.*, 1977; Clavijo., 1994; Royero y Clavijo., 2001; Gutiérrez., 2001; Ríos *et al.*, 2002; Castellanos *et al.*,2008).

Figura 2: Mapa de Localización geográfica, vías de acceso y relación espacial con el casco urbano más cercano al área de estudio



Fuente: Autores.

1.2 GENERALIDADES DE LAS TURMALINAS

En el contexto del MS la turmalina es un mineral que ha sido reportado como mineral accesorio en las rocas metamórficas (Ríos *et al.*, 2002; Castellanos *et al.*, 2008). Según Gutiérrez (2001) ésta variedad de turmalina, observada mayoritariamente en los esquistos del Silgará, se clasifica como Dravita.

Turmalinas de grano grueso (alrededor de 3 cm), observadas en cuerpos ígneos de la unidad cartografiada como 'Granito de Durania', se presentan en litologías leuco-graníticas formadas principalmente por cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa, en las que la turmalina se presenta como mineral accesorio. El GD forma plutones pequeños e intrusiones dispuestas a lo largo de una franja N-S (Ward *et al.*, 1970; Ward *et al.*, 1973), según Botello *et al.*, (2014) el GD es de carácter peraluminico, presenta variedades toleíticas y calcoalcalinas con contenido medio y alto de potasio. Estas turmalinas según análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM) se clasifican como chorlo rico en Ca y Mg y por difracción de rayos X (DRX) como uvita rica en Na (Botello *et al.*, 2014).

2. METODOS ANALÍTICOS

Los métodos utilizados para el desarrollo del presente trabajo son enumerados y descritos a continuación: (a) Microscopia Óptica, (b) Difracción de rayos X (DRX), (c) Litogeoquímica de roca total (d) Microsonda electrónica.

Los análisis de microscopia óptica fueron realizados en los laboratorios que la escuela de geología y el Grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) de la Universidad Industrial de Santander tienen para este fin, los equipos utilizados fueron microscopios petrográficos LEICA DM750P y NIKON ECLIPSE E200 50/POL

La difracción de rayos X fue realizada en los laboratorios de la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander con el fin de identificar las fases minerales que no pudieron ser determinadas mediante los análisis microscópicos y que están presentes en las muestras, para esto fue usado un difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance, con filtro de Níquel especificaciones analíticas en: www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/acreditacionLaboratorios/laboratorioDifraccion/serviciosPrestados.html), el análisis de las fases presentes se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Los análisis de litogeoquímica en roca total se realizaron en los laboratorios ALS Colombia Ltda. (*ALS Geochemistry*) usando el método de preparación de muestras PREP-31, el paquete de geoquímico CCP-PKG03 para análisis de elementos mayores, menores y trazas, adicional a esto de uso el método B-ICP82 para la determinación del contenido de Boro (B) presente en las muestras. Las

especificaciones de los métodos y procedimientos anteriormente mencionados pueden ser consultadas en la página web de *ALS Geochemistry* (<http://www.alsglobal.com>). Los resultados obtenidos se procesaron mediante el software (Igpert 2007).

Los análisis de Microsonda se realizaron en el laboratorio de caracterización litológica del departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, usando el equipo Electron Microprobe Analyser JEOL JXA-8230, para los análisis de silicatos se usó un voltaje de 15 Kv y para los análisis de elementos metálicos 20 Kv, ambos a una corriente de 20 nA, los estándares de calibración usados se presentan en la (Tabla 1).

Tabla 1: Estándares de calibración usados para el análisis de microsonda electrónica

Elemento	Estandar de calibración
Si	Horblenda
Al	Cianita
Mg	Horblenda
Fe	Horblenda
K	Horblenda
Na	Sodalita
Ca	Diopsido
Ti	Rutilo
Cr	Oxido de Cr
Mn	Espesartina
Bi	Bismuto
Ba	Benitoita
Co	Elemento puro
Ni	Elemento puro
Cu	Elemento puro
Zn	Elemento puro
Pb	Elemento puro
Sn	Elemento puro
V	Elemento puro

3. RESULTADOS

3.1 LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS Y RELACIONES LITOLÓGICAS

El área muestreada para el presente estudio se localiza en el cerro Las Antenas, ubicado a unos 12 Km al SW de la cabecera municipal de Pamplona (Norte de Santander), por la vía alterna que lleva al municipio de Cácosta (Figura 2). Esta zona está compuesta litológicamente por (a) Formación Silgará (en el sentido original de Ward *et al.*, 1973). (b) Granito de Durania (Figura 3)

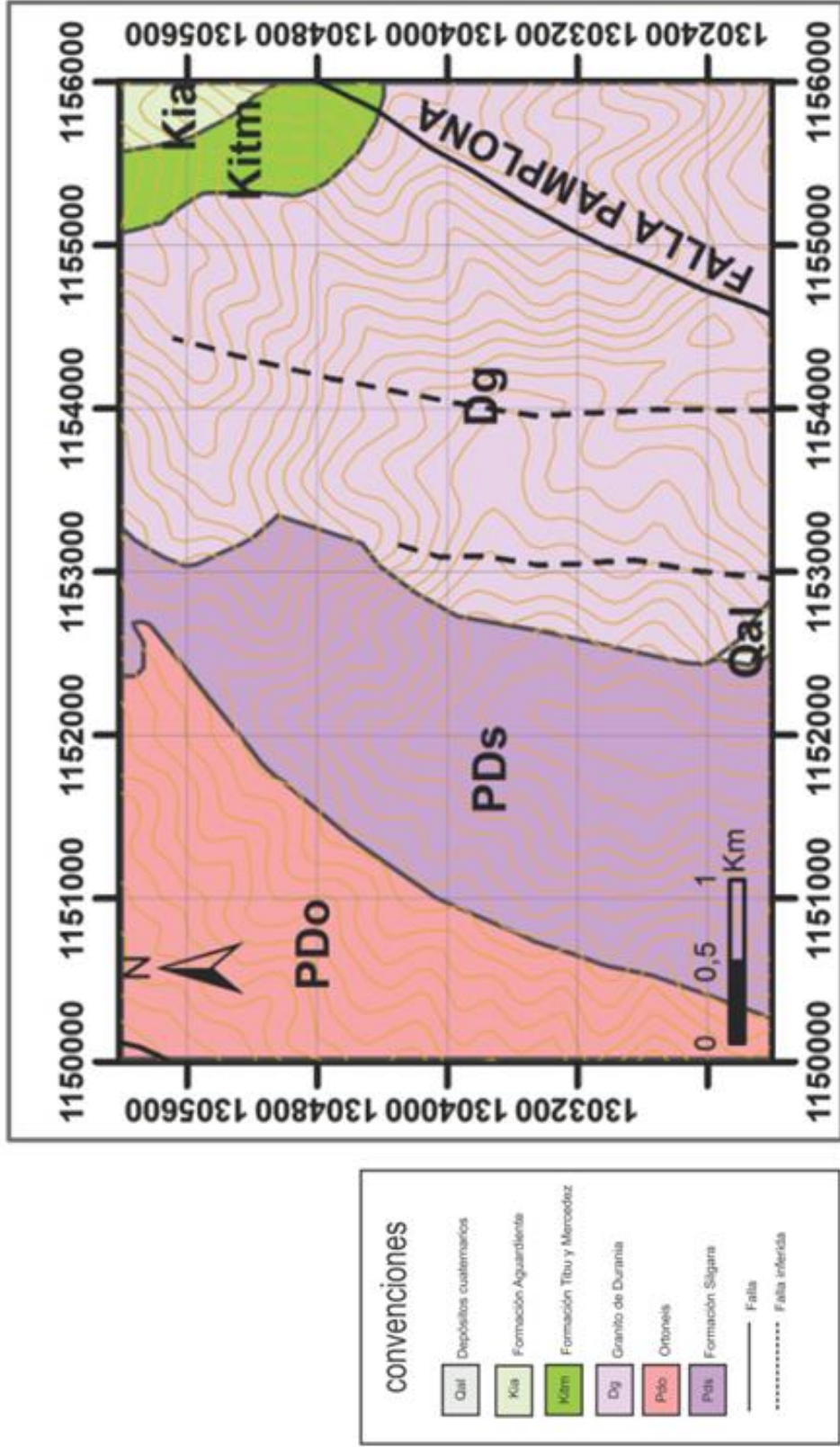
En la zona de estudio se observan diversos cuerpos intrusivos asociados al Granito de Durania (diques pegmatíticos y sills principalmente), los cuales cortan las rocas metamórficas agrupadas dentro de la denominada unidad Esquistos del Silgará. Estos cuerpos ígneos han sido observados cortando la foliación regional, y también emplazados de manera paralela entre los planos de anisotropía metamórfica (Figura 4C y Figura 5A).

El contenido de turmalina en los ES pareciera aumentar en sentido norte (Figura 5A) siguiendo la carretera. El sector donde afloran los esquistos con mayor contenido de turmalina se localiza en las inmediaciones de la antena de RCN (Figura 5).

El muestreo en el CA fue realizado por los autores del presente estudio y por estudiantes de la asignatura Campo II del programa de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Un total de veintidós (22) muestras pertenecientes a los ES fueron analizadas macroscópicamente, de las cuales nueve (9) muestras fueron seleccionadas para análisis mediante microscopía óptica (Ver localización de estas muestras en la Figura 6), de estas, dos (2) se seleccionaron para análisis por medio de Difracción de Rayos X (DRX), una (1) fue seleccionada para ser analizada mediante geoquímica de roca total, y tres (3) fueron analizadas por Microsonda electrónica.

Para el desarrollo del presente estudio se realizó una clasificación de las muestras con base en la cantidad porcentual de Turmalina que estas presentan (Figura 7), obteniendo así dos grupos de esquistos (a) Esquistos Turmaliníticos (turmalina >15%) representado por las muestras (LEA-24-M1; LEA-24-M1.1; LEA-24-M1.2; LEA-31-M1; MC-07-2) (Figura 8 y Figura 9) (b) Esquistos Cuarzo-Micáceos (cuarzo > 40%, muscovita > 40%, y turmalina < 15%) representado por las muestras (LEA-34-M1; LEA-24-M4; LEA-11-M1.1; LEA-19-M1) (Figura 10)

Figura 3: Mapa Geológico del Sector del Cerro de las Antenas, Se muestran las litologías y rasgos estructurales mayores presentes en el área de estudio



Fuente: Autores

Figura 4: Fotografías de las pegmatitas relacionadas con el granito de Durania. A) Foto en afloramiento de pegmatitas con turmalina. B) Muestra de mano de pegmatita con cuarzo, plagioclasa y turmalina. C) cuerpo pegmatítico que intruye esquistos, las líneas rojas semiparalelas indican la dirección de esquistosidad. D) Pegmatita relacionada al GD con gran contenido de



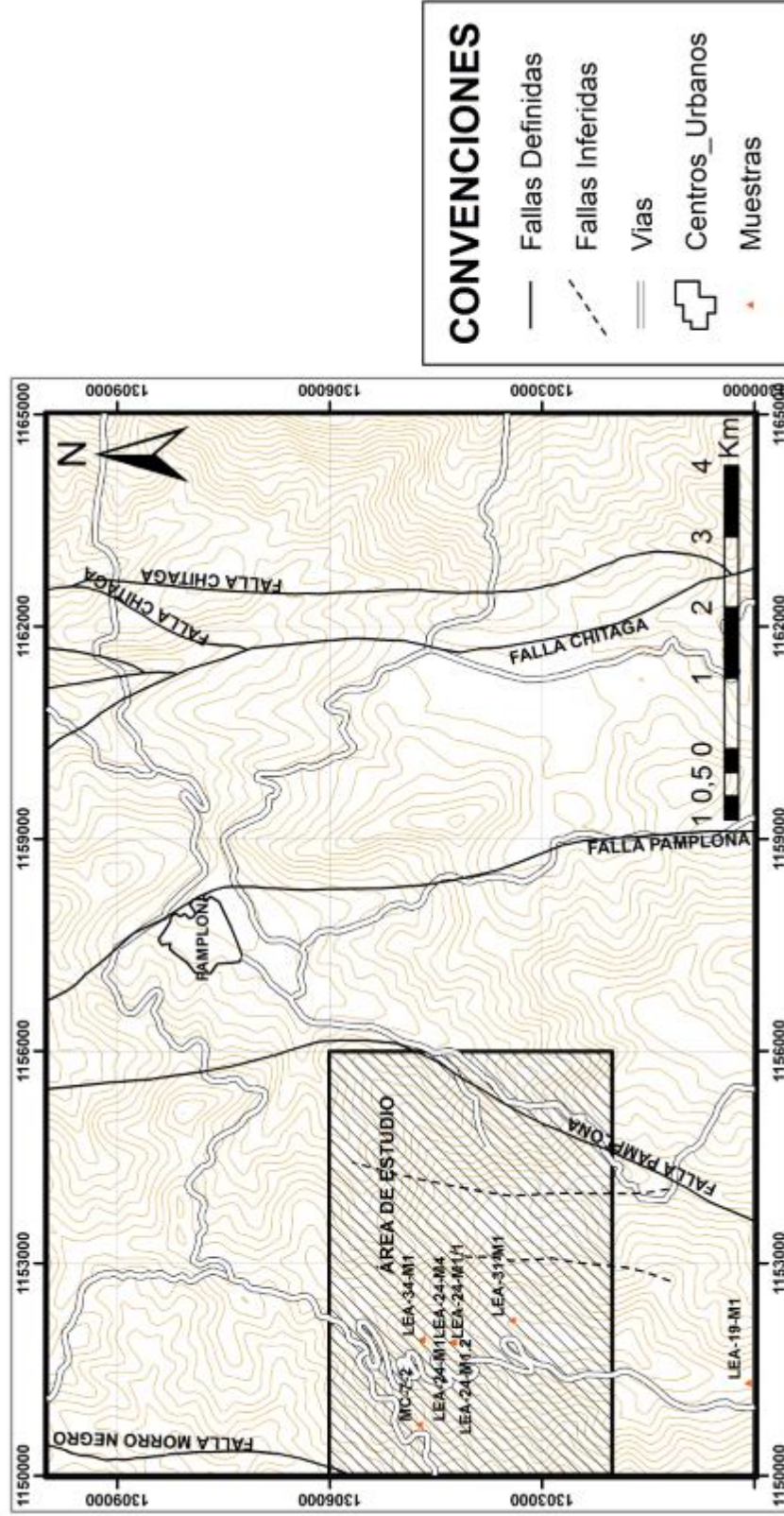
Fuente: Autores

Figura 5: Fotos de afloramiento del Cerro de las Antenas. A) Se observa un sills relacionado al GD intruyendo a los ES, el contenido de turmalina pareciera aumentar hacía el norte, a la izquierda de la imagen se observa la localización del afloramiento con mayor contenido de turmalina. B) Localización del grupo de muestras con mayor contenido de turmalina. C) Foto con mayor detalle de los esquistos turmaliníticos, se observa la dirección principal de foliación (dirección de esquistosidad).



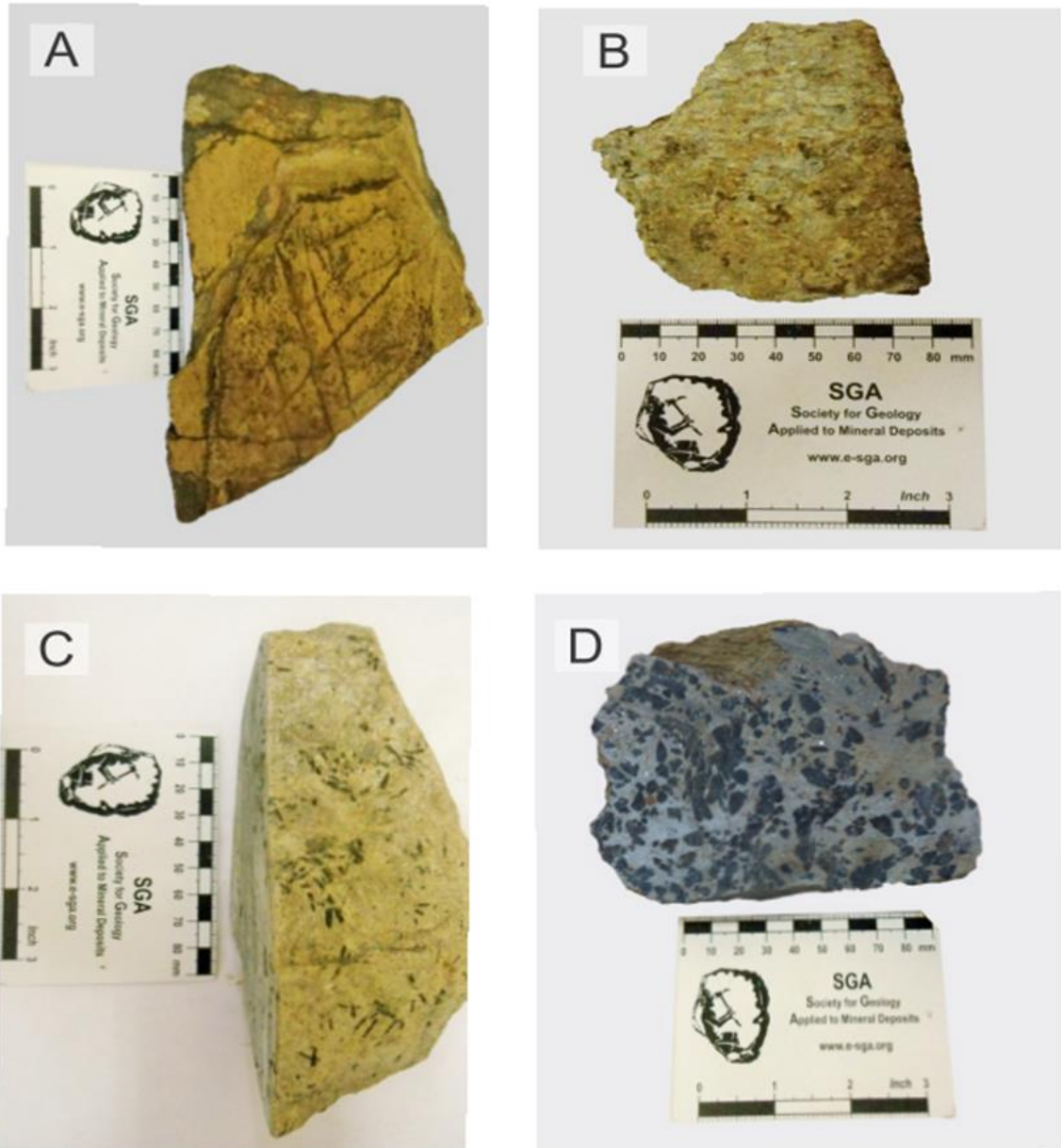
Fuente: Autores

Figura 6: Localización geográfica de las nueve (9) muestras seleccionadas para análisis de laboratorio (microscopía óptica y electrónica, DRX, Microsonda electrónica, y geoquímica de roca total).



Fuente: Autores

Figura 7: Variación del contenido de turmalina presente en las muestras del presente estudio. A-B) muestras de mano de ejemplares clasificados como esquistos cuarzo muscovíticos, C-D) muestras de mano de ejemplares clasificados como esquistos turmaliníticos. El contenido de turmalina va en aumento desde A hasta D



3.2 PETROGRAFÍA DE LOS ESQUISTOS TURMALINÍTICOS Y ESQUISTOS CUARZO-MUSCOVÍTICOS

3.2.1 Esquistos Turmaliníticos: Los Esquistos Turmaliníticos se caracterizan por ser rocas de color gris verdoso, en algunos sectores se observan de color marrón (producto de alteración súpergena), con brillo sedoso, moderadamente macizas de grano medio a grueso. Presentan buen desarrollo de la esquistosidad, que está definida por la orientación preferencial de la muscovita. Estas rocas presentan textura granolepidoblástica y localmente porfidoblástica en matriz lepidoblástica (Figura 8). El metamorfismo de los Esquistos que hospedan las turmalinas corresponde con las facies esquistos verde, zona del granate determinada por la paragénesis $Qz+Ms+Bt\pm Grt$ (clasificación según García 2007; convenciones según Whitney y Evans 2010).

Mineralógicamente los Esquistos Turmaliníticos (Figuras 8 y 9) están compuestos por Muscovita, que se presenta como agregados minerales de individuos incoloros, heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, alargados con tamaño aproximados de 0,4 [mm] y dispuestos en dirección de la foliación principal de la roca, aunque en ocasiones se presenta de forma oblicua a esta. El cuarzo se presenta como individuos incoloros, heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos de tamaños entre 0,1 [mm] y 0,4 [mm], alargados en su mayoría en dirección de la foliación principal. Así mismo el cuarzo se presenta como inclusiones en la turmalina y en el granate. La turmalina se presenta como individuos porfidoblásticos heteroblásticos, con tamaños que varían entre 0,4 [mm] y 2 [cm], dispuestos y orientados al azar, xenoblásticos, heteromorfos de color verde a rosado, zonados y pleocroicos, con colores de birrefringencia de segundo orden. Algunas de las turmalinas presentan isotropía pero se sugiere que esta se

debe al ángulo de corte de los cristales. (Figura 9A y 9a). Se observan inclusiones de cuarzo, muscovita y opacos orientados en su mayoría de forma perpendicular a la dirección de foliación (Figura 8C y 8D), así como fracturas rellenas por óxidos. La mayoría de los cristales tienen bordes netos y cortan la foliación principal en diferentes direcciones (Figura 9B). La muestra LEA 24.M1.1 contiene una turmalina con borde de textura tipo peine la cual encierra un granate metamórfico (Figura 9C y 9D). Las muestras LEA 24-M1 y LEA 24-M2 presentan cristales de turmalina con inclusiones de cristales heteromorfos y heteroblásticos distribuidos en gran parte de la superficie minera, que podría llamarse textura esquelética que podrían indicar una tasa de rápido crecimiento de la turmalina (?) y/o una sobresaturación del medio en fluido (Figura 9E y 9F). La biotita se presenta como individuos idioblásticos a subidioblásticos, heteromórficos con tamaños aproximados entre 0,1 [mm] y 0,4 [mm], de color marrón, oxidados y alterados (clorita), alargados y dispuestos en dirección de la foliación principal. El granate se presenta como individuos porfidoblásticos, incoloros, idioblásticos a xenoblásticos con tamaños entre 0,3 [mm] y 3 [mm], fracturas rellenas de óxido e inclusiones de cuarzo, muscovita y minerales opacos. Los minerales opacos presentes en las muestras se encuentran dispuestos en dirección de la foliación principal de la roca así como en incluidos dentro de turmalina y granate.

Como fases accesorias se observó circón que se presenta en la matriz de forma aleatoria en pequeños granos, y apatito que se presenta en pequeños granos, subidioblásticos y prismáticos.

Figura 8: Esquistos Turmaliníticos. Las imágenes A, C y E fueron tomadas con nicoles cruzados y las B, D y F con nicoles paralelos. A-B) Textura lepidogranoblástica con algunos porfidoblóstos de Turmalina sin orientación preferente. C-D) Textura lepidogranoblástica, foliación principal definida por la dirección de alargamiento de los minerales hojosos, en este caso Muscovita, se observa cuarzo tanto en el dominio de los microlitones como en inclusiones en la turmalina. Las inclusiones E-F) Textura porfidoblástica local, porfidoblóstos de turmalina con inclusiones de cuarzo, muscovita y opacos.

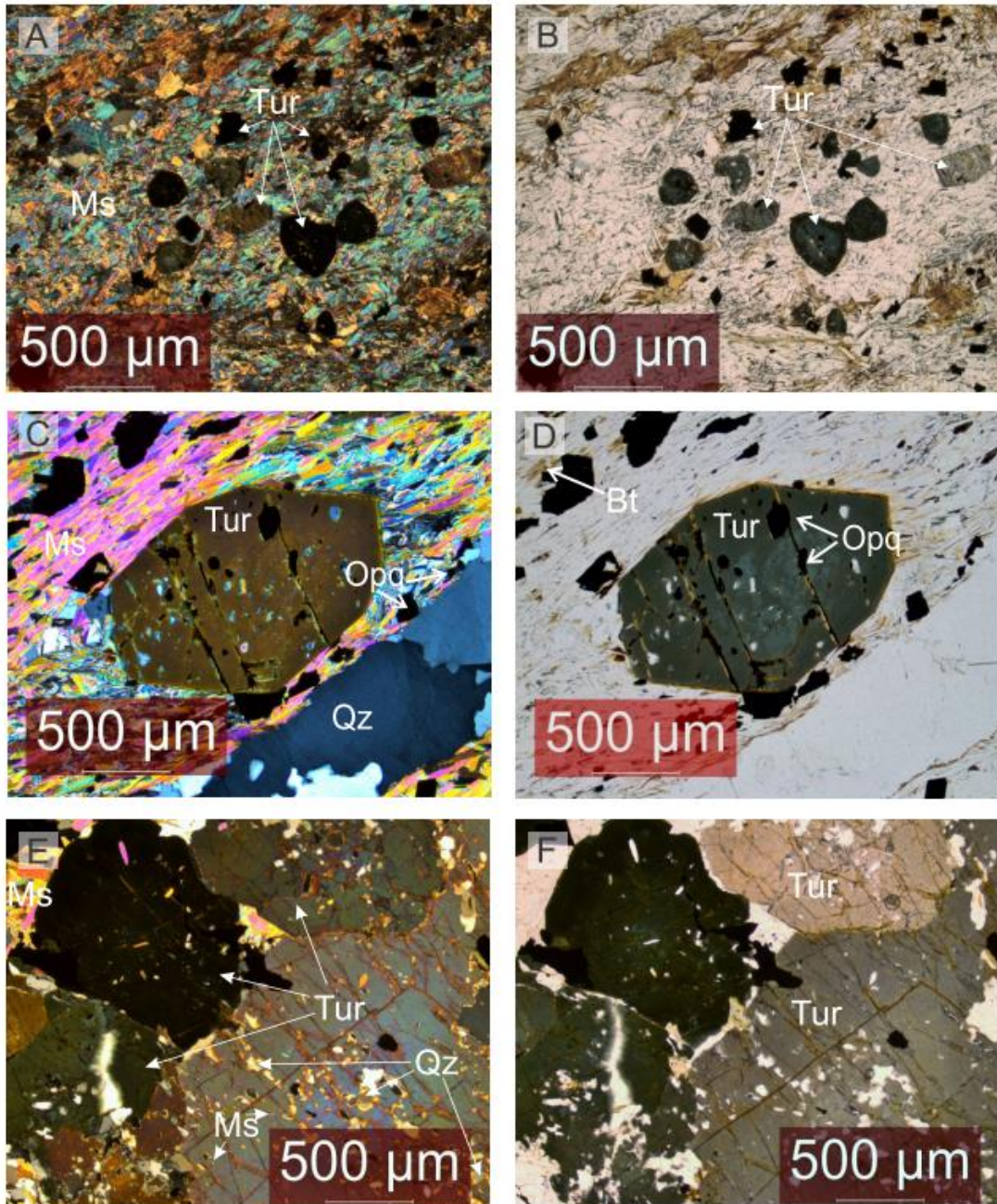
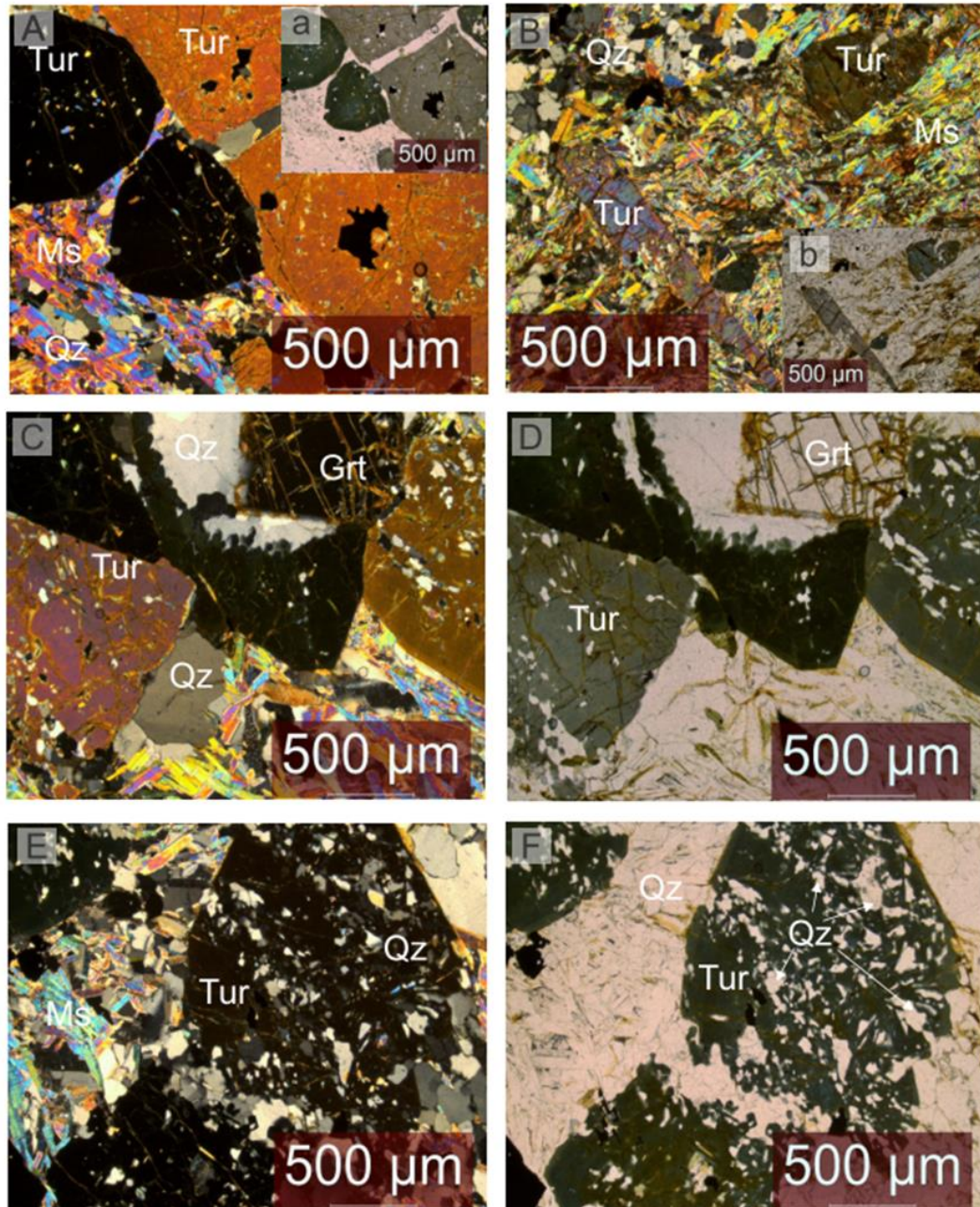


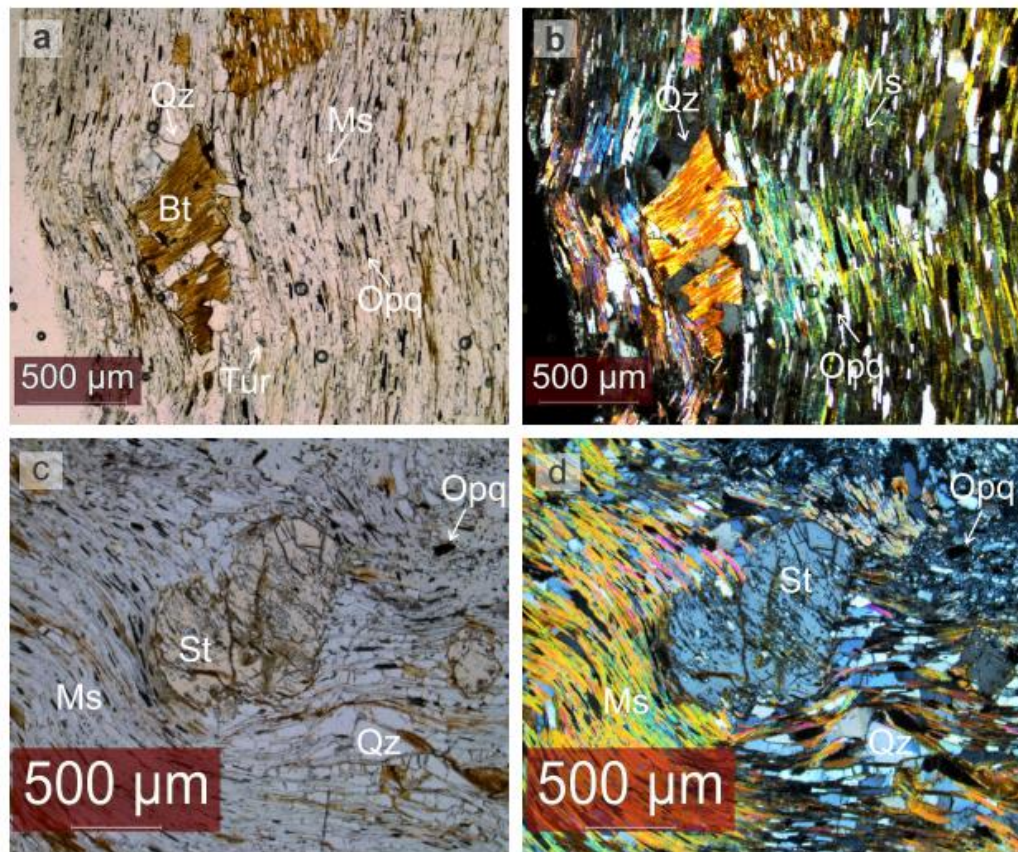
Figura 9: Esquistos turmaliníticos. A) Nicoles cruzados, turmalina con carácter isotrópico debido al ángulo de corte, se observan cristales de Muscovita, Cuarzo y Turmalina. a) Nicoles paralelos, la variación de color de las turmalinas se da debido al ángulo de corte y no a una variación composicional. B) Nicoles cruzados, turmalinas orientadas al azar en una matriz muscovítica que cortan la foliación principal. b) Nicoles paralelos. C-D) Fotos con nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando turmalina con Textura en forma de peine, en contacto con cuarzo y turmalina. E,F) Mineral con múltiples inclusiones de cuarzo que le dan un aspecto de corrosión, que podría indicar una tasa de rápido crecimiento de la turmalina



3.2.2 Esquistos Cuarzo-Muscovíticos: Los Esquistos Cuarzo Muscovíticos (Figura 10) se caracterizan por ser rocas de color gris verdoso, en algunos sectores se observan de color marrón (producto de alteración supergena), con brillo sedoso, moderadamente macizas de grano medio a grueso. Presentan buen desarrollo de la esquistosidad, que se encuentra definida por la orientación preferencial de la muscovita. Presentan textura granolepidoblástica y localmente porfidoblástica en matriz lepidoblástica, algunos de estos porfidoblásticos forman sombras de presión. El metamorfismo de los Esquistos Cuarzo Muscovíticos corresponde con facies esquistos verde (zonas desde biotita hasta granate), y facies anfibolita (zonas desde andalucita-almandino hasta cianita-almandino) determinadas por las paragénesis $Qz+Ms+Bt\pm Grt$ y $Qz+Ms+Bt+Grt+St\pm Ky$ respectivamente (clasificación según García 2007; convenciones según Whitney y Evans (2010)). Mineralógicamente los Esquistos Muscovíticos (Figura 10) están compuestos por Muscovita que se presenta como agregados minerales de individuos incoloros, heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, con tamaños entre 0,1 [mm] y 0,6 [mm], alargados y dispuestos en dirección de la foliación principal de la roca aunque en ocasiones se presenta de forma oblicua. El cuarzo se presenta como individuos incoloros, heteroblásticos, idioblásticos a subidioblásticos, con tamaños aproximados de 0,4 [mm], alargados en su mayoría en dirección de la foliación principal, así mismo se presenta como inclusiones en el granate. La biotita se presenta como individuos idioblásticos a subidioblásticos, heteromórficos con tamaños aproximados de 0,3 [mm], de color marrón, oxidados y alterados (clorita), alargados y dispuestos en dirección de la foliación principal. El granate se presenta como individuos porfidoblásticos, incoloros, idioblásticos a xenoblásticos de aproximadamente 0,7 [mm], sus núcleos frecuentemente se encuentran incluidos por pequeños minerales de cuarzo, muscovita y minerales opacos. La estaurolita, que se identificó en la muestra LEA11_M1.1 se presenta como individuos de color amarillo, heteroblásticos, subidioblásticos a xenoblásticos con tamaños entre 0,4 [mm] y 1,1[mm], con múltiples inclusiones de cuarzo y fracturas que se encuentran rellenas por óxidos. La cianita, que se

identifica en la muestra LEA 34-M1 se presenta como individuos discretos con carácter porfidoblástico con un tamaño aproximado de 0,9 [mm] exhibiendo su forma característica, presenta inclusiones de minerales opacos. Como fases accesorias se observó turmalina que se presenta como granos pequeños con tamaños inferiores a 0,08 [mm] subidioblásticos a xenoblásticos de color verde, pleocroicos y ligeramente zonados que se observa cortando la foliación principal de la roca, circón que se presenta de forma aleatoria en pequeños granos y apatito que se presenta en pequeños granos, subidioblásticos y prismáticos.

Figura 10: Esquistos Cuarzo-Muscovíticos. A y B) Textura granolepidoblástica, con cristales de muscovítica orientados y alargados en la dirección principal de foliación (esquistosidad). C y D) Estaurolita con inclusiones de muscovita paralelas a la dirección principal de foliación



3.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La Difracción de Rayos X (DRX) se realizó a las muestras **1)** LEA 24-M1 y **2)** LEA 24-M4 (**Figura 11**), los resultados a continuación se relacionan únicamente a las muestras analizadas pasantes de un tamiz malla 400 mesh (**Tabla 2**).

Figura 11: Difractogramas de las muestras LEA 24-M1 (D3JB) y LEA 24-M4 (DJ3C). Graficas obtenidas por medio del análisis de difracción de rayos X de las muestras mencionadas anteriormente

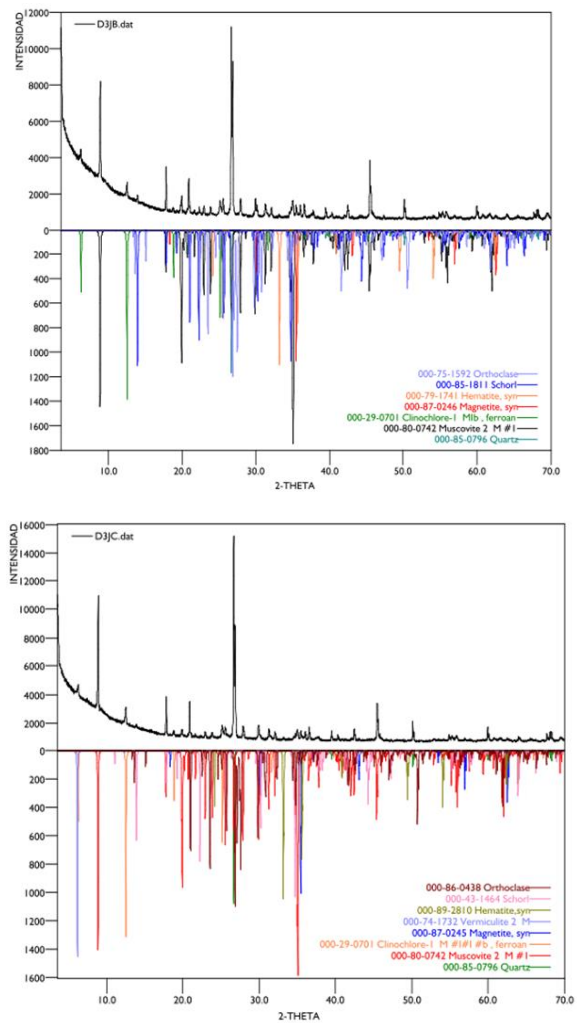


Tabla 2: Fases cristalinas en las muestras LEA 24-M1 y LEA 24-M4 detectadas por medio del análisis de difracción de rayos X (DRX).

LEA 24-M1 (D3JB)		
	FASE	NOMBRE
Cristalinos	SiO_2	Cuarzo
	$(K_{0,82} Na_{0,18}) (Fe_{0,03} Al_{1,92}) (AlSi_3) O_{10} (OH)_2$	Muscovita
	$(Mg, Fe)_6 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$	Clinocloro
	$Na Fe_3 Al_6 (BO_3)_3 Si_6 O_{18} (OH)_4$	Chorlo
	$Fe_2 O_3$	Hematita
	$K Al Si_3 O_8$	Ortoclasa
	$Fe_{2,9} O_4$	Magnetita
LEA 24-M4 (D3JC)		
	FASE	NOMBRE
Cristalinos	SiO_2	Cuarzo
	$(K_{0,82} Na_{0,18}) (Fe_{0,03} Al_{1,92}) (AlSi_3) O_{10} (OH)_2$	Muscovita
	$(Mg, Fe)_6 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$	Clinocloro
	$Na Fe_3 Al_6 (BO_3)_3 Si_6 O_{18} (OH)_4$	Chorlo
	$Fe_2 O_3$	Hematita
	$K (Al Si_3 O_8)$	Ortoclasa
	$Fe_3 O_4$	Magnetita
	$Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$	Vermiculita

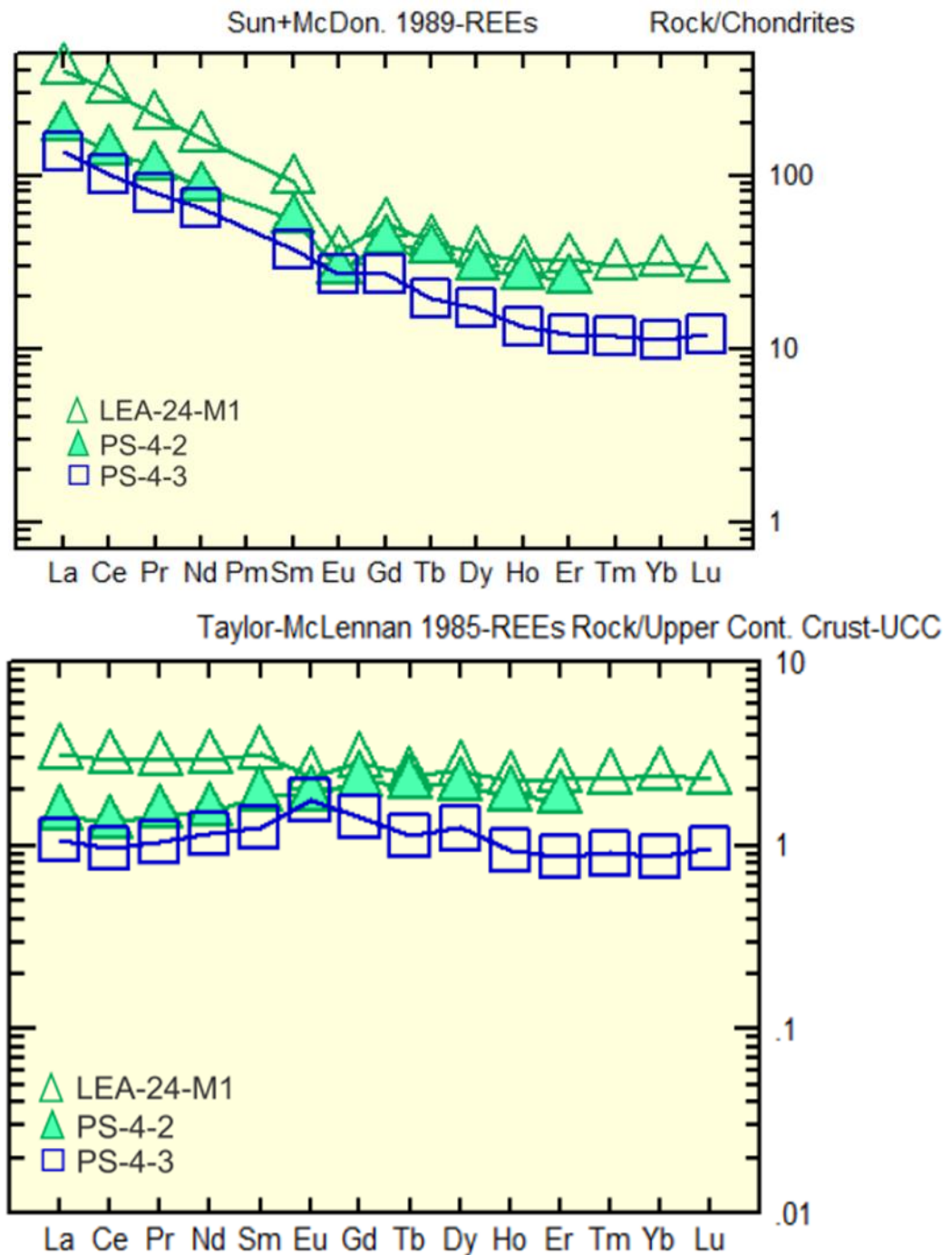
Los resultados confirman los minerales identificados por medio de la Microscopia Óptica tanto para el grupo de los esquistos turmaliníticos (LEA 24-M1) como para el grupo de los esquistos muscovíticos (LEA 24-M4). Adicionalmente fue detectada ortoclasa (en ambos grupos) así como vermiculita y hematita..

3.4 GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL DE LOS ESQUISTOS TURMALINÍTICOS

Los análisis de litogeoquímica se realizaron para la muestra de esquistos Turmaliníticos de los ES (LEA-24-M1). Adicionalmente, con el fin de comparar con los datos litogeoquímicos de rocas metapelíticas del Silgará sin turmalina, se utilizaron los resultados de geoquímica de roca total de dos muestras del área Pescadero-Aratoca (Muestras PS-4-2 y PS-4-3). Los datos de estas dos muestras del área Pescadero-Aratoca, fueron suministrados por los profesores Carlos Alberto García Ramírez y Luis Carlos Mantilla Figueroa, quienes colectaron y analizaron éstas muestras en el marco del proyecto de investigación 5463 (VIE-UIS). Los resultados de geoquímica de roca total de las tres muestras referidas, se relacionan en el **Anexo 1**.

Los datos de REE fueron normalizados respecto al condrito reportado por Sun y McDonough (1989), a la Upper-Cont-Crust-UCC reportado por Taylor y McLennan (1985) (**Figura 12**) y al manto primitivo reportado por McDonough *et al.*, (1992) (**Figura 13**). Los patrones de REE para las tres muestras normalizadas a la corteza superior son muy similares y muestran enriquecimiento alrededor de 1. Lo anterior indica que el protolito en las tres muestras procede del desmantelamiento de una corteza continental (la cual presenta una composición media total de tipo andesítico).

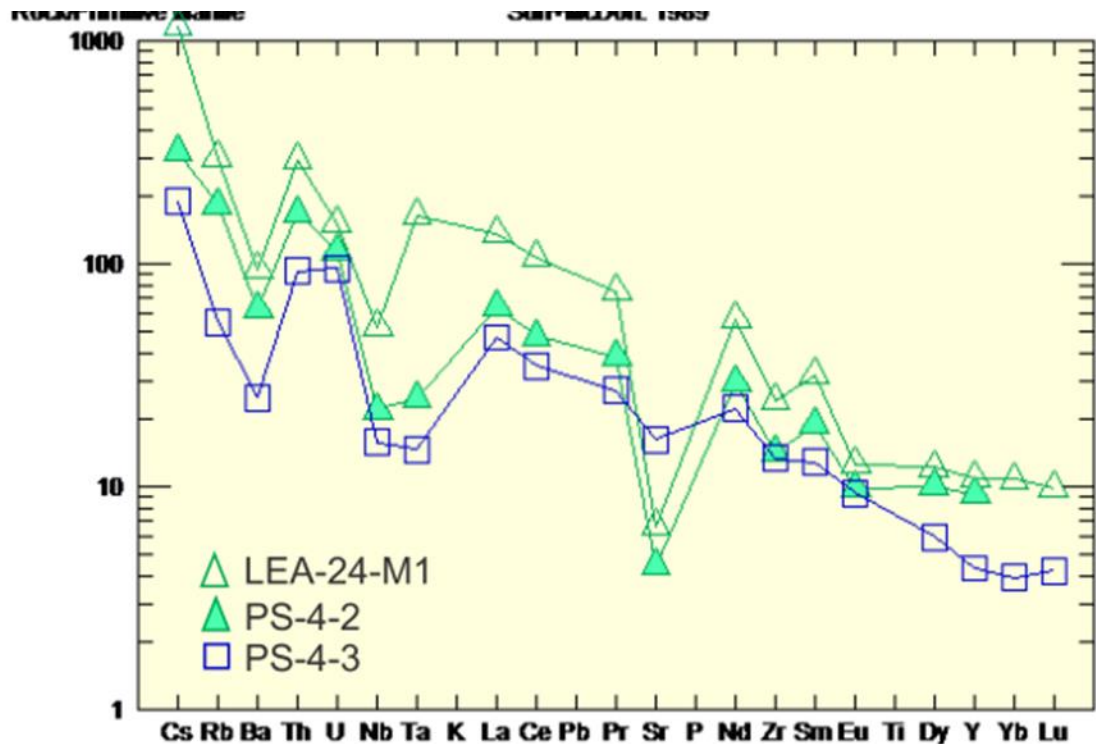
Figura 12: Aracnigrama de los datos geoquímicos de los esquistos turmaliníticos del CA y las metapelitas del Pescadero, Arriba-centro datos normalizados al condrito (Sun & McDonough., 1989). Abajo-centro datos normalizados a la corteza superior continental (McDonough., et al 1992) Se observa un patrón de tierras raras muy similar en todas las muestras, con un enriquecimiento en tierras raras alrededor de 1



Fuente: Autores.

Los Patrones de las tres muestras analizadas, normalizadas al condrito CI, muestran un enriquecimiento de las LREE, respecto a las HREE. El enriquecimiento ligeramente mayor (respecto al condrito CI) de los esquistos con turmalina, podría estar relacionado con variaciones composicionales del protolito, o con un enriquecimiento ligeramente mayor, mediante procesos de alteración magmático-hidrotermal (?). En términos generales, los patrones de REE (normalizados al condrito), indican un protolito derivado fundamentalmente de arcos magmáticos propios de ambientes de subducción o reciclaje de éstos. En el mismo sentido apuntan los arcnigramas de la Figura 12.

Figura 13: Aracnigrama de los datos geoquímicos de los esquistos turmaliníticos del CA y las metapelitas del Pescadero-normalizados respecto al manto primitivo (McDonough., *et al* 1992).



Fuente: Autores

3.5 MICROSONDA ELECTRÓNICA

Los análisis realizados mediante Microsonda se concentraron en 3 muestras representativas de cada una de las diferentes variedades de turmalina. Las muestras analizadas son (a) Granito de Durania APD-53-01 en la cual se realizaron 3 mediciones (**Figura 14**); (b) Esquistos Turmaliníticos LEA-24-M1.2 con 4 mediciones (**Figura 15**) y (c) Esquistos Cuarzo-Muscovíticos LEA-34-M1 con 2 mediciones (**Figura 16**) para un total de 9 mediciones cuyos resultados se presentan en el **Anexo 2**.

Figura 14: Imágenes de los puntos de la muestra APD 53-1 analizados por Microsonda electrónica, se muestra la ubicación en lámina delgada de los tres (3) puntos analizados y la nomenclatura utilizada para su identificación en la tabla de resultados geoquímicos (Anexo B).

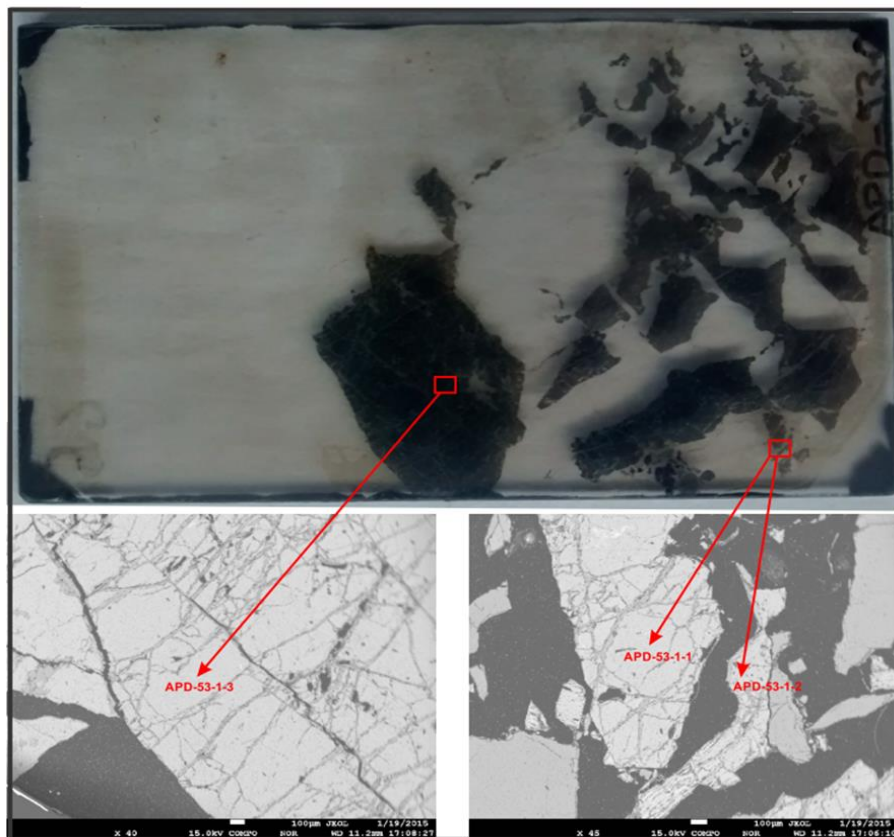


Figura 15: Imágenes de los puntos de la muestra LEA 24 M1.2 analizados por Microsonda electrónica, se muestra la ubicación en lámina delgada de los cuatro (4) puntos analizados y la nomenclatura utilizada para su identificación en la tabla de resultados geoquímicos (Tabla 4).

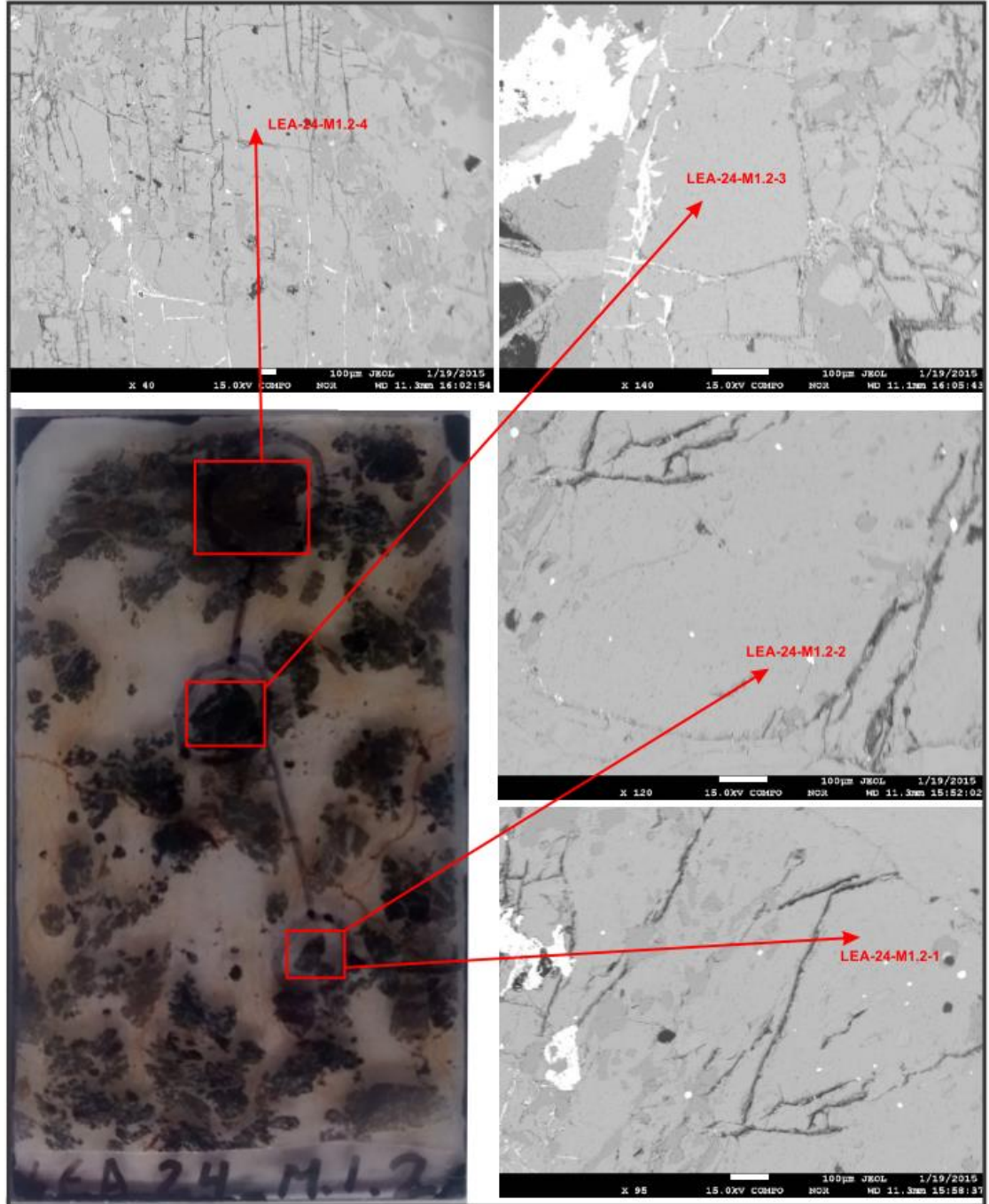
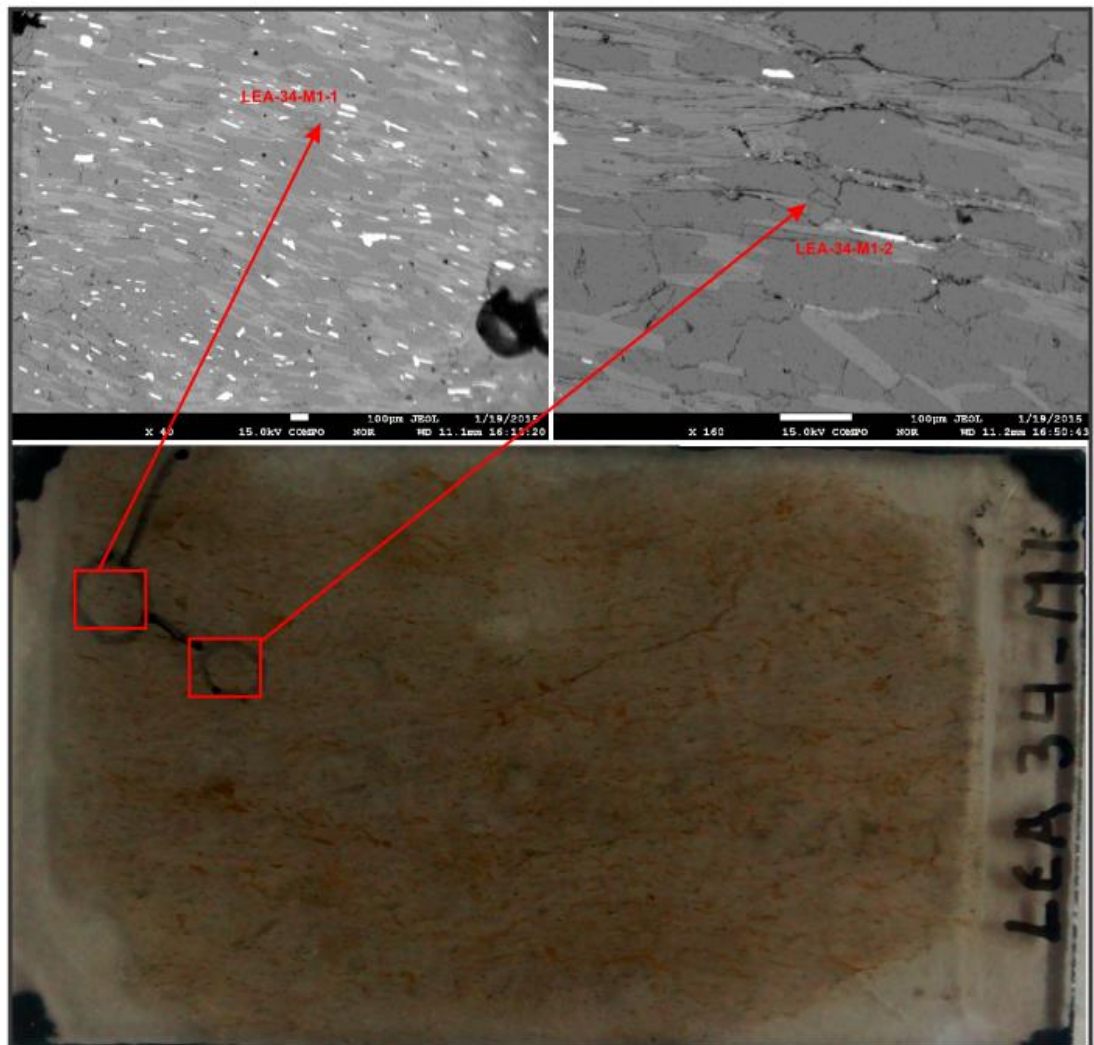


Figura 16: Imágenes de los puntos de la muestra LEA 34 M1.2 analizados por Microsonda electrónica, se muestra la ubicación en lámina delgada de los dos (2) puntos analizados y la nomenclatura utilizada para su identificación en la tabla de resultados geoquímicos (Tabla 4).



3.6 CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL DE LAS TURMALINAS POR MEDIO DEL SOFTWARE WINTCAC

Para la clasificación modal de las turmalinas por medio de WinTCac, (Software desarrollado y publicado por Fuat *et al.*, 2014) se normalizan los datos utilizando 15 cationes y se calculan estequiométricamente los contenidos de Boro, Litio y Agua en los cristales de turmalina analizados, se emplea la fórmula química $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$. (Clarke *et al.*, 1989; Novak *et al.*, 2009; Henry *et al.*, 2011; Dutrow & Henry., 2011; Slack & Trumbull., 2011; Marschall & Jiang., 2011; Hinsberg *et al.*, 2011; Dutrow & Henry., 2012). Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo 3.

Con los datos obtenidos mediante la microsonda se ubicaron las muestras en un diagrama ternario (generado por medio del software GRAPHER 11) de los cationes ubicados en el sitio X de la estructura química de la turmalina (Figura 17), que clasifica las turmalinas de este estudio dentro del grupo alcalino, la clasificación secundaria dentro de subgrupos se realiza con los datos sobre la ocupancia del sitio Y, que permite clasificar las turmalinas dentro de los subgrupos del Chorlo y la Dravita (Figura 18).

Figura 17: Terna de clasificación de la turmalina según la ocupancia del sitio Y. En el diagrama mostrado las muestras analizadas se ubican en los Subgrupos del Chorlo y la Dravita.

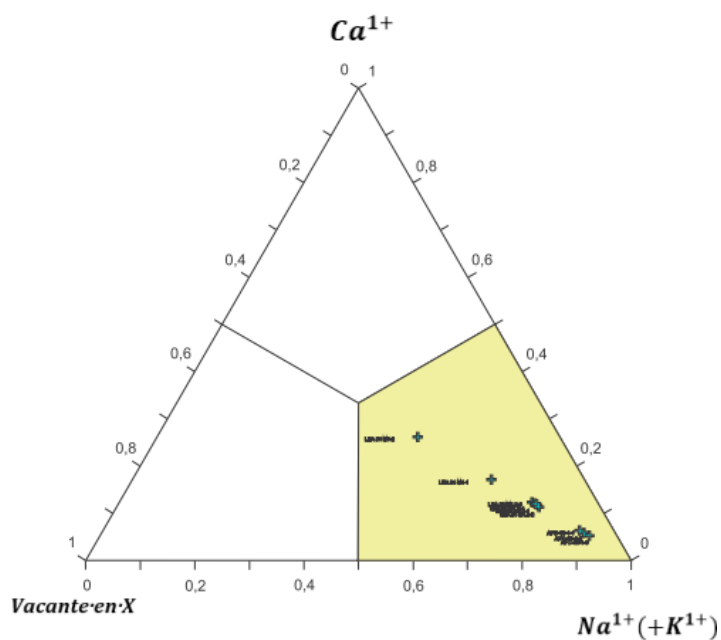
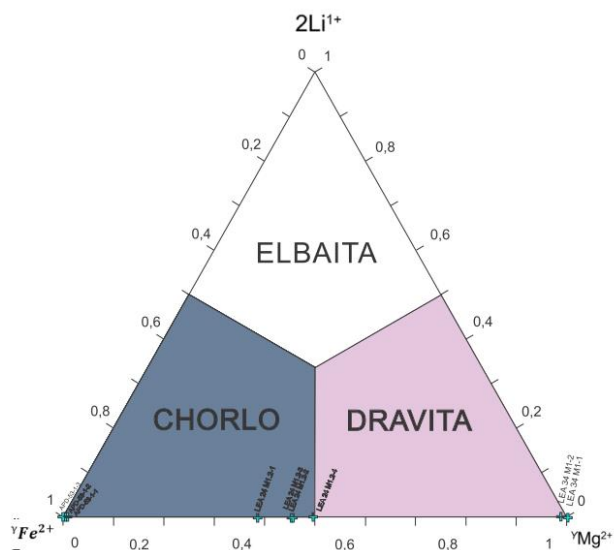


Figura 18: Terna de clasificación de la turmalina según la ocupancia del sitio Y. En el diagrama mostrado las muestras analizadas se ubican en los Subgrupos del Chorlo y la Dravita

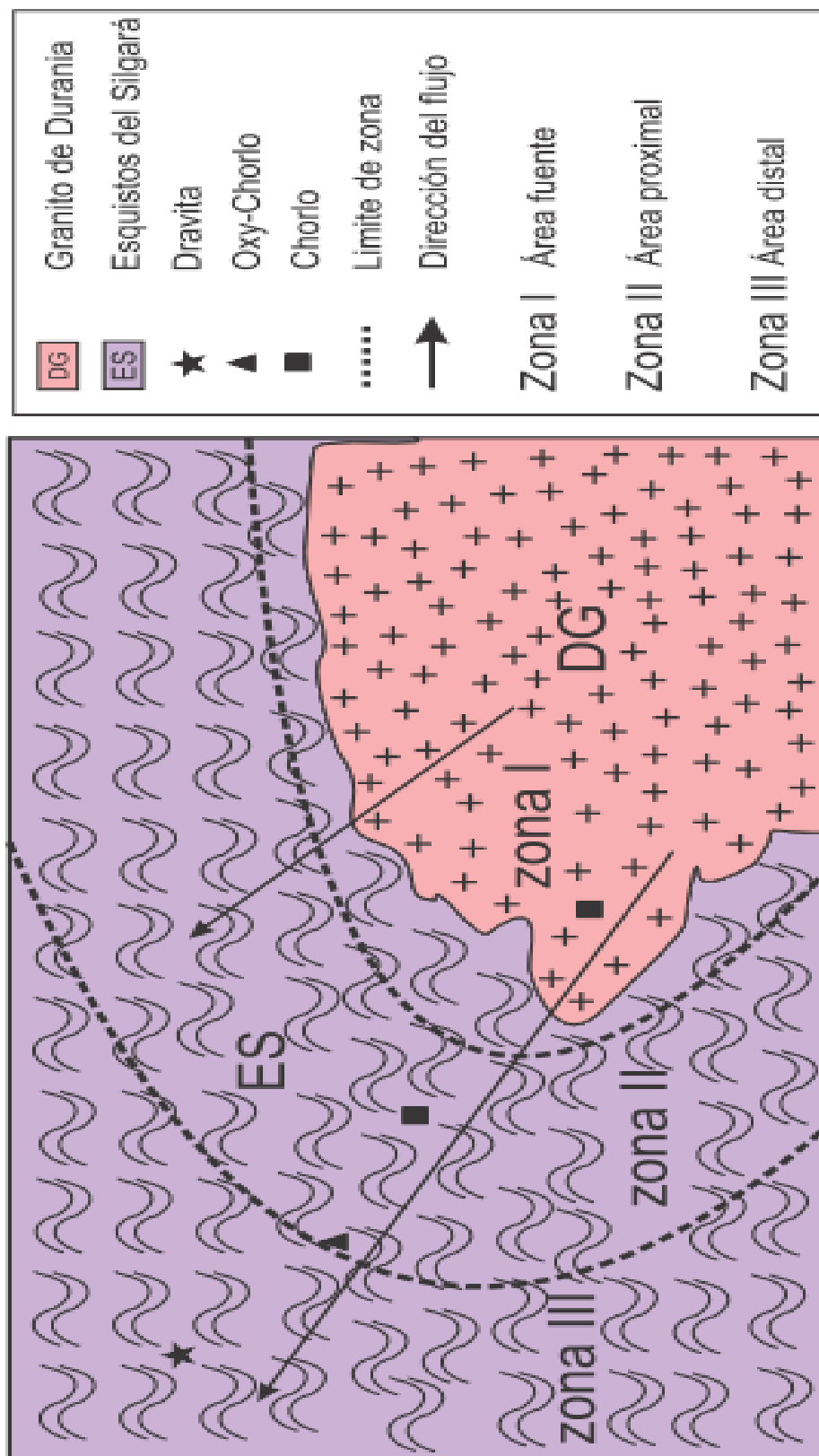


4. CONCLUSIONES

- Se propone el uso del término Turmalinita para las rocas metasomáticas que presentan un contenido de turmalina entre 15% y 40% del volumen de roca total propuesto por Slack *et al.*, (1984).
- Los esquistos turmalínicos y esquistos cuarzo micáceos presentan paragénesis $Qz+Ms+Bt\pm Grt$ y $Qz+Ms+Bt\pm Grt\pm St\pm Ky$ respectivamente.
- Las turmalinas de la unidad Esquistos del Silgará se clasificaron químicamente como sódico-férricas (Chorlo) (0,4 mm – 2 cm) y sódico-magnésicas (Dravita) (<0,4mm).
- Los patrones de REE de la unidad Esquistos del Silgará (de las franjas Pescadero-Aratoca y Pamplona-Chitaga) apuntan a que el protolito es producto del desmantelamiento de una corteza continental y el enriquecimiento en LREE de los esquistos turmalínicos se puede interpretar como una variación composicional del protolito o como un enriquecimiento producto de alteraciones magmático-hidrotermales(?).

- En el contexto dado por este trabajo de investigación se generó un modelo preliminar (**Figura 19**) en él que se propone al granito de Durania como posible fuente de los fluidos ricos en boro que permitieron la generación de las turmalinitas (evento metasomático). Esta conclusión se realiza con base en la similitud composicional de las turmalinas (mencionada anteriormente) y en la relación espacial existente entre la unidad Esquistos del Silgará y el Granito de Durania. El modelo preliminar (**Figura 19**) para la génesis de las turmalinas plantea tres áreas tomando como referencia la proximidad de la fuente del fluido (GD): (a) Zona I: área fuente, donde se presentan turmalinas de variedad chorlo ricas en Fe (b) Zona II área proximal, donde se encuentran turmalinas variedad chorlo con un menor contenido de hierro con respecto a las de la zona I y (c) Zona III área distal donde se encuentran turmalinas con el menor contenido de Fe y mayor contenido de Mg clasificándolas como dravita. Para la dravita se sugiere un enriquecimiento en magnesio debido a la presencia de minerales con contenido de este elemento.

Figura 19: Esquema interpretativo del modelo preliminar generado en este estudio para explicar la génesis de las turmalinas en los Esquistos del Silgara del sector del Cerro de las Antenas. Se propone al Granito de Durania como posible fuente de los fluidos ricos en boro que permitieron la generación de turmalinas en los niveles esquistosos de la Formación Silgara.



5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un muestreo más detallado para complementar la caracterización de las relaciones espaciales entre el Granito de Durania y los Esquistos del Silgará, así como para complementar la cartografía.
- Se sugiere realizar más estudios a la turmalina, específicamente la datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para establecer la edad de las turmalinas tanto en el Granito de Durania como en los Esquistos del Silgará.
- Se recomienda el análisis de isotopos de Boro, para confirmar la relación parental de las turmalinas del Granito de Durania y los Esquistos del Silgará.
- Se sugiere realizar análisis geoquímicos tanto a los esquistos del cerro de las Antenas con gran contenido de turmalina como a los esquistos con turmalina como mineral accesorio para establecer si hay diferencias marcadas entre las dos litologías.

BIBLIOGRAFÍA

Botello, F.; Mantilla, F. L. C.; Colegial, G. J. 2014. Edad U-pb en Zircones y contexto tectónico de formación del Granito de Durania (Macizo de Santander, Colombia). Memorias XI Semana Técnica de Geología y I Geosciences Annual Meeting UIS. Bucaramanga, 11 al 15 de Agosto de 2014.

Bray, J. C., Spooner, E. T. C., 1983. Sheeted Veins Sn-W Mineralization and Greisenization Associated with Economic Kaolinization, Goonbarrow China Clay Pit, St. Austell, Cornwall, England: Geologic Relationships and Geochronology. 1983. Vol. 78, pp. 1064-1089.

Castellanos, O., Ríos, C. Takasu, A. (2008): A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with p-t paths of the barrovian-type silgará formation at the central santander massif, colombian andes. Earth Sci. Res. J. Vol. 12, No. 2 pag 125-155

Cediel, F., Shaw, R., and Cáceres, C. 2003. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. AAPG Memoir, vol. 79, pp. 815-848.

Clarke D. *et al.*, 1989. Tourmaline Composition as a Guide to Mineral Exploration: A Reconnaissance Study from Nova Scotia Using Discriminant Function Analysis. Economic Geology, Vol. 84, pp. 1921-1935.

Clavijo, J., 1994. Mapa geológico generalizado del Departamento de Norte de Santander. Escala 1:250.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, informe interno, 67p.

Cordani, U., Cardona, A., Jimenez, D., Liu, D., and Nutman, A.P., 2005. Geochronology of proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: Tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. Geological Society, vol. 246, pp. 329-346.

Dutrow, B. & Henry, D., 2011. Tourmaline: A Geologic DVD. Elements, vol. 7, pp. 301-306.

Dutrow, B. & Henry, D., 2012. Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability. Lithos, Vol.154, pp. 16-32.

Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H., 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, and Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper 750-D, pp D44eD49.

Gutiérrez, C : Petrografía y mineralogía de las formaciones Silgará y Ortoneis en el área de Pamplona (Norte de Santander). Trabajo de Grado Geólogo. Bucaramanga Santander: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología, 2014. Pág. 110-113; 118-119.

Frikken, P. H., Cooke, D. R., Walshie, J. L., Archibald, D., Skarmeta, J., Serrano, L., Vargas, R., 2005. Mineralogical and Isotopic Zonation in the Sur-Sur Tourmaline Breccia, Rio Blanco-Los Bronces Cu-Mo Deposits, Chile: Implications for Ore Genesis. Vol. 100, pp. 935-961.

Garcia, C., Rios, C., 1999. Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe final Proyecto de investigación. Universidad Industrial de Santander- Colciencias, p 191.

García, C., 2007. Manual de prácticas de petrología metamórfica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 88p.

Henry, D. *et al.*, 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. American Mineralogist, Vol. 96, pp. 895-913.

Hinsberg, V. *et al.*, 2011. Tourmaline as a Petrologic Forensic Mineral: A Unique Recorder of Its Geologic Past. Elements Vol.7, pp. 327-332.

Hinsberg, V *et al.*, 2011. Tourmaline: An ideal indicator of its host environment. The Canadian mineralogist. Vol. 49, pp.1-16.

Kettaneh, Y. A., Badham, J. P. N., 1978. Mineralization and Paragenesis at the Mount Wellington Mine, Cornwall. Economic Geology. Vol. 73, pp. 486-495.

López, J., Velandia, F., Silva, A.I, Cano, H.I & Felder, F., 2013. Geología y estructura del proyecto angostura. Algunas consideraciones genéticas. XIV Congreso Colombiano de Geología. Colombia, pp. 566-567.

Mantilla, F.L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., Colegial, J., 2009. Geocronología U-Pb de los cuerpos Porfíricos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Santander, Colombia). Boletín de Geología, vol. 13 (1), pp. 31-43.

Mantilla, F.L. C., Mendoza, F. H., Bissig, T., Hart, C., 2011. Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología, vol 33 (1).

Mantilla, F. L. C., Bissig, T., Cottle, J., Hart, C., 2012. Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian eastern cordillera). Journal of South American Earth Sciences, vol. 38; pp. 1-12.

Marschall H. & Jiang S., 2011. Tourmaline Isotopes: No Element Left Behind. Elements, Vol. 7, pp. 313-319

Novak M. *et al.*, 2009. Nomenclature of the Tourmaline-Group Minerals. Report of the Subcommittee on Tourmaline Nomenclature to the International Mineralogical Association's Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMMN), as approved by the CNMMN at 8th, 2009.

Raith, J.G., Riemer née Schöner, N. & Meisel, T. (2004): Boron metasomatism and behaviour of rare earth elements during formation of tourmaline rocks in the eastern Arunta Inlier, central Australia. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147/1, 91–109.

Restrepo-Pace, P., P.A, Ruiz, J., Gehrels, G., Cosca, M., 1997. Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in Columbian Andes: new constraints for late Proterozoic-early Paleozoic paleocontinental reconstruction of Americas. *Earth and Planetary Sciences Letters* 154. 331-347.

Restrepo-Pace, P., Cediél, F., 2010. Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of American Earth Sciences*, vol. 29, pp. 764-771.

Ríos, C., García, A. y Takasu, A. (2002): Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes, *Journal of South American Earth Sciences* 16 pág. 133–154.

Royero, J.M., Clavijo, J., 2001, Mapa Geológico generalizado del departamento de Santander., Ingeominas.

Schäfer, J., Grösser, J.R., Rodríguez, G.I.1998. Proterozoic Formación Silgará, Cordillera Oriental, Colombia: metamorphism and geochemistry of amphibolites. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, Vols.3-6.*

Sillitoe, Richard H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, Vol. 105, pp. 3-41.

Sillitoe, R. H., Tolman, J., Kerkvoort, G. V., 2013. Geology of the Caspiche Porphyry Gold-Copper Deposit, Maricunga Belt, Northern Chile. *Economic Geology*. Vol. 108, pp. 585-604.

Slack JF, Herriman N, Barnes RG, Plimer IR (1984) Stratiform tourmalinites in metamorphic terranes and their geologic significance. *Geology* 12:713–716.

Slack J. & Trumbull R. 2011. Tourmaline as a Recorder of Ore-Forming Processes. *Elements*, Vol. 7, pp. 321-326.

Van Der Lelij, R., 2013. Reconstructing north-western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a geochronological, Thermochemical and geochemical study. Tesis Doctoral, Universidad de Geneva. Suiza. 221p.

Ward D., Goldsmith R., Cruz B. J., Jaramillo C. L., Vargas I. R., 1970. *Geología de la Plancha 110 Pamplona*, Ingeominas.

Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, A.H. 1973. *Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona*, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. *Boletín Geológico* 21, 1-3, 1-132.

Ward D., Goldsmith R., Cruz B. J., Jaramillo C. L., Vargas I. R., 1977. Geología del Cuadrángulo Pamplona H13, Ingeominas.

Warnaars, F. W., Holmgren, D. C., Barassi, F. S., Porphyry Copper and Tourmaline Breccias at Los Bronces-Rio Blanco, Chile. 1985. Economic Geology. Vol. 80, pp. 1544-1565.

Whitney, D., Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, vol. 95, pp. 185-187.

Yavuz, F., Karakaya, N., Yildirim, D., Karakaya, M. 2014. A Windows program for calculation and classification of tourmaline-supergroup (IMA-2001). Computer and Geosciences . vol 63. Pp. 70-87

ANEXOS

ANEXO A

MUESTRA	ELEMENTOS MAYORES MENORES Y TRAZAS													
LEA-24-M1	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO	TiO2	LOI 1000
	21,3	0,07	0,19	0,01	8,6	3,59	2	0,05	0,89	0,11	58,3	0,02	1	2,65
	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb
	654	189	100	9,18	9	5,37	2,1	36,3	10,8	7,3	1,81	94,6	0,73	37,3
	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y
	76,2	20,6	189,5	14,15	64	140,5	6,7	1,54	25	0,76	3,2	120	10	49,7
	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn	As	Bi
5,31	272	<0.5	<0.5	6	112	40	<1	19	23	17	99	12,6	1,11	
Hg	Sb	Se	Te	Tl	S	C	FeO	B						
0,028	0,05	0,8	0,01	0,07	0,01	0,02		8780						
MUESTRA	ELEMENTOS MAYORES MENORES Y TRAZAS													
PS-4-2	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO	TiO2	LOI 1000
	19,17		0,67	0,015	2,63	3,73	2,41	0,22	1,52	0,12	59,6		0,85	3
	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb
	434	83,9		2,5	7,42	4,11	1,64	24,8	8,53	4,3	1,49	44,1	0,62	15,8
	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y
	39,6	10,6	116,7	8,41	5	92,4	1	1,37	14,4	0,62	2,4	125	3,1	41,9
	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn	As	Bi
3,94	158			28,9	42,5		0,5	57	5,5	19	109	16,3	0,3	
Hg	Sb	Se	Te	Tl	S	C	FeO	Rb						
<0.01		<0.5					5,2	116,7						
MUESTRA	ELEMENTOS MAYORES MENORES Y TRAZAS													
PS-4-3	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO	TiO2	LOI 1000
	13,68		7,69	0,072	2,31	0,72	8,47	0,19	2,43	0,18	53,3		1,03	3,1
	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb
	175	61,9		1,5	4,37	2,01	1,57	18	5,5	3,9	0,76	32,1	0,31	11,3
	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y
	30,3	7,44	34,7	5,73	2	342,4	0,6	0,73	7,9	0,3	2	222	8	19,6
	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn	As	Bi
1,93	150			36,7	2,8		0,4	179	1,9	23	42	<0.5	0,4	
Hg	Sb	Se	Te	Tl	S	C	FeO	Rb						
<0.01		<0.5					5,97	34,7						

ANEXO C

Nomenclatura de la Muestra	(%)[SiO ₂	TiO ₂	SnO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Bi ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
APD-53-1-1	33824,000	0,193	0	21617,000	0,01	0	0	0	0
APD-53-1-2	33630,000	0,213	0	23061,000	0,006	0	0	0	0
APD-53-1-3	33272,000	0,428	0,006	22272,000	0,014	0	0,02	0	0
LEA-24-M1.2-1	31847,000	0,533	0,014	20876,000	0,041	0,038	0,037	0	0
LEA-24-M1.2-2	33193,000	0,379	0	20733,000	0,018	0	0,006	0	0
LEA-24-M1.2-3	30476,000	0,343	0,002	19434,000	0,015	0	0,011	0	0
LEA-24-M1.2-4	30908,000	0,328	0,009	19355,000	0,005	0,019	0,016	0	0
LEA-34-M1-1	32454,000	0,248	0	20868,000	0,02	0	0,011	0	0
LEA-34-M1-2	31757,000	0,412	0	20019,000	0,024	0,001	0,012	0	0

Nomenclatura de la Muestra	FeO	MnO	NiO	CoO	ZnO	CuO	MgO	CaO	PbO
APD-53-1-1	12276,000	0,111	0,013	0	0,196	0	1814,000	0,22	0,006
APD-53-1-2	12354,000	0,1	0,001	0	0,234	0,015	1668,000	0,254	0
APD-53-1-3	12947,000	0,15	0,02	0	0,155	0,022	1683,000	0,277	0,012
LEA-24-M1.2-1	10023,000	0,08	0,013	0	0,057	0,002	3537,000	0,681	0,036
LEA-24-M1.2-2	9572,000	0,087	0,003	0	0,068	0,003	4631,000	0,509	0,005
LEA-24-M1.2-3	8849,000	0,051	0,004	0	0,033	0	4193,000	0,547	0
LEA-24-M1.2-4	7882,000	0,071	0,004	0	0,038	0	4438,000	0,475	0
LEA-34-M1-1	5808,000	0,054	0,031	0	0,012	0	7504,000	1270,000	0,016
LEA-34-M1-2	3817,000	0,02	0,022	0,049	0,041	0,009	6475,000	0,525	0

Nomenclatura de la Muestra	BaO	Na2O	K2O	Rb2O	Cs2O	Li2O	F	Cl	H2O	B2O3	O=F	O=Cl
APD-53-1-1	0,345	2099,000	0,058	0	0	0	0	0	2856,000	8421,000	0	0
APD-53-1-2	0,351	2071,000	0,059	0	0	0	0	0	2895,000	8581,000	0	0
APD-53-1-3	0,829	2126,000	0,087	0	0	0	0	0	2932,000	8515,000	0	0
LEA-24-M1.2-1	0,898	1763,000	0,056	0	0	0	0	0	2807,000	8194,000	0	0
LEA-24-M1.2-2	0,741	1999,000	0,042	0	0	0	0	0	2902,000	8455,000	0	0
LEA-24-M1.2-3	0,721	1785,000	0,051	0	0	0	0	0	2679,000	7807,000	0	0
LEA-24-M1.2-4	0,632	1921,000	0,28	0	0	0	0	0	2071,000	7797,000	0	0
LEA-34-M1-1	0,419	1503,000	0,056	0	0	0	0	0	2877,000	8503,000	0	0
LEA-34-M1-2	0,716	1191,000	0,02	0	0	0	0	0	2535,000	7954,000	0	0

Nomenclatura de la Muestra	Total](%)	(apfu)[Si	Ti	Sn	Al	V	Bi	Cr	Mn(3+)
APD-53-1-1	84059,000	6981,000	0,03	0	5259,000	0,002	0	0	0
APD-53-1-2	85494,000	6811,000	0,032	0	5505,000	0,001	0	0	0
APD-53-1-3	85766,000	6792,000	0,066	0,001	5358,000	0,002	0	0,003	0
LEA-24-M1.2-1	81533,000	6755,000	0,085	0,002	5219,000	0,007	0,003	0,006	0
LEA-24-M1.2-2	83346,000	6823,000	0,059	0	5023,000	0,003	0	0,001	0
LEA-24-M1.2-3	77002,000	6784,000	0,057	0	5099,000	0,003	0	0,002	0
LEA-24-M1.2-4	76249,000	6889,000	0,055	0,002	5085,000	0,001	0,002	0,003	0
LEA-34-M1-1	81654,000	6634,000	0,038	0	5027,000	0,003	0	0,002	0
LEA-34-M1-2	75598,000	6939,000	0,068	0	5156,000	0,004	0	0,002	0

Nomenclatura de la Muestra	Fe(2+)	Mn(2+)	Ni	Co	Zn	Cu	Mg	Ca	Pb
APD-53-1-1	2119,000	0,019	0,002	0	0,03	0	0,558	0,049	0
APD-53-1-2	2092,000	0,017	0	0	0,035	0,002	0,504	0,055	0
APD-53-1-3	2210,000	0,026	0,003	0	0,023	0,003	0,512	0,061	0,001
LEA-24-M1.2-1	1778,000	0,014	0,002	0	0,009	0	1118,000	0,155	0,002
LEA-24-M1.2-2	1646,000	0,015	0	0	0,01	0	1419,000	0,112	0
LEA-24-M1.2-3	1647,000	0,01	0,001	0	0,005	0	1391,000	0,13	0
LEA-24-M1.2-4	1469,000	0,013	0,001	0	0,006	0	1475,000	0,113	0
LEA-34-M1-1	0,993	0,009	0,005	0	0,002	0	2287,000	0,278	0,001
LEA-34-M1-2	0,698	0,004	0,004	0,009	0,007	0,001	2109,000	0,123	0

Nomenclatura de la Muestra	Ba	Na	K	Rb	Cs	Li	F	Cl	B](apfu)	(apfu)[Si(T)
APD-53-1-1	0,028	0,84	0,015	0	0	0	0	0	2935,000	6981,000
APD-53-1-2	0,028	0,813	0,015	0	0	0	0	0	2940,000	6811,000
APD-53-1-3	0,066	0,841	0,023	0	0	0	0	0	2939,000	6792,000
LEA-24-M1.2-1	0,075	0,725	0,015	0	0	0	0	0	2943,000	6755,000
LEA-24-M1.2-2	0,06	0,797	0,011	0	0	0	0	0	2952,000	6823,000
LEA-24-M1.2-3	0,063	0,77	0,014	0	0	0	0	0	2951,000	6784,000
LEA-24-M1.2-4	0,055	0,83	0,08	0	0	0	0	0	2938,000	6889,000
LEA-34-M1-1	0,034	0,596	0,015	0	0	0	0	0	2969,000	6634,000
LEA-34-M1-2	0,061	0,505	0,006	0	0	0	0	0	2946,000	6939,000

Nomenclatura de la Muestra	B(T)	Al(T)	Total(T)](apfu)	(apfu)[Al(Z)	Cr(Z)	V(Z)	Fe3+(Z)	Mg(Z)	Fe2+(Z)	Total(Z)](apfu)	(apfu)[Al(Y)
APD-53-1-1	0	0	6981,000	5259,000	0	0,002	0	0,558	0,182	6000,000	0
APD-53-1-2	0	0	6811,000	5505,000	0	0,001	0	0,494	0	6000,000	0
APD-53-1-3	0	0	6792,000	5358,000	0,003	0,002	0	0,512	0,124	6000,000	0
LEA-24-M1.2-1	0	0	6755,000	5219,000	0,006	0,007	0	0,768	0	6000,000	0
LEA-24-M1.2-2	0	0	6823,000	5023,000	0,001	0,003	0	0,973	0	6000,000	0
LEA-24-M1.2-3	0	0	6784,000	5099,000	0,002	0,003	0	0,897	0	6000,000	0
LEA-24-M1.2-4	0	0	6889,000	5085,000	0,003	0,001	0	0,912	0	6000,000	0
LEA-34-M1-1	0	0	6634,000	5027,000	0,002	0,003	0	0,968	0	6000,000	0
LEA-34-M1-2	0	0	6939,000	5156,000	0,002	0,004	0	0,838	0	6000,000	0

Nomenclatura de la Muestra	Ti(Y)	Sn(Y)	V(Y)	Cr(Y)	Fe3+(Y)	Mn3+(Y)	Bi(Y)	Fe2+(Y)	Mn2+(Y)	Mg(Y)	Zn(Y)
APD-53-1-1	0,03	0	0	0	0	0	0	1937,000	0,019	0	0,03
APD-53-1-2	0,032	0	0	0	0	0	0	2092,000	0,017	0,009	0,035
APD-53-1-3	0,066	0,001	0	0	0	0	0	2086,000	0,026	0	0,023
LEA-24-M1.2-1	0,085	0,002	0	0	0	0	0,003	1778,000	0,014	0,351	0,009
LEA-24-M1.2-2	0,059	0	0	0	0	0	0	1646,000	0,015	0,446	0,01
LEA-24-M1.2-3	0,057	0	0	0	0	0	0	1647,000	0,01	0,495	0,005
LEA-24-M1.2-4	0,055	0,002	0	0	0	0	0,002	1469,000	0,013	0,563	0,006
LEA-34-M1-1	0,038	0	0	0	0	0	0	0,993	0,009	1319,000	0,002
LEA-34-M1-2	0,068	0	0	0	0	0	0	0,698	0,004	1271,000	0,007

Nomenclatura de la Muestra	Ni(Y)	Co(Y)	Cu(Y)	Li(Y)	Total(Y)](apfu)	(apfu)[Ca(X)	Pb(X)	Ba(X)	Na(X)	K(X)	Rb(X)
APD-53-1-1	0,002	0	0	0	2019,000	0,049	0	0,028	0,84	0,015	0
APD-53-1-2	0	0	0,002	0	2189,000	0,055	0	0,028	0,813	0,015	0
APD-53-1-3	0,003	0	0,003	0	2208,000	0,061	0,001	0,066	0,841	0,023	0
LEA-24-M1.2-1	0,002	0	0	0	2245,000	0,155	0,002	0,075	0,725	0,015	0
LEA-24-M1.2-2	0	0	0	0	2177,000	0,112	0	0,06	0,797	0,011	0
LEA-24-M1.2-3	0,001	0	0	0	2216,000	0,13	0	0,063	0,77	0,014	0
LEA-24-M1.2-4	0,001	0	0	0	2111,000	0,113	0	0,055	0,83	0,08	0
LEA-34-M1-1	0,005	0	0	0	2366,000	0,278	0,001	0,034	0,596	0,015	0
LEA-34-M1-2	0,004	0,009	0,001	0	2061,000	0,123	0	0,061	0,505	0,006	0

Nomenclatura de la Muestra	Cs(X)	X-vacancy]	Total(X)(apfu)	(%)[H2O©	B2O3©	Li2O©](%)	(apfu)[OH	F	Cl	Total](apfu)
APD-53-1-1	0	0,068	1000,000	2856,000	8421,000	0	3932,000	0	0	3932,000
APD-53-1-2	0	0,089	1000,000	2895,000	8581,000	0	3911,000	0	0	3911,000
APD-53-1-3	0	0,008	1000,000	2932,000	8515,000	0	3992,000	0	0	3992,000
LEA-24-M1.2-1	0	0,028	1000,000	2807,000	8194,000	0	3972,000	0	0	3972,000
LEA-24-M1.2-2	0	0,02	1000,000	2902,000	8455,000	0	3980,000	0	0	3980,000
LEA-24-M1.2-3	0	0,022	1000,000	2679,000	7807,000	0	3978,000	0	0	3978,000
LEA-24-M1.2-4	0	0	1078,000	2071,000	7797,000	0	3078,000	0	0	3078,000
LEA-34-M1-1	0	0,077	1000,000	2877,000	8503,000	0	3923,000	0	0	3923,000
LEA-34-M1-2	0	0,306	1000,000	2535,000	7954,000	0	3694,000	0	0	3694,000

Nomenclatura de la Muestra	[OH(V+W sites)]	OH(V-site)	O(V-site)	OH(W-site)	F(W-site)	Cl(W-site)	O(W-site)	Total(V+W sites)]	Group name (X-site)
APD-53-1-1	3932,000	3000,000	0	0,932	0	0	0,068	4000,000	Alkali
APD-53-1-2	3911,000	3000,000	0	0,911	0	0	0,089	4000,000	Alkali
APD-53-1-3	3992,000	3000,000	0	0,992	0	0	0,008	4000,000	Alkali
LEA-24-M1.2-1	3972,000	3000,000	0	0,972	0	0	0,028	4000,000	Alkali
LEA-24-M1.2-2	3980,000	3000,000	0	0,98	0	0	0,02	4000,000	Alkali
LEA-24-M1.2-3	3978,000	3000,000	0	0,978	0	0	0,022	4000,000	Alkali
LEA-24-M1.2-4	3078,000	3000,000	0	0,078	0	0	0,922	4000,000	Alkali
LEA-34-M1-1	3923,000	3000,000	0	0,923	0	0	0,077	4000,000	Alkali
LEA-34-M1-2	3694,000	3000,000	0	0,694	0	0	0,306	4000,000	Alkali

Nomenclatura de la Muestra	Species series (W-site)	Dominant cation (X-site)	OH/(OH+O) (V-site)	Nomenclatura de la Muestra	Dominant anion (V-site)	Si/(Si+B+Al) (T-site)	Dominant cation (T-site)
APD-53-1-1	Hydroxy-	Na	1000,000	APD-53-1-1	OH	1000,000	Si4+
APD-53-1-2	Hydroxy-	Na	1000,000	APD-53-1-2	OH	1000,000	Si4+
APD-53-1-3	Hydroxy-	Na	1000,000	APD-53-1-3	OH	1000,000	Si4+
LEA-24-M1.2-1	Hydroxy-	Na	1000,000	LEA-24-M1.2-1	OH	1000,000	Si4+
LEA-24-M1.2-2	Hydroxy-	Na	1000,000	LEA-24-M1.2-2	OH	1000,000	Si4+
LEA-24-M1.2-3	Hydroxy-	Na	1000,000	LEA-24-M1.2-3	OH	1000,000	Si4+
LEA-24-M1.2-4	Oxy-	Na	1000,000	LEA-24-M1.2-4	OH	1000,000	Si4+
LEA-34-M1-1	Hydroxy-	Na	1000,000	LEA-34-M1-1	OH	1000,000	Si4+
LEA-34-M1-2	Hydroxy-	Na	1000,000	LEA-34-M1-2	OH	1000,000	Si4+

Nomenclatura de la Muestra	Total divalent cation (Y+Z sites)	Dominant divalent cation (Y+Z sites)	Total divalent cation (Y-site)	Dominant divalent cation (Y-site)	Total divalent cation (Z-site)	Dominant divalent cation (Z-site)	Total trivalent cation (YZ sites)
APD-53-1-1	2729,000	Fe2+	1989,000	Fe2+	0,74	Mg2+	5260,000
APD-53-1-2	2651,000	Fe2+	2156,000	Fe2+	0,494	Mg2+	5506,000
APD-53-1-3	2778,000	Fe2+	2142,000	Fe2+	0,636	Mg2+	5364,000
LEA-24-M1.2-1	2922,000	Fe2+	2154,000	Fe2+	0,768	Mg2+	5235,000
LEA-24-M1.2-2	3091,000	Fe2+	2118,000	Fe2+	0,973	Mg2+	5027,000
LEA-24-M1.2-3	3055,000	Fe2+	2158,000	Fe2+	0,897	Mg2+	5103,000
LEA-24-M1.2-4	2964,000	Mg2+	2053,000	Fe2+	0,912	Mg2+	5090,000
LEA-34-M1-1	3296,000	Mg2+	2328,000	Mg2+	0,968	Mg2+	5032,000
LEA-34-M1-2	2831,000	Mg2+	1993,000	Mg2+	0,838	Mg2+	5162,000

Nomenclatura de la Muestra	Dominant trivalent cation (YZ sites)	Total trivalent cation (Y-site)	Dominant trivalent cation (Y-site)	Total trivalent cation (Z-site)	Dominant trivalent cation (Z-site)	Total quadrivalent cation (YZ sites)	Dominant quadrivalent cation (YZ sites)
APD-53-1-1	Al3+	0		5260,000	Al3+	0,03	Ti4+
APD-53-1-2	Al3+	0		5506,000	Al3+	0,032	Ti4+
APD-53-1-3	Al3+	0		5364,000	Al3+	0,067	Ti4+
LEA-24-M1.2-1	Al3+	0,003		5232,000	Al3+	0,087	Ti4+
LEA-24-M1.2-2	Al3+	0		5027,000	Al3+	0,059	Ti4+
LEA-24-M1.2-3	Al3+	0		5103,000	Al3+	0,058	Ti4+
LEA-24-M1.2-4	Al3+	0,002		5088,000	Al3+	0,057	Ti4+
LEA-34-M1-1	Al3+	0		5032,000	Al3+	0,038	Ti4+
LEA-34-M1-2	Al3+	0		5162,000	Al3+	0,068	Ti4+

Nomenclatura de la Muestra	Total Li (Y-site)	Mg/(Mg+Fe2+) (Y-site)	Li-species test (Y-site)	R2+/(R2+ + 2Li)(Y-site)	Ca/(Ca+Na+K)(X-site)	Vac/(Ca+Vac)(X-site)	Vac/(Na+K+Vac)(X-site)
APD-53-1-1	0	0	other	1000,000	0,054	0,582	0,074
APD-53-1-2	0	0,004	other	1000,000	0,062	0,616	0,097
APD-53-1-3	0	0	other	1000,000	0,066	0,122	0,01
LEA-24-M1.2-1	0	0,165	other	1000,000	0,173	0,155	0,037
LEA-24-M1.2-2	0	0,213	other	1000,000	0,122	0,153	0,024
LEA-24-M1.2-3	0	0,231	other	1000,000	0,143	0,143	0,027
LEA-24-M1.2-4	0	0,277	other	1000,000	0,111	0	0
LEA-34-M1-1	0	0,571	other	1000,000	0,313	0,217	0,112
LEA-34-M1-2	0	0,646	other	1000,000	0,194	0,713	0,375

Nomenclatura de la Muestra	O/(O+OH+F)(W-site)	Al/(Al+Fe3+Cr)(Z-site)	Fe3+/(Al+Fe3+Cr)(Z-site)	Cr/(Al+Fe3+Cr)(Z-site)	Subgroup	Tourmaline species
APD-53-1-1	0,068	1000,000	0	0	subgroup 1	Schorl
APD-53-1-2	0,089	1000,000	0	0	subgroup 1	Schorl
APD-53-1-3	0,008	0,999	0	0,001	subgroup 1	Schorl
LEA-24-M1.2-1	0,028	0,999	0	0,001	subgroup 1	Schorl
LEA-24-M1.2-2	0,02	1000,000	0	0	subgroup 1	Schorl
LEA-24-M1.2-3	0,022	1000,000	0	0	subgroup 1	Schorl
LEA-24-M1.2-4	0,922	0,999	0	0,001	subgroup 3	Oxy-schorl
LEA-34-M1-1	0,077	1000,000	0	0	subgroup 1	Dravite
LEA-34-M1-2	0,306	1000,000	0	0	subgroup 1	Dravite

Nomenclatura de la Muestra	Normalization	Total (Z+Y sites)	Total (T+Z+Y sites)	Total (T+Z+Y+X sites)	T-site allocation	Z-site allocation
APD-53-1-1	15 cations (T+Z+Y)	8019,000	15000,000	15932,000	Full	Full
APD-53-1-2	15 cations (T+Z+Y)	8189,000	15000,000	15911,000	Full	Full
APD-53-1-3	15 cations (T+Z+Y)	8208,000	15000,000	15992,000	Full	Full
LEA-24-M1.2-1	15 cations (T+Z+Y)	8245,000	15000,000	15972,000	Full	Full
LEA-24-M1.2-2	15 cations (T+Z+Y)	8177,000	15000,000	15980,000	Full	Full
LEA-24-M1.2-3	15 cations (T+Z+Y)	8216,000	15000,000	15978,000	Full	Full
LEA-24-M1.2-4	15 cations (T+Z+Y)	8111,000	15000,000	16078,000	Full	Full
LEA-34-M1-1	15 cations (T+Z+Y)	8366,000	15000,000	15923,000	Full	Full
LEA-34-M1-2	15 cations (T+Z+Y)	8061,000	15000,000	15694,000	Full	Full

Nomenclatura de la Muestra	Y-site allocation	X-site allocation	Si excess	T-site charge	Z-site charge	Y-site charge	X-site charge
APD-53-1-1	Deficiency	Deficiency	0,981	27925,000	17260,000	4097,000	1009,000
APD-53-1-2	Deficiency	Deficiency	0,811	27245,000	17506,000	4442,000	0,994
APD-53-1-3	Deficiency	Deficiency	0,792	27166,000	17364,000	4550,000	1119,000
LEA-24-M1.2-1	Deficiency	Deficiency	0,755	27021,000	17232,000	4667,000	1203,000
LEA-24-M1.2-2	Deficiency	Deficiency	0,823	27293,000	17027,000	4471,000	1152,000
LEA-24-M1.2-3	Deficiency	Deficiency	0,784	27137,000	17103,000	4547,000	1172,000
LEA-24-M1.2-4	Deficiency	Full	0,889	27557,000	17088,000	4336,000	1247,000
LEA-34-M1-1	Deficiency	Deficiency	0,634	26535,000	17032,000	4809,000	1235,000
LEA-34-M1-2	Deficiency	Deficiency	0,939	27757,000	17162,000	4257,000	0,879

Nomenclatura de la Muestra	Cation charge	R1	R2	R3	X Al (Al-in-R2)	R+	R2+	R3+
APD-53-1-1	50292,000	0,889	2697,000	5298,000	0,28	0,953	2697,000	5298,000
APD-53-1-2	50187,000	0,868	2613,000	5548,000	0,359	0,939	2613,000	5548,000
APD-53-1-3	50199,000	0,902	2748,000	5445,000	0,237	0,985	2748,000	5446,000
LEA-24-M1.2-1	50123,000	0,88	2911,000	5332,000	0,087	1050,000	2911,000	5332,000
LEA-24-M1.2-2	49943,000	0,909	3080,000	5101,000	-0,076	1032,000	3080,000	5101,000
LEA-24-M1.2-3	49959,000	0,901	3048,000	5175,000	-0,041	1046,000	3048,000	5175,000
LEA-24-M1.2-4	50229,000	0,944	2957,000	5158,000	0,047	1137,000	2957,000	5158,000
LEA-34-M1-1	49612,000	0,874	3289,000	5078,000	-0,288	1167,000	3289,000	5078,000
LEA-34-M1-2	50055,000	0,628	2810,000	5246,000	0,185	0,756	2810,000	5246,000

Nomenclatura de la Muestra	Mg*	Al*	Na*	OH*	Fe(tot)/(Fe(tot)+Mg)	Na/(Na+Ca)	Al/(Al+Mg)
APD-53-1-1	2667,000	5318,000	0,855	0,932	0,792	0,945	0,904
APD-53-1-2	2581,000	5570,000	0,828	0,911	0,806	0,937	0,916
APD-53-1-3	2682,000	5489,000	0,864	0,992	0,812	0,933	0,913
LEA-24-M1.2-1	2826,000	5389,000	0,74	0,972	0,614	0,824	0,824
LEA-24-M1.2-2	3021,000	5140,000	0,808	0,98	0,537	0,877	0,78
LEA-24-M1.2-3	2991,000	5214,000	0,785	0,978	0,542	0,855	0,786
LEA-24-M1.2-4	2902,000	5195,000	0,91	0,078	0,499	0,88	0,775
LEA-34-M1-1	3251,000	5104,000	0,61	0,923	0,303	0,682	0,687
LEA-34-M1-2	2743,000	5291,000	0,51	0,694	0,249	0,804	0,71

Nomenclatura de la Muestra	Al/(Al+Si)	Al/(Al+Fe(tot)+Mg)	Ca/(Ca+Fe(tot)+Mg)
APD-53-1-1	0,43	0,663	0,018
APD-53-1-2	0,447	0,68	0,021
APD-53-1-3	0,441	0,663	0,022
LEA-24-M1.2-1	0,436	0,643	0,051
LEA-24-M1.2-2	0,424	0,621	0,035
LEA-24-M1.2-3	0,429	0,627	0,041
LEA-24-M1.2-4	0,425	0,633	0,037
LEA-34-M1-1	0,431	0,605	0,078
LEA-34-M1-2	0,426	0,647	0,042