

**REEVALUACIÓN Y REINTERPRETACIÓN DE DATOS DE  
TERMOBAROMETRÍA Y EQUILIBRIO DE FASES MINERALES DE LA  
FORMACIÓN SILGARÁ EMPLEANDO THERMOCALC Y THERIAK DOMINO**

**PAULA GIOVANNA DELGADO GALVIS  
ANA MILENA SUAREZ ARIAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**REEVALUACIÓN Y REINTERPRETACIÓN DE DATOS DE  
TERMOBAROMETRÍA Y EQUILIBRIO DE FASES MINERALES DE LA  
FORMACIÓN SILGARÁ EMPLEANDO THERMOCALC Y THERIAK DOMINO**

**PAULA GIOVANNA DELGADO GALVIS  
ANA MILENA SUÁREZ ARIAS**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Geólogo**

**Director:  
CARLOS ALBERTO RÍOS REYES  
Geólogo, PhD**

**Codirector:  
JULIÁN ANDRÉS LÓPEZ ISAZA  
Geólogo, MSc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISCOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

“Porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas. A Él sea la gloria para siempre.” Romanos 11,36.

A mis padres William Suárez Uribe y Ana Cely Arias Gamboa por su ejemplo, dedicación y amor, por la enseñanza que me dan día a día para entender que los logros se alcanzan con compromiso, constancia y disciplina. De ellos y para ellos todos mis logros.

A mis hermanas Silvia Marcela Suárez Arias y María Fernanda Suárez Arias por brindarme su apoyo incondicional, compañía, alegría y darme la felicidad de verlas crecer y cumplir sus logros que son mi motivación.

A mis abuelos: Victoria Gamboa por ser la madre de la mejor mamá del mundo, brindarme su compañía y consejos y a mis ángeles Giraldo Suárez, Inés Uribe y Misael Arias que sin duda me acompañan en todo mi camino dándome fuerzas en las dificultades desde el cielo.

A personas irremplazables en mi vida mis Tíos Edison, Israel, Flor Alba, Rubiela, Luz Dary y Cenaida Arias Gamboa, Oscar Suárez Uribe y demás familiares y amigos.

A Carlos Quiroz Prada por la compañía en este proceso, siempre luchando por el mismo sueño, ser geólogos de corazón

**Ana Milena Suarez Arias**

## DEDICATORIA

A Dios, de él es la gloria, mis éxitos y mi vida. Para Él toda mi gratitud.

A mi mami y nonitos maternos Nhora Cecilia Galvis, Marina Quiñonez y Ramiro Galvis (Q.E.P.D) quiénes estuvieron siempre presentes en mi vida dándome su apoyo, amor y disciplina, enseñándome a discernir y siempre tomar el camino correcto, de ellos son mis logros y mi amor.

A mi papi Giovanni Delgado Osorio de quién heredé maravillosas cualidades, una vena artística propia de sus genes y me enseñó el significado de las palabras esfuerzo y compromiso; a mi hermana, por su compañía y apoyo. A los dos amo y les agradezco por cada momento compartido.

A mi familia Galvis, por ser la mejor familia que Dios pudo haberme regalado, llena de seres únicos, felices e incondicionales.

A mi familia Delgado, que siempre han estado en mi corazón presentes y se han enorgullecido de cada uno de mis logros.

A mi mejor amiga María Fernanda Vergara, mi hermana, mi compañera y mi confidente.

A los amigos que gané y me hicieron feliz con su compañía llenando de lindos recuerdos esta etapa de mi vida.

**Paula Giovanna Delgado Galvis**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de formarnos profesionalmente y a la Escuela de Geología por brindarnos apoyo durante este proceso.

Al profesor Carlos Alberto Ríos Reyes por su colaboración y apoyo en la elaboración del trabajo final y el uso de los laboratorios.

Al profesor Julián Andrés López Isaza por acompañarnos como codirector del proyecto y brindarnos asesorías para la orientación del mismo.

Al profesor Oscar Mauricio Castellanos por facilitarnos los datos de geoquímica de roca total.

A los laboratorios de Rayos X y Microscopia, adscritos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander (Parque Tecnológico de Guatiguará) y su personal, por el servicio analítico suministrado para la adquisición de datos.

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN .....	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	22
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	23
2. OBJETIVOS .....	24
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
3. MARCO TEÓRICO .....	25
3.1 EQUILIBRIO DE FASES .....	25
3.1.1 Generalidades del Sistema Termodinámico .....	25
3.1.2 Estados del Sistema .....	27
3.2 SISTEMAS KFMASH Y CKNASH.....	28
3.3 GEOTERMOBAROMETRÍA .....	31
3.3.1 Reacciones Metamórficas.....	32
3.3.2 Geotermómetros y Geobarómetros .....	34
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE .....	37
4.2 ORGANIZACIÓN Y FILTRAJE DE MUESTRAS .....	37
4.3 ESTUDIO MICROSCÓPICO.....	37
4.4 EJECUCIÓN DE LOS SOFTWARE (THERIAK DOMINO- THERMOCALC- GTB) .....	38
4.4.1 Software Thermocalc .....	39

4.4.2 Software Theriak Domino .....	40
4.4.3 Software GTB .....	41
4.5 ELABORACIÓN DEL TRABAJO FINAL .....	42
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	43
5.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO .....	43
5.1.1 Muestra PCM-417 .....	45
5.1.2 Muestra PCM-420 .....	47
5.1.3 Muestra PCM-441 .....	51
5.2 GEOQUIMICA .....	55
5.2.1 Determinación de Protolito .....	55
5.2.2 Diagrama AFM de Thompson .....	58
5.3. EQUILIBRIO MINERAL .....	60
5.3.1 Minimización de Energía Libre de Gibbs .....	60
5.3.2 Pseudosecciones .....	64
5.3.2.1 Pseudosección PCM-417. ....	65
5.3.2.2 Pseudosección PCM-420. ....	67
5.3.2.3 Pseudosección PCM-441 .....	68
5.4 GEOTERMOBAROMETRÍA .....	69
5.4.1 Reevaluación y reinterpretación de datos Geotermobarométricos .....	73
5.4.2 Comparación con Otros Autores .....	75
5.4.3 Determinación del Pico Metamórfico para la Muestra PCM-441 .....	78
6. CONCLUSIONES .....	80
BIBLIOGRAFIA .....	82
ANEXOS .....	89

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Abreviaturas de minerales usadas en el presente estudio.....	38
Tabla 2. Resumen petrográfico para cada muestra de la zona de granate. Agrupa sus características ópticas, contactos netos en equilibrio y estructuras. ....	54
Tabla 3. Composición química de roca total para las muestras de la zona de granate de la Formación Silgará. Proporcionados por Castellanos et al. (2008) (Muestras PCM-417 y PCM-420) y laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, UIS sede Guatiguara (Muestra PCM-441).....	55
Tabla 4. Intervalos de presión y temperatura para cada una de las zonas reevaluadas de la Formación Silgará.....	69
Tabla 5. Comparación de los datos obtenidos del software GTB con el trabajo de Ríos et al. (2002). ....	74

## LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1. Diagrama AFM de Thompson. Representa las asociaciones minerales de las rocas pelíticas donde se añaden las áreas que ocupan las metapelitas ricas y pobres en aluminio. ....29
- Figura 2. Pseudosección donde se observan los ensamblajes minerales en equilibrio en zonas bivariantes limitados por líneas univariantes y puntos invariantes. Pseudosección desarrollada por el software Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09 usando la base de datos JUN92.bs.....30
- Figura 3. Diagrama de flujo que representa cada etapa de la metodología planteada.....36
- Figura 4. Interfaz del software Thermocalc de Powell and Holland (1994) versión 3.26. Dentro de esta herramienta se introducen las fases minerales estudiadas, rangos P-T, varianza y script. ....39
- Figura 5. Interfaz del software Theriak Domino de Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. Dentro de esta herramienta se introduce la base de datos, rangos P-T e intervalos de la gráfica. ....40
- Figura 6. Interfaz del software GTB de Spear and Kohn (2001). Dentro de esta herramienta se introducen los datos de química mineral y se escogen los geotermobarómetros y sus respectivas calibraciones. ....42
- Figura 7. Mapa geológico generalizado del suroccidente del Macizo de Santander. Muestra la ubicación de las muestras estudiadas y la delimitación de las zonas metamórficas de la Formación Silgará. ....44
- Figura 8. Estructuras y texturas del esquisto micáceo (PCM-420). A) y B) Textura locales porfidoblástica y poiquiloblástica N// Y NX, C) y D) Textura principal granolepidoblástica con estructuras dadas por agregados poligonales y crecimiento en microlitones. Dominio de clivaje se

	presenta de forma espaciada, zonal y paralela. N// Y NX. Nícoles paralelos (N//), Nícoles cruzados (NX). .....	50
Figura 9.	Estructuras y texturas del esquisto micáceo (PCM-441). A) y B) Textura principal granolepidoblástica con clivaje continuo de grano fino. N// Y NX, C) y D) Textura local lepidogranoblástica con agregados poligonales y puntos triples. N// Y NX. Nícoles paralelos (N//), Nícoles cruzados (NX).....	53
Figura 10.	Diagrama de discriminación de protolitos para la Formación Silgará en el área de Suroccidental del Macizo de Santander. ....	57
Figura 11.	Diagrama clasificación de los protolitos de la Formación Silgará. ....	58
Figura 12.	Proyección AFM de Thompson para las muestras pertenecientes de la zona de granate de la Formación Silgará. ....	59
Figura 13.	Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-417. A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. Las viñetas en cada imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral. ....	61
Figura 14.	Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-420. A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. . Las viñetas en cada imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral. ....	62
Figura 15.	Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-441.A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. . Las viñetas en cada	

- imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral. ....63
- Figura 16. Gráfica que representa el proceso de determinación del sistema químico mediante la paragénesis mineral.....64
- Figura 17. Pseudosección tipo P-T de la muestra PCM-417 de la Formación Silgará zona suroccidental del Macizo de Santander, construida en un sistema MnNCKFMASH empleando Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. La zona sombreada corresponde al campo de equilibrio P-T alcanzado para la muestra durante el evento metamórfico según su paragénesis mineral. ....66
- Figura 18. Pseudosección tipo P-T de la muestra PCM-420 de la Formación Silgará zona suroccidental del Macizo de Santander, construida en un sistema MnNCKFMASH empleando Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. La zona sombreada corresponde al campo de equilibrio P-T alcanzado para la muestra durante el evento metamórfico según su paragénesis mineral. ....67
- Figura 19. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-361 perteneciente a la zona de la estaurolita de la Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y del geobarómetro Granate-Plagioclasa-Biotita-Muscovita (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001). ....70
- Figura 20. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-441 perteneciente a la zona del granate de la Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y del geobarómetro Granate-Plagioclasa-Biotita-Muscovita (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001). ....71
- Figura 21. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-473 perteneciente a la zona de la silimanita de la

	Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y el geobarómetro GASP (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001).....	72
Figura 22.	Diagrama PT, mostrando la superposición de datos geotermobarométricos obtenidos en el presente estudio por GTB (polígonos azules) con relación a los reportado por Ríos et al. (2002) (polígonos de contorno verde) para las zonas metamórfica de granate, estaurólita y silimanita. Reacciones minerales en el sistema KFMASH de la red petrogenética (modificada de Spear and Cheney, 1989). Área gris claro representa el campo de estabilidad de la coexistencia de St+Qz. Punto triple $Al_2SiO_5$ .....	75
Figura 23.	Comparación de los resultados obtenidos por Castellanos et al. (2008) usando GTB de Spear and Kohn (2001) (polígono de contorno rojo) con los rangos obtenidos del presente estudio con GTB para cada zona metamórfica (polígonos azules).....	76
Figura 24.	Comparación de los resultados obtenidos por García et al. (2005) usando TWQ (contorno de color rojo) con los rangos obtenidos por GTB de Spear and Kohn (2001) para cada zona metamórfica (polígonos azules).....	77
Figura 25.	Comparación de los resultados obtenidos por Arenas (2004) por medio de análisis petrográfico (contorno de color rojo) con los rangos obtenidos por GTB de Spear and Kohn (2001) para cada zona metamórfica (polígonos azules).....	78
Figura 26.	Gráfica de correlación de datos de equilibrio de fases minerales generadas por Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010) versión 01.08.09 (campo azul) y geotermobarometría dada por GTB de Spear and Kohn (2001) (polígono de contorno rojo) para la zona de granate (PCM-441) de la Formación Silgará.....	79

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-361. ....	89
Anexo B Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-441. ....	90
Anexo C Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-473. ....	91

## RESUMEN

### TÍTULO:

REEVALUACIÓN Y REINTERPRETACIÓN DE DATOS DE TERMOBAROMETRÍA Y EQUILIBRIO DE FASES MINERALES DE LA FORMACIÓN SILGARÁ EMPLEANDO THERMOCALC Y THERIAK DOMINO\*

### AUTORES:

PAULA GIOVANNA DELGADO GALVIS & ANA MILENA SUÁREZ ARIAS\*\*

### PALABRAS CLAVE:

FORMACIÓN SILGARÁ, EQUILIBRIO DE FASES MINERALES, GEOTERMOBAROMETRÍA, PSEUDOSECCIONES.

### DESCRIPCIÓN:

La reevaluación y reinterpretación de datos de la Formación Silgará que afloran área de Pescadero-Aratoca en el suroccidente del Macizo de Santander, está basada en muestras de cada zona metamórfica definidas en el previo estudio de Ríos et al. (2002). La geotermobarometría y el equilibrio de fases minerales se determinaron mediante los software Thermocalc, Theriak-Domino y GTB. Los datos geotermobarométricos estimados con el software GTB se hicieron para cada zona metamórfica (zona granate 3.0-5.9 Kbar y 400-500 °C; zona estaurolita 5.5-8.4 Kbar y 553-600 °C; zona silimanita 4.0-8.0Kbar y 600-710°C) utilizando diferentes geotermómetros y geobarómetros con distintas calibraciones. El equilibrio de fases minerales se determinó por los software Theriak-Domino y Thermocalc utilizando el sistema MnNCKFMASH, que establece el campo de estabilidad para la asociación mineral correspondiente a la zona del granate en un rango de presión de 0-9 Kbar y en un rango de temperatura de 350-550°C. La reevaluación y reinterpretación de los resultados están dados por: (1) las condiciones P-T para cada zona metamórfica, que son muy similares a los resultados obtenidos en el trabajo de Ríos et al. (2002), que coinciden con los diferentes campos dentro de la red petrogenética de Spear and Cheney (1989) y (2) la correlación del equilibrio de fases minerales con la geotermobarometría para la zona del granate estableciendo un pico de presión y temperatura.

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes. Codirector: MSc Julián Andrés López Isaza.

## ABSTRACT

### TITLE:

REEVALUATION AND REINTERPRETATION OF THE THERMOBAROMETRY DATA, AND THE BALANCE OF MINERAL PHASES OF "SILGARÁ" FORMATION, USING THERMOCALC AND THERIAK-DOMINO

### AUTHORS:

PAULA GIOVANNA DELGADO GALVIS & ANA MILENA SUÁREZ ARIAS\*\*

### KEY WORDS:

SILGARÁ FORMATION, BALANCE OF THE MINERAL PHASES, GEOTHERMOBAROMETRY, PSEUDOSECTIONS.

### DESCRIPTION:

The revaluation and reinterpretation of data of Silgará Formation cropping out in the Pescadero-Aratoca area, southwestern Santander Massif, is based on samples from each metamorphic zone defined in the preliminary work by *Ríos et al. (2002)*. The geothermobarometry and the equilibrium of mineral phases were determined by Thermocalc, Theriak-Domino and GTB Software. The geothermobarometric data estimated by GTB software were made for each metamorphic zone (garnet zone 3.0-5.9Kbar and 400–500°C; staurolite zone 5.5–8.4Kbar and 553–600°C; silimanite zone 4.0–8.0Kbar and 600–710°C) using different geothermometers and geobarometers. The equilibrium of mineral phases was determined by Theriak-Domino and Thermocalc software, using the MnNCKFMASH system, which establishes the stability field for the mineral association corresponding to the garnet zone in the pressure range of 0-9Kbar and the temperature range of 375-575°C. The revaluation and reinterpretation of results are given by (1) the P-T conditions for each metamorphic zone, which are quite similar to results obtained in the Ríos's work, which matches with the different stability fields of the petrogenetic grid proposed by Spear and Cheney (1989), and (2) the correlation of the equilibrium of mineral phases with the geothermobarometry for the garnet zone, setting a temperature- and pressure-peak conditions.

\*Degree Work

\*\* Faculty of Physics-Chemistry Engineering. School of Geology: PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes. Codirector: MSc Julián Andrés López Isaza.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados sobre la Formación Silgará se basan en el uso de datos petrográficos, geoquímicos y termobarométricos que son de gran utilidad para predecir la génesis, condiciones de formación, y procesos del basamento ígneo-metamórficos que tuvieron lugar en el Macizo de Santander. El presente trabajo de grado tiene en cuenta estudios termobarométricos realizados por diferentes autores los cuales estimaron condiciones P-T y la ocurrencia de minerales indicadores de metamorfismo de la Formación Silgará. Ríos et al. (2002) estudian la evolución tectono-metamórfica de las rocas de la Formación Silgará en el suroccidente del Macizo de Santander presentando condiciones de P-T (495-518 °C y 4.4-5.5 Kbar de la zona del granate; 590–612 °C y 6.6–7.5 Kbar de la zona de la estaurolita; 660–700 °C y 5.5–7.2 Kbar de la zona de la silimanita) estimadas a partir de diferentes termobarómetros y barómetros. García et al. (2005) establece condiciones de alta temperatura y presión intermedia (metamorfismo tipo Barroviano), con el desarrollo de tres zonas metamórficas: estaurolita-cianita, silimanita y migmatita. Las condiciones de presión y temperatura, estimadas mediante el programa TWQ, están en el rango de 5.0-9.5 Kbar y 630-727°C. Castellanos et al. (2008) definen las paragénesis minerales y los cálculos geotermobarométricos que indican temperaturas y presiones metamórficas de 400-600 °C y 4.0-6.5 Kbar, respectivamente.

Dentro de la información consultada fueron de gran importancia los trabajos de grado que estiman presiones y temperaturas para la Formación Silgará. Ríos (1999), divide la Formación Silgará dentro de cuatro zonas metamórficas: biotita, granate, estaurolita y silimanita, basados en las asociaciones minerales para los esquistos pelíticos, y sus condiciones PT de metamorfismo con rangos de 2.5-4.0 Kbar y 430-570°C, respectivamente. Gutiérrez (2001) determina la geotermobarometría para la Formación Silgará con temperaturas entre 635°C y 728 °C. Arenas (2004) establece temperaturas entre 500°C y 650°C, y a presiones

superiores a 4.1 Kbar y 7.2 Kbar en las rocas de las facies epidota – anfibolita y facies anfibolita alta; donde las características químicas y las tendencias composicionales de algunos minerales metamórficos, han permitido inferir una trayectoria horaria.

Los cálculos de geotermobarometría y equilibrio de fase mineral son modelados con diferentes herramientas, tales como, Thermocalc (Powell and Holland, 1988; Powell and Holland, 1994), Theriak Domino (De Capitani and Petrakakis, 2010) y GTB (Spear and Kohn, 2001) que relacionan ensamblajes minerales en equilibrio y condiciones de formación de la roca.

Los campos de estabilidad predichos por Theriak Domino y Thermocalc para el equilibrio de fases minerales se basan en la minimización de energía libre de Gibbs, que es la solución de complejos sistemas de ecuaciones termodinámicos los cuales se representan por pseudosecciones P-T, T-X y P-X dando como resultado ensamblajes estables para una roca específica en condiciones específicas (De Capitani and Petrakakis, 2010). Estos software son aplicados por diferentes autores representando el equilibrio de fases minerales por medio de pseudosecciones utilizando diferentes sistemas químicos para rocas metapelíticas. Tinkham et al. (2001) realizan la comparación de las pseudosecciones con sistemas MnNCKFMASH y KFMASH para las metapelitas donde se destaca la consecuencia de ignorar los importantes constituyentes de rocas como MnO, Na<sub>2</sub>O y CaO y concluyen que el sistema KFMASH no puede modelar fases importantes como plagioclasa y zoisita, y hay diferencias significativas en la predicción del granate, biotita y en la estabilidad del cloritoide. Chunjing and Wei (2007) estudian el proceso de anatexis en metapelitas de alto grado donde pueden ser mejor simuladas en el sistema NCKFMASH. White et al. (2007) muestran las relaciones de actividad-composición para la biotita, granate y silicato líquido en la construcción de pseudosecciones P-T utilizando diferentes

sistemas KFMASH, NCKFMASH y NCKFMASHTO para las metapelítas de alto grado.

La geotermobarometría determinada con el software GTB permite encontrar un adecuado ensamblaje de fases en equilibrio donde utiliza una reacción de intercambio catiónico (geotermómetros) y una reacción de transferencia neta (geobarómetros) determinando la intersección PT para las condiciones de formación de la roca (Bucher and Grapes, 2011). Castellanos et al. (2008) realiza un estudio geotermobarométrico usando GTB llevando a cabo un análisis petrológico detallado de las pelitas y rocas relacionadas, ha sido usado para deducir la historia de P-T para las rocas metamórficas de la Formación Silgará.

La implementación de estos software es adecuada para obtener datos más precisos sobre las condiciones de presión y temperatura de metamorfismo e innovar en la predicción del equilibrio de fases minerales de las rocas metamórficas. Con base en lo anteriormente expuesto, se propone llevar a cabo la reevaluación y reinterpretación de los datos de geotermobarometría y equilibrio de fases minerales reportados por el trabajo realizado por Ríos et al. (2002).

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Formación Silgará ha sido estudiada desde distintas perspectivas de la geología, haciendo posible la reevaluación de datos de estudios previos gracias a la modernización de algunas herramientas computacionales de análisis. En este caso se busca complementar la información previamente analizada promoviendo nuevas interpretaciones en base al funcionamiento de software como Thermocalc y Theriak Domino, generando resultados más precisos y enfocados hacia el campo de la geotermobarometría, proveyendo información acerca de las fases presentes durante el proceso de metamorfismo y el equilibrio mineral.

Las preguntas a las cuales se quiere dar respuesta con este proyecto son:

- ¿Qué beneficios proporcionan el software Thermocalc y Theriak Domino y cuáles son los más indicados para estudios de geoquímica?
- ¿Cómo se usa el software Thermocalc y Theriak Domino y que procedimientos se deben llevar a cabo para tener resultados eficientes en el campo de la geoquímica de rocas metamórficas?
- ¿Cuáles son los rangos de presión y temperatura a los que estuvo sometida la Formación Silgará?
- Con respecto a la presión y temperatura que se haya evidenciado, ¿qué fases se manejaron en equilibrio durante el proceso de metamorfismo de la Formación Silgará?

- 

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

La Formación Silgará ha sido objeto de diferentes estudios dentro de los cuales se han identificado petrográficamente las fases minerales, zonas de metamorfismo, litologías, facies de metamorfismo, presiones y temperaturas de formación de algunas de las unidades, posibles protolitos y extensión. A pesar de todos estos estudios, aún no se han establecido los equilibrios de fases ni se ha realizado el modelamiento termodinámico de las fases minerales en equilibrio, por lo que se hace necesario realizar una reinterpretación de los datos disponibles además de la revisión de algunas de las secciones delgadas.

Este trabajo pretende realizar una reinterpretación de los datos disponibles de geotermobarometría y equilibrio mineral para la Formación Silgará, aprovechando el uso de herramientas tales como los software Thermocalc y Theriak-Domino. Por consiguiente, con este proyecto de investigación se busca aportar al conocimiento de esta unidad mediante la compilación y revisión de los datos existentes, efectuando estudios complementarios que permitan entender el contexto geológico del Macizo de Santander.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Aplicar el software Thermocalc y Theriak Domino en la reinterpretación de datos preexistentes enfocados en la geotermobarometría de la Formación Silgará y a su vez en la generación e interpretación de nuevos resultados de equilibrio de fases minerales que se hayan presentado durante su proceso de metamorfismo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Usar y aprovechar como herramienta computacional y geológica el software Thermocalc y Theriak Domino realizando los cálculos debidos para obtener resultados de geotermobarometría y equilibrio de fases minerales.
- Relacionar los resultados de geotermobarometría de la Formación Silgará previamente mencionados con los de estudios anteriores para generar nuevas interpretaciones y complementar las que se tienen propuestas.
- Generar diagramas de fases del género de las pseudosecciones, los cuales proporcionan la información necesaria acerca del equilibrio de fases minerales, revelando nuevos detalles del proceso de metamorfismo de la Formación Silgará.

### 3. MARCO TEÓRICO

Los software usados en el desarrollo de este proyecto de grado, Theriak Domino, Thermocalc y GTB poseen un funcionamiento basado en principios químicos y termodinámicos relacionados entre sí, los cuales se aplican en la generación de cálculos sistematizados con los que es posible procesar los datos geoquímicos proporcionados por cada muestra de roca. Estos conceptos son básicos para el entendimiento de dichos software y son explicados en los siguientes capítulos.

#### 3.1 EQUILIBRIO DE FASES

**3.1.1 Generalidades del Sistema Termodinámico** El proceso de metamorfismo se basa en la transformación de los cuerpos de roca involucrando cambios de presión y temperatura. La termodinámica es la ciencia que estudia dichas transformaciones que se llevan a cabo dentro de sistemas termodinámicos, que en un contexto geológico podrían llegar a ser desde un pequeño volumen de roca hasta la totalidad de la corteza terrestre (Best, 2008). Dichos sistemas pueden ser cerrados que son aquellos que permiten el intercambio de energía en forma de calor o trabajo, pero no permiten el intercambio de materia a través de sus límites; también pueden ser abiertos, los cuales permiten el intercambio de materia y de energía en forma de calor o trabajo y por último están los sistemas aislados que no permiten el intercambio de energía y materia con ningún otro sistema (Spear, 1995), un tipo de sistema aislado es el sistema adiabático que se encuentra separado de forma termal con respecto a otros sistemas, pero intercambia energía en forma de trabajo con sus alrededores (Best, 2008).

Los sistemas químicos se forman a partir de componentes y fases, los componentes pueden ser de dos tipos, por ejemplo, en un sistema dado por

olivino  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  y ortopiroxeno  $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$  se determinan tres componentes independientes del sistema  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{SiO}_2$ , pero si se hace referencia a que el olivino se presenta en forma de fayalita  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  y fosterita  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  se considerarían estos dos como componentes de fase (Miyashiro, 1994), definiendo como fase mineral a una sustancia química homogénea que es posible separar de otras sustancias, es decir, dentro de un concepto geológico una fase sería equivalente a un mineral formador de roca o a los fluidos metamórficos que actúan dentro de estos procesos, por ejemplo, el cuarzo y la plagioclasa son fases minerales diferentes, pero la albita y la anortita son clases de plagioclasa que no se pueden separar, por lo tanto se concluye que las variantes de un mineral se consideran una sola fase (Spear, 1995).

Los procesos termodinámicos que se dan dentro de un sistema se basan en los cambios que sufren las variables de estado, las cuales describen de forma macroscópica el estado de un sistema, estas pueden ser extensivas e intensivas (Spear, 1995). Las variables de tipo intensivas son aquellas que no cambian así se divide el sistema y son independientes de la cantidad del material, por ejemplo, la presión y la temperatura. Las variables extensivas cambian cuando el sistema se divide ya que estas si dependen de la cantidad de material, como lo son la entalpía, entropía, energía libre de Gibbs y cantidades molares (SERC, 2014). La entropía es definida como la medida de la uniformidad con respecto a la cantidad de energía dentro de un sistema (Best, 2008). Una sustancia que mantiene mucha entropía es aquella que posee una alta capacidad para moverse y por consiguiente tiene altos grados de libertad (García, 1995). La entalpía está relacionada a los deltas de energía calorífica que se presentan en un proceso a presión constante en el cual se ha transferido parte de esta (Best, 2008).

**3.1.2 Estados del Sistema** Los estados del sistema dependen directamente de los valores que toman sus variables de estado, por consiguiente se definen de la siguiente forma:

El estado de equilibrio se caracteriza por mantener los valores de sus variables sin cambio alguno en espacio y tiempo (Spear, 1995). A este estado de equilibrio se llega en el momento en el que el volumen de roca ha acomodado sus minerales a las condiciones a las que está siendo sometido por medio de cambios físicos como la generación de nuevas texturas y estructuras y cambios químicos que se dan a través de la formación de nuevos minerales (Gómez, 2006). El estado de equilibrio puede ser estable, este es el que tiene la menor configuración de energía libre de Gibbs, metaestable el cual no tiene variación ni en tiempo ni en espacio pero no tiene la menor configuración de energía libre de Gibbs y puede llegar a un estado estable, estado de equilibrio parcial y el estado de equilibrio local (Spear, 1995).

Un condicionante que determina si un sistema termodinámico está en equilibrio estable es el hecho de que la Energía Libre de Gibbs se encuentre minimizada dentro del sistema y no varíe con respecto al tiempo, es decir,  $\partial G=0$  (García, 1995). La energía libre de Gibbs es una magnitud que es determinada por la cantidad de las sustancias en moles y su respectivo potencial químico ( $\mu_i$ ) (Miyashiro, 1994). Un sistema heterogéneo se compone de varias fases minerales y de varios componentes químicos, por consiguiente cada componente tiene un potencial químico y una cantidad determinada en moles (García, 1995) entonces la energía libre de Gibbs estaría dada por:

$$\partial G = \sum \mu_i n_i = 0$$

La regla de las fases mineralógica si bien no es una variable de estado, si se toma como un condicionante más, ya que se plantea sólo cuando un volumen de roca se encuentra dentro de un equilibrio termodinámico con presión y temperatura constantes (Misyahiro, 1994). En este caso la regla de fases se expresaría de la siguiente forma:

$$F = C - P + 2$$

Siendo (F) el número de grados de libertad o varianza, es decir, el máximo número de variables intensivas a las que se les pueden asignar valores arbitrarios o que pueden ser cambiadas independientemente, sin causar cambios en el número de fases del sistema en equilibrio, (C) número de componentes del sistema, (P) número de las fases presentes y (2) como una constante (Misyahiro, 1994).

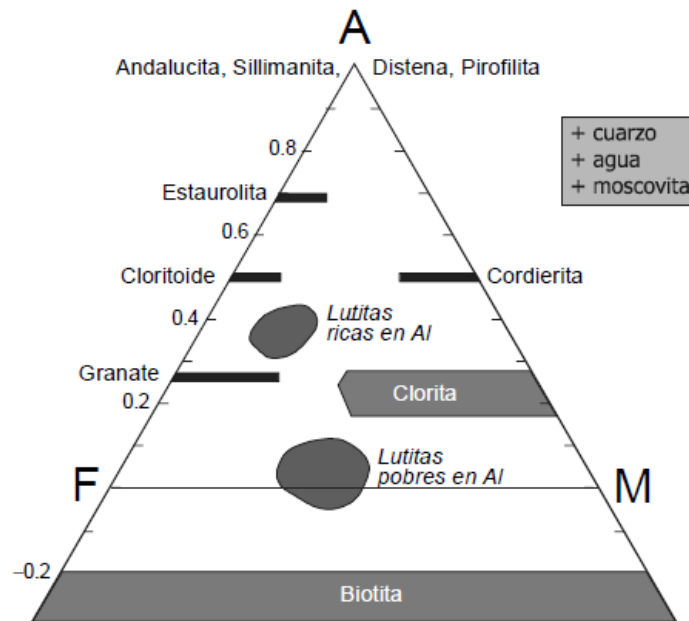
### **3.2 SISTEMAS KFMASH Y CKNASH**

La Formación Silgará se conforma en su gran mayoría por rocas pelíticas, este tipo de rocas posee un sistema que las caracteriza llamado KFMASH con los siguientes componentes químicos: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, K<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>O, junto a componentes minoritarios como TiO, MnO, Na<sub>2</sub>O y CaO. Estos tipos de rocas son buenos indicadores de metamorfismo a causa de su sensibilidad a los cambios de presión y temperatura (Melgarejo, 2003). Los sistemas químicos pueden ser representados mediante diagramas de fase, los cuales muestran que fase o grupo de fases (ensamblaje mineral) se encuentra más estable en función de la presión y la temperatura (Best, 2008). Principalmente se encuentran dos tipos de diagramas de fase que son de utilidad dentro de este proyecto, estos son los diagramas triangulares y las pseudosecciones.

Los diagramas triangulares pueden ser AFM, AKM, AKF y ACF los cuales se realizan para graficar sistemas metamórficos a través de una reducción de los

componentes (Gómez, 2006). El diagrama triangular más usado para las rocas del presente estudio es el diagrama triangular AFM de Thompson (Fig.1) el cual usa el sistema KFMASH, donde se necesitan hasta 6 dimensiones para poder graficarlo, por consiguiente, este diagrama se proyecta desde las fases minerales que se encuentran en exceso como el agua, la muscovita y el cuarzo, excluyendo entonces del sistema el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y reduciendo el sistema a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$ , encontrando la posibilidad de graficarlo en un diagrama ternario de dos dimensiones (Vernon and Clarke, 2008).

Figura 1. Diagrama AFM de Thompson. Representa las asociaciones minerales de las rocas pelíticas donde se añaden las áreas que ocupan las metapelitas ricas y pobres en aluminio.

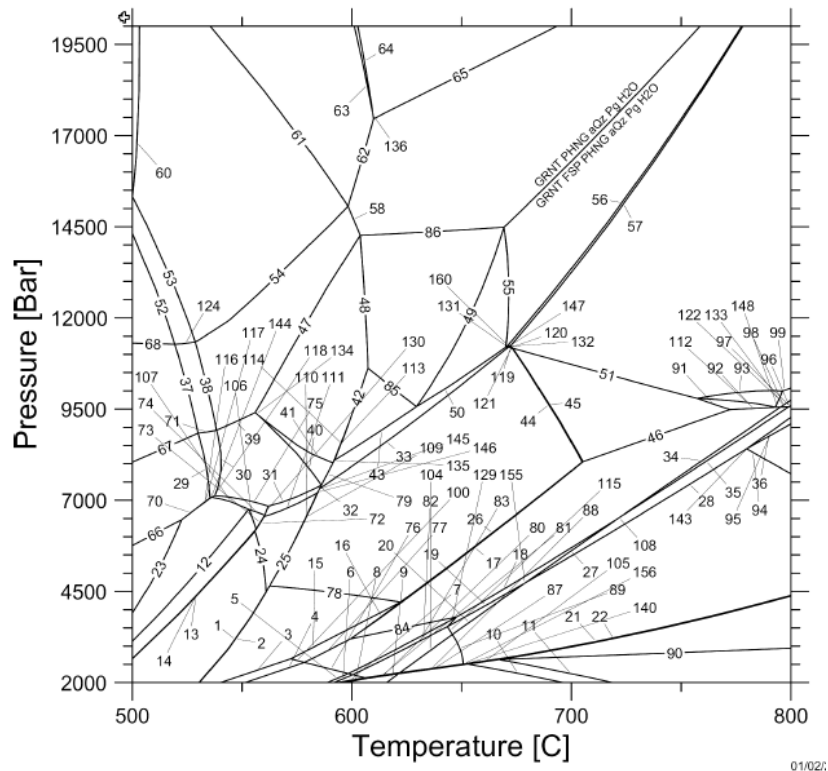


Fuente: Tomado de Gómez (2006).

Las pseudosecciones son diagramas de fases multivariantes (Fig. 2) que se construyen para una composición determinada (Thermocalc, 2014), representando relaciones de equilibrio de las fases minerales, donde se observan cambios entre estas debido a las variaciones de presión y temperatura (SERC, 2014). Este tipo

de gráfica muestra los campos de estabilidad y la variedad de reacciones entre las diferentes asociaciones minerales que se encuentran en equilibrio teniendo en cuenta la composición total de la roca (óxidos mayores). Se pueden construir tres tipos de pseudosecciones: PT, TX o PX (Thermocalc, 2014). Estas gráficas se componen de zonas bivariantes, líneas univariantes y puntos invariantes, los cuales serán definidos a continuación:

Figura 2. Pseudosección donde se observan los ensamblajes minerales en equilibrio en zonas bivariantes limitados por líneas univariantes y puntos invariantes. Pseudosección desarrollada por el software Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09 usando la base de datos JUN92.bs.



Fuente: Tomado de SERC (2014).

Puntos invariantes: son aquellos puntos en los cuales se mantienen o coexisten en equilibrio estable las fases del sistema químico (Pacuar, 2014). En estos puntos invariantes los grados de libertad son iguales a cero (Alarcón, 2014).

Líneas Univariantes: son aquellas que poseen solo un grado de libertad y por consiguiente las otras variables son automáticamente determinadas (Alarcón, 2014). Dentro de estas líneas coexisten varias fases minerales, es decir, que en estos intervalos de presión y temperatura se genera la reacción química que produce nuevos ensamblajes minerales (Pacuar, 2014).

Zonas Bivariantes: Áreas en las cuales existen dos grados de libertad, es decir, que se deben asignar valores a dos de las variables de estado y el resto serán automáticamente propuestas. Dentro de estas zonas coexisten ciertas fases minerales a diferentes presiones y temperaturas manteniendo el equilibrio estable entre ellas (Alarcón, 2014).

### **3.3 GEOTERMOBAROMETRÍA**

Es la rama de la petrología metamórfica que estudia los cálculos de presiones y temperaturas a los cuales estuvieron sometidas dichas rocas manteniendo un equilibrio químico. Estos estudios son basados en la generación de constantes de equilibrio a partir de reacciones químicas (Spear, 1995) y sus cálculos se realizan con la ayuda de minerales sensibles a los cambios de presión y temperatura llamados geotermómetros y geobarómetros (Selverstone, 2015).

**3.3.1 Reacciones Metamórficas** Los procesos metamórficos están ligados a los principios que rigen las reacciones químicas, las cuales generan los minerales formadores de roca y son provocadas por un desequilibrio térmico y mecánico en volúmenes reducidos de la corteza y el manto de la Tierra (Bucher and Grapes, 2011). La determinación de las condiciones de presión y temperatura se pueden dar por medio de las reacciones metamórficas que se hayan llevado a cabo durante el proceso de metamorfismo (Gómez, 2006), las más útiles para evaluar la presión son aquellas que se producen en un rango muy amplio de temperaturas con una misma presión, mientras que una reacción que se produce a la misma temperatura para un amplio rango de presiones será una buena indicadora de la temperatura (SERC, 2014). Las reacciones que permiten que nuevas fases minerales sean introducidas en un cuerpo de roca con composición específica son llamadas isogradas (Selverstone, 2015)

Las Reacciones de Intercambio, las cuales son ideales para el estudio de temperaturas de rocas metapelíticas de grado medio, ya que presentan gran sensibilidad con respecto a los cambios de temperatura y una sensibilidad casi nula con respecto a los cambios de presión y composición (Holdaway and Mukhopadhyay, 1993). Estas reacciones se dan a causa del cambio de cationes entre especies minerales, dentro las cuales no se generan nuevas fases y tampoco desaparecen algunas de ellas, por el contrario, se dan cambios composicionales internos a causa de dicho intercambio (SERC, 2014). Este tipo de reacciones se da entre minerales ferromagnesianos como la biotita y el granate, siendo este uno de los geotermómetros más usados junto al geotermómetro de granate-piroxeno (Spear, 1995).

Las Reacciones Solvus son consideradas excelentes termómetros ya que se llevan a cabo dentro de altas temperaturas que permiten que dos soluciones solidas parciales se mezclen (García, 1995). Son también llamadas como reacciones solido-solido, las cuales tienen como característica el hecho de que

son independientes de la composición química de la fase fluida, esta premisa no se debe confundir con el hecho de que no exista una fase fluida, por el contrario, existe pero no hace parte de la reacción. Los ejemplos más claros acerca de los geotermómetros relacionados a reacciones solvus son: ortopiroxeno-clinopiroxeno, plagioclasa-feldespato alcalino, calcita-dolomita, moscovita-paragonita (Bucher and Grapes, 2011).

Un tipo especial de reacción sólido-sólido son las llamadas transformaciones polimórficas, las cuales consisten en los cambios que se dan en fases de composición idéntica, los ejemplos clásicos son las reacciones entre los silicatos de aluminio (cianita-silimanita-andalucita), la conversión de grafito de diamante a alta presión y los cambios entre minerales de carbonato de calcio (calcita-aragonita) (SERC, 2014). Si la roca tiene dos de estos minerales, las condiciones de formación corresponden a la curva univariante y si contiene los tres, la roca se ha formado en las condiciones PT del punto triple invariante (unos 500°C y 3.5Kbar) (Gómez, 2006). Estas transformaciones son usadas tanto para determinar geotermómetro como determinar geobarómetro.

Las reacciones ideales para la determinación de los geobarómetros son las reacciones de transferencia neta sólido-sólido. Este tipo de reacción es ideal para la determinación de geobarómetros, ya que son reacciones que no implican algún componente líquido y esto significa que la presión puede ser estimada de forma independiente de la cantidad de agua (Holdaway and Mukhopadhyay, 1993). El ejemplo más común dentro de estos geobarómetros es el GASP (granate, aluminosilicato, cuarzo y plagioclasa), este es usado en el cálculo de la presión de rocas metapelíticas de grado medio a alto. Las reacciones de transferencia neta se dan a causa de la formación de nuevos minerales a partir de unos anteriores por medio de la transferencia de elementos de una fase a otra (SERC, 2014).

**3.3.2 Geotermómetros y Geobarómetros** Los geotermómetros y geobarómetros más usados dentro del estudio de los datos presión y temperatura en rocas metapelíticas son: Granate-Biotita, geotermómetro de intercambio catiónico que tiene diversas calibraciones, es el caso de Ferry and Spear (1978) y Perchuk and Lavrent'eva (1984), determinan la sustitución casi ideal entre el Fe y Mg para el granate y la biotita (Spear, 1995), sin embargo la idealización de las sustituciones relacionadas a otros elementos químicos tales como Ca, Al, Ti, y Mn generan desviaciones dentro de los resultados. Hodges and Spear (1982), proponen nuevos modelos de actividad para el granate (Kohn and Spear, 1990) incorporando una sustitución no ideal para el Ca con el fin de ser estadísticamente más consistente con los datos generando temperaturas más altas con respecto a las producidas por Ferry and Spear (1978) (Spear and Peacock, 1989). Ganguly and Saxena (1984), mejora las sustituciones entre Fe, Mg y Ca para las diferentes especies de granate que puedan coexistir entre esta fase (Grosularia y Piropo), considerándolos como soluciones no ideales, al igual que los trabajos realizados por Berman (1990) quienes también basan su modificación en las sustituciones llevadas a cabo dentro de las diferentes especies de granate (Ríos, 1999). Holdaway et al. (1997), realiza una recalibración usando parámetros de Margules obtenidos para el granate, teniendo en cuenta el Fe, Mg, Ca y Mn. Además de las correcciones de la biotita con respecto a Al. Kleemann and Reinhardt (1994), incursionaron en el uso del particionamiento no ideal entre el granate y la biotita, y las irregularidades de composición, tales como  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  y la sustitución de  $Fe^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en granate (Holdaway et al., 1997).

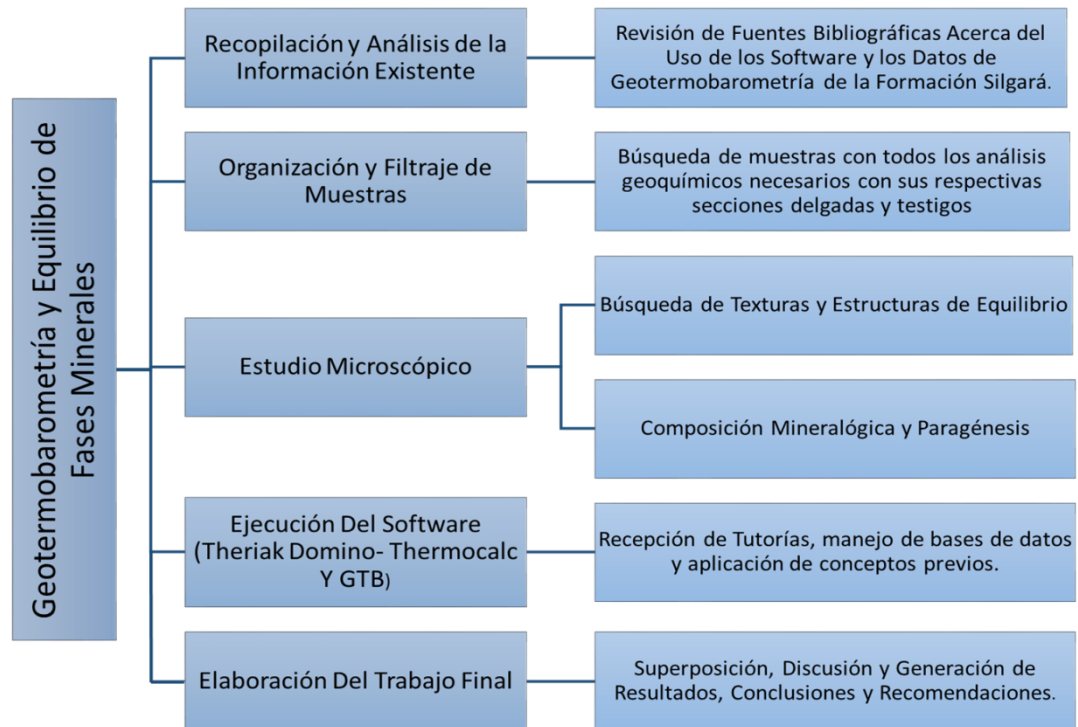
Los geobarómetros de transferencia neta utilizados comúnmente para hallar las presiones metamórficas en roca metapelíticas son granate-biotita-muscovita-plagioclasa para rocas con ausencia de polimorfos de aluminio y GASP (granate-polimorfos de aluminio-plagioclasa-cuarzo) para rocas con presencia de dichos polimorfos. Estos geobarómetros poseen las siguientes calibraciones: Ghent and Stout (1981) que relacionan las sustituciones que se dan entre la plagioclasa, la

muscovita, la biotita y el granate con respecto a elementos tales como el Fe, Mg, Al, Ca y K. Estos autores también han especificado en trabajos más recientes de los efectos que produce el TiO<sub>2</sub> dentro la biotita y el granate Ghent and Stout (1984). Hodges and Crowley (1985) proponen un método sistemático para realizar la calibración, el cual es más acertado disminuyendo los posibles errores provocados por calibraciones de tipo experimental y determina la reacción en la que se balancea el Ca entre la plagioclasa y el granate involucrando a la biotita y la muscovita con respecto al Fe como miembro extremo (Spear and Peacock, 1989). Powell and Holland (1988) realizan este mismo balanceo con respecto al Mg como miembro extremo. Hoisch (1990) incluye expresiones termodinámicas con parámetros de interacción que modelan la sustitución no ideal entre los cationes pertenecientes a la muscovita y la biotita. Determina que sus resultados son cercanos a los producidos por el geobarómetro GASP. Newton and Haselton (1981) realizan una calibración sólo para el geobarómetro GASP, dentro de esta priorizan la actividad del granate y de la plagioclasa teniendo en cuenta especialmente la grosularia y el piropo para la fase del granate y la anortita para la fase de la plagioclasa, de igual forma evalúan y corrigen los casos donde el volumen molar de la grosularia es el suficiente para generar cambios en el coeficiente de actividad del granate (Newton and Perkins, 1982).

## 4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo que permitió de forma coherente y ordenada el desarrollo de este estudio se describe a continuación (Fig.3).

Figura 3. Diagrama de flujo que representa cada etapa de la metodología planteada.



Fuente: Autores

#### **4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE**

En esta etapa se realizó la adquisición y revisión de la información existente acerca de la Formación Silgará y los software (Theriak/Domino, Thermocalc y GTB), las cuales se obtuvieron mediante diferentes fuentes bibliográficas (libros, artículos de revistas científicas y trabajos de grado), estos documentos se consultaron en la base de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, páginas web y documentos del Servicio Geológico Colombiano con el fin de analizar y clasificar la información importante para el presente trabajo, en especial se tuvo en cuenta la información proporcionada del estudio realizado por Ríos et al. (2002).

#### **4.2 ORGANIZACIÓN Y FILTRAJE DE MUESTRAS**

Las muestras fueron suministradas del estudio realizado por Ríos et al. (2002) para llevar a cabo este proyecto de grado; además de esto se realizó un proceso de filtraje y se escogieron aquellas muestras (PCM-417, PCM-420, PCM-441, PCM-361 y PCM-473) que tenían estudios geoquímicos que fueron necesarios para el uso de los software.

#### **4.3 ESTUDIO MICROSCÓPICO**

El estudio microscópico se realizó a las secciones delgadas pertenecientes a las muestras de la zona del granate, en las cuales se enfocó el estudio de equilibrio de fases minerales. Para estas fueron establecidas las diferentes características petrográficas como texturas y estructuras de equilibrio, composición mineralógica y paragénesis de la roca (utilizando las abreviaturas propuestas por Whitney and Evans, 2010, tabla 1). El análisis de las secciones fue realizado en el laboratorio de microscopía electrónica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 1. Abreviaturas de minerales usadas en el presente estudio.

<b>Mineral</b>	<b>Abreviatura</b>
Albita	Ab
Andalucita	And
Anfibol	Amp
Apatito	Ap
Biotita	Bt
Calcita	Cal
Clinozoisita	Czo
Cloritoide	Cld
Clorita	Chl
Cordierita	Crd
Cuarzo	Qz
Diópsido	Di
Estaurolita	St
Epidota	Ep
Glaucófana	Gln
Feldespato K	Fsp
Granate	Grt
Jadeíta	Jd
Muscovita	Ms
Sericita	Ser
Silimanita	Sil
Plagioclasa	Pl

Fuente: Tomado de Whitney and Evans (2010).

#### **4.4 EJECUCIÓN DE LOS SOFTWARE (THERIAK DOMINO- THERMOCALC-GTB)**

En esta etapa se procesaron los datos geoquímicos de las muestras anteriormente nombradas pertenecientes a la zona de Aratoca-Pescadero de la Formación Silgará utilizando los software Theriak/Domino, Thermocalc y GTB. La tabla 1 muestra la abreviaturas de Whitney and Evans usadas para cada modelamiento en los software.

**4.4.1 Software Thermocalc** Thermocalc versión 3.26 es un programa de cálculo termodinámico desarrollado por Powell and Holland (1994) que utiliza y agrupa bases de datos asociadas a diferentes sistemas químicos con el fin de llevar a cabo cálculos de termobarometría y graficar diagramas de fase para rocas metamórficas, tales como proyecciones P-T, pseudosecciones (P-T, P-X y T-X), diagramas de compatibilidad y  $\mu$ - $\mu$  diagramas. La Fig. 4 ilustra la interfaz del software Thermocalc donde se observa un menú para introducir y procesar los datos que tiene diferentes opciones como: (0) Generación tabla de datos termodinámicos de miembros extremos, (1) Generación de diagramas de fase, (2) Cálculo de promedio de presión y temperatura, (3) Cálculo de reacciones entre miembros extremos y (4) Lista de miembros extremos y composiciones. Dentro del presente estudio se usó la opción 1 la cual delimita campos de estabilidad para cada fase mineral determinando la minimización de energía de Gibbs, las cuales fueron importantes para el análisis y la interpretación de los resultados.

Figura 4. Interfaz del software Thermocalc de Powell and Holland (1994) versión 3.26. Dentro de esta herramienta se introducen las fases minerales estudiadas, rangos P-T, varianza y script.

```

F:\tc_pc\tc325.exe
THERMOCALC 3.23 (Gnu Pascal version)
calculation type :
  0 = table of thermodynamic data of end-members
  1 = phase diagram calculations
  2 = average pressure-temperature calculations
  3 = calculations on all reactions between end-members
  4 = list end-member names and compositions
control code : 1
data filename: suffix in 'tcd.txt' : ana
datafile being read: "tcdana.txt"
reading phase info from this file ...
liq g mng pl Cpl4 hi bidt chl mu cd st par ksp kfsp opx sill
and ky san q H2O mic cz zo
log output is in "tclog.txt"
main output is in the file, "tcoana.txt"
other (eg drawpd) output is in the file, "tcdr.txt"

too many end-members: 63 (max = 50)
omit phases to reduce the no of end-members by 13
choose from: liq g mng pl Cpl4 hi bidt chl mu cd st par ksp kfsp o
px sill and ky san q H2O mic cz zo
which phases :

```

Fuente. Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26.

**4.4.2 Software Theriak Domino** El software Theriak Domino es un programa diseñado por Christian De Capitani, petrólogo de la Universidad de Basilea, Suiza. Este software tiene un uso enfocado en el cálculo y trazo de pseudosecciones en los cuales se observan las fases en equilibrio de los ensamblajes minerales dentro de campos bivariantes que representan presiones y temperaturas determinadas, teniendo en cuenta principalmente la composición de roca total de la muestra. Se usaron las herramientas Therin para el ingreso de los datos geoquímicos de roca total, Domino como procesador de los datos de Therin y los rangos de P-T y Guzzler y Explot como ploteadores de la gráfica. La Fig. 5 ilustra la interfaz del software Theriak Domino donde son procesados los datos previamente introducidos dentro del script Therin, en esta se muestra una serie de preguntas que indican los rangos e intervalos de presión y temperatura dentro de los cuales se desean desarrollar la pseudosección y la base de datos a usar.

Figura 5. Interfaz del software Theriak Domino de Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. Dentro de esta herramienta se introduce la base de datos, rangos P-T e intervalos de la gráfica.

```

C:\Users\Usuario\Documents\TheriakDominoWIN\Programs\domino.exe
-----
database definition
Enter [ "?" | CR | "files" | "script" | database filename ] <JUN92.bs>?

-----
definition of X-axis
-----
X-variable may be: TC, TK, P, A<abc>, LNA<abc>, LOGA<abc>, BIN, TER

Enter [ "?" | "list" | CR | X-variable X-min X-max <X-Grid> <width> <ptdis
t>] <TC 0 800>?
TC 0 800

-----
definition of Y-axis
-----
Y-variable may be: TC, TK, P, PT, THG, A<abc>, LNA<abc>, LOGA<abc>, BIN

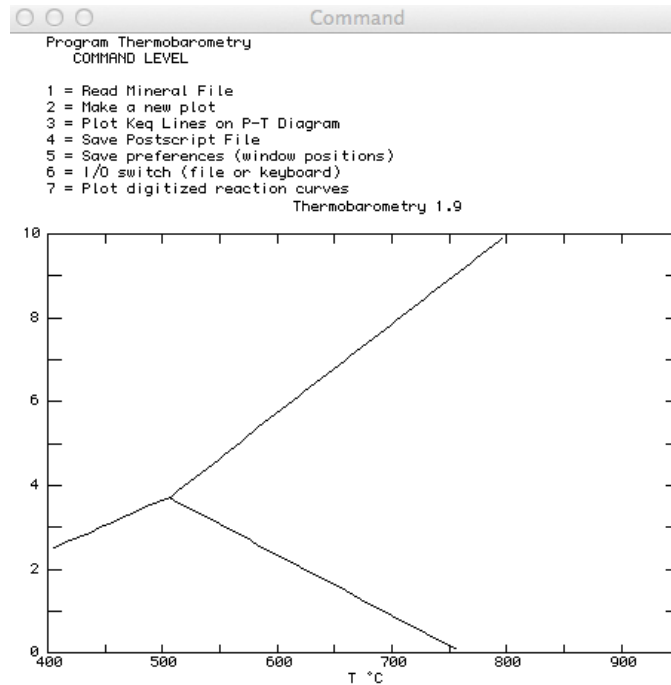
Enter [ "?" | CR | "list" | Y-variable Y-min Y-max <Y-Grid> <height>] <P 0
15000>?
P 0 15000

```

Fuente: Theriak Domino de Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09.

**4.4.3 Software GTB** Este software fue desarrollado por Spear and Kohn (2001) requiere un sistema operativo Macintosh 8.1 tratando datos de química mineral realizados por medio de microsonda electrónica los cuales son adjuntados por medio de un script tabulado. Realiza cálculos geotermobarométricos los cuales son graficados por medio de líneas de equilibrio representando distintas calibraciones de diferentes autores para cada geotermómetro y geobarómetro. Se evaluó una muestra de cada zona metamórfica (PCM-361, PCM-441 y PCM-473) de la Formación Silgará, con el fin de realizar una comparación entre los resultados hallados por diferentes autores y los proporcionados por este software. La Fig. 6 ilustra la interfaz del software GTB, en la cual se observa la gráfica donde se plotean los datos y el ejecutable en el que aparecen las opciones a seguir dentro del proceso de generación de constantes de equilibrio a partir de los geotermómetros y geobarómetros (1) Lectura de archivo mineral, (2) Desarrollo de una nueva gráfica, (3) Graficar líneas de constante de equilibrio en un diagrama P-T, (4) Guardar el postscript, (5) Guardar preferencias, (6) Cambio de archivo y (7) Curvas de reacción digitalizadas.

Figura 6. Interfaz del software GTB de Spear and Kohn (2001). Dentro de esta herramienta se introducen los datos de química mineral y se escogen los geotermobarómetros y sus respectivas calibraciones.



Fuente: GTB de Spear and Kohn (2001).

#### 4.5 ELABORACIÓN DEL TRABAJO FINAL

En esta etapa se elaboró el trabajo final donde se recopilaron todos los resultados obtenidos por medio de los software relacionados con la petrogénesis de la Formación Silgará. Se llegó finalmente a unas discusiones comparando la bibliografía con el presente trabajo donde se obtuvieron conclusiones de la investigación.

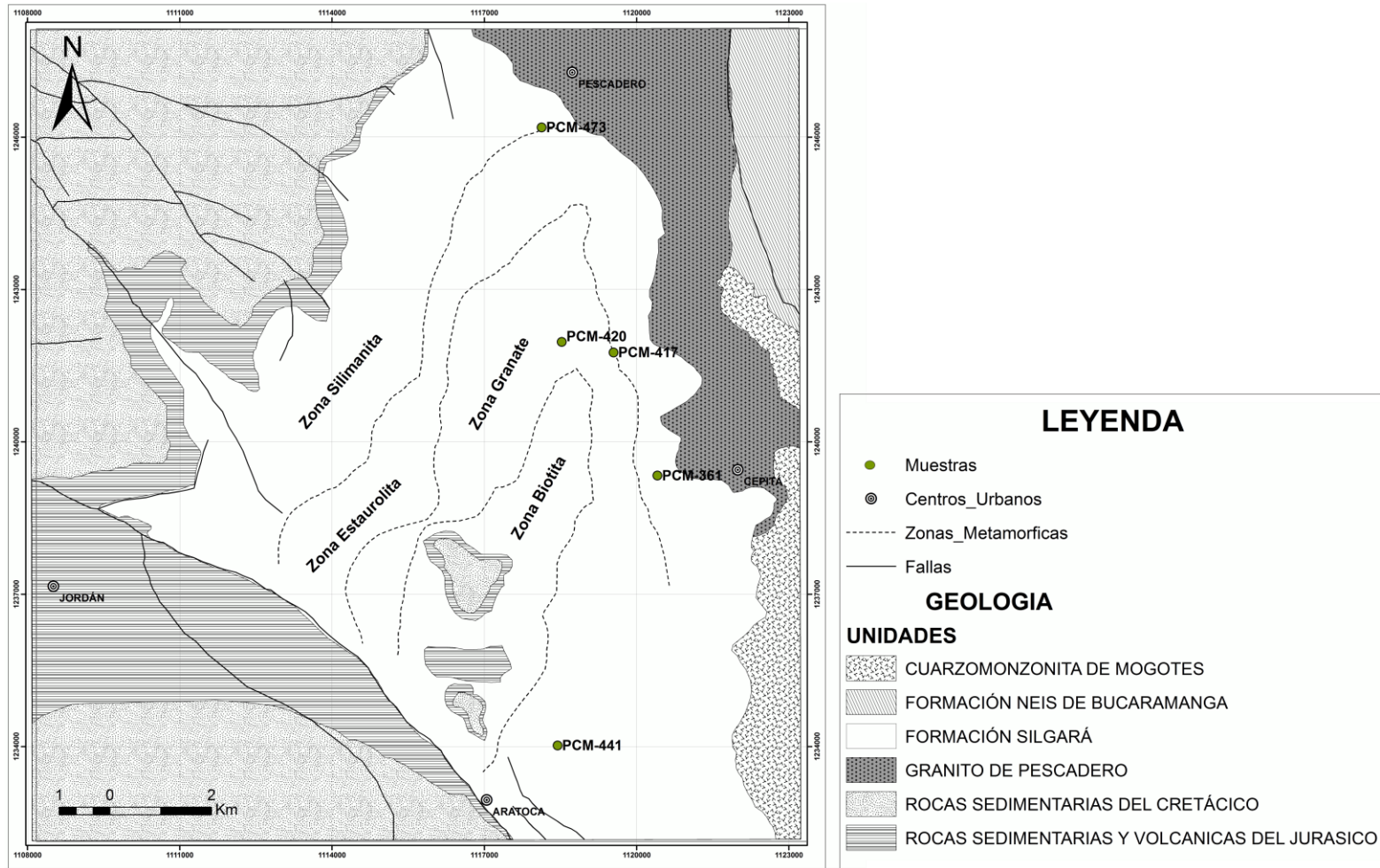
## **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO**

El análisis petrográfico se realizó a las muestras pertenecientes de la zona del granate de la Formación Silgará al suroccidente del Macizo de Santander definida por Ríos et al. (2002). La Fig. 7 muestra la ubicación de las muestras consideradas en el presente estudio.

Las muestras analizadas contienen evidencias petrográficas relacionadas a texturas y estructuras de equilibrio mineral. La clasificación cuantitativa de los minerales se determinó con los porcentajes y la cantidad de cada mineral en la sección delgada clasificándolos como minerales principales (superior al 50%), mayores (superior al 5%), menores (entre 1 y 5%) y accesorios (inferior a 1%) además, se establecieron las asociaciones minerales y la paragénesis en la roca de acuerdo a García (2007). Las características más relevantes de las muestras analizadas se resumen en la Tabla 2.

Figura 7. Mapa geológico generalizado del suroccidente del Macizo de Santander. Muestra la ubicación de las muestras estudiadas y la delimitación de las zonas metamórficas de la Formación Silgará.



Fuente: Adaptado y modificado de Ríos et al. (2002).

**5.1.1 Muestra PCM-417** Esta muestra corresponde a un esquistó micáceo con altos contenidos de biotita, granate, plagioclasa, cuarzo, muscovita y clorita. Evidencia metamorfismo retrogrado, el cual se manifiesta en la ocurrencia de clorita después de granate y biotita. Por otra parte, se observa epidota desarrollando venas de poco espesor. Dentro de las estructuras principales se dan los agregados poligonales, acompañados de contactos con punto triple, se destacan también el crecimiento de minerales en microlitones. La textura principal es de tipo granolepidoblástica y la textura local es de tipo porfidoblástica y poiquiloblástica (apreciada principalmente por medio del granate). El dominio del clivaje se presenta de forma espaciada, zonal y paralela. También se observan aparentes texturas cataclásticas, las cuales evidencian un proceso de deformación frágil (Fig.8).

**Granate (22%):** Porfidoblastos que sobresalen dentro de una matriz de cuarzo y plagioclasa, los blastos poseen relieve alto, color pálido, formas hipidioblásticas y presentan su isotropía característica. Aparece con textura de tipo poiquiloblástica y ubicado de forma aleatoria dentro de la lámina, se encuentra asociado al cuarzo y la plagioclasa. También se observa bastante fracturado y con alteración a clorita la cual aparece como relleno de sus fracturas, evidenciándose la deformación a la que estuvo sometido.

**Biotita (10%):** Individuos con hábito hojoso, pleocroísmo notable y color marrón verdoso, hipidioblásticos a xenoblásticos. La biotita es el mineral que marca el dominio del clivaje. Su crecimiento se da en forma de microlitones en contacto con cuarzo y plagioclasa. La alteración que presenta está relacionada a la clorita, la cual la reemplaza de borde a centro y en ocasiones en su totalidad.

**Cuarzo (25%):** Individuos homeoblásticos a heteroblásticos, incoloros con bajo relieve, xenoblásticos y poseen colores de interferencia bajos. Se encuentran asociados a la plagioclasa, la biotita y el granate. Algunos cristales de cuarzo

poseen extinción ondulante asociada a deformación post-metamorfismo y localmente se encuentran en agregados sin alteración alguna.

Plagioclasa (18%): Agregados poligonales homeoblásticos, incoloros o de color pardos pálido, con bajos colores de interferencia, hábito tabular e hipidioblásticos, no presentan maclado debido a la alteración a sericita. Los agregados de plagioclasa se ven de forma alargada concordando con la dirección de la foliación. Sufre alteración a sericita, la cual se observa como agregados muy finos con altos colores de interferencia y con aspecto terroso.

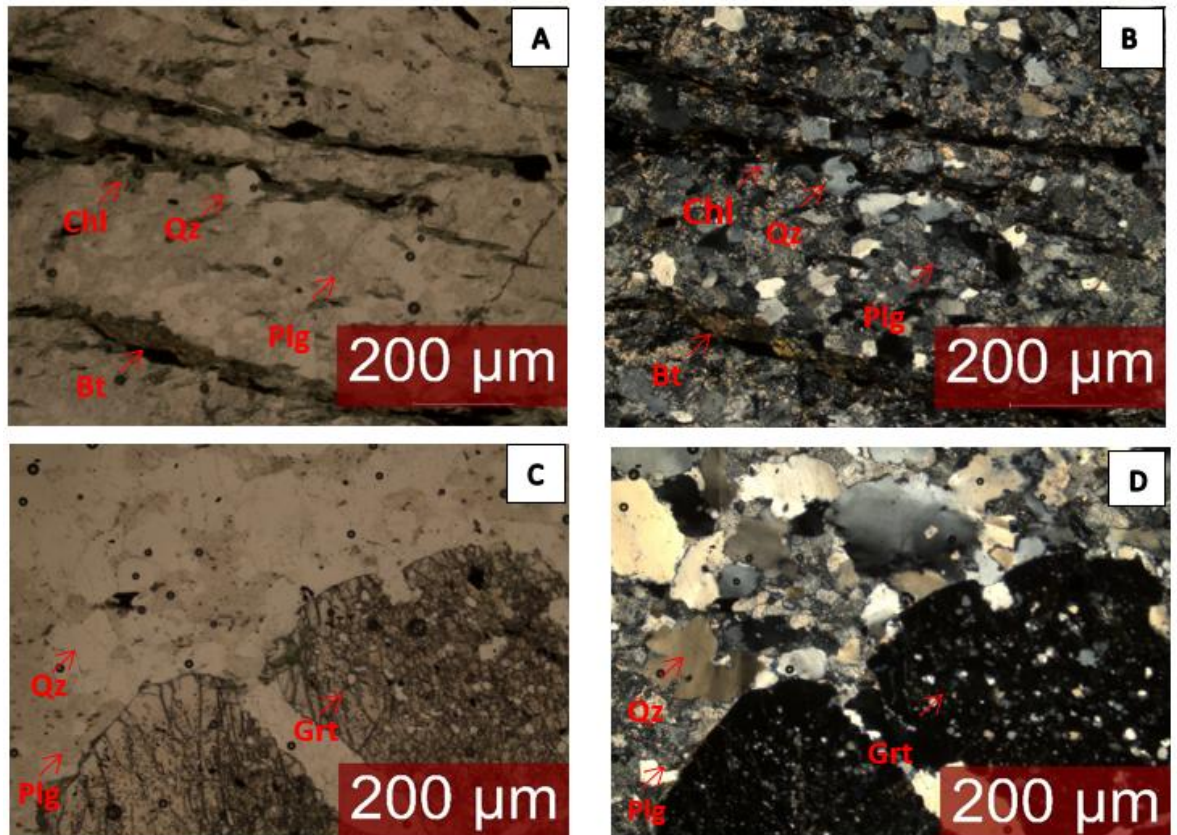
Clorita (15%): Individuos heteroblásticos de color verde pálido con pleocroísmo leve, formas xenoblásticas y colores de interferencia bajos. La clorita se observa ubicada aleatoriamente dentro de la lámina y no presenta una estructura o textura representativa.

Muscovita (10%): Agregados muy finos de bajo relieve, con colores de interferencia altos. No presenta propiedades ópticas definidas debido al tamaño de sus cristales.

Minerales Accesorios: La ilmenita se presenta esporádicamente como individuos de hábito tabular y alargado en la dirección de la foliación. El apatito se presenta en forma de pequeñas cabezas de alfiler, incoloras y con un relieve mayor que se destaca sobre los otros minerales incoloros. En nicoles cruzados se observa con colores de interferencia bajos y parecidos a los del cuarzo.

La asociación mineral identificada en la sección delgada corresponde a Biotita + Granate + Muscovita + Cuarzo + Plagioclasa + Clorita perteneciente a la facie de esquistos verdes y a la zona del granate.

Figura 8. Estructuras y texturas del esquistó micáceo (PCM-417). A) y B) Textura principal granolepidoblástica con estructuras dadas por agregados poligonales, crecimiento en microlitones y puntos triples. Dominio de clivaje se presenta de forma espaciada, zonal y paralela. N// Y NX, C) y D) Texturas locales porfidoblástica y poiquiloblástica N// Y NX. Nícoles paralelos (N//), Nícoles cruzados (NX).



Fuente: Autores.

**5.1.2 Muestra PCM-420** Esquistó micáceo con alto contenido de granate, biotita, cuarzo, plagioclasa, muscovita y clorita. Evidencia posibles procesos de metamorfismo retrogrado basados en la formación de minerales de menor grado de metamorfismo a partir de minerales de mayor grado. Las estructuras principales están dadas por la asociación de cuarzo, plagioclasa y biotita en las cuales se presentan agregados poligonales y crecimiento en microlitones. La textura principal es de tipo granolepidoblástica y localmente se dan texturas de

tipo porfidoblástica generadas por el crecimiento del granate. El dominio del clivaje se presenta de forma espaciada, zonal y paralela (Fig. 9).

Granate (20%): Porfidoblastos que sobresalen dentro de una matriz de cuarzo y plagioclasa, los cuales mantienen sus características principales tales como un alto relieve, color muy pálido, isotropía. Posee textura poiquiloblástica, ya que presenta inclusiones de minerales pertenecientes a la matriz anteriormente nombrada. Se encuentra distribuido aleatoriamente dentro de la lámina, en contacto con la plagioclasa y el cuarzo. Posee fracturas rellenas de clorita, evidenciando la deformación y alteración.

Plagioclasa (20%): Agregados constituidos por individuos incoloros, con hábito tabular, hipidioblásticos y homeoblásticos. Estos agregados son de tipo poligonal asociados al cuarzo, granate y biotita. Sus formas alargadas en la misma dirección de la biotita son características de un crecimiento en microlitones. Alteración a sericita, dando una apariencia terrosa y borrando el maclado característico de la plagioclasa.

Cuarzo (25%): Individuos incoloros con bajo relieve, homeoblásticos a heteroblásticos y xenoblásticos. Está asociado a la plagioclasa, la biotita y el granate y no poseen una dirección determinada. Algunos de sus bordes poseen formas aserradas relacionadas a deformación post-metamorfismo.

Biotita (15%): Individuos de color marrón verdoso, hábito hojoso, pleocroísmo notable, colores de interferencia de segundo orden, exfoliación basal, hipidioblásticos a xenoblásticos. Se hallan en contacto con cuarzo y plagioclasa. La biotita es el mineral que marca el dominio del clivaje de la lámina en una dirección y sin presencia constante en toda la lámina, su estructura principal es su crecimiento en forma de microlitones. Presenta alteración a clorita de borde a centro, en algunas ocasiones reemplazada en su totalidad.

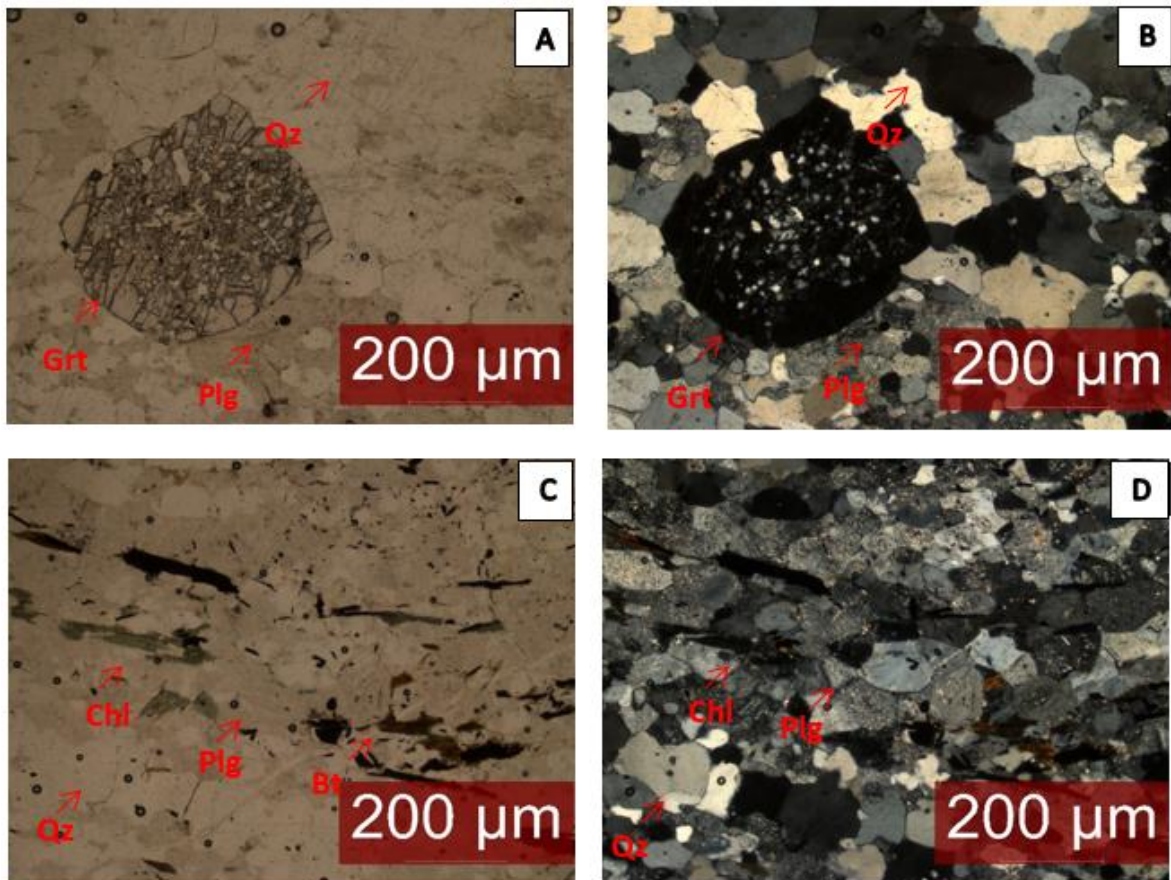
Clorita (10%): Individuos heteroblásticos de color verde pálido, con pleocroísmo leve, colores de interferencia medios a bajos y xenoblásticos. Se encuentran de forma aleatoria asociados principalmente a la plagioclasa y al cuarzo. No presenta una estructura o textura determinada.

Muscovita (10%): Agregados muy finos de bajo relieve, con colores de interferencia altos. No presenta propiedades ópticas definidas debido al tamaño de sus cristales.

Minerales Accesorios: La ilmenita se presenta en gran cantidad con formas alargadas en la dirección de la foliación (tomando como ilmenita a los minerales opacos que se hallan dentro de la sección delgada) (Ríos et al., 2002). La ilmenita en estas rocas pelíticas sugiere la idea de presencia de fluidos carbonatados o sulfurados (Melgarejo, 2003).

La asociación mineral identificada en la sección delgada corresponde a Biotita + Granate + Muscovita + Cuarzo + Plagioclasa + Clorita perteneciente a la facie de esquistos verdes y a la zona del granate.

Figura 8. Estructuras y texturas del esquistó micáceo (PCM-420). A) y B) Textura local porfidoblástica y poiquiloblástica N// Y NX, C) y D) Textura principal granolepidoblástica con estructuras dadas por agregados poligonales y crecimiento en microlitones. Dominio de clivaje se presenta de forma espaciada, zonal y paralela. N// Y NX. Nícoles paralelos (N//), Nícoles cruzados (NX).



Fuente: Autores

**5.1.3 Muestra PCM-441** Esquisto micáceo, presenta una dirección de esquistosidad definida por las micas (biotita y muscovita) con clivaje continuo. Se observan estructuras de agregados poligonales y puntos triples. Composicionalmente estos esquistos contienen muscovita, biotita, granate, plagioclasa, cuarzo, clorita, minerales accesorios y minerales de alteración como clorita (biotita) y sericita (plagioclasa). Presenta textura granolepidoblástica y localmente textura lepidogranoblástica (Fig. 10).

**Muscovita (45%):** Agregados minerales compuestos por individuos incoloros de relieve basculante de hábito laminar con terminaciones irregulares, heteroblásticos, hipidioblásticos, concordantes con la dirección de esquistosidad principal su distribución es abundante y homogénea. La muscovita está asociada a biotita y granate en contacto neto.

**Biotita (22%):** Individuos de color marrón con perfecta exfoliación basal, hábito hojoso, homeoblásticos a heteroblásticos, idioblásticos, algunos concordantes con la dirección de esquistosidad y otros en dirección perpendicular, su distribución es homogénea. La biotita está asociada a muscovita y granate en contacto neto. Presenta alteración moderada a clorita de borde a centro.

**Granate (15%):** Individuos heteroblásticos hexagonales de alto relieve, muy fracturados, no siguen la dirección de esquistosidad principal, se encuentran orientados al azar y su distribución es heterogénea. Se encuentra asociado a biotita, muscovita y cuarzo en contacto neto.

**Cuarzo (10%):** Pequeños individuos incoloros de bajo relieve con colores de birrefringencia de primer orden (grises). Son xenoblásticos y heteroblásticos se presentan de forma alargada y su distribución es heterogénea. Se encuentra asociado a biotita y muscovita.

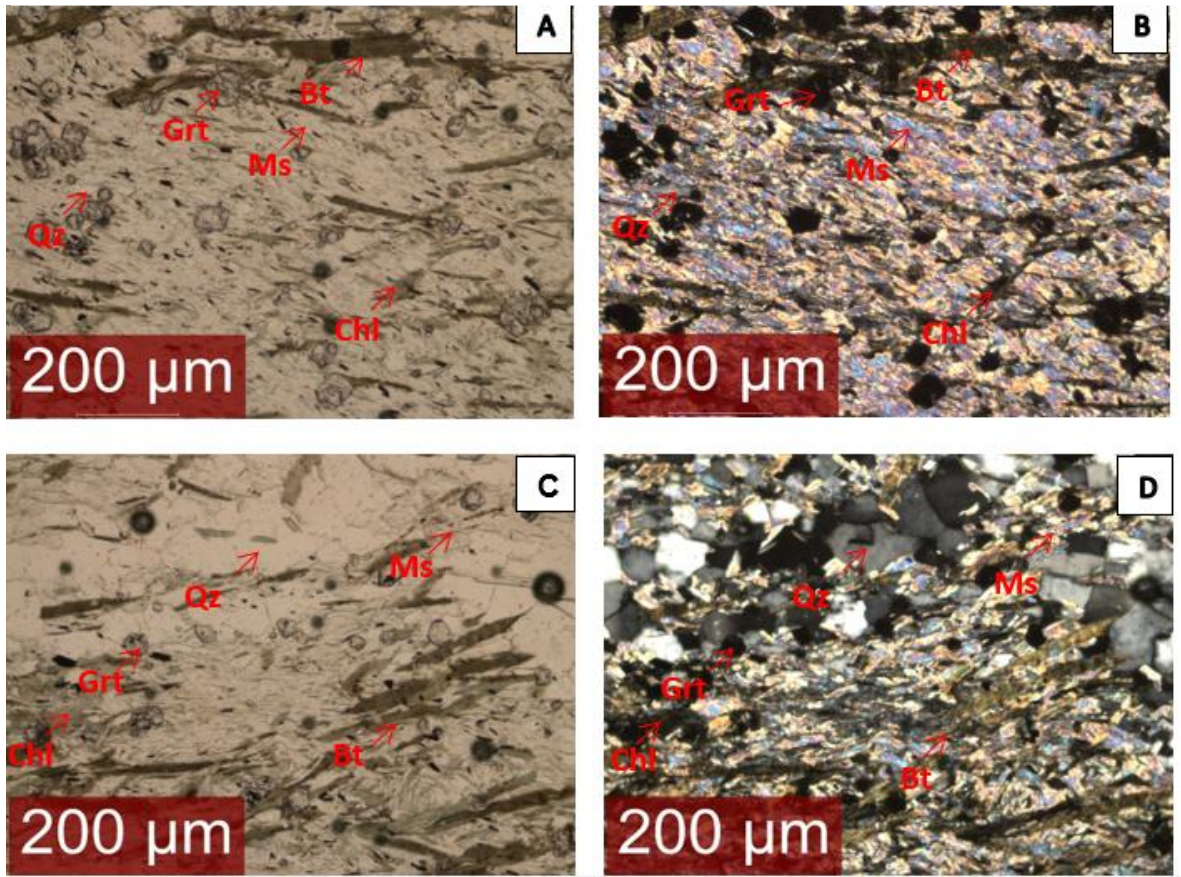
Clorita (7%): Individuos de color verde pálido con pleocroísmo leve, colores de interferencia bajos, xenoblásticos y heteroblásticos. La clorita se observa ubicada aleatoriamente dentro de la lámina asociada a cuarzo, plagioclasa y muscovita.

Plagioclasa (1%): Individuos xenoblásticos y heteroblásticos parcialmente reemplazados por sericita. Asociados a cuarzo, biotita, muscovita y granate.

Minerales accesorios: Se hallan minerales opacos como individuos heteroblásticos con diferentes geometrías variadas e irregulares.

La asociación mineral identificada en la sección delgada corresponde a Biotita + Granate + Muscovita + Plagioclasa + Cuarzo + Clorita + perteneciente a la facie de esquistos verdes y a la zona del granate.

Figura 9. Estructuras y texturas del esquistó micáceo (PCM-441). A) y B) Textura principal granolepidoblástica con clivaje continuo de grano fino. N// Y NX, C) y D) Textura local lepidogranoblástica con agregados poligonales y puntos triples. N// Y NX. Nícoles paralelos (N//), Nícoles cruzados (NX).



Fuente: Autores

Tabla 2. Resumen petrográfico para cada muestra de la zona de granate. Agrupa sus características ópticas, contactos netos en equilibrio y estructuras.

PCM - 417	Fases Minerales	Aparición		Estructuras y texturas	En contacto con	Observaciones
		Esquistos	Venas Hidrotermales			
Paragénesis	Plagioclasa	x		Agregados poligonales con puntos triples	Biotita o granate o clorita con cuarzo	Alteración a sericita
	Cuarzo	x	x	Agregados poligonales con puntos triples y algunos pocos con contactos aserrados	Biotita o granate o clorita con cuarzo	
	Granate	x		Porfidoblastos algunos con textura poiquiloblástica	Plagioclasa y cuarzo	Alterado a clorita y posee inclusiones de cuarzo
	Biotita	x		Crecimiento en microlitones	Plagioclasa y cuarzo	Alterado a clorita
	Muscovita	x		Agregados muy finos		
	Clorita	x		No posee una estructura definida, aparece de forma aleatoria	Plagioclasa y cuarzo	Mineral principal y de alteración
	Epidota		x	Los cristales son muy pequeños y no se observa una estructura definida		
Apatito		x		Asociado a cuarzo	Mineral accesorio	
Ilmenita		x			Ópaco	
PCM - 420	Fases Minerales	Aparición		Estructuras y texturas	En contacto con	Observaciones
		Esquistos	Venas Hidrotermales			
Paragénesis	Plagioclasa	x		Agregados poligonales con puntos triples	Biotita o granate o clorita con cuarzo	Alteración a sericita
	Cuarzo	x		Agregados poligonales y apariencia cataclástica	Biotita o granate o clorita con plagioclasa	
	Granate	x		Porfidoblastos, textura poiquiloblástica y fracturas cataclásticas	Plagioclasa y cuarzo	Alterado a clorita y posee inclusiones de cuarzo
	Biotita	x		Microlitones que determinan el dominio del clivaje	Plagioclasa y cuarzo	Alterado a clorita
	Muscovita	x		Agregados muy finos, sin estructura definida		
	Clorita	x		Se presenta de forma aleatoria	Plagioclasa y cuarzo	Mineral principal y de alteración
	Ilmenita		x			Ópaco
PCM - 441	Fases Minerales	Aparición		Estructuras y texturas	En contacto con	Observaciones
		Esquistos	Venas Hidrotermales			
Paragénesis	Plagioclasa	x		No presenta	Cuarzo, biotita y clorita	Se observan altamente sericitizadas
	Cuarzo	x		Agregados poligonales con puntos triples	Plagioclasa, muscovita, biotita y granate	
	Granate	x		No presenta	Cuarzo, biotita y muscovita	Fracturas leves
	Biotita	x		Crecimiento en dirección del clivaje	Plagioclasa, granate cuarzo y muscovita	Alterado a clorita
	Muscovita			Definen la dirección de la foliación, con un clivaje continuo	Cuarzo, clorita, granate y biotita	
	Clorita	x		Se presenta de forma aleatoria	Cuarzo y muscovita	Mineral principal y de alteración
	Ópacos		x			

## 5.2 GEOQUIMICA

Los datos geoquímicos se tomaron del previo estudio de Ríos et al. (2002), mediante técnicas analíticas de fluorescencia de rayos X (XRF) para la química de roca total (Tabla 3) y microsonda electrónica para la química mineral (Anexo 1) de la Formación Silgará en el suroccidente del Macizo de Santander.

Tabla 3. Composición química de roca total para las muestras de la zona de granate de la Formación Silgará. Proporcionados por Castellanos et al. (2008) (Muestras PCM-417 y PCM-420) y laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, UIS sede Guatiguara (Muestra PCM-441).

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
PCM-417	68,32	0,66	14,49	8,73	1,17	1,42	1,22	3,07	1,7	0,04
PCM-420	76,51	0,72	10,9	4,27	0,42	1,5	1,41	2,45	1,78	0,24
PCM-441	48,38	1,32	27,01	8,6	1,1	3,17	0,63	1,51	7,04	0,15

Fuente: Autores

**5.2.1 Determinación de Protolito** La determinación del protolito para las rocas de la Formación Silgará se realizó con base en los resultados geoquímicos de análisis de fluorescencia de rayos X para las muestras de la zona de granate, los cuales se representan en el diagrama propuesto por la De La Roche (1968).

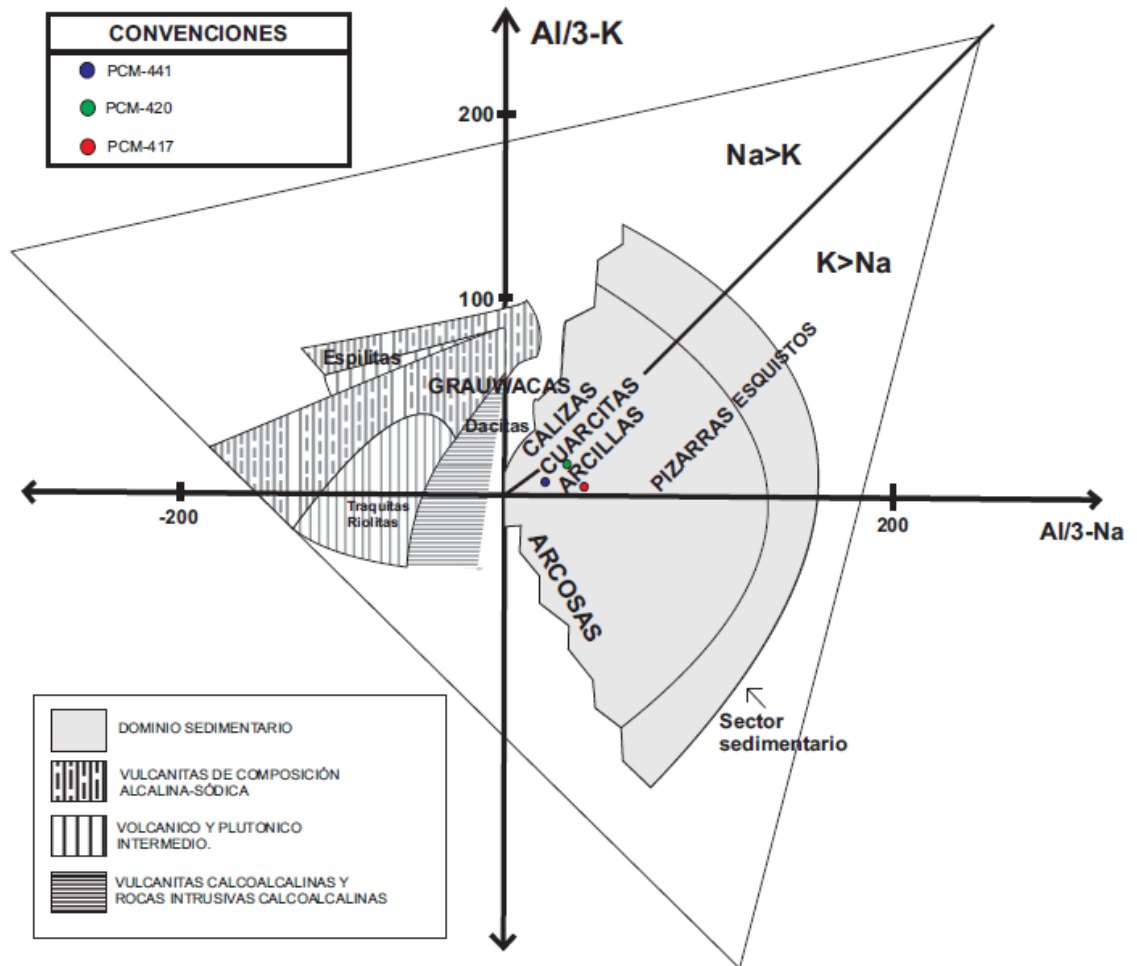
El diagrama de discriminación de protolito De La Roche (1968), se basa en la proyección de los datos geoquímicos de la roca expresados en cantidades atómicas, utilizando dos ejes cartesianos que comprenden cuatro cuadrantes o campos; donde el cuadrante I y IV corresponden a protolitos de origen sedimentario y el II y III a protolitos de origen ígneo. Las coordenadas X y Y de estos ejes correlacionan los elementos Al, Na y K mediante las siguientes expresiones:

$$X = (Al/3) - Na$$

$$Y = (Al/3) - K$$

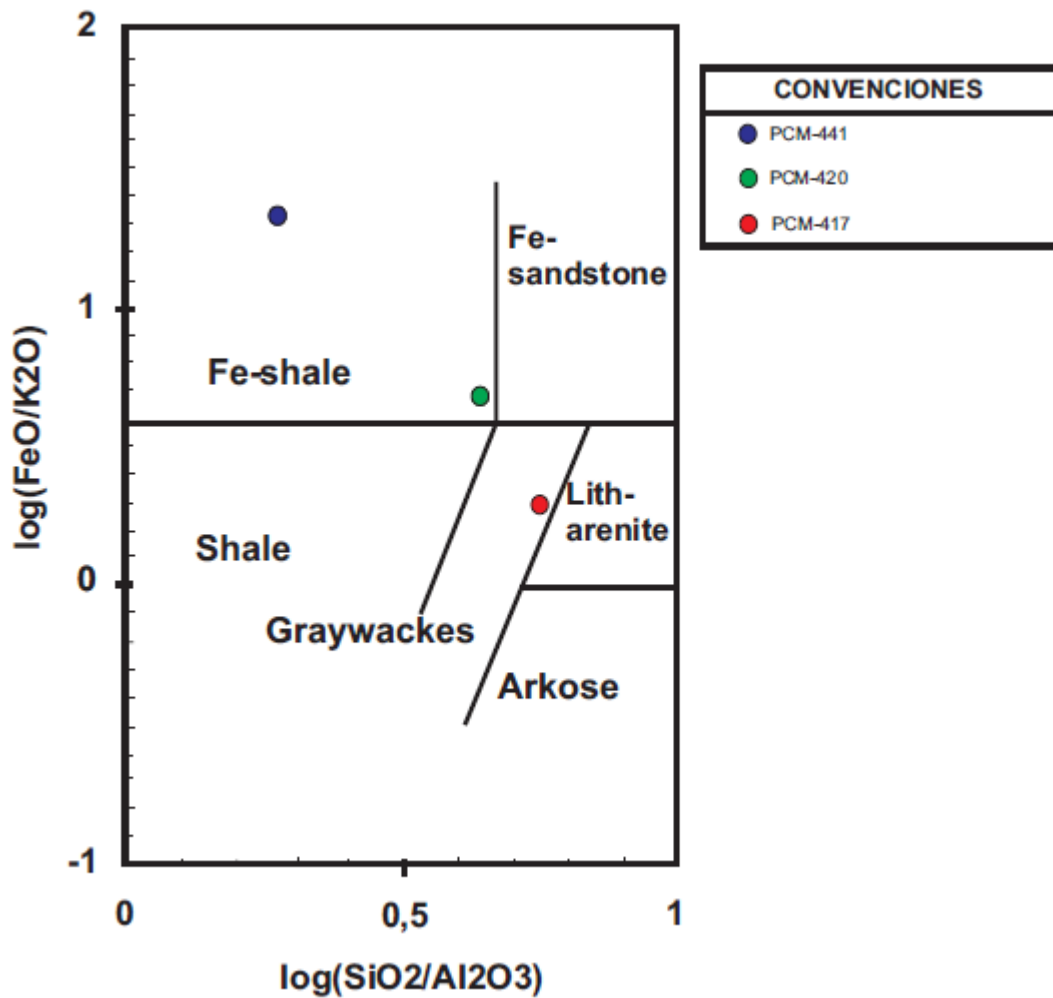
Las metapelítas de la Formación Silgará corresponden a un protolito de origen sedimentario (Fig. 11), se ubican principalmente en la región de rocas arcillosas. Para la clasificación más detallada de la variedad de roca sedimentaria se usó el diagrama de Herron, 1988 (Fig. 12). Las muestras en el área de Pescadero-Aratoca correspondientes a un protolito sedimentario se clasifican en grauvacas (PCM-417) y shale rico en Fe (PCM-420 y PCM-441)

Figura 10. Diagrama de discriminación de protolitos para la Formación Silgará en el área de Suroccidental del Macizo de Santander.



Fuente: De La Roche (1968).

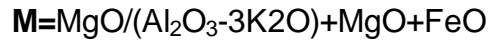
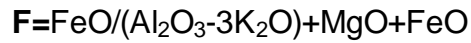
Figura 11. Diagrama clasificación de los protolitos de la Formación Silgará.



Fuente: Tomado de Herron (1988).

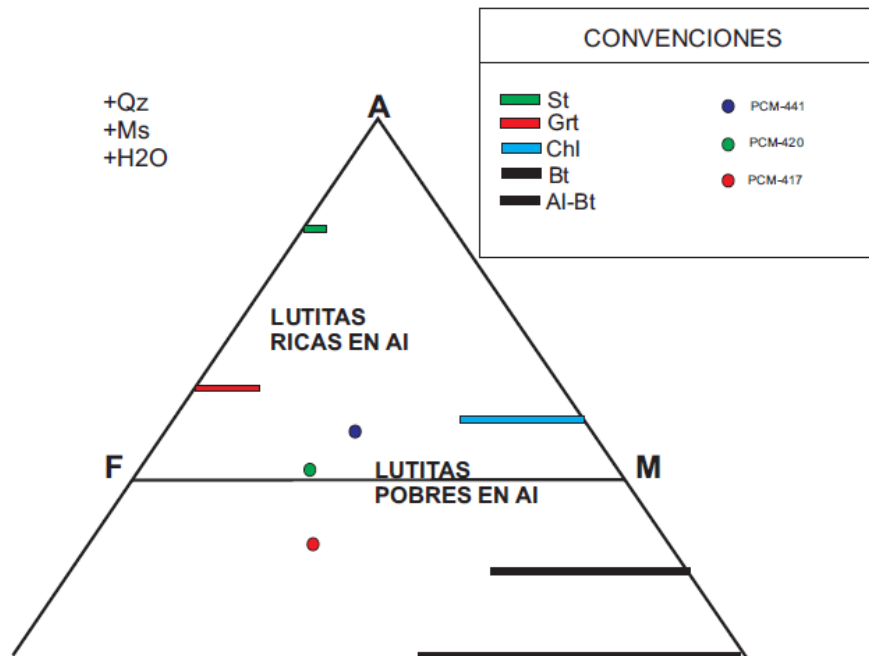
**5.2.2 Diagrama AFM de Thompson** Este diagrama es útil en el estudio de rocas metapelíticas, estas rocas son sensibles a diferentes temperaturas y presiones donde se someten a cambios mineralógicos, por lo tanto es bueno tener un esquema integral para visualizar estos cambios (Winter, 2001). El diagrama está definido por tres componentes los cuales tienen las siguientes expresiones:

$$A = \frac{Al_2O_3 - 3K_2O}{(Al_2O_3 - 3K_2O) + MgO + FeO}$$



Para la proyección de las muestras PCM-417, PCM-420 y PCM-441 (Fig. 13) en el diagrama AFM de Thompson se utilizaron los resultados obtenidos de los análisis de fluorescencia de rayos X. Se representó mediante el sistema NCKFMASH ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ) donde se proyectó desde las fases que se encuentran en exceso, en este caso el cuarzo, muscovita y  $\text{H}_2\text{O}$ . El resultado muestra bajo contenido de Al para la zona de granate de la Formación Silgará.

Figura 12. Proyección AFM de Thompson para las muestras pertenecientes de la zona de granate de la Formación Silgará.



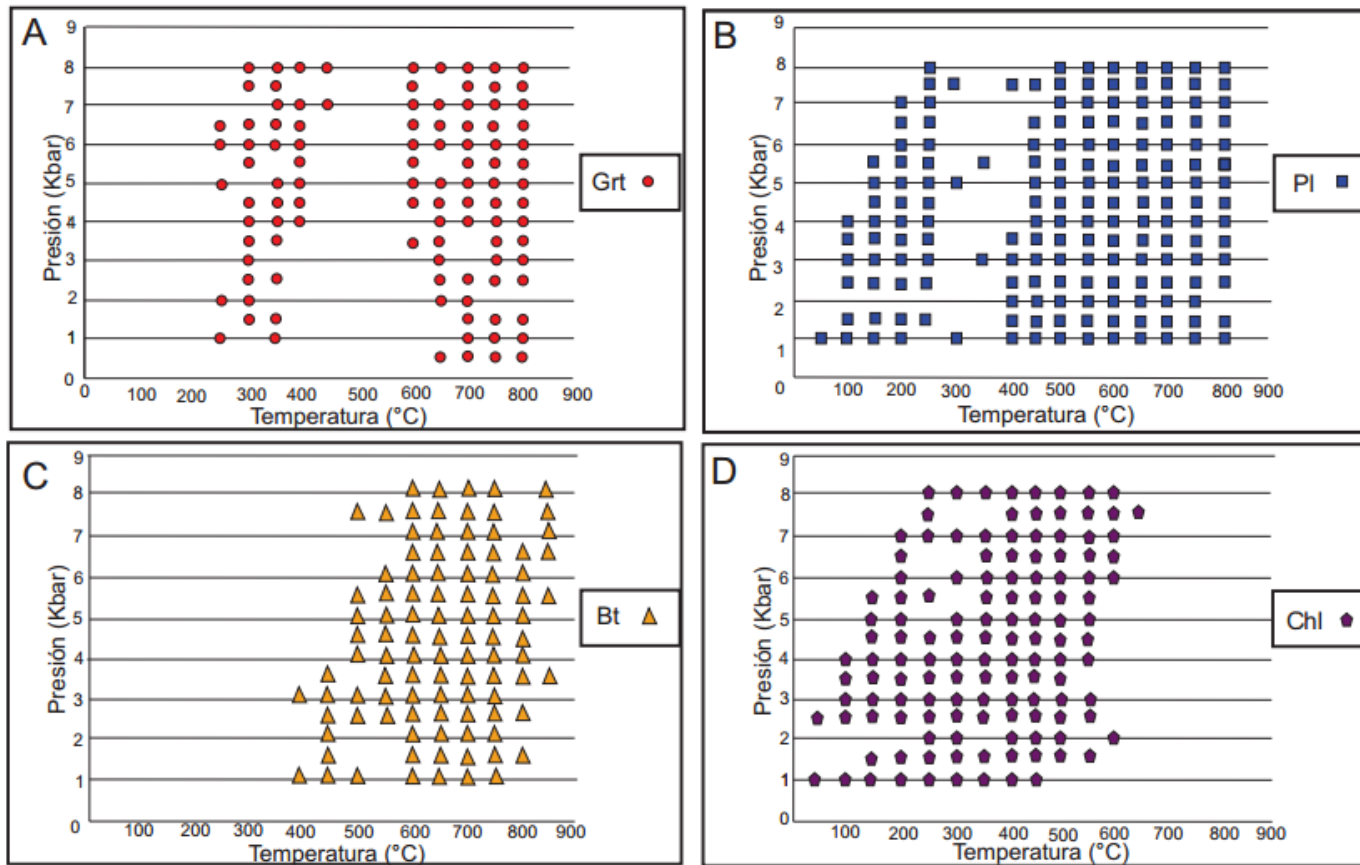
Fuente: Autores

### 5.3 EQUILIBRIO MINERAL

**5.3.1 Minimización de Energía Libre de Gibbs** Los rangos de equilibrio de fase mineral para la asociación Grt-Pl-Ms-Bt-Chl-Qz se hallan a presiones constantes para las muestras de la zona del granate de la Formación Silgará, se establecen mediante la química de roca total con el software Thermocalc estableciendo la minimización de energía libre de Gibbs (Figs. 14, 15 y 16).

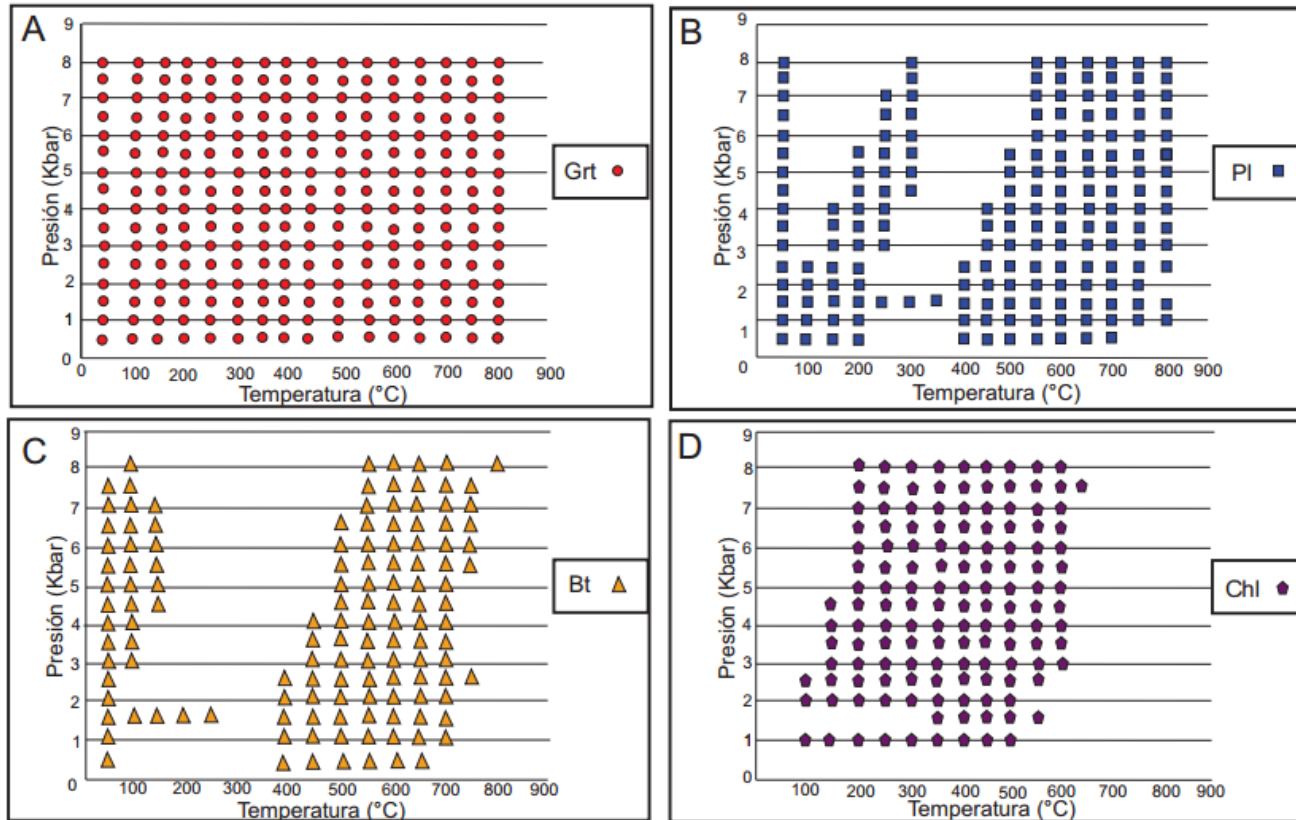
Los resultados obtenidos de la minimización de energía libre de Gibbs para cada fase mineral están dados por los siguientes rangos P-T: muestra PCM-417 la clorita, muscovita y cuarzo se encuentran totalmente estables, las fases restantes granate (250-450°C y 600-800°C) plagioclasa (100-250°C y 450-850°C) y biotita (300-800°C) presentan equilibrio a diferentes temperaturas y presiones; muestra PCM-420 el granate, cuarzo y muscovita se encuentran totalmente estables, las fases restantes plagioclasa (50-300°C y 400-800°C), biotita (50-150°C y 400-750°C), clorita (200-600°C), presentan equilibrio a diferentes temperaturas y presiones; muestra PCM-441 la muscovita y cuarzo se encuentran estables y las fases restantes plagioclasa (50-200°C y 500-800°C), granate (200-500°C y 600-800°C), biotita (50-150°C y 350-700°C), clorita (200-600°C), presentan equilibrio a diferentes temperaturas y presiones.

Figura 13. Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-417. A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. Las viñetas en cada imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral.



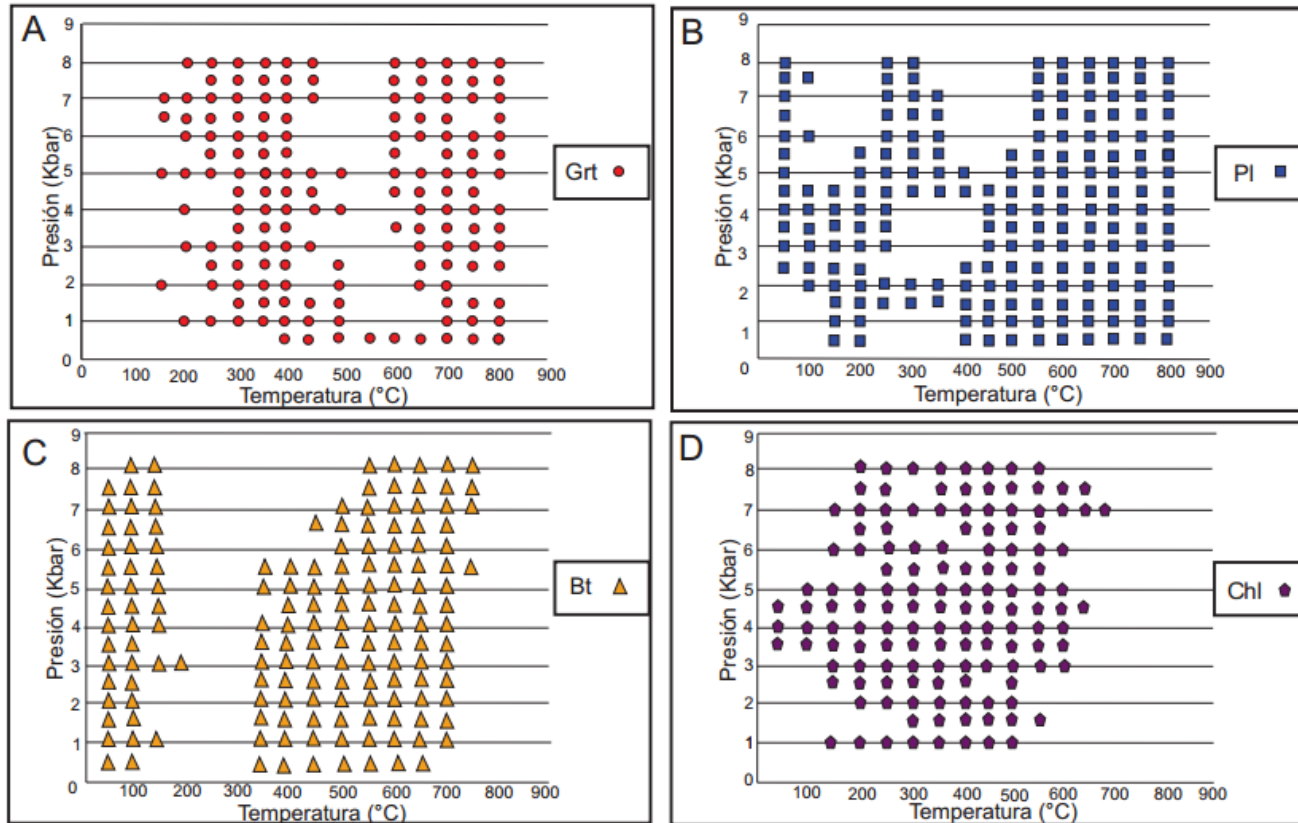
Fuente: Autores.

Figura 14. Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-420. A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. . Las viñetas en cada imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral.



Fuente: Autores.

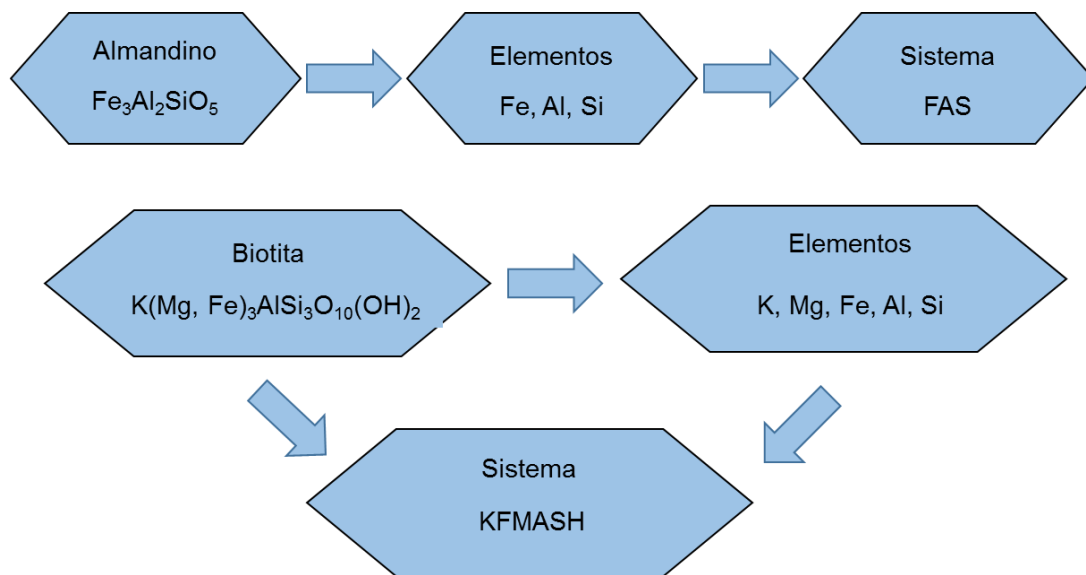
Figura 15. Gráficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra PCM-441. A) Granate, B) Plagioclasa, C) Biotita D) Clorita. Datos obtenidos con Thermocalc de Powell and Holland (1994), versión 3.26. . Las viñetas en cada imagen representan los puntos invariantes donde se da un equilibrio estable para cada mineral.



Fuente: Autores.

**5.3.2 Pseudosecciones** La determinación del sistema químico para obtener las pseudosecciones se fundamenta en las paragénesis mineral definida previamente y la composición mineral, por ejemplo, conociendo la fórmula química del granate y la biotita, se definió el sistema químico KFMASH (Fig. 17) para estas dos fases minerales (este proceso se aplicó igualmente a todas las fases restantes).

Figura 16. Gráfica que representa el proceso de determinación del sistema químico mediante la paragénesis mineral.



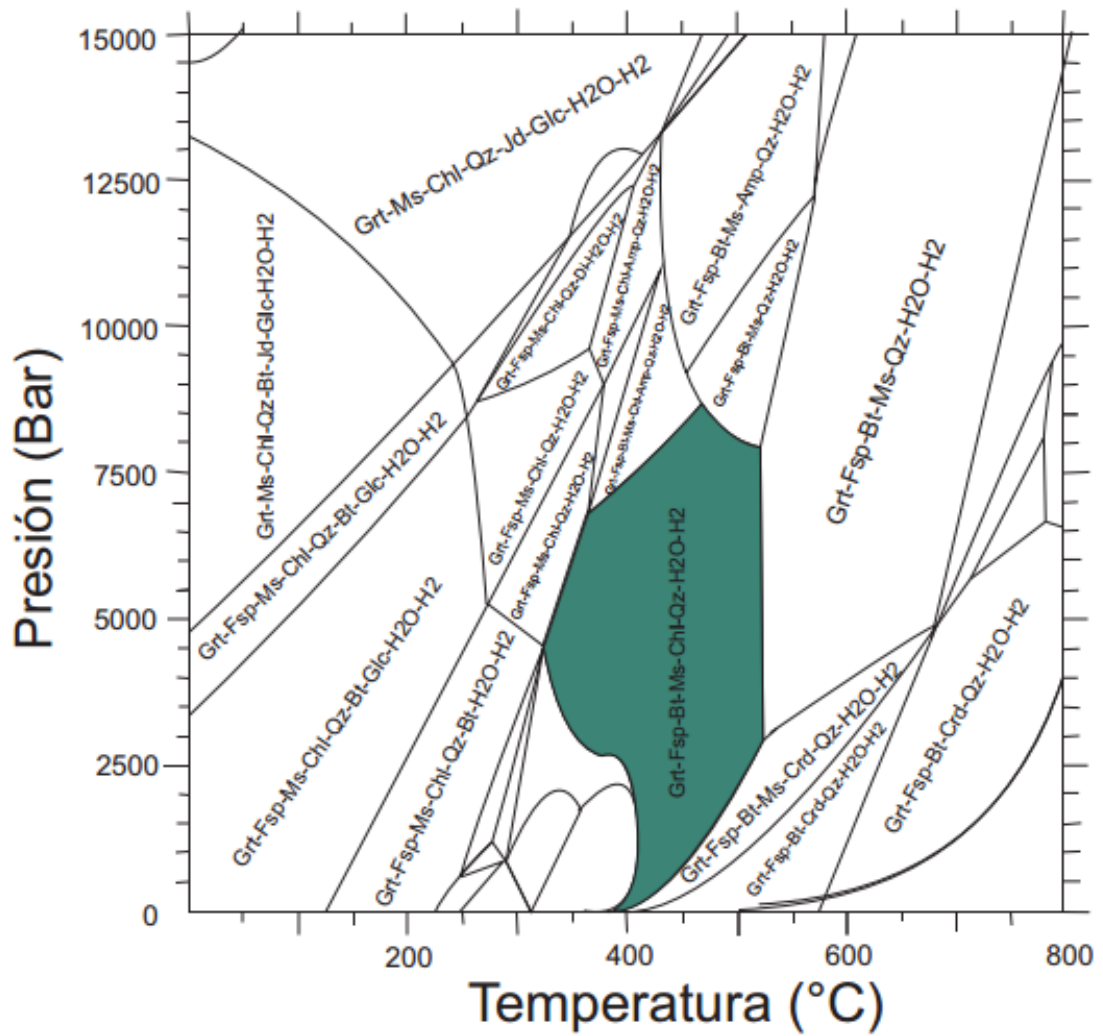
Fuente: Autores

No obstante, el sistema químico KFMASH no tiene en cuenta los componentes  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$  para la predicción de la estabilidad mineral en la pseudosección. Por lo tanto, tomando como referencia estos componentes el sistema químico considerado fue MnNCKFMASH dado por  $\text{MnO-Na}_2\text{O-CaO-K}_2\text{O-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , el cual considera el efecto del  $\text{MnO}$  y  $\text{CaO}$ , determinando el estado de equilibrio del granate y la zoisita (fase prematura al granate) y el  $\text{Na}_2\text{O}$  asociado con  $\text{CaO}$  definiendo la estabilidad de la plagioclasa, paragonita y clinozoisita (Tinkham et al., 2001).

Las pseudosecciones se realizaron con el software Theriak-Domino donde se estimaron presiones y temperaturas para las asociaciones minerales de cada muestra correspondiente a la zona del granate de la Formación Silgará.

**5.3.2.1 Pseudosección PCM-417.** El equilibrio de fases minerales calculado a partir del sistema MnNCKFMASH en la pseudosección PCM-417 (Fig. 18) muestra que la asociación mineral de la roca coexiste en los campos de estabilidad como granate, biotita, muscovita, plagioclasa, clorita y cuarzo, estableciendo rangos de presión de 0-8 Kbar y temperatura de 310-500°C que concuerdan con el equilibrio de cada fase mineral dado por la minimización de energía de Gibbs.

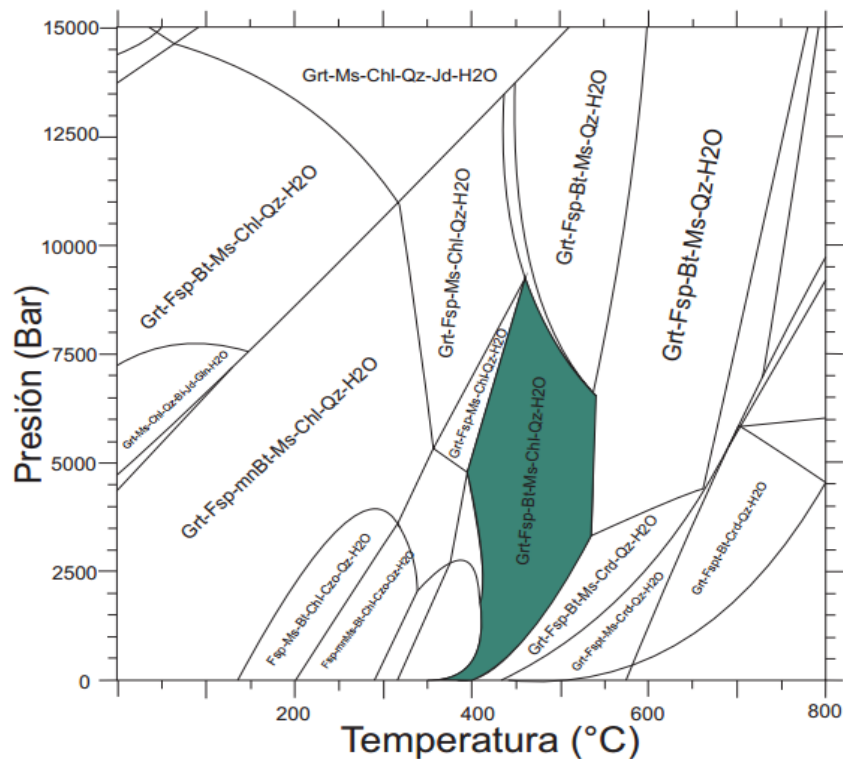
Figura 17. Pseudosección tipo P-T de la muestra PCM-417 de la Formación Silgará zona suroccidental del Macizo de Santander, construida en el sistema MnNCKFMASH empleando Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. La zona sombreada corresponde al campo de equilibrio P-T alcanzado para la muestra durante el evento metamórfico según su paragénesis mineral.



Fuente: Autores

**5.3.2.2 Pseudosección PCM-420.** El equilibrio de fases minerales calculado a partir del sistema MnNCKFMASH en la pseudosección PCM-420 (Fig. 19) muestra que la asociación mineral de la roca coexiste en los campos de estabilidad como granate, biotita, muscovita, plagioclasa, clorita y cuarzo, estableciendo rangos de presión de 0-9.5Kbar y temperatura de 380-520°C que concuerdan con el equilibrio de cada fase mineral dado por la minimización de energía de Gibbs.

Figura 18. Pseudosección tipo P-T de la muestra PCM-420 de la Formación Silgará zona suroccidental del Macizo de Santander, construida en el sistema MnNCKFMASH empleando Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09. La zona sombreada corresponde al campo de equilibrio P-T alcanzado para la muestra durante el evento metamórfico según su paragénesis mineral.



Fuente: Autores



#### 5.4 GEOTERMOBAROMETRÍA

La geotermobarometría fue establecida para cada zona metamórfica de la Formación Silgará, las cuales fueron evaluadas dentro del software GTB de Spear and Kohn (2001). Este análisis arrojó como resultado rangos de presión y temperatura para las zonas metamórficas granate (PCM-441), estaurolita (PCM-361) y silimanita (PCM-473).

Los análisis realizados con el geotermómetro granate-biotita y geobarómetros granate-biotita-muscovita-plagioclasa y GASP fueron determinados a partir de distintas calibraciones desarrolladas por diferentes autores, escogiendo las de mayor precisión respecto a los rangos que se pretendían encontrar de tal forma de que estos encajaran dentro de las zonas de equilibrio para cada mineral. La Tabla 4 muestra las condiciones P-T producidas por el software GTB.

Tabla 4. Intervalos de presión y temperatura para cada una de las zonas reevaluadas de la Formación Silgará.

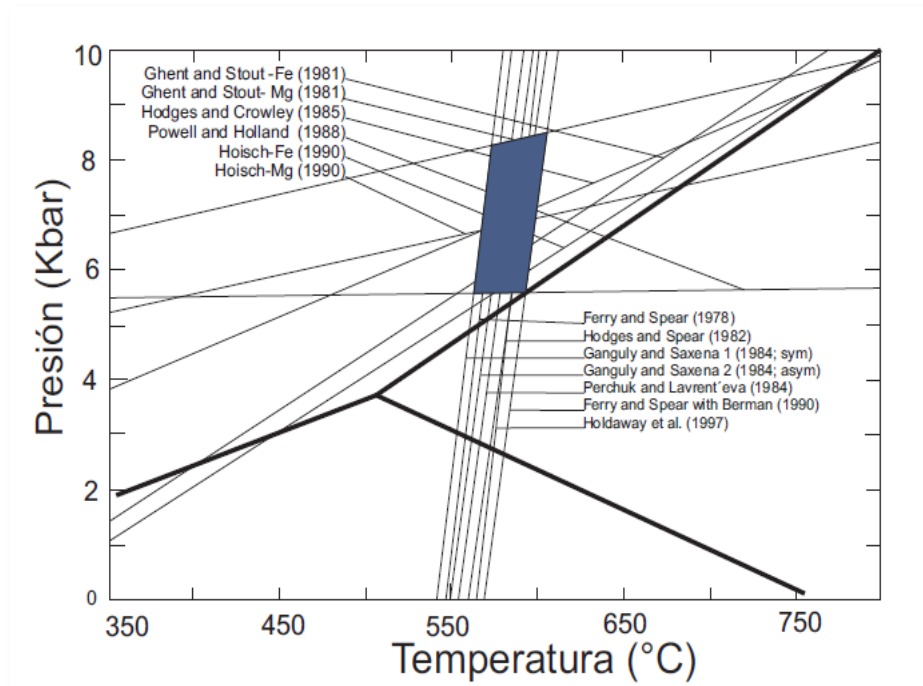
Muestra	Presión	Temperatura
PCM-361	5.5-8.4 Kbar	553-600 °C
PCM-441	3.0-5.9 Kbar	400-500 °C
PCM-473	4.0-8.0 Kbar	600-710 °C

Fuente: Autores

Las condiciones PT de la zona estaurolita (PCM-361) fueron encontrados con el geobarómetro granate-biotita-plagioclasa-muscovita con rangos de presión entre 5.5–8.4Kbar limitados por las calibraciones de Ghent and Stout –Mg (1981) en el límite superior y Hoisch –Mg (1990) como límite inferior. Los rangos de temperatura fijados por el geotermómetro granate-biotita se dieron entre 553-

600°C, limitados por las calibraciones de Ganguly and Saxena (1984) como límite lateral izquierdo y Kleeman and Reinhardt (1994) como límite lateral derecho (Fig. 21). El punto medio para la zona de la estaurolita está dado por 6.9Kbar de presión y 563°C de temperatura aproximadamente.

Figura 19. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-361 perteneciente a la zona de la estaurolita de la Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y del geobarómetro Granate-Plagioclasa-Biotita-Muscovita (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001).

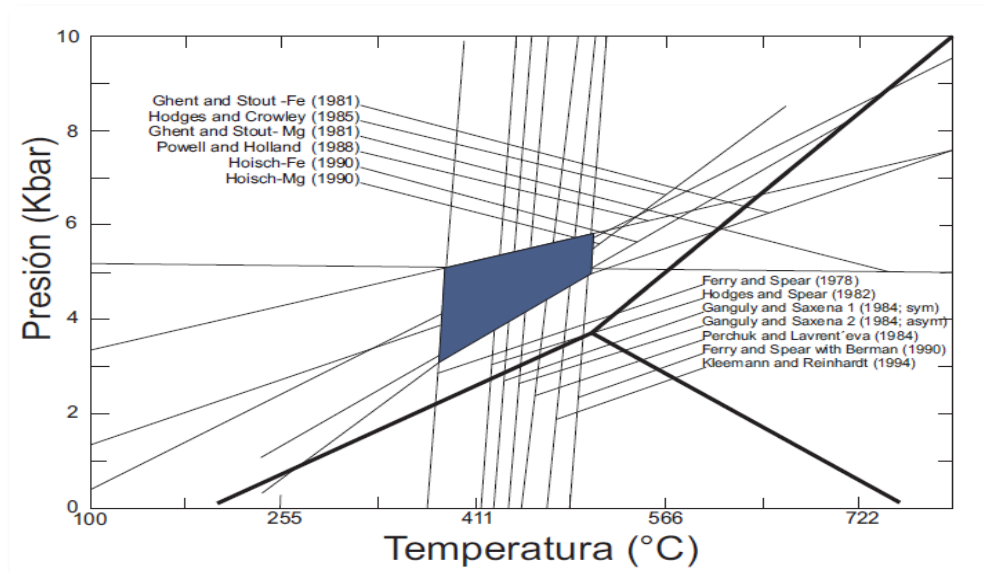


Fuente: Autores

Las condiciones PT de la zona del granate (PCM-441) fueron encontrados con el geobarómetro granate-biotita-plagioclasa-muscovita con rangos de presión entre

3.0-5.9Kbar limitados por las calibraciones de Powell and Holland (1988) en el límite superior y Ghent and Stout –Fe (1981) como límite inferior. Los rangos de temperatura fijados por el geotermómetro granate-biotita fueron dados entre 400-500°C, limitados por las calibraciones de Ferry and Spear (1978) como límite lateral izquierdo y Kleeman and Reinhardt (1994) como límite lateral derecho (Fig. 22). El punto medio para la zona del granate está dado por 4.2Kbar de presión y 450°C de temperatura aproximadamente.

Figura 20. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-441 perteneciente a la zona del granate de la Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y del geobarómetro Granate-Plagioclasa-Biotita-Muscovita (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001).

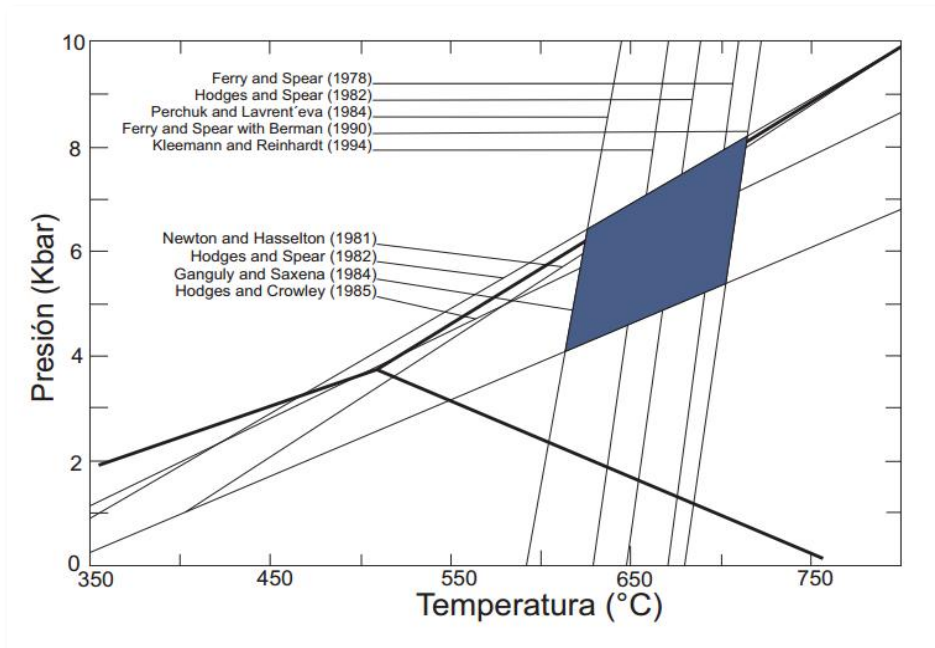


Fuente: Autores

Las condiciones PT de la zona silimanita (PCM-473) fueron encontrados con el geobarómetro GASP con rangos de presión entre 4.0–8.0 Kbar limitados por las calibraciones de Hodges and Spear (1982) en el límite superior y Ganguly and

Saxena (1984) como límite inferior. Los rangos de temperatura fijados por el geotermómetro granate-biotita fueron dados entre 600-710°C, limitados por las calibraciones de Perchuk and Lavrent'eva (1978) como límite lateral izquierdo y Ferry and Spear (1978) como límite lateral derecho (Fig. 23). El punto medio para la zona de la silimanita está dado por 6Kbar de presión y 655°C de temperatura aproximadamente.

Figura 21. Estimación de los rangos de presión y temperatura determinados para la muestra PCM-473 perteneciente a la zona de la silimanita de la Formación Silgará (polígono azul). Utilizando las diferentes calibraciones del geotermómetro Granate-Biotita (líneas verticales) y el geobarómetro GASP (líneas inclinadas) dadas por el software GTB de Spear and Kohn (2001).



Fuente: Autores

Para cada una de estas evaluaciones geotermobarométricas fueron descartadas ciertas calibraciones que se encontraban alejadas de los rangos de presión y temperatura más acertados, es el caso de la calibración propuesta por Indares and Martignole (1985) para el geotermómetro granate-biotita que no se tuvo en cuenta

para ninguna de las muestras. Holdaway et al. (1997) fue descartada para las muestras pertenecientes a la zona de la silimanita y granate, ya que presentaba temperaturas muy altas y desfasadas, y la calibración de Ganguly and Saxena (1984) fue suprimida porque presentaba temperaturas muy bajas para la zona de la silimanita.

#### **5.4.1 Reevaluación y reinterpretación de datos geotermobarométricos**

Los rangos de presión y temperatura obtenidos para cada zona metamórfica fueron comparados principalmente con el previo estudio de Ríos et al. (2002) los cuales concuerdan en ciertos límites con los rangos P-T establecidos por GTB (Tabla 5).

Con relación a los datos observados correspondientes a los cálculos termobarométricos obtenidos por Ríos et al (2002) y en el presente estudio, se evidencia una disminución en las condiciones de presión entre la zona estaurolita y la zona silimanita, lo cual puede atribuirse al hecho de que la secuencia metapelítica considerada ha sufrido un transporte tectónico a través del cual se alcanzó las condiciones máximas de presión (pico bórico) en la zona de la estaurolita y las condiciones máximas de temperatura (pico térmico) en la zona de la silimanita, tal como lo evidencia la trayectoria PT en sentido horario propuesta por Ríos et al. (2002) y corroborada en el presente estudio.

De otra parte, estudios preliminares llevados a cabo por miembros del grupo de investigación de geología básica y aplicada de geología de la Universidad Industrial de Santander han permitido definir algunas evidencias geológicas que apuntan a la posibilidad de considerar un evento termal sobreimpuesto al metamorfismo regional que ha afectado a la Formación Silgará en el Macizo de Santander, y, por lo tanto, el esquema zonal de metamorfismo propuesto en estudios previos (e.g., Ríos et al., 2002). Algunas de estas evidencias se manifiestan en la aparición de porfidoblastos de andalucita y granate, este último

presentando zonación (textural y composicional) sectorial, en rocas metapelíticas de la región central del Macizo de Santander, y que podría asociarse al emplazamiento de masas de ortoneis en la etapa tardía del metamorfismo regional de la Formación Silgará (Ríos comunicación personal). Sin embargo, en la región suroccidental del Macizo de Santander en rocas de la zona de la Silimanita se puede observar una textura decusada la cual se caracteriza por la disposición al azar de blastos de muscovita y botita en un esquistos pelítico con granate y relictos de estaurólita, el cual presenta además la primera aparición de silimanita (fibrolítica). Esta textura está asociada a un metamorfismo térmico. Según Ríos (comunicación verbal) en algunos sectores se ha observado la aparición de andalucita lo cuales podrían asociarse al emplazamiento de posibles cuerpos intrusivos pertenecientes al Grupo Plutónico de Santander (GPS). Sin embargo, esto último sería recomendable en futuros estudios.

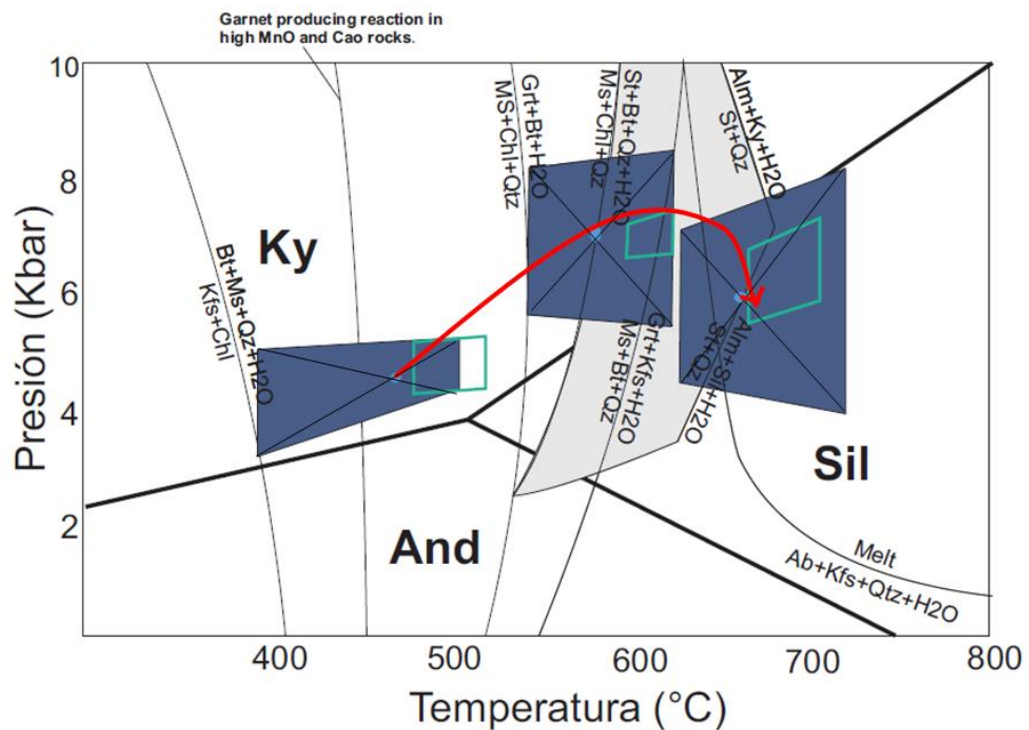
Tabla 5. Comparación de los datos obtenidos del software GTB con el trabajo de Ríos et al. (2002).

ZONA METAMORFICA	Ríos et al. (2002)		GTB	
	Presión (kbar)	Temperatura (°C)	Presión (kbar)	Temperatura (°C)
<b>Granate (PCM-441)</b>	4.4-5.5	495-518	3.0-5.9	400-500
<b>Estaurólita (PCM-361)</b>	6.6-7.5	590-612	5.5-8.4	553-600
<b>Silimanita (PCM-473)</b>	5.5-7.2	600-700	4.0-8.0	600-710

Fuente: Autores

Los rangos obtenidos por GTB se presentan de forma más amplia con respecto a los generados por Ríos et al. (2002), debido a que dentro del presente trabajo fueron escogidas la mayoría de las calibraciones dadas para cada geotermómetro y geobarómetro. Estos rangos fueron correlacionados con la red petrogenética de Spear and Cheney (1989), en la cual se observa una concordancia entre las condiciones P-T y las zonas de equilibrio metamórfico para cada muestra (Fig.24).

Figura 22. Diagrama PT, mostrando la superposición de datos geotermobarométricos obtenidos en el presente estudio por GTB (polígonos azules) con relación a los reportado por Ríos et al. (2002) (polígonos de contorno verde) para las zonas metamórfica de granate, estauroлита y silimanita. Reacciones minerales en el sistema KFMASH de la red petrogenética (modificada de Spear and Cheney, 1989). Área gris claro representa el campo de estabilidad de la coexistencia de St+Qz. Punto triple  $Al_2SiO_5$ .



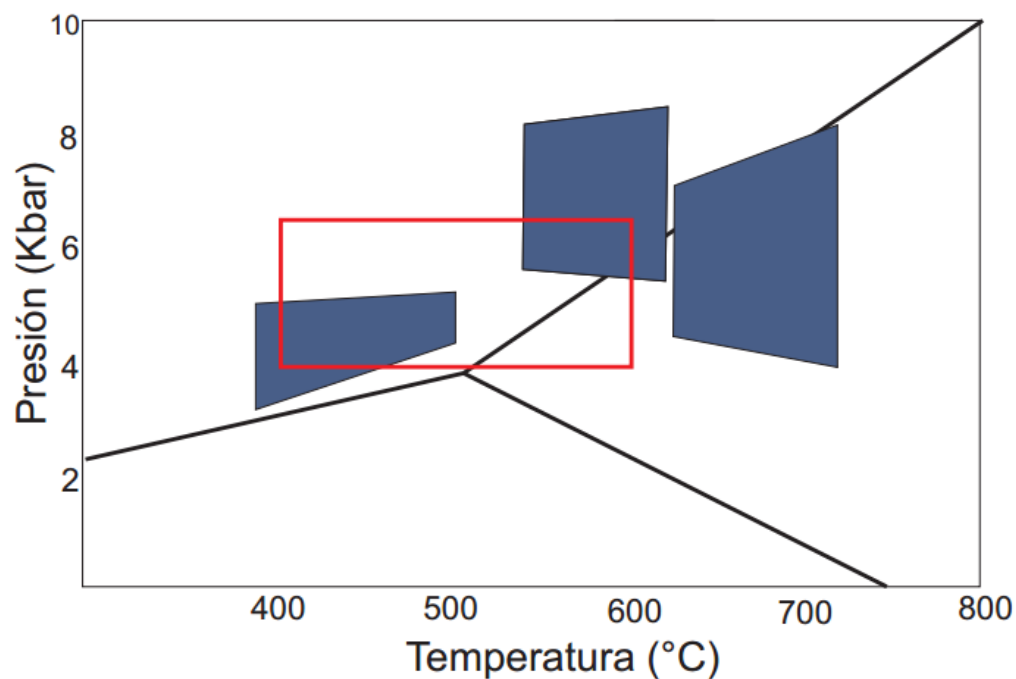
Fuente: Adaptado y modificado de Ríos et al. (2002).

#### 5.4.2 Comparación con Otros Autores

Estudios geotermobarométricos de la Formación Silgará realizados por diferentes autores que establecen condiciones P-T para las diferentes zonas metamórficas (e. g., Castellanos et al., 2008, García et al., 2005 y Arenas, 2004) fueron comparados con los resultados obtenidos del software GTB.

Castellanos et al. (2008) proponen condiciones P-T a partir de la zonación del granate con temperaturas entre 400-600°C y presiones de 4.0-6.5 Kbar usando el software GTB de Spear and Kohn (2001). La comparación muestra una concordancia entre las zonas del granate casi en su totalidad y la estaurólita en su límite inferior (Fig. 25).

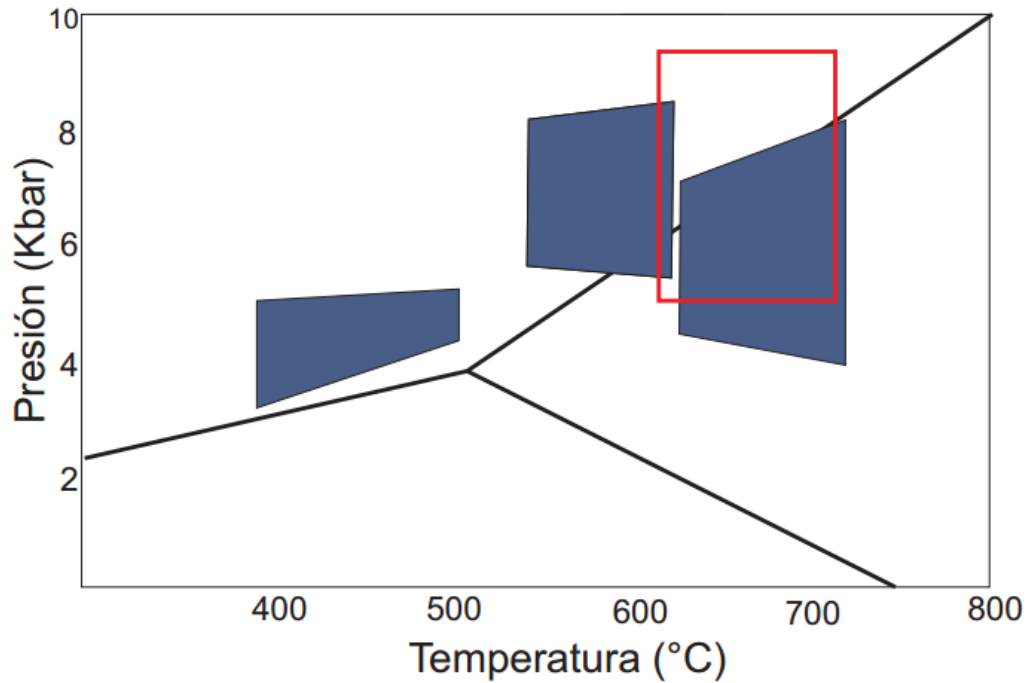
Figura 23. Comparación de los resultados obtenidos por Castellanos et al. (2008) usando GTB de Spear and Kohn (2001) (polígono de contorno rojo) con los rangos obtenidos del presente estudio con GTB para cada zona metamórfica (polígonos azules).



Fuente: Autores

García et al. (2005) estima rangos P-T utilizando el software TWQ para tres zonas metamórficas (estaurólita-cianita, silimanita y migmatita) con rangos de 5.0-9.5 Kbar y 630-727°C (Fig. 26). Los rangos obtenidos por GTB y TWQ concuerdan en las altas presiones y temperaturas pertenecientes a la zona estaurólita y silimanita.

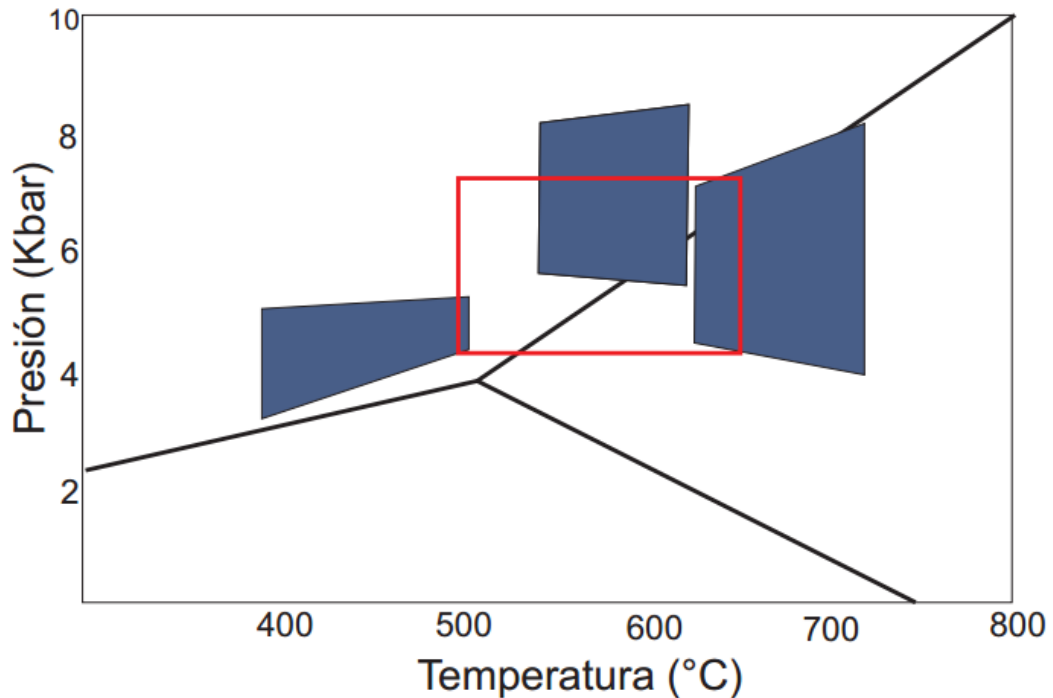
Figura 24. Comparación de los resultados obtenidos por García et al. (2005) usando TWQ (contorno de color rojo) con los rangos obtenidos por GTB de Spear and Kohn (2001) para cada zona metamórfica (polígonos azules).



Fuente: Autores.

Arenas (2004) a partir de un estudio petrográfico determina condiciones de presión y temperatura de 4.1-7.2 Kbar y 500-650 °C, respectivamente (Fig. 27), las cuales en esta comparación cubren ciertas áreas de cada zona evaluada por el GTB.

Figura 25. Comparación de los resultados obtenidos por Arenas (2004) por medio de análisis petrográfico (contorno de color rojo) con los rangos obtenidos por GTB de Spear and Kohn (2001) para cada zona metamórfica (polígonos azules).



Fuente; Autores

#### 5.4.3 Determinación del Pico Metamórfico para la Muestra PCM-441

Los datos de equilibrio de fases minerales fueron correlacionados con la geotermobarometría para la zona del granate estableciendo el pico metamórfico de la muestra PCM-441 (Fig. 28). El equilibrio de fases minerales desarrollado por Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09 utilizando el sistema MnNCKFMASH produjo el campo de estabilidad de la asociación mineral Granate+Plagioclasa+Biotita+Clorita+Muscovita+Cuarzo, la cual se encuentra dentro de rangos de presión 0-9Kbar y de temperatura de 350-550 °C, estos incluyen los rangos de geotermobarometría generados por el GTB de Spear and Kohn (2001) que se encuentran entre 3.0-5.9 Kbar de presión y 400-500°C de



## 6. CONCLUSIONES

Los estudios petrográficos y mineralógicos se realizaron a las muestras de la zona del granate (PCM-417, PCM-420 y PCM-441). Las rocas corresponden a esquistos micáceos con bajo contenido de Al, su paragénesis principal es Granate+Plagioclasa+Biotita+Clorita+Muscovita+ Cuarzo de la facie de esquistos verdes. La clasificación de protolito se define de tipo sedimentario (arcillas).

La minimización de energía libre de Gibbs establece el equilibrio de cada fase mineral a determinada presión y temperatura para cada roca.

El equilibrio de fases minerales desarrollado por el software Theriak Domino de De Capitani and Petrakakis (2010), versión 01.08.09 para la zona de granate establece campos de estabilidad para cada asociación mineral dentro de cada pseudosección con rangos de presión y temperatura para las muestras PCM-417 (0-8 Kbar y 310-500°C), PCM-420 (0-9.5 Kbar y 380-520°C) y PCM-441 (0-9 Kbar y 350-550).

La geotermobarometría de la Formación Silgará establecida con el software GTB de Spear and Kohn (2001) presenta diferentes rangos de presión y temperatura para cada zona metamórfica, correspondientes a: zona granate 3.0-5.9 Kbar y 400-500 °C, zona estaurolita 5.5-8.4 Kbar y 553-600 °C y zona silimanita 4.0-8.0 Kbar y 600-710 °C.

El proceso de reevaluación de datos geotermobarométricos arrojó similitudes con respecto al trabajo de Ríos et al. (2002), ya que se observó que cada rango proporcionado por el GTB cubría en su totalidad cada rango determinado en el trabajo de Ríos et al. (2002), esto debido a la cantidad de calibraciones usadas en

cada proceso. Los datos también fueron concordantes con las zonas de equilibrio mineral determinadas dentro de la red petrogenética de Spear and Cheney (1989).

La correlación entre la geotermobarometría y el equilibrio de fases minerales realizada para la muestra PCM-441 correspondiente a la zona del granate, corroboró un pico metamórfico dentro de la Formación Silgará. Fue posible reducir el campo de estabilidad de la paragénesis mineral de 0-9 Kbar y 350-550°C a rangos entre 3.0-5.9 Kbar y 400-500°C para presión y temperatura respectivamente. Además de esto se determinó que esta asociación mineral se mantuvo dentro de un equilibrio estable en los rangos de presión y temperatura, ya que los tres software concordaron en los resultados obtenidos para esta zona metamórfica.

## BIBLIOGRAFIA

ALARCÓN, Javier. Química de Materiales Cerámicos. Unidad de Investigación en Materiales Cerámicos y Vítreos. Universidad de Valencia. <http://www.uv.es/uimcv/Castellano/ModuloMatCeramicos/Unidad%206.pdf> (Consultado el lunes 14 de julio de 2014).

ARENAS, José. Litología y petrología de las metamorfitas carbonatadas y metasedimentitas asociadas de la Formación Silgará, faja noroeste de Mutiscua (Macizo de Santander), Norte de Santander. Trabajo de grado Geólogo. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias, 2004, pp. 261.

BERMAN, Robert. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1990, Vol. 75, pp. 328-344.

BEST, Myron. Igneous and metamorphic petrology. 2da Edición. Estados Unidos: Blackwell Publishing, 2008, pp. 717.

BUCHER, Kurt; GRAPES, Rodney. Petrogenesis of metamorphic rocks. 8va Edición. Alemania: Springer, 2011, pp. 428.

CASTELLANOS, Oscar; RÍOS, Carlos; TAKASU, Akira. 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. En: Earth Science Research Journal. Bogotá, 2008, Vol. 12, pp. 125-155.

DE CAPITANI, Christian; PETRAKAKIS, Konstantin. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 2010, Vol. 95, pp. 1006–1016.

FERRY, John; SPEAR, Frank. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. En: Contributions to Mineralogy and Petrology. Alemania, 1978, Vol. 66, pp. 113-117.

GANGULY, Jibamitra; SAXENA, Surendra. Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1984, Vol. 69, pp. 88-97.

GARCÍA, Antonio. Cálculo de P y T: Geotermobarometría. 1era Edición. España: Universidad de Granada, 1995, pp. 91.

GARCÍA, Carlos. Manual de prácticas de petrología metamórfica. 2da Edición. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2007, pp. 88.

GARCÍA, Carlos; RÍOS, Carlos; CASTELLANOS, Oscar. Medium-pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. En: Boletín De Geología. Colombia, 2005 Vol. 27, pp. 43-68.

GHENT, Edward; STOUT, Mavin. Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages. En: Contributions to Mineralogy and Petrology. Alemania, 1981, Vol. 76, pp. 92-97.

GHENT, Edward; STOUT, Mavin. TiO<sub>2</sub> activity in metamorphosed pelitic and basic rocks: principles and applications to metamorphism in southeastern Canadian Cordillera. En: Contributions to Mineralogy and Petrology. Alemania, 1984, Vol. 86, pp. 248-255.

GÓMEZ, Javier. Metamorfismo, Apuntes de la asignatura Petrología Endógena. 1era Edición. España: Universidad de Zaragoza, 2006, pp. 193.

GUTIÉRREZ, C. Petrografía y mineralogía de las formaciones Silgara y Ortoneis en el área de Pamplona (Norte de Santander). Trabajo de Grado Geólogo. Bucaramanga Santander: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología, 2001. pp. 173.

HERRON, Michael. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. En: Journal of Sedimentary Research. Estados Unidos: 1988, Vol. 58, pp. 820–829

HODGES, Kip, CROWLEY, P. Error estimation and empirical geothermobarometry for pelitic systems. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1985, Vol. 70, pp. 702-709.

HODGES, Kip; SPEAR, Frank. Geothermometry, geobarometry and the  $Al_2SiO_5$  triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1982, Vol. 67, pp. 1118-1134.

HOISCH, Thomas. Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz+muscovite+biotite+plagioclase+garnet. En: Contributions to Mineralogy and Petrology. Alemania, 1990, Vol. 104, 225-234.

HOLDAWAY, Michael; MUKHOPADHYAY, Biswajit. Geothermobarometry in pelitic schists: A rapidly evolving field. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1993, Vol. 78, pp. 681-693.

HOLDAWAY, Michael; MUKHOPADHYAY, Biswajit; DYAR, Darby; GUIDOTTI, Charles; DUTROW, Barb. Garnet-Biotite geothermometry revised: New Margules parameters and a natural specimen data set from Maine. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1997, Vol. 82, pp. 582–595.

KLEEMANN, Ulrich., REINHARDT, Jorgen. Garnet-biotite thermometry revisited: The effect of AlVI and Ti in biotite. En: European Journal of Mineralogy. Alemania, 1994, Vol. 6, pp. 925–941.

KOHN, Mathew; SPEAR, Frank. Two new barometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1990, Vol. 75, pp. 89-96.

LA ROCHE, H. Comportement géochimique différentiel de Na, K et Al dans les formations volcaniques et sédimentaires: un guide pour l'étude des formations métamorphiques et plutoniques. En: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris. Francia, 1968, Vol. 267, pp. 39–42.

MELGAREJO, Joan. Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada. 2da Edición. España: Ediciones Universidad de Barcelona, Fundación Folch, 2003, pp. 1073.

MIYASHIRO, Akiho. Metamorphic Petrology. 1era Edición. Reino Unido: Editorial Universidad de Oxford, 1994, pp. 404.

NEWTON, Rob; HASSELTON, H. Thermodynamics of the garnet-plagioclase-Al<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> quartz geobarometer. Thermodynamics of Minerals and Melts, En: Springer. Alemania, 1981, Vol 1, pp. 129-145.

NEWTON, Rob; PERKINS, Dexter. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. En: American Mineralogist. Estados Unidos. 1982, Vol. 67, pp. 203-222.

PACUAR, Carlos. Diagrama de Fases. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.unalmed.edu.co/~cgpaucar/modulo7.pdf> (Consultado el lunes 14 de julio de 2014).

PERCHUK, Leonid; LAVRENT'EVA, L. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. En: Kinetics and equilibrium in mineral reactions, Springer. Alemania: 1984, pp. 199-239.

POWELL, Roger; HOLLAND, Tim. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: application methods, worked examples and a computer program. En: Journal of Metamorphic Geology, 1988, Vol. 6, pp. 173–204.

POWELL, Roger; HOLLAND, Tim. Optimal geothermometry and geobarometry. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 1994 Vol. 79, pp. 120-133.

RÍOS, Carlos. Chemical compositions of the constituent minerals and P–T conditions of the low-grade Silgara´ Formation metamorphic rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. Tesis de Maestría. Geólogo. Shimane University, Matsue (Japan), 1999, pp. 207.

RÍOS, Carlos; GARCÍA, Carlos; TAKASU, Akira. Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. En: Journal of South American Earth Sciences, 2002, Vol. 16, pp. 133–154.

SERC. P-T-t Paths. Teaching Phase Equilibria. [http://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/PTtPaths.html](http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/PTtPaths.html) (Consultado el viernes 21 de Diciembre de 2013).

SELVERSTONE, Juliana. Metamorphic Rocks. <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/377777/metamorphic-rock/80314/Reactions-of-other-mineral-systems> (Consultado el 6 de Enero de 2015)

SPEAR, Frank. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. 2da Edición. Mineralogical Society of America, 1995, pp. 799.

SPEAR, Frank; CHENEY, John. A Petrogenetic Grid for Pelitic Schists in the System  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ . En: Contributions to Mineralogy and Petrology. Alemania, 1989, Vol. 101, pp. 149–164.

SPEAR, Frank; KOHN, Mathew. Program GTB: GeoThermoBarometry. Rensselaer Polytechnic Institute, 2001.

SPEAR, Frank; PEACOCK, Simon. Metamorphic Pressure-Temperature-Time Paths. Estados Unidos: American Geophysical Union, 1989, Vol. 7, pp. 102.

THERMOCALC. THERMOCALC everything you wanted to know but were too afraid to ask. <http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/> (Consultado el 24 de octubre de 2014).

TINKHAM, Douglas; ZULUAGA, Carlos; STOWELL, Harold. Metapelite phase equilibria modeling in MnNCKFMASH: The effect of variable  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$  on mineral stability. En: Geological Materials Research. Estados Unidos, 2001, Vol. 3, pp. 42.

VERNON, Ron; CLARKE, Geoffrey. Principles of Metamorphic Petrology. 1era Edición. Reino Unido: Cambridge University, 2008, pp. 437.

WEI, Chunjing; WEI, Wang. Phase Equilibria in the Process of Anatexis in High-grade Metapelites. En: Earth Science Frontiers. China, 2007, Vol. 14, pp. 125-134.

WHITE, Richard; POWELL, Roger; HOLLAND, Tim. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. En: Journal of Metamorphic Geology, 2007, Vol. 25, pp. 511-527.

WHITNEY, Donna; EVANS, Bernard. Abbreviations for names of rock-forming minerals. En: American Mineralogist. Estados Unidos, 2010, Vol. 95, pp. 185-187.

WINTER, John. An introduction to Igneous and metamorphic petrology. 1era Edición. Reino Unido: Prentice Hall, 2001, pp. 687.

## ANEXOS

Anexo A Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-361.

Muestra PCM-361	Total	Cantidades Cationicas									
		CSi	CAI	CTi	CMg	CFe2+	CMn	CCa	CNa	CK	CCr
Granate	102.26	3.011	1.939	.000	.272	2.560	.129	.103	.013	.015	.003
Granate	101.30	3.011	1.941	.000	.331	2.492	.189	.054	.019	.011	.001
Granate	101.09	3.019	1.943	.000	.302	2.455	.221	.069	.006	.009	.000
Granate	100.91	2.991	1.939	.003	.333	2.545	.051	.167	.013	.009	.004
Biotita	97.040	5.429	3.310	.194	1.721	2.999	.017	.000	.051	2.056	.000
Biotita	96.540	5.079	3.011	.200	1.336	2.719	.008	.006	.020	1.691	.000
Biotita	97.260	5.361	3.446	.152	1.742	2.963	.016	.000	.062	2.098	.002
Biotita	96.940	5.398	3.371	.182	1.705	3.006	.009	.002	.051	2.067	.002
Muscovita	94.890	6.109	5.518	.050	.092	.255	.000	.000	.337	1.776	.001
Muscovita	94.520	6.130	5.481	.048	.119	.240	.000	.000	.364	1.761	.000
Muscovita	94.720	6.155	5.413	.042	.111	.277	.006	.004	.274	1.891	.004
Muscovita	100.14	2.801	1.183	.001	.000	.000	.000	.207	.817	.012	.000
Plagioclasa	100.93	2.808	1.174	.000	.001	.006	.000	.193	.839	.007	.000
Plagioclasa	102.60	2.943	1.046	.000	.002	.005	.001	.050	.948	.023	.000
Plagioclasa	101.69	2.820	1.166	.000	.000	.003	.002	.190	.822	.008	.000
Plagioclasa	94.520	3.876	9.026	.057	.169	1.369	.029	.008	.022	.009	.003
Estaurolita	93.140	3.892	8.999	.061	.157	1.392	.027	.000	.022	.005	.005
Ilmenita	99.810	.003	.001	.400	.017	1.091	.002	.001	.003	.001	.000
Ilmenita	99.200	.002	.001	.951	.015	1.068	.009	.000	.000	.001	.000

Anexo B Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-441.

Muestra PCM-441	Total	Cantidades Cationicas									
		CSi	CAI	CTi	CMg	CFe2+	CMn	CCa	CNa	CK	CCr
Granate	99.410	3.008	2.029	.005	.499	1.569	.041	.819	.000	.000	.002
Granate	100.53	2.973	1.958	.001	.231	1.573	.963	.347	.000	.017	.000
Granate	100.82	2.981	1.942	.004	.135	1.217	1.397	.367	.003	.009	.000
Granate	100.55	2.961	1.942	.003	.117	1.183	1.482	.355	.010	.009	.000
Granate	100.90	2.972	1.947	.003	.132	1.132	1.616	.248	.013	.006	.000
Biotita	98,25	6.669	2.168	.086	.000	1.003	.000	1.451	.993	.046	.008
Biotita	93.470	5.547	3.078	.160	2.714	2.246	.057	.020	.012	1.850	.000
Biotita	93.850	5.366	3.147	.169	2.909	2.231	.081	.007	.018	1.935	.004
Biotita	94.710	5.398	2.207	.143	2.768	2.317	.073	.005	.042	1.845	.001
Muscovita	93.870	6.198	5.254	.043	.219	.306	.015	.003	.293	1.889	.001
Muscovita	94.810	6.235	5.211	.042	.193	.323	.009	.007	.285	1.906	.001
Muscovita	94.590	6.201	5.272	.039	.183	.358	.000	.000	.280	1.864	.000
Muscovita	95.190	6.266	5.194	.037	.161	.310	.001	.009	.341	1.902	.000
Muscovita	92.520	6.510	5.341	.044	.178	.341	.002	.000	.305	1.845	.002
Plagioclasa	102.80	3.007	0.986	.000	.000	.008	.000	.023	.950	.002	.000
Plagioclasa	100.09	2.803	1.184	.000	.001	.006	.001	.198	.814	.010	.000
Plagioclasa	101.98	2.960	0.994	.000	.014	.020	.002	.000	.018	1.090	.000
Plagioclasa	98.520	2.824	1.172	.000	.001	.006	.001	.150	.854	.018	.000

Anexo C Tabla correspondiente a la de química mineral usada para el tratamiento de los datos de GTB para la muestra PCM-473.

Muestra PCM-473	Total	Cantidades Cationicas									
		CSi	CAI	CTi	CMg	CFe2+	CMn	CCa	CNa	CK	CCr
Granate	100.77	2.967	1.991	.005	.402	1.368	.096	.204	.003	.011	.000
Granate	100.71	3.001	1.934	.000	.283	2.408	.279	.128	.052	.009	.000
Granate	100.24	2.991	1.955	.000	.322	2.319	.289	.154	.000	.009	.001
Granate	100.49	3.015	1.956	.000	.215	2.420	.254	.146	.000	.009	.000
Biotita	95.150	5.393	3.649	.203	1.641	2.597	.036	.000	.066	2.028	.010
Biotita	94.270	5.395	3.378	.170	1.879	2.851	.021	.000	.049	2.043	.004
Biotita	95.750	5.386	3.421	.179	1.698	2.472	.004	.005	.066	2.026	.001
Biotita	96.480	5.412	3.621	.272	1.698	2.472	.004	.013	.067	1.963	.000
Muscovita	94.030	6.209	5.377	.035	.106	.297	.001	.000	.261	1.823	.000
Muscovita	92.560	6.254	5.247	.054	.130	.334	.000	.004	.242	1.846	.000
Muscovita	92.390	6.253	5.211	.071	.118	.340	.005	.007	.262	1.867	.000
Muscovita	92.970	6.218	5.308	.061	.123	.300	.005	.003	.244	1.854	.000
Muscovita	98.170	2.763	1.224	.000	.000	.002	.000	.255	.758	.003	.000
Plagioclasa	98.330	2.776	1.217	.001	.000	.006	.002	.237	.744	.007	.000
Plagioclasa	99.880	2.746	1.248	.001	.000	.000	.000	.271	.718	.006	.000
Plagioclasa	99.450	2.814	1.185	.000	.011	.032	.001	.174	.729	.027	.000
Silimanita	98.120	.996	1.997	.000	.000	.010	.000	.000	.000	.002	.000
Silimanita	97.290	.995	1.986	.000	.001	.024	.001	.003	.001	.003	.000
Silimanita	99.380	.986	2.007	.000	.000	.016	.000	.000	.000	.003	.000
Silimanita	100.290	1.017	1.956	.001	.000	.013	.001	.003	.004	.021	.000
Silimanita	97.440	.991	2.002	.000	.000	.010	.002	.001	.002	.002	.000