



Estudio petrográfico de rocas emplazadas en la unidad litodémica Neis de Bucaramanga por los sectores de Los Curos, vía Los Curos-Guaca y La Corcova, vía Bucaramanga-Pamplona, Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia.

Petrographic study of rocks located in the Neis de Bucaramanga lithodemic unit in the sectors of Los Curos, road Los Curos-Guaca and La Corcova, road Bucaramanga-Pamplona, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia.

Juan Camilo Bastos Espinosa ^a

^a Estudiante de Geología, Universidad de Pamplona, Colombia.

Correspondencia: juan.bastos@unipamplona.edu.co

Recibido: Abril 4, 2024. Aceptado: Noviembre 26, 2024. Publicado: Noviembre 26, 2024

Resumen

El Neis de Bucaramanga es la unidad litodémica más antigua del Macizo de Santander en los Andes colombianos, está definida por Ward et al. [1] como una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico que consisten principalmente de paraneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo; esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico, anfíbolita y migmatitas. Esta unidad se ha visto sometida a varios procesos tectono-metamórficos que han alterado su morfología y su composición, en el caso de estudio del presente proyecto se analizaron 20 muestras de esta unidad en dos localidades: Los Curos (8 muestras) y La Corcova (12 muestras); de las cuales se hicieron 19 láminas delgadas para caracterizar las microestructuras y las asociaciones minerales de los ejemplares como objetivo principal, además de plantear una interpretación de su evolución.

Se determinó que en las zonas de estudio hay presencia de neises biotítico-sillimaníticos en facie anfíbolita que muestran una transición composicional hacia una roca granítica, lo cual se ha relacionado al emplazamiento del Ortoneis, y también del Plutón del Monzogranito de La Corcova; a su vez, presentan variaciones mineralógicas a neises cuarzo-feldespáticos, neises cuarzo-granatíferos en La Corcova y neises hornbléndico-granatíferos en Los Curos, que llevan sobreimpuesta una alteración hidrotermal, interpretada por las asociaciones minerales de epidota, clinozoisita, clorita, sericita y granate, además, de intrusiones de venas de cuarzo, epidota y apatito, mineralizaciones de sulfuros y diferentes texturas y microestructuras presentes en estas rocas, que al mismo tiempo exhiben la deformación que han sufrido los cristales en estos afloramientos. Se han analizado mapas composicionales obtenidos por la microsonda electrónica de un granate con una zonación textural sectorial en una vena de apatito, cuarzo y zoisita de un neis hornbléndico-granatífero, que tiene inclusiones de cuarzo alargado, apatito y óxidos hacia los bordes de las caras de sus cristales.

Palabras clave: Macizo de Santander, Neis de Bucaramanga, metamorfismo, alteración hidrotermal, Plutón Monzogranito de La Corcova.

Abstract

The Bucaramanga Neis is the oldest lithodemic unit of the Santander Massif in the Colombian Andes, it is defined by Ward et al. [1] as a stratified sequence of metasedimentary rocks of high metamorphic grade consisting mainly of pelitic, semi-pelitic and sandy paraneis; schist and subordinate amounts of calcareous neis, marble, hornblende neis, amphibolite and migmatites. This unit has been subjected to several tectono-metamorphic processes that have altered its morphology and composition, in the case study of the present project 20 samples of this unit were analyzed in two localities: Los Curos (8 samples) and La Corcova (12 samples); of which 19 thin films were made to characterize the microstructures and mineral associations of the specimens as the main objective, in addition to posing an interpretation of their evolution.

It was determined that in the study zones there is presence of biotitic-sillimanite neisses in amphibolite facies that show a compositional transition towards a granitic rock, which has been related to the Ortoneis emplacement, and also to the La Corcova Monzogranite Pluton; in turn, they show mineralogical variations to quartz-feldspathic neisses, quartz-granatiferous neisses in La Corcova and hornblende-granatiferous neisses in Los Curos, which have hydrothermal alteration superimposed, interpreted by the mineral associations of epidote, clinozoisite, chlorite, sericite and sericite, chlorite, sericite and garnet, as well as intrusions of quartz, epidote and apatite veins, sulfide mineralization and different textures and microstructures present in these rocks, which at the same time exhibit the deformation that the crystals have undergone in these outcrops. Compositional maps obtained by electron microprobe of a garnet with a sectorial textural zoning in a vein of apatite, quartz and zoisite of a hornblende-garnet neis, which has inclusions of elongated quartz, apatite and oxides towards the edges of the faces of its crystals, have been analyzed.

Keywords: Santander Massif, Bucaramanga Neis, metamorphism, hydrothermal alteration, La Corcova Monzogranite Pluton.

1. Introducción

La zona de interés para esta investigación se ubica en el Macizo de Santander en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, específicamente en el litodema Neis de Bucaramanga que es la unidad metamórfica más antigua del basamento del Macizo, su origen se atribuye a la orogenia Grenvilliana y ha sido afectada por todos los eventos tectónicos y termales a los que se ha visto sometido a lo largo de su evolución de los cuales se interpretaron los relevantes para este proyecto. Esta unidad fue definida por Ward et al. [1] como una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico que consisten principalmente de paraneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo; esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico, anfibolita y localmente migmatita.

En los afloramientos involucrados de donde se hizo la caracterización de las muestras, cerca de las localidades de Los Curos y La Corcova, el Neis de Bucaramanga ha sido altamente influenciada por el emplazamiento de la unidad Ortoneis que comprende neises pelíticos, cuarzo-feldespáticos y máficos, y cuerpos discontinuos de anfibolitas foliadas de forma lenticular y tabular, además, esta unidad es evidencia de la orogenia Famatiniana en los Andes septentrionales [2] [3], y a su vez, también es afectado por la actividad magmática en el límite Triásico - Jurásico en el Macizo de Santander demostrada por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos en basamentos metamórficos del Paleozoico.

Para este caso se asocia con las zonas el emplazamiento del Plutón de La Corcova, el cual en [1] se había clasificado como Cuarzomonzonita de La Corcova, que aflora en las vecindades de la localidad de La Corcova, sobre la carretera Bucaramanga-Pamplona, y a su vez, esta se presenta bien expuesta en la carretera de Los Curos-Guaca. Ellos observaron afloramientos del contacto intrusivo de La Corcova con el Neis de Bucaramanga en su trabajo de campo; mencionan que hay zonas de migmatita, las cuales provienen de la fusión parcial de una roca preexistente, en este caso del neis pelítico, que está compuesta por bandas oscuras (“melanosoma” de características metamórficas) y claras (“leucosoma” de características plutónicas), que contienen paraneis mezclado con neis augen y neis granítico siendo abundantes en el Neis de Bucaramanga adyacente al Plutón de La Corcova, aunque señalan que estas rocas están demasiado meteorizadas. Pero en el más reciente trabajo sobre este Plutón se ha definido como el Monzogranito de La Corcova por Rodríguez et al. [4] donde proponen el nombre teniendo en cuenta que la

litología dominante corresponde a monzogranitos y muy contadas muestras alcanzan el campo de las cuarzomonzonitas.

El estudio petrográfico de las rocas metamórficas permite comprender parte de la compleja historia producto de los procesos físicos y químicos que han afectado a las rocas cuando son sometidas a cambios de presión y temperatura. Tomando en consideración la relación entre la fábrica de la roca, que es definida como la disposición espacial de los componentes que la constituyen; y las asociaciones minerales, que representan las fases mineralógicas que están en equilibrio químico en las rocas, se puede generar un análisis petrográfico basado en la interpretación de las características microscópicas y la composición mineral, llegando a la categorización de las muestras y dando una interpretación de las posibles condiciones de formación de estas.

Al realizar la caracterización mineralógica y petrográfica de estas secuencias de rocas, se está dando el primer paso a una interpretación petrológica, fundamentada por los ensamblajes minerales presentes, las texturas y las características microestructurales de los cristales, expresados en las descripciones y clasificaciones de las rocas en este proyecto de fin investigativo. Aportando a la geología colombiana un estudio petrográfico de una de las unidades del basamento cristalino más antiguas datadas en su evolución geológica, como lo es el Neis de Bucaramanga y proponiendo una interpretación de la evolución en el contexto local de las zonas objeto de estudio para presentar esos cambios composicionales y morfológicos.

Con el objetivo de detallar más acerca de la génesis de las muestras recolectadas de la unidad Neis de Bucaramanga, implicadas en las zonas de este proyecto se pretende hacer un aporte a la comprensión de la evolución tectono-metamórfica del Macizo de Santander, teniendo en cuenta los resultados que permiten establecer una correlación en la distribución de las litologías detalladas en campo con rasgos tectónicos a nivel regional, además, el análisis de las microestructuras también permite obtener información sobre los cambios sufridos por los minerales durante la trayectoria del metamorfismo, dando más indicios sobre su origen y proponiendo una respuesta a cuál es la relación entre las rocas de ambas localidades.

2. Marco geológico

En Colombia, los Andes septentrionales se ramifican en tres cordilleras espaciadas por estrechos valles (Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera

Oriental). Está estipulado que el sistema Andino Colombiano fue construido por sucesivos episodios orogénicos, que comenzaron en el Cretácico Tardío y culminaron durante la orogenia andina neógena. El núcleo pre-Mesozoico en este sistema montañoso está expuesto a lo largo de las cordilleras oriental y central; particularmente, estas cordilleras tienen varios bloques aislados de basamento Proterozoico con diversidad en edad y evolución de la corteza según Restrepo-Pace et al. [5] y Tschanz et al. [6].

Varios autores que se han enfatizado en el estudio de la tectónica y la evolución estructural de los Andes septentrionales haciendo alusión a que la actual configuración de los Andes del Norte es el resultado de la interacción tectónica de las placas Caribe, Nazca y Suramericana (Fig. 1). Hacia el norte de la cordillera oriental la configuración estructural está principalmente dominada por la Falla de Bucaramanga (Fig. 1 y 2), estructura que según Cediel *et al.* [7] fue reactivada en el Aptiano-Albiano, debido a la migración del bloque Maracaibo en dirección NW, en el cual la falla constituiría el límite occidental del mismo. Tesón [8] y Velandia [9] afirman que la actividad tectónica de las fallas mayores como Bucaramanga, Soapaga y Río Servitá (Fig. 1) a lo largo de los bordes de los macizos de Santander y Floresta daría lugar a la actual configuración del núcleo de la Cordillera Oriental.

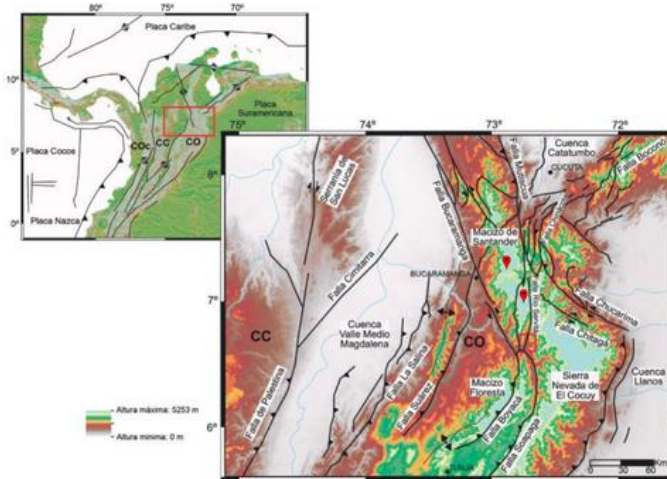


Figura 1. Modelo Digital de Elevación, donde se observan los principales rasgos tectónicos de la Cordillera Oriental de Colombia (CO), en la cual se encuentra localizada las zonas de estudio (puntos rojos). CO = Cordillera Occidental y CC = Cordillera Central. En este marco regional se destacan en la Cordillera Oriental estructuras como las fallas de Bucaramanga, Suárez, Boyacá y Chitagá, entre otras, así como estructuras longitudinales S-N relacionadas por la continuidad de sus trazos (fallas de Soapaga, Río Servitá y Mutiscua). Tomada y adaptada de Forero *et al.* [10].

Irving [11] planteó la evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia dando algunos

indicios de los eventos ocurridos en el Macizo de Santander, relacionándolo con otros cuerpos cristalinos de Colombia como la Sierra Nevada de Santa Marta, igualmente, concluyendo que durante la Orogenia Andina del Terciario medio, la Cordillera Oriental intra-cratónica, se levantó a lo largo de bien definidas flexiones marginales, fallas invertidas que se inclinan hacia la Cordillera y localmente a lo largo de fallas direccionales; y que para el Ordovícico tardío, al este de Bucaramanga, el orotectonismo sintectónico de biotita, cuarzo y feldespato de considerable espesor, se intercala concordantemente con los planos de foliación del Neis de Bucaramanga y del Esquisto de Silgará, que está asociado con la orogenia del Ordovícico tardío.

Forero [12] publica su hipótesis sobre como el sistema de fallas del Borde Llanero de Colombia representa el límite entre dos provincias geológicas del paleozoico inferior: el Escudo de Guayana (Gondwana) al Oriente, y un terreno alóctono del continente norteamericano al Occidente. Planteando que el basamento metamórfico pre-Emsiano del flanco oriental de la Cordillera Central y de la Cordillera Oriental corresponde a un terreno alóctono que perteneció a Norte América. Donde el alóctono fue unido al borde continental de Sur América durante el choque entre Norte América y Gondwana en el tiempo Silúrico-Devónico temprano, además de reportar el último evento de metamorfismo regional en los Andes septentrionales de Colombia en ese rango del tiempo geológico, y que luego, a partir del Emsiano tardío se inició un ciclo sedimentario sobre este basamento alóctono. Cabe aclarar que el carácter de este terreno aún es cuestión de debate.

Posteriormente, Restrepo [13] propone según la geocronología en rocas del basamento de los Andes Colombianos, que se confirma la presencia de un cinturón de alto grado metamórfico de edad Grenvilliana. El cinturón Grenvilliano, conocido localmente como Nickeriense u Orinoquiense, está expuesto como levantamientos de basamento a lo largo de la Cordillera Oriental de Colombia y la Sierra Nevada de Santa Marta en la costa del Caribe. A su vez que existen rocas metamórficas de bajo grado que consisten en una gruesa secuencia supracrustal, es decir, metapelítica-metapsamítica con pequeños diques máficos transversales, que suprayacen el basamento Nickeriense a lo largo de la Cordillera, corroborándolo con la edad U/Pb en zircón obtenida de un granitoide sin-cinemático emplazado en concordancia estructural con el cinturón metamórfico de bajo grado del Macizo de Santander, que arrojó una edad de 477 ± 16 Ma, indicando un evento

metamórfico regional de facies esquisto verde a anfibolita baja para estas rocas a mediados del Ordovícico. Además, que se pone en evidencia un evento metamórfico regional en el Triásico-Jurásico superpuesto a los anteriormente mencionados. Este evento es el resultado de una anomalía térmica regional producida por extensión cortical en el área posterior al arco y el gran volumen de intrusivos calcalinos que tuvo lugar simultáneamente. Las rocas metamórficas del Paleozoico inferior fueron elevadas de grado metamórfico de facies esquisto verde a anfibolita en la zona de la sillimanita, y las secuencias del Paleozoico medio a superior se metamorfosearon variablemente de facies esquisto verde a muy bajo grado dependiendo de su distancia relativa a los centros intrusivos. Poniendo en evidencia el efecto de estos intrusivos ígneos sobre las rocas del basamento.

Cediel *et al.* [7] hicieron una síntesis e interpretación integradas del ensamblaje tectónico de todo el Bloque Andino Septentrional (los Andes de Ecuador, Colombia y Venezuela). La reconstrucción tectónica se basa en la identificación y caracterización de unidades litotectónicas y morfoestructurales distintas y sus sistemas de suturas y fallas limítrofes, que, basándose en consideraciones geológicas, geofísicas y dinamo-tectónicas, definen cuatro reinos tectónicos distintos que representan toda la región andina septentrional. Nos encontramos con que el Macizo de Santander hace parte del Maracaibo Subplate Realm (MSP). La MSP alberga numerosas provincias litotectónicas compuestas y rasgos morfoestructurales, incluyendo la Sierra Nevada de Santa Marta, la Sierra de Mérida, la Serranía de Perijá y las cuencas Cesar-Ranchería y Maracaibo. Desde una perspectiva geológica, el MSP se caracteriza por ser la porción más noroccidental del Escudo Guayanés, sobreyacido en esta región por extensas secuencias supracrustales del Fanerozoico. A finales del Cretácico, el MSP comenzó a migrar hacia el noroeste a lo largo de los sistemas de fallas de Santa Marta-Bucaramanga y Oca-El Pilar, formando en el proceso la Sierra de Mérida, el cinturón Santander-Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta. Aunque técnicamente forma parte del Escudo Guayanés, la MSP se distingue por un estilo de deformación único y regionalmente limitado, provocado por la interacción Mesozoico-Cenozoico a través de la reciente interacción entre las placas de Nazca, Caribe y Sudamérica continental.

El doctor Víctor Ramos [3] se enfoca en relacionar eventos tectono-metamórficos para la interpretación de la configuración tectónica de los Andes, donde el protomargen continental de Gondwana Occidental en América del Sur registra una importante actividad

magmática del Ordovícico Temprano-Medio asociada con el desarrollo del orógeno Famatiniano. Casi todo el margen de la zona occidental de Suramérica tiene evidencia de un arco magmático preservado como ortoneises en los dominios metamórficos de alto grado hasta rocas volcánicas de la misma edad intercaladas con facies sedimentarias. Se comparan diferentes dominios a lo largo del margen continental teniendo que hay tres segmentos profundamente exhumados y conservados como ortoneises en facies de anfibolita de alto grado, los dominios Sierras Pampeanas, Maraño y Santander-Mérida. La ubicación y grado metamórfico están controlados por la cantidad de acortamiento y levantamiento, responsables de los diferentes niveles corticales expuestos, como consecuencia de las características de los distintos terrenos que chocaron con el margen continental. Como observación final, plantea que el lapso del episodio Famatiniano, cuando se compara globalmente, tiene un desarrollo generalizado en Laurentia, Báltica y Australia, como consecuencia de un período de alta movilidad de las placas durante el Ordovícico Temprano-Medio.

En otro aspecto, Mantilla *et al.* [14] publican haciendo énfasis en un evento magmático del Ordovícico Temprano que ha sido documentado para el Macizo de Santander. Donde tres edades U/Pb en torno a 477 ± 2 Ma, fueron obtenidas a partir de unas dioritas foliadas calcoalcalinas con metamorfismo regional. Estos datos permiten interpretar el origen de estos zircones como procedentes a partir de una fuente de isótopos de Hf inicial radiogénica, lo cual es característico del manto terrestre. Esto, junto al hecho que las rocas han sido afectadas posteriormente por procesos tectono-metamórficos, apuntan a que las dioritas del Ordovícico Temprano fueron emplazadas en un ambiente de supra-subducción, relacionado con el inicio del cierre del Océano Iapetus.

López y Zuluaga [15] dan información acerca del cinturón magmático del Triásico Tardío-Jurásico en Colombia, siendo el resultado de la fusión parcial de rocas de la corteza inferior mezcladas con fundidos provenientes del manto en un ambiente de margen continental. A su vez, define que el Macizo de Santander está compuesto en gran parte por varios granitoides metaluminosos a fuertemente peraluminosos del Triásico Superior al Jurásico Inferior que intruyen el Neis de Bucaramanga y las rocas metamórficas de la Formación Silgará (llamados Granodiorita de Onzaga, Diorita del Río Guaca, Tonalita San Martín, Diorita, Tonalita y Granodiorita Surata, Tonalita y Granodiorita Páramo Rico, Monzonita Cuarítica La Corcova, Monzogranito

Pescadero, Monzonita Cuarítica Santa Bárbara, Monzonita Cuarítica Mogotes, Granito Alcalino Ocaña y Monzogranito Rionegro). Composicionalmente, son principalmente diorita, tonalita, granodiorita y granito del cinturón magmático del Triásico Tardío – Jurásico.

Restrepo y Toussaint [16] hicieron una clasificación de las provincias geológicas que representaban terrenos acrecionados al borde noroccidental del Escudo de Guayana, donde la región andina oriental de Colombia tiene un basamento continental y su geología es diferente a la de la región andina occidental, que está cubierta por corteza oceánica. Plasman que el basamento de la Cordillera Oriental de Colombia ha sido interpretado como un terreno alóctono acrecionado durante el Paleozoico tardío; de igual modo, correlacionan al Macizo de Santander con la Sierra Nevada de Santa Marta y el borde oriental de la cordillera central en el Terreno Andino Oriental, que estaba compuesto por rocas metamórficas del Precámbrico superpuestas por rocas metamórficas de medio a bajo grado en el caso de Macizo de Santander, que fueron metamorfoseadas antes del Devónico, ya que están cubiertas por sedimentos epicontinentales no metamorfoseados de edad Devónica y Carbonífera. Posteriormente estos mismos autores en [17] denominaron a este terreno el Terreno Chibcha, el cual está constituido principalmente por un basamento metamórfico Grenvilliano, principalmente Steniense - Toniense, y un evento metamórfico Famatinense de grado bajo a medio. El magmatismo de composición intermedia a ácida anterior al Devónico afectó principalmente al Macizo de Santander, seguido de una importante sedimentación marina del Paleozoico tardío que se produjo en todo el Terreno Chibcha. Su acreción en el Cratón Amazónico y el Terreno Andaquí puede haber sido de edad Paleozoica tardía.

El Macizo de Santander es un cuerpo rocoso ubicado en los Andes colombianos por el sector nororiental de la Cordillera Oriental, cerca de donde ésta se ramifica hacia los Andes de Mérida de Venezuela (ver Fig.1 y Fig. 2b); el cual ha sido sometido desde la era Paleozoica hasta el presente a múltiples eventos tectónicos, metamórficos, magmáticos e hidrotermales que han hecho que su historia sea compleja. Este macizo es un bloque levantado localizado entre fallas mayores; por el complejo conjunto de fallas y estilos de deformacionales que presenta, además de su elevación actual es probable que sea el resultado de la evolución de la falla de Bucaramanga la cual limita al oeste al cuerpo rocoso y tiene un deslizamiento de rumbo sinistral con un componente vergente inverso al oeste, y al este está limitado por un sistema de fallas de

cabalgamiento con vergencia al este (Pamplona - Cubogón – Mercedes – Sulasquilla – Morro Negro).

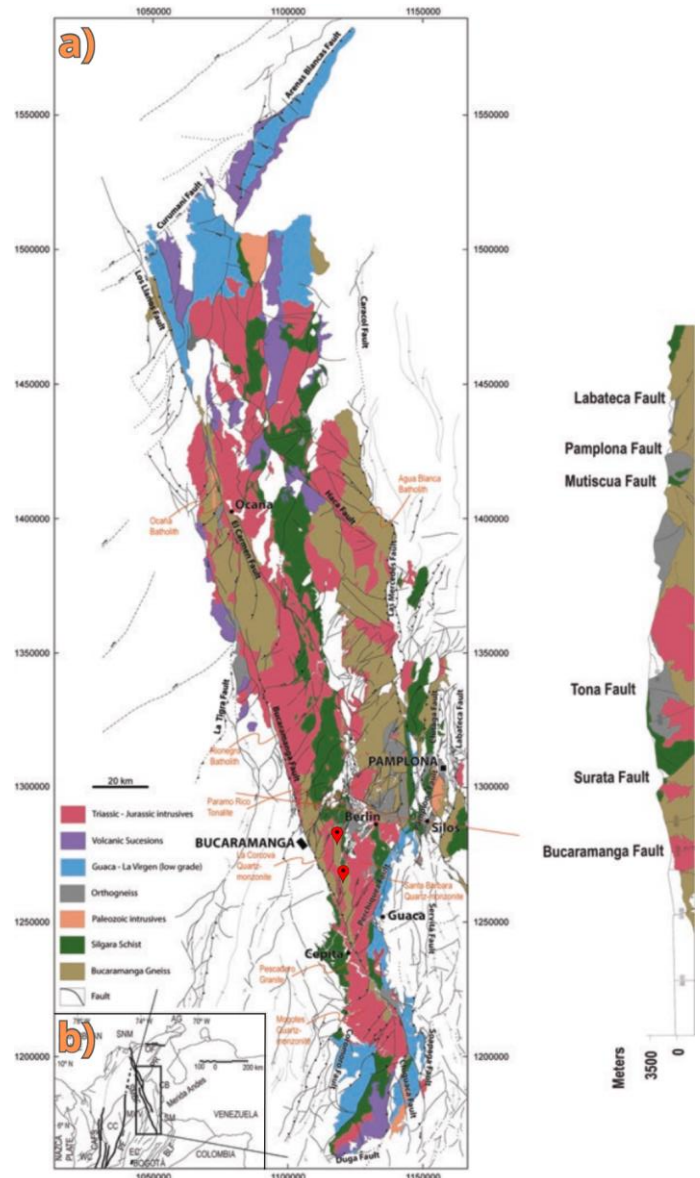


Figura 2. a) Mapa geológico del basamento del Macizo de Santander con unidades cristalinas y estructuras principales. b) Ubicación del Macizo de Santander en la cordillera de Oriental de los Andes Colombianos. Los puntos rojos indican la ubicación de las zonas objeto de estudio. Tomada y adaptada de Zuluaga y López [18].

Su basamento cristalino (Fig. 2a) está compuesto por rocas metamórficas de diferentes edades, agrupadas en tres principales unidades de la más antigua a la más reciente como: Neis de Bucaramanga, Formación Silgará y Ortoneis. Las anteriores unidades mencionadas son comprendidas como el producto de un metamorfismo regional tipo Barroviense y en algunos sectores metamorfismo dinámico, además, de sufrir una serie de intrusiones ígneas a lo largo de su evolución geológica.

Este basamento consiste en un complejo ensamblaje que comprende rocas pelíticas (neises de biotita), máficas (neises de hornblenda, neises de biotita-hornblenda y anfibolitas) y cuarzofeldespáticas (neises de cuarzo-feldespato y cuarcitas), que presentan un aspecto bandeado, colectivamente llamado el Neis de Bucaramanga. Rocas pelíticas (feldespato-micaesquistos y micaesquistos), semipelíticas (esquistos de cuarzo-feldespato, esquistos de mica-cuarzo, cuarcitas de feldespato, cuarcitas de mica-feldespato, cuarcitas de moscovita y cuarcitas de feldespato), carbonatadas (mármol) y máficas (esquistos anfibólicos y esquistos biotita-anfibólicos), que muestran una esquistosidad bien desarrollada, y agrupadas se conocen como Formación Silgará. Rocas intrusivas deformadas de composiciones félsicas (neises de cuarzo-feldespato) y máficas (neises de biotita-hornblenda y anfibolitas) en menor proporción, correspondientes a la unidad Ortoneis, que corta la unidad Neis de Bucaramanga e intruye de forma sintectónica la Formación Silgará, ya que las foliaciones de ambas unidades son concordantes. Además, de rocas intrusivas félsicas de afinidad granítica (monzogranitos y granodioritas, ricas en plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico) del Triásico Tardío al Jurásico Temprano denominados Grupo Plutónico de Santander en [1].

Desde los primeros trabajos donde se reconoció la configuración geológica del Macizo de Santander tenemos a Julivert [19] que expresa características estructurales, morfológicas y composicionales de la vertiente oeste del macizo indicando que la falla de Bucaramanga es la responsable de su levantamiento. Seguido de esto Goldsmith *et al.* [20] analizaron muestras de rocas metamórficas e ígneas del Macizo de Santander que fueron datadas por métodos K-Ar o Rb-Sr, llegando a la conclusión de que las edades radiométricas indican que el Neis de Bucaramanga es una roca de edad Precámbrica, y que las rocas sedimentarias del Precámbrico superior o Paleozoico inferior fueron intruídas y metamorfoseadas durante el Ordovícico, y que las principales intrusiones batolíticas se produjeron a finales del Triásico y principios del Jurásico temprano, seguidas de intrusiones menores durante el Jurásico y principios del Cretácico.

Luego Ward *et al.* [1], llegaron a definir las formaciones de los diferentes tipos de roca que comprenden el Macizo de Santander, las estructuras y los procesos que sufrieron a lo largo de la evolución geológica en la zona, además de una cartografía que hoy en día se sigue utilizando. Se colectó a detalle la caracterización litológica y los aspectos principales de campo; dejando precedentes de la definición, la

distribución, la descripción, la edad y la correlación de las unidades del Macizo, por ende, se cuenta con la información del Neis de Bucaramanga siendo la unidad de interés para este proyecto, donde lo definen como una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico que consisten principalmente de paraneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo; esquistos y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita. Y también incluye zonas de migmatita de dos tipos: una en la cual el paraneis está mezclado con rocas granítica néisica y otra, donde ambos están cortados por muchas masas pequeñas de granito no foliado de edad mucho más joven.

Enfatizando más en los aspectos petrológicos y termo barométricos, García *et. al* [21] hacen una publicación donde han examinado las paragénesis minerales, reacciones metamórficas y condiciones de presión y temperatura de las rocas metamórficas de la región central del Macizo de Santander. Concluyendo que el metamorfismo regional Barroviense ocurrió bajo condiciones de alta temperatura y presión intermedia con el desarrollo de tres zonas metamórficas: estaurolita-cianita, sillimanita y migmatita. Las condiciones de presión y temperatura están en el rango de 5.0-9.5 kbar y 630-727°C. La trayectoria de presión y temperatura de las unidades metamórficas es en sentido horario sugiriendo un modelo de colisión para esta región de los Andes Colombianos.

Es importante resaltar que para esta investigación se ve involucrado el Neis de Bucaramanga, el Ortoneis y el Plutón del Monzogranito de La Corcova como se puede ver en la Figura 3; así que se ha analizado la información existente que se pueda relacionar con los aspectos composicionales y morfológicos de las zonas objeto de estudio. Por ello se ha de tener en cuenta las características asumidas en los estudios específicos de estas unidades.

En el 2011 Ureña y Zuluaga [22] profundizaron acerca de la caracterización petrográfica de la formación Neis de Bucaramanga definiéndola como una secuencia formada principalmente por neises cuarzo feldespáticos, biotíticos y sillimaníticos con niveles de neises hornbléndicos, cuarcitas y anfibolitas. Las rocas pertenecen a la facies anfibolita de alta temperatura y en general están caracterizadas por la asociación cuarzo, plagioclasa, biotita, sillimanita, feldespato potásico y moscovita. Amaya [23] hace un análisis detallado acerca de las migmatitas relacionadas al Neis de Bucaramanga que comprenden una parte sustancial del Macizo de Santander. Las migmatitas consisten de melanosomas con anfíboles, mesosomas con anfíboles, biotita, sillimanita,

muscovita, feldespatos, y cuarzo, y leucosomas sin presencia de residuos restíticos. El grado de metamorfismo está en facies anfibolita superior. Las evidencias de campo, observaciones petrográficas, datos químicos y cálculos de balance de masas sugieren que la intrusión de magmas y la fusión parcial de rocas metasedimentarias fueron los principales procesos que generaron las migmatitas, y estos pudieron ser alcanzados solo con una alta cantidad de agua presente en el sistema. El Neis de Bucaramanga representa un ejemplo de migmatitas formadas en presiones medias y altas temperaturas, relacionado con procesos orogénicos caracterizados por trayectorias de P-T en sentido horario en la cual el pico de presión precedió el pico de la temperatura. Zuluaga *et al.* [24] exponen que según los datos petrológicos y geoquímicos de su estudio se indica que el pico metamórfico del migmatítico Neis de Bucaramanga alcanzó la facies de granulita contradiciendo a Irving en [11] quien propuso que no llegaba a tal facies metamórfica. Bajo condiciones de temperaturas hasta de 800° C y que un evento metamórfico de baja presión posterior sobreimpresionó las migmatitas. La migmatización de la unidad probablemente ocurrió durante el período metamórfico del pico representado por un conjunto mineral que contiene granate $\pm$ plagioclasa $\pm$ cuarzo $\pm$ silimanita $\pm$ biotita $\pm$ anfíbol $\pm$ moscovita; este ensamblaje tiene microestructuras características de las facies de granulita, como la homogeneización química del granate y la sustitución de anfíboles por clinopiroxeno. Algunos leucosomas probablemente se originaron a partir de una fusión parcial local; sin embargo, la unidad contiene varios leucosomas más que no pudieron petrogenéticamente ser vinculados a las litologías mesosomales locales y probablemente representan composiciones fundidas modificadas. La evaluación de las composiciones de los mesosomas indica que las rocas ricas en anfíboles no eran una fuente importante de derretimientos parciales y que la mayoría de los derretimientos parciales locales probablemente se formaron por fusión de pelitas y rocas cuarzo feldespáticas presentes en fluido que involucran cuarzo y feldespato.

En la correlación espacial que Ward *et al.* [1] describen de la Cuarzomonzonita de La Corcova en el Neis de Bucaramanga, indican que este cuerpo ígneo aflora en las vecindades de la localidad de La Corcova, sobre la carretera Bucaramanga a Pamplona, y a su vez, esta se presenta bien expuesta en la carretera de Los Curos a Guaca. Allí pueden verse los afloramientos del contacto intrusivo de La Corcova con el Neis de Bucaramanga,

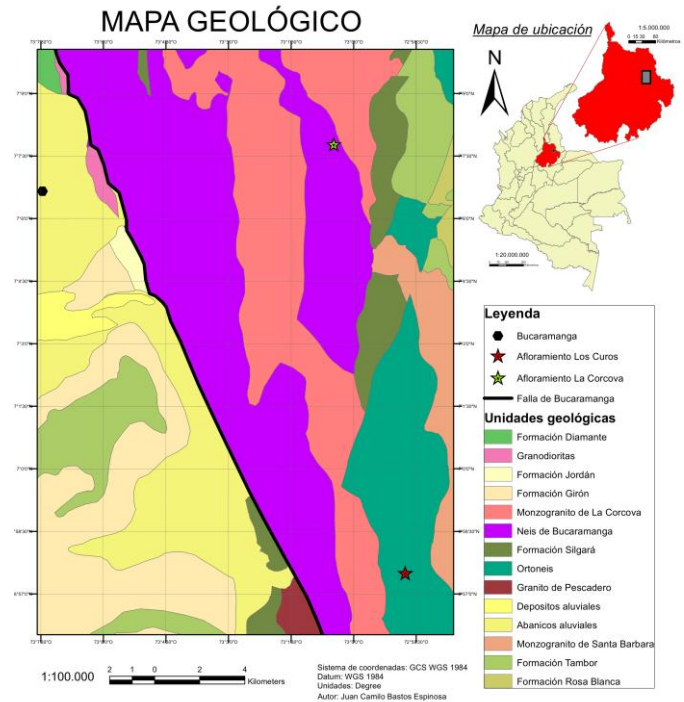


Figura 3. En la parte superior derecha está el mapa de ubicación de la zona de interés en el departamento de Santander, Colombia; al costado izquierdo el mapa geológico de la zona de estudio mostrando los afloramientos analizados. Unidades tomadas de Gómez *et al.* [25].

siendo relevante para este estudio ya que compromete las dos vías donde se han recolectado las rocas; mencionando que hay zonas de migmatita que contienen paraneis mezclado con neis augen y neis granítico que son abundantes en el Neis de Bucaramanga adyacente al Plutón de La Corcova, aunque indican que estas rocas están profundamente meteorizadas. Pero en el más reciente estudio el Servicio Geológico Colombiano publicó el catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia del cual tomamos como referencia al Plutón de La Corcova, el cual fue catalogado por Rodríguez *et al.* [4] como Monzogranito de La Corcova a partir de estudios macroscópicos, microscópicos y litogeoquímicos, además de la química mineral y la génesis, llegando a la conclusión de que el Plutón está constituido principalmente por monzogranitos que pueden variar a escasos sienogranitos y granodioritas, y hacia los bordes del intrusivo aparecen localmente cuarzdioritas, cuarzomonzonitas y tonalitas; por ende, se tendrá en cuenta para este trabajo por esta clasificación. En general las rocas son faneríticas de grano fino a medio, de color blanco a gris moteado de negro, con textura granular e inequigranular, localmente bimodal ligeramente porfídica, constituida por cristales de feldespato alcalino de color blanco, cuarzo blanco translúcido y plagioclasa blanca lechosa, como minerales

máficos biotita y escasa hornblenda; los accesorios son apatito, circón, opacos y en algunas rocas allanita y titanita.

García et. al [2] presentan las características petrográficas, geoquímicas y geocronológicas del ortoneis que intruye al Neis de Bucaramanga y a los Esquistos del Silgará. Estos ortoneises ocurren como franjas alargadas en dirección N-S o como masas irregulares bordeando las rocas del Neis de Bucaramanga y Esquistos del Silgará. Las rocas de la unidad Ortoneis comprenden neises pelíticos, cuarzo-feldespáticos y máficos, y cuerpos discontinuos de anfibolitas foliadas de forma lenticular y tabular. Esclarecen que las foliaciones de los neises y anfibolitas son siempre concordantes. A su vez, Carolina Jiménez [26] en su tesis de investigación plasmó los resultados de estudios de campo, petrográficos y geoquímicos indicando que el Ortoneis de Berlín consiste en una variación composicional que va de monzogranito a monzodiorita. Sus relaciones de campo y estudios geoquímicos demuestran que estas rocas están relacionadas con un magma que se sometió a cristalización fraccionada. El cuerpo ortoneisico tiene naturaleza calcoalcalina, peraluminosa y se clasifica como granitoide de tipo S, las anomalías negativas de Nb y Ti junto con anomalías positivas de Rb, Ba, K, y Pb en los diagramas spider indican un ambiente de subducción. En cuanto a la configuración geodinámica, este cuerpo se formó en un ambiente tectónico de emplazamiento de tipo transicional de arco volcánico, en un evento que ocurrió desde el cámbrico hasta el silúrico (540- 420 Ma), asociado a la orogenia Famatiniana.

Teniendo clara esta información se obtuvieron las bases para la interpretación del contexto regional tectono-metamórfico de la unidad Neis de Bucaramanga, y las asociaciones minerales que se relacionaron con lo detallado en las muestras de este proyecto, y así alcanzar el objetivo principal de la investigación, con la caracterización mineralógica y petrográfica de las rocas en estas localidades, además de propiciar una interpretación adecuada de su evolución.

3. Método y materiales

La metodología de este proyecto se dividió en 4 fases: recopilación bibliográfica, trabajo de campo, laboratorio y análisis e interpretación de los resultados.

3.1 Recopilación bibliográfica

Para iniciar, en la primera fase se realizó una exhaustiva búsqueda de información geo científica

relacionada con las zonas de estudio, desde lo más general como la configuración tectónica de los Andes y los eventos a los cuales ha sido sometido el Macizo de Santander a lo largo de su historia geológica, hasta lo más detallado enfatizado en la composición, distribución y evolución del basamento cristalino del macizo. Priorizando a las unidades involucradas en las áreas analizadas, que son el Neis de Bucaramanga, el Plutón de La Corcova y el Ortoneis, para así hacer una recopilación de lo que diversos autores han estipulado en sus trabajos sobre la región, y plantear una interpretación geológica preliminar en base a lo investigado.

3.2 Trabajo de campo

En la segunda fase tenemos el trabajo de campo, donde se hizo una evaluación detallada de las zonas objeto de estudio, con el fin de obtener la mayor información posible de los afloramientos donde se ven expuestas las rocas de la unidad Neis de Bucaramanga en ambas localidades, teniendo en cuenta la morfología de las rocas in situ y la variabilidad de su composición. El afloramiento del sector de Los Curos se ubica sobre la vía Los Curos – Guaca entre los kilometrajes 115+142 hasta el 115+153, en el cual, fueron recolectadas 8 muestras de manera ascendente sobre la vía en el litodema Neis de Bucaramanga (Fig. 4). Y entre los km 30+347 al 30+304 sobre la vía Bucaramanga – Pamplona se recolectaron 12 muestras de manera descendente sobre la vía (ver Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 12), aproximadamente a 6 km del corregimiento de La Corcova.

3.3 Laboratorio

Teniendo este material se prosigue a la tercera fase que corresponde al laboratorio, donde de las veinte rocas recolectadas se hicieron cortes pulidos en dirección paralela o transversal a la foliación según las características en la distribución de las fases minerales y las estructuras que presentan, para su respectivo diagnóstico macroscópico mediante el estereoscopio marca MEIJI TECHNOL referencia RZ, adecuado con el iluminador de alta intensidad NI-150 Nikon, identificando la composición mineralógica y los rasgos macroscópicos de las rocas. Seguido de esto, se seleccionaron 12 de las 20 muestras que presentaban diferencias estipuladas en su composición, de ellas se hicieron los cortes con los que se elaboraron 19 secciones delgadas (11 para La Corcova y 8 para Los Curos), por el proceso de doble pulido de la roca a 30 micras puesta en el vidrio de un portaobjetos, para tener la posibilidad de determinar las adecuadas propiedades ópticas de los minerales en un microscopio

petrográfico. Para este caso se utilizó una marca OLYMPUS referencia BX5, haciendo uso de los lentes UPlanFI 4x, 10x, 20x y 40x de OLYMPUS bajo luz polarizada cruzada (XPL) y luz polarizada plana (PPL) obteniendo las asociaciones minerales precisas que se encuentran en las muestras, sus texturas y los rasgos microestructurales presentes, además de capturar las fotografías estereoscópicas de los cortes pulidos y las microfotografías de las secciones delgadas mediante la cámara Nikon DS-Fi1 con el programa NIS-Elements BR de Nikon, para así darles una clasificación a las muestras bajo parámetros recomendados por la SCMR (Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks) del IUGS (International Union of Geological Sciences). Se utilizaron productos de esta subcomisión en la categorización de las rocas por los aspectos descifrados en este trabajo, guiándose ante los términos recomendados en cómo nombrar rocas metamórficas por Schmit et al [27]; los tipos, grado y facies del metamorfismo por Smulikowski et al [28] para poder interpretar las condiciones en que se han podido originar las rocas objeto de estudio; y las abreviaturas minerales propuestas por Whitney y Evans [29], también el Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica del profesor Carlos García [30].

Además, se cuenta con los mapas composicionales de Calcio, Magnesio, Manganeso y Hierro de un cristal de granate en una vena de apatito, cuarzo y zoisita de un neis hornbléndico-granatífero, y otros mapas de Silicio, Fosforo y Calcio de la vena alrededor del granate, obtenidos por el análisis de microsonda electrónica (EPMA) en la sección delgada CUR-3 del presente proyecto; esta técnica es de análisis elemental, la cual permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de sustancias sólidas a escala micrométrica. Su principio de funcionamiento consiste en la excitación de la superficie de la muestra (previamente pulida) mediante un haz de electrones, acelerados entre 15 y 35 keV y focalizados en un diámetro que oscila entre 1 y 2 μm . Los rayos X característicos generados en la muestra son detectados por espectrómetros dispersores de longitud de onda (WDS).

3.4 Análisis e interpretación de los resultados

Disponiendo de estos resultados se procedió a la cuarta y última fase de la investigación planteada, donde se plasmó la interpretación del contexto geológico local, asimilado por los eventos que se pueden diferenciar fundamentados por la caracterización mineralógica y petrográfica de las muestras, como el objetivo de estudio principal del proyecto, además del análisis de los mapas

composicionales de la distribución de Calcio, Magnesio, Manganeso y Hierro en un granate con zonación textural sectorial en una vena de apatito, cuarzo y zoisita de la cual se muestran los mapas composicionales de Calcio, Fosforo y Silice. La interpretación de estos mapas da indicios de cómo ha sido la evolución de este cristal de granate según la distribución química durante su blastesis,

4. Resultados

Con los análisis de las muestras de la unidad Neis de Bucaramanga se concluyeron las asociaciones minerales y sus características microscópicas para las dos zonas estudiadas, disponiendo de los resultados de la mineralogía y la petrografía respectivamente para los afloramientos en los sectores de Los Curos y La Corcova. Para este apartado se presentarán los datos obtenidos de las dos zonas trabajadas por aparte, luego se les dará una interpretación general donde se afianzarán las similitudes y se estipularán las diferencias según los criterios mineralógicos y microestructurales percibidos en la inspección de los cortes pulidos y las secciones delgadas.

4.1 Los Curos

Las muestras de la unidad Neis de Bucaramanga objeto de estudio de este sector corresponden a rocas metamórficas de protolito sedimentario, con una composición pelítica predominante, que en ocasiones puede variar a máfica, según lo expuesto en las asociaciones minerales que se encuentran en la paragénesis de los ejemplares; están ubicadas dentro de la facies metamórfica anfibolita de alta temperatura, alcanzando la zona de la sillimanita para los diversos tipos composicionales. Esta unidad ha sido influenciada en la localidad por la unidad del Ortoneis y el Plutón del Monzogranito de La Corcova, donde se han apreciado como se intercalan entre los planos de foliación del Neis masas lenticulares de monzogranito, y al mismo tiempo muestran la gran deformación que han impartido sobre el basamento cristalino, el cual exhibe un plegamiento muy pronunciado, además, de contener venas de cuarzo, epidota y apatito (en el caso del neis hornbléndico-granatífero), y mineralizaciones de sulfuros como producto de un fluido hidrotermal.

El afloramiento estudiado (Fig. 4) entre los puntos de referencia 115+142 al 115+153 de la vía Los Curos – Guaca, consiste en una secuencia formada por neises biotítico-sillimaníticos con delgadas capas de ortonéis que cortan por los planos de foliación y tienen un

buzamiento de 32°NE, este neis aún preservaba su estructura bandeada con intercalaciones centimétricas cuarzo-feldespáticas de apariencia ígnea y biotítico-sillimaníticas más finas (PR 115+142 en Fig. 4); seguido del emplazamiento de un cuerpo lenticular de 6 metros que denota un cambio de litología por una roca de composición granítica que está muy fracturada generando una pseudoestratificación, que a su vez, tenía en su parte inferior un cuerpo rocoso de composición metamáfica que corresponde a un neis hornbléndico-granatífero con meteorización esferoidal, el cual presenta porfidoblastos de granates anhedrales bandeados con hornblenda y cuarzo recrystalizado, además de venas de apatito con cuarzo de hasta 1 centímetro donde el granate es euhedral, y hay mineralización de piritita asociada a la hornblenda y el granate. Este cuerpo metamáfico a su costado izquierdo está en contacto con un neis biotítico-sillimanítico de intercalaciones milimétricas con cuarzo fracturado y plagioclasa parcialmente alterada a sericita.



Figura 4. Fotografía editada del afloramiento vía Los Curos – Guaca, donde se muestra mediante los números de donde fueron extraídas las muestras de neis biotítico-sillimanítico (1 y 8) de la unidad Neis de Bucaramanga, las pegmatitas del lente cuarzo feldespático (6 y 7) y los neises hornbléndico granatíferos del cuerpo metamáfico (2 a 5).

4.1.1 Mineralogía

A continuación, se dispondrá de las composiciones mineralógicas de cada muestra examinada (Fig. 5) y una breve descripción de aspectos analizados en los cortes pulidos y las secciones delgadas, de las cuales se ha tomado el fundamento para la respectiva clasificación que se les ha otorgado en el presente proyecto (ver Tab. 9).

CUR-1: Roca metamórfica foliada, que comprende un bandeamiento néisico entre partes biotítico-sillimaníticas y cuarzo feldespáticas con una textura lepidogranoblástica en general, y una textura inequigranular seriada en la parte cuarzo feldespática la cual muestra una considerable deformación en sus cristales y una apariencia ígnea, donde dominan cristales finos de cuarzo, plagioclasa alterándose a sericita/epidota, feldespato potásico, granate

y poca biotita. Hacia los bordes esta la parte biotítico-sillimanítica, con una textura lepidoblástica; se asume que la parte cuarzo feldespática se ha emplazado concordantemente con los planos de foliación del neis biotítico-sillimanítico.

Tabla 1. Composición mineralógica de la muestra CUR-1.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Pl	24%	Ser	Ep	7%	4%
Kfs	16%	Ser		5%	
Qtz	15%				
Bt	8%	Chl		4%	
Grt	5%	Chl		1%	
Ms	5%				
Sil	3%				
Py	2%				
Ap	1%				

CUR-2: Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una textura granonematoblástica donde hay una intercalación de cristales medianos y finos de granate subhedral con poiquiloblastos de cuarzo y clorita, hornblenda en algunos casos cloritizada y cuarzo con muchas inclusiones de cristales muy finos de apatito, estos minerales se encuentran con fracturamiento irregular en general. Se observan pseudomorfos de granate reemplazados por epidota, además de una vena de apatito, con cuarzo y zoisita que esta paralela a la foliación de la roca que contiene cristales euhedrales finos de granate con una zonación textural sectorial por inclusiones en los bordes de las caras del cristal.

Tabla 2. Composición mineralógica de la muestra CUR-2.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Grt	32%	Ep	Chl	5%	4%
Hbl	25%	Chl		5%	
Qtz	16%				
Ap	7%				
Py	5.8%				
Ttn	0.1%				
Rt	0.1%				

CUR-3: Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una textura nematogranoblástica donde hay una intercalación de cristales medianos y finos de granate con poiquiloblastos de cuarzo y clorita en su interior, cuarzo con muchas inclusiones de cristales muy finos de apatito, y hornblenda en algunos casos cloritizada. Tiene una vena de apatito con cuarzo donde hay porfidoblastos de granate euhedral con zonación textural sectorial, en algunos casos reemplazados por epidota. Hay mineralización de sulfuros de hierro, y los cristales muestran una gran deformación

denotada por el fracturamiento de la roca en general.

Tabla 3. Composición mineralógica de la muestra CUR-3.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Grt	36%	Ep Chl	2% 6%
Hbl	20%	Chl	7%
Qtz	17%		
Ap	9%		
Py	3%		

CUR-4: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con textura nematogranoblástica, tiene una intercalación de cristales gruesos y medianos de granate con poiquiloblastos de cuarzo, con cristales medianos y finos de hornblenda cloritizada junto al cuarzo. La muestra tiene fracturas irregulares llenas de oxidación, además de mineralización de piritita de diversos tamaños. En la parte superior domina la clorita por alteración de la hornblenda y algunos granates, y en la parte inferior los cristales medianos de granate están mejor formados.

Tabla 4. Composición mineralógica de la muestra CUR-4.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Grt	50%	Chl	5%
Hbl	18%	Chl	7%
Qtz	17%		
Py	3%		

CUR-5: Roca metamórfica foliada, de estructura néisica y textura nematogranoblástica, compuesta por intercalaciones de niveles hornbléndicos en cristales finos y medianos alterándose parcialmente a clorita, con niveles granatíferos en cristales medianos y finos que muestran gran fracturación y texturas de intercrecimiento con el cuarzo, además de tener bandas en su estructura dispuestas en dirección paralela a la foliación de la roca, donde la tonalidad rojiza es más intensa. La muestra en el borde superior tiene una vena de cristales muy finos de apatito color blanco en la cual se dan cristales euhedrales de granate con una zonación textural sectorial por las inclusiones que tiene en los bordes de las caras del cristal.

Tabla 5. Composición mineralógica de la muestra CUR-5.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Grt	43%	Chl	6%
Qtz	19%		
Hbl	14%	Chl	2%
Ap	12%		
Py	1.8%		
Rt	0.2%		

CUR-6: Roca ígnea holocristalina de composición félsica con textura pegmatítica de cristales gruesos de cuarzo,

feldespato potásico y plagioclasea con pocos cristales medianos de biotita parcialmente alterada a clorita. Hay intercrecimientos entre el cuarzo con los feldespatos y la plagioclasea, y algunos feldespatos tienen tonalidades verdosas aludidas a una sericitación, la roca en general muestra una deformación generando fracturas regulares en los cristales cuarzo feldespáticos.

Tabla 6. Composición mineralógica de la muestra CUR-6.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	32%		
Kfs	25%	Ser	7%
Pl	23%	Ser	5%
Bt	6%	Chl	2%

CUR-7: Roca ígnea holocristalina de composición félsica, con una textura pegmatítica de cristales gruesos y muy gruesos de cuarzo y feldespato potásico con pocos cristales medianos de biotita totalmente alterada a clorita, y cristales medianos y finos de granate con fracturamiento regular. Hay intercrecimientos entre el cuarzo y la plagioclasea o el feldespato potásico, los cuales tienen una apariencia sucia aludida a la sericitación, la roca en general muestra una deformación generando fracturas regulares en los cristales cuarzo feldespáticos y el granate.

Tabla 7. Composición mineralógica de la muestra CUR-7.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	33%		
Kfs	22%	Ser	5%
Pl	16%	Ep	3%
Grt	10%		
Bt	4%	Chl	4%
Py	2.8%		
Ap	0.1%		
Zrn	0.1%		

CUR-8: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con textura granolepidoblástica, compuesta por intercalaciones de cristales finos de cuarzo y plagioclasea con cristales medianos fibrosos de sillimanita y biotita parcial y totalmente alterada a clorita. Algunos cristales de sillimanita tienen granates finos asociados, la roca presenta muchas fracturas irregulares y a su vez una gran oxidación.

Tabla 8. Composición mineralógica de la muestra CUR-8.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Sil	30%		
Qtz	24%		
Pl	20%	Ser	4%
Bt	12%	Chl	7%
Grt	3%		

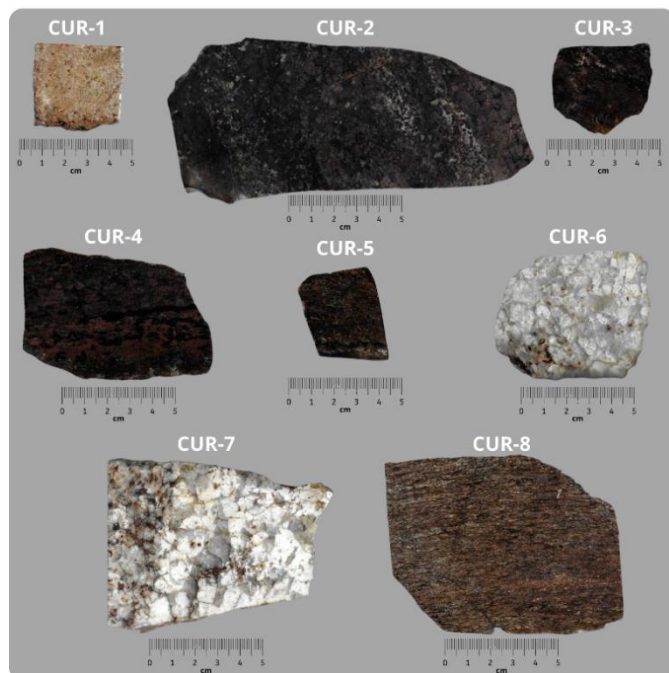


Figura 5. Cortes pulidos de las ocho muestras analizadas del Neis de Bucaramanga en la vía Los Curos – Guaca.

Esta sección consiste inicialmente en una secuencia formada principalmente por neises biotítico sillimaníticos, que exhiben un bandeamiento composicional con bandas milimétricas cuarzo-feldespáticas, pero algunos planos de foliación del neis

han sido cortados por el Ortoneis de composición granítica de cristales medianos y finos como en la muestra CUR-1, asumiendo que en su interacción con la roca huésped se ha generado la blastesis de minerales metamórficos como el granate (ver Fig. 6a), y conservando aún su estructura néisica. Asemejándose a un proceso de migmatización que se ha descartado por las interpretaciones de campo; de igual manera se haya un grande cuerpo lenticulares principalmente de composición monzogranítica, que está compuesto por cristales grandes y muy grandes de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y poca biotita como en las muestras CUR-6, y CUR-7 la cual contiene cristales medianos y finos de granate.

En la parte inferior del cuerpo lenticular emplazado que se ha analizado se encontró un cuerpo rocoso metamáfico de neis hornbléndico-granatífero, compuesto por intercalaciones de cristales medianos de hornblenda y granate anhedral con cuarzo. Este cuerpo ha sido intruído por venas de cuarzo, y a su vez se encontró una vena de cristales muy finos de apatito, cuarzo y zoisita con granates euhedrales que presentan una zonación textural sectorial por las inclusiones que se disponen en los bordes de las caras de sus cristales. Fue detallado entre las muestras CUR-2 a la CUR-5, son comunes las alteraciones a clorita de los minerales ferro magnesianos, y de epidota para algunos granates y plagioclasas.

Tabla 9. Mineralogía de las 8 muestras recolectadas vía Guaca – Los Curos.

ROCA	SECCIÓN DELGADA	CLASIFICACIÓN	MINERALOGÍA			
			Paragénesis / Relación de cristalización	Accesorios	Alteración	Introducción
CUR – 1	CUR – 1	Neis granítico / Neis biotítico - sillimanítico.	Pl + Kfs + Qtz + Grt + Ms / Bt + Sil + Qtz + Pl	Ap + Rt	Ser + Chl + Ep	
CUR – 2	CUR – 2A	Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2	Rt	Ep + Chl1 + Chl2 + Zoi	Qtz
	CUR – 2B	Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2	Rt	Ep + Chl1 + Chl2 + Zoi	Qtz
	CUR – 2C	Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2	Rt + Ttn	Ep + Chl1 + Chl2	Qtz
CUR – 3	CUR – 3	Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2	Rt	Ep + Chl1 + Chl2 + Zoi	Qtz
CUR – 4		Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2	Rt	Ep + Chl1 + Chl2	Qtz
CUR – 5	CUR – 5	Neis hornbléndico – granatífero.	Hbl + Grt1 + Qtz + Py / Ap + Grt2		Ep + Chl1 + Chl2	Qtz
CUR – 6		Monzogranito.	Qtz + Pl + Kfs + Bt		Ser + Chl	
CUR – 7	CUR – 7	Monzogranito con granate.	Qtz + Pl + Kfs + Grt + Bt	Zrn + Ap	Ser + Chl	
CUR – 8	CUR – 8	Neis biotítico – sillimanítico.	Qtz + Bt + Sil + Kfs + Ms + Pl	Zrn + Ap + Rt	Chl + Ser + Ep	

Nota: Pl - Plagioclasa; Kfs – Feldespato potásico; Qtz – Cuarzo; Grt – Granate; Ms – Moscovita; Bt – Biotita; Sil – Sillimanita; Ap – Apatito; Rt – Rutilo; Ser – Sericita; Chl – Clorita; Ep – Epidota; Py – Piritita; Zoi – Zoisita; Hbl – Hornblenda; Zrn - Zircón. Abreviaciones minerales según Whitney y Evans [29]. Paragénesis para rocas metamórficas y relación de cristalización para rocas ígneas. Minerales de introducción son los que intruyen las rocas en venas.

Al costado izquierdo de esta roca metamáfica de meteorización esferoidal se vuelve a encontrar el neis biotítico-sillimanítico con un bandeamiento composicional milimétrico con minerales cuarzo-feldespáticos de cristales medianos, su diferenciación composicional se ha interpretado como la migmatización de este (muestra CUR-8), el cual además denota una gran oxidación y un fracturamiento en general.

4.1.2 Petrografía

Según la clasificación que se les ha dado a las rocas en la Tabla 9, se ha realizado la descripción petrográfica de los tipos de roca que se han encontrado, plasmando los aspectos microscópicos que se han detallado en las respectivas secciones delgadas.

Neis granítico:

Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una lineación definida por las bandas micáceas, tiene una textura lepidogranoblástica en general y una textura inequigranular seriada en la parte cuarzo feldespática de protolito ígneo que muestra una deformación en sus cristales exhibiendo fracturas regulares; donde dominan cristales finos de cuarzo, plagioclasa con macla tipo albita (alterándose parcial o totalmente a sericita y epidota), feldespato potásico, granate con coronas de sericita y poca biotita alterándose parcialmente a clorita que muestran rutilos con macla de sagenita en su interior; son comunes las texturas mirmequíticas entre cuarzo con plagioclasa (ver Fig. 6a), en contacto con los feldespatos potásicos que en algunos ejemplares exhiben una textura pertítica en forma de estrías con la plagioclasa. Hacia los bordes de la sección delgada hay un contacto concordante con la foliación de un neis biotítico- sillimanítico (ver Fig. 6b) de cristales medianos, donde los feldespatos están muy deformados por lo que se asume que la capa de composición granítica ha sido emplazada dentro de los planos de foliación del neis pelítico.

Neis biotítico-sillimanítico:

Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una lineación mineral definida por minerales micáceos, su textura es lepidogranoblástica, compuesta por intercalaciones de cristales medianos y finos de cuarzo y plagioclasa, con cristales de sillimanita de variedad fibrolita y biotita parcial y totalmente alterada a clorita. Son comunes las texturas de intercrecimiento entre cuarzo y biotita, y se encuentran algunos cristales aciculares finos de rutilo con macla de la sagenita en biotitas cloritizadas, producto de un fenómeno llamado diasterismo, el cual ha

sido definido por Díaz y Benadives [31] como el efecto de estrella que presentan algunas rocas cuando la luz se transmite a través de ellas (esta propiedad es característica de la mica, la flogopita y el cuarzo); la roca presenta un patrón de fracturamiento irregular mostrando una deformación de sus cristales en general y a su vez una gran oxidación a través de los planos de foliación y fracturas de la roca.

Neis hornbléndico-granatífero:

Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una textura nematogranoblástica donde hay una intercalación de cristales medianos y finos de granate anhedral (Grt1 en Tab. 9) comúnmente con poiquiloblastos de cuarzo en su interior y alterándose a clorita (Chl1 en Tab.9); cristales medianos de cuarzo que aparecen en algunos sectores con una textura poiquiloblástica con la fase máfica y también presenta inclusiones de cristales muy finos de apatito, y hornblenda en cristales tabulares medianos (ver Fig. 6c) en algunos casos cloritizada (Chl2 en Tab. 9) o como pseudomorfos del Grt2 (ver Fig. 6e). En un sector de esta roca hay una vena paralela a la foliación, de cristales de apatito, cuarzo y zoisita muy finos donde hay cristales de granate euhedral (Grt2 en Tab. 9, ver Fig. 6c y 6d) que exhiben una zonación textural sectorial según la distribución de las inclusiones de cuarzo, apatito y óxidos en los bordes de las caras del cristal, en ocasiones este granate se altera parcial o totalmente a epidota y clorita (ver Fig. 6e). Hay presencia de óxidos, y los cristales muestran una gran deformación inferida por el fracturamiento de la roca en general.

Monzogranito:

Roca ígnea holocristalina de composición félsica, con una textura pegmatítica de cristales gruesos de cuarzo y feldespato potásico con pocos cristales medianos de biotita totalmente alterada a clorita, y cristales medianos y finos de granate con fracturamiento regular (en la muestra CUR-7, ver Fig. 6f), que en algunos ejemplares tiene textura poiquiloblástica con cuarzo. Hay intercrecimientos entre el cuarzo y la plagioclasa, y los feldespatos suelen tener una apariencia sucia aludida a la sericitación; la roca en general muestra una deformación generando fracturas regulares en los cristales cuarzo feldespáticos y el granate. Hay exsolución de feldespato potásico en algunos cristales de plagioclasa creando texturas pertíticas en forma de estrías. Las muestras CUR-6 y CUR-7 han sido clasificadas monzogranito según la composición modal normalizada representada en el diagrama de Streckeisen [32].

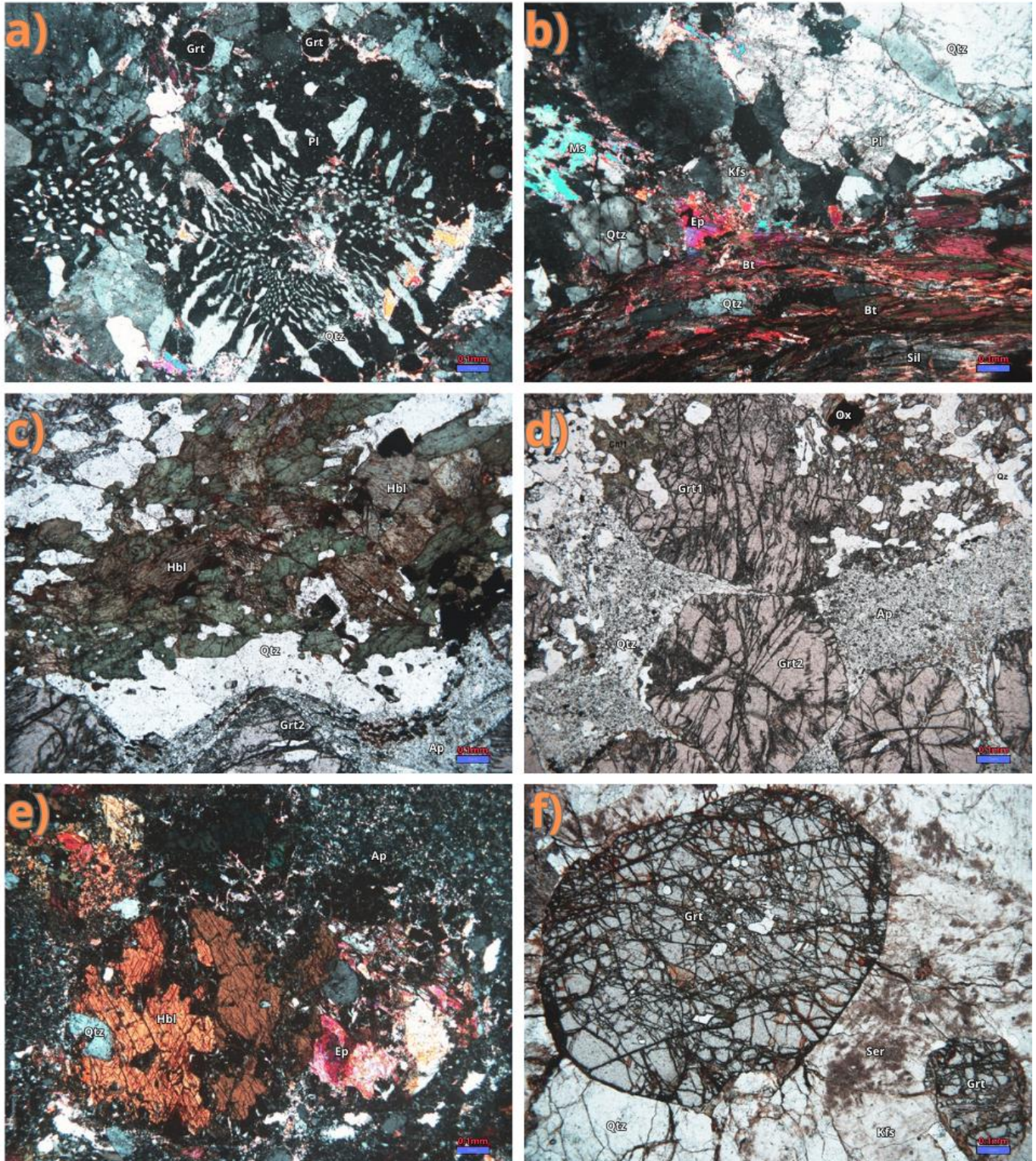


Figura 6. Microfotografías captadas con el lente 4x de: a) Textura mirmekítica entre cuarzo y plagioclasa, además de granates con coronas de sericita. XPL (CUR-1). b) Contacto entre el Ortoneis y el neis biotítico-sillimanítico. XPL (CUR-1). c) Neis hornbléndico granatífero con vena de apatito y cuarzo con granates. PPL (CUR-4). d) Diferencia entre el granate masivo que está en asociación con la hornblenda, el cuarzo y los óxidos (Grt1) y el granate de zonación textural sectorial en la vena de apatito (Grt2). PPL (CUR-2C). e) Pseudomorfos de granate en la vena de apatito reemplazado por hornblenda y epidota. XPL (CUR-2A). f) Porfidoblasto de granate fracturado en monzogranito. PPL (CUR-7). Escala 0.1mm.

4.1.3 Zonación química del granate

Para esta investigación se cuenta con mapas composicionales de calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg) y manganeso (Mn) de un cristal de granate con zonación textural sectorial (Grt2 en Tab. 9) generada por la disposición de las inclusiones de apatito, cuarzo y óxidos en los bordes de las caras del cristal. Este granate está en una vena de apatito, cuarzo y zoisita de un neis horbléndico granatífero de la muestra CUR-3 (Fig. 7a). Se han obtenido apartir de la microsonda electrónica en la sección delgada CUR-3, para así tener un análisis cuantitativo y cualitativo de la distribución de estos elementos, generando indicios de cómo fue la blastesis del granate, partiendo de que es un mineral indicador de las condiciones de metamorfismo de la roca, además, de cómo es su equilibrio químico interno.

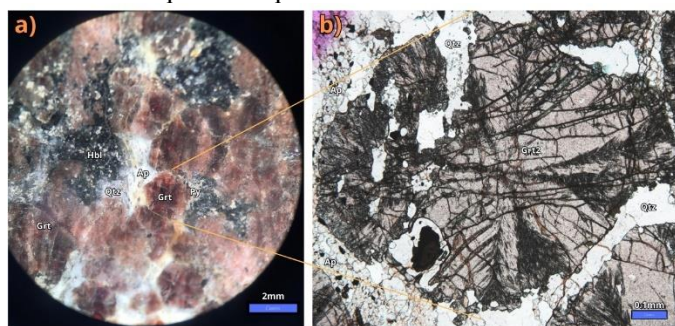


Figura 7. a) Fotografía estereoscópica con aumento 30x de la vena de apatito con granates en el neis hornbléndico granatífero. b) Microfotografía con el lente 4x de un porfidoblasto de granate con zonación textural sectorial por inclusiones de cuarzo, apatito y óxidos que se concentran a lo largo de los límites de los sectores de crecimiento de las caras del cristal. PPL (CUR-3).

El granate de forma dodecaédrica (Fig. 7a y 7b) presenta una concentración alta de Mn en el centro del cristal que se va reduciendo considerablemente en el crecimiento de este porfidoblasto mostrando un patrón de zonación progrado; el Mg está presente en la nucleación del granate pero su concentración aumenta hacia los bordes principalmente donde se encuentran las inclusiones, algo similar que con el Ca que denota su presencia en todo el cristal pero con una mayor concentración en la composición de las fases de inclusiones del cristal, asociándose a apatitos que de igual modo están en la matriz de apatito, cuarzo y zoisita rodeando el cristal (ver cristales blancos en mapa de Ca de la Figura 8), al contrario que el contenido de Fe que se mantuvo constante en todo el cristal pero su concentración decrece en las partes donde se hallan las inclusiones que están concentradas a lo largo de los límites de los sectores de crecimiento del granate, paralelo a los planos cristalográficos.

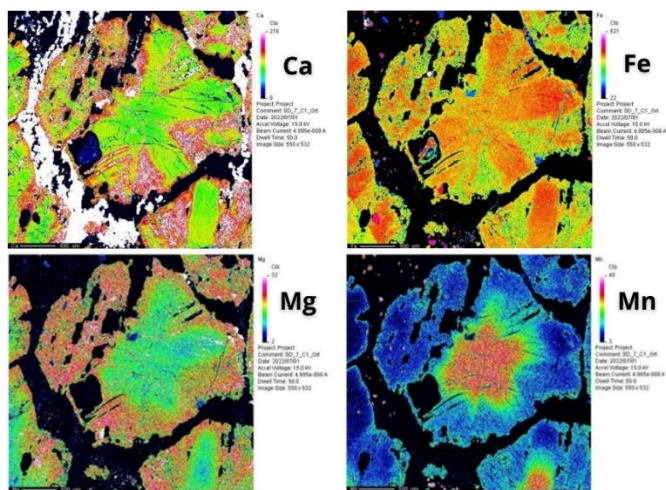


Figura 8. Mapas composicionales de Ca, Fe, Mg y Mn mostrando la distribución química del granate de la Figura 7b, donde los colores de tonalidad cálida y el blanco representan altas concentraciones del elemento y los colores fríos una baja concentración.

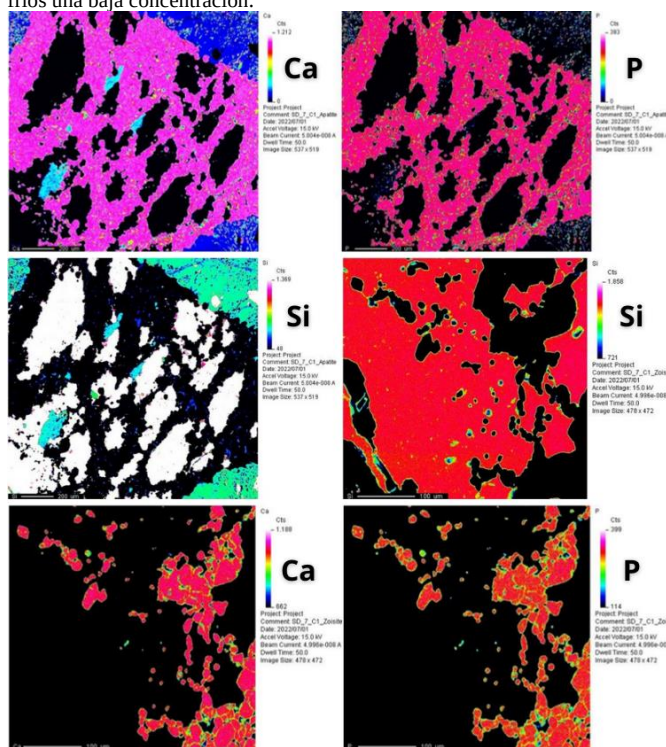


Figura 9. Mapas composicionales de Ca, P y Si mostrando la distribución química de la vena de apatito, zoisita y cuarzo donde se encontró el granate con zonación textural sectorial. Los colores de tonalidad cálida y el blanco representan altas concentraciones del elemento y los colores fríos una baja concentración.

A su vez se cuenta con los mapas de calcio (Ca), fósforo (P) y sílice (Si) de las fases mineral de la vena donde se encontraron los granates de zonación textural sectorial, y se pudo confirmar que la matriz donde se encuentra el granate está compuesta por apatito y cuarzo, además que entre los cristales de apatito hay presencia de una fase mineral de zoisita (criptocristales verdes en últimos mapas composicionales de Ca y P en Figura 9)

característica de alteración de minerales ricos en Ca, en este caso se ve comprometido el protolito metamáfico de hornblenda, granate, clorita y cuarzo que fue afectado por un fluido hidrotermal generando diversas intrusiones de cuarzo, y en particular, esta vena de apatito, cuarzo y zoisita que hizo que hubiera una recrystalización del granate del protolito metamáfico, y mientras alcanzó su homogenización se vio sometido a cambios de equilibrio químico especialmente en el Ca, Fe y Mg hacia los bordes del cristal. Interpretando que sus concentraciones probablemente reflejan el alcance local de la reacción en las inmediaciones del porfiroblasto de granate mientras se desarrollaba en esta matriz de la asociación mineral de apatito, cuarzo y zoisita que intruyó en el neis hornbléndico-granatífero, además de contemplar el origen de la zonación textural sectorial por las inclusiones de apatito, cuarzo y óxidos que se disponen en los bordes de las caras del cristal durante el evento hidrotermal.

4.2 La Corcova

Entre los km 30+347 al 30+304 sobre la vía Bucaramanga – Pamplona se recolectaron 12 muestras de rocas metamórficas aproximadamente a 6 kilómetros del sector de La Corcova, donde las muestras fueron tomadas de manera descendente sobre la vía en el litodema Neis de Bucaramanga. Iniciando el área de estudio se halló un cuerpo rocoso de 2,90 metros de ancho por 1,70 metros de alto con una tonalidad rojiza por una pátina de oxidación superficial (Fig. 10), donde se tomaron 4 muestras de neises biotítico-sillimaníticos (CVA-1 a CVA-4) color grisáceo con negro los cuales en algunos sectores exhiben en una transición composicional una textura diferente donde la composición de la roca pasa a ser félsica y su apariencia es ígnea, de lo cual se infiere que es el resultado de un proceso de migmatización del



Figura 10. Afloramiento del Neis de Bucaramanga sobre la vía Bucaramanga-Pamplona, donde se ven expuestos neises biotítico-sillimaníticos (CVA-1 a CVA-4)

neis por la asociación mineral de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y reducida biotita que se encuentra en equilibrio en las rocas y la diferenciación composicional en bandas que presenta.

Luego en contacto difuso debido la vegetación en el área, se encuentra a 20 metros hacia el noroeste un segmento de 3 metros de ancho donde se recolectaron 5 muestras (Fig. 11a). Dos neises cuarzo feldespáticos color blanco verdoso a amarillento que denotan una gran alteración en los feldespatos (CVA-5 y CVA-6), dos neises cuarzo granatíferos color rojo claro con mineralizaciones de pirita (CVA-8 y CVA-9) y venas de epidota intersecando por los planos de fracturamiento de la roca, y la muestra CVA-7 que presenta un contacto entre estos dos tipos de neis, ambos tipos con tonalidad pardo rojizo en superficie por patinas de oxidación y con intrusiones de venas de cuarzo y epidota, estos neises se encontraban de manera irregular como masas en una matriz de roca de composición félsica (Fig. 11b) de cristales medianos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico con alto grado de alteración por lo que no se pudo muestrear (Fig. 11c).

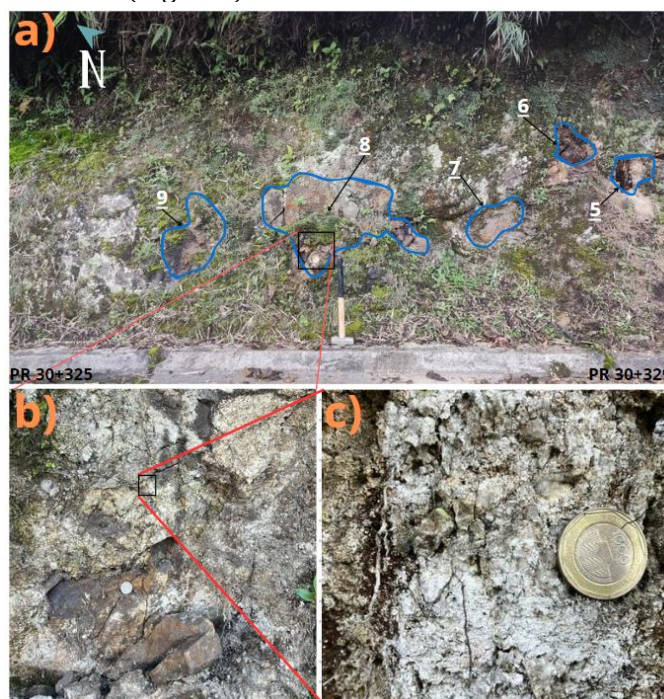


Figura 11. a) Afloramiento sobre la vía Bucaramanga-Pamplona, donde se ven expuestos neises cuarzo feldespáticos y neises cuarzo granatíferos alterados por un fluido hidrotermal (CVA-5 a CVA-9). b) Neises embebidos irregularmente en una matriz de composición félsica muy alterada. c) Matriz cuarzo feldespática de cristales medianos y finos muy alterados.

Ya en el último segmento del área estudiada (Fig. 12) se encontraron 4 metros de masas de neises dispuestos irregularmente en una matriz rocosa de composición

félsica de cristales medianos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico con un alto grado de alteración. Allí se recolectaron 3 tipos de neises, uno cuarzo granatífero con migmatización (CVA-10), y dos cuarzo-feldespáticos, pero con diferencias mineralógicas y en su grado de alteración, conteniendo uno gran cantidad de ortoclasa (CVA-11) y el otro siendo alterado por un fluido hidrotermal exhibiendo características semejantes a las muestras CVA-5 y CVA-6; de igual manera se encuentran varias intrusiones de venas de cuarzo y epidota cortando por las fracturas en las muestras de la zona.



Figura 12. Afloramiento del Neis de Bucaramanga sobre la vía Bucaramanga-Pamplona, donde se ven expuestos neises cuarzo feldespáticos y neises cuarzo granatíferos muy oxidados (CVA-10 a CVA-12), dispuestos como masas en una matriz rocosa de composición félsica.

4.2.1 Mineralogía

A continuación, se dispondrá de las composiciones mineralógicas de cada muestra examinada (Fig. 13, Fig. 14 y Fig. 15) y una breve descripción de aspectos analizados en los cortes pulidos y las secciones delgadas, de las cuales se ha tomado el fundamento para la respectiva clasificación que se les ha otorgado en el presente proyecto (ver Tab. 22).

CVA-1: Roca metamórfica foliada, de estructura néisica con una textura lepidogranoblástica, donde la foliación va definida por la dirección de los cristales medianos y finos de biotita y sillimanita que están intercalados con minerales cuarzo feldespáticos en un bandeamiento milimétrico generando una migmatización de baja escala. En sus bordes hay una aureola de oxidación que pronuncia una transición de su composición, donde los cristales cuarzo feldespáticos aumentan su tamaño y las micas disminuyen considerablemente. Algunos feldespatos se alteran a sericita y a epidota.

Tabla 10. Composición mineralógica de la muestra CVA-1.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	29%				
Pl	18%	Ser	Ep	6%	5%
Bt	14%	Chl		10%	
Kfs	8%	Ser		4%	
Sil	6%				

CVA-2: Roca metamórfica foliada de estructura néisica, con textura granolepidoblástica dominante en roca fresca, donde hay una intercalación de cristales medianos y finos de biotita, sillimanita y agregados micáceos de sericita con niveles cuarzo feldespáticos, donde las plagioclasas se han alterado por sericitación. Tiene una aureola de oxidación hacia los bordes donde los minerales ferromagnesianos se reducen considerablemente y la roca tiene una transición a una textura lepidogranoblástica, los minerales cuarzo – feldespáticos se presentan en cristales más desarrollados mostrando una apariencia más ígnea. La foliación de la roca se da en un bandeamiento entre micas y minerales cuarzoes feldespáticos, con una migmatización de escala milimétrica que asciende en tamaño cerca de la zona oxidada.

Tabla 11. Composición mineralógica de la muestra CVA-2.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	20%				
Bt	17%	Chl		6%	
Sil	15%				
Pl	11%	Ser	Ep	6%	5%
Kfs	9%	Ser		4%	
Ms	3%				
Grt	2%				
Py	1.6%				
Rt	0.2%				
Ap	0.1%				
Zrn	0.1%				

CVA-3: Roca metamórfica foliada de estructura néisica, con textura granolepidoblástica, presenta bandeamiento entre cristales medianos y finos biotítico-sillimaníticos con agregados micáceos de sericita y cristales medianos cuarzo feldespáticos. En una parte de la roca hay una asociación mineral diferente de composición granítica, donde predominan fenocristales cuarzo – feldespáticos y poca biotita, la cual se alude a un proceso de migmatización de la roca.

Tabla 12. Composición mineralógica de la muestra CVA-3.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	25%				
Bt	24%	Chl		8%	
Pl	16%	Ser	Ep	5%	4%

Kfs	7%	Ser	4%
Sil	6%		
Grt	1%		

CVA-4: Roca metamórfica foliada de estructura néisica, con textura granolepidoblástica, presenta un bandeamiento milimétrico entre cristales medianos y finos biotítico-sillimaníticos con agregados micáceos de sericita y cristales medianos cuarzo feldespáticos. En una parte de la roca hay una asociación mineral diferente de composición granítica, donde predominan fenocristales cuarzo – feldespáticos y poca biotita, la cual se alude a un proceso de migmatización de la roca.

Tabla 13. Composición mineralógica de la muestra CVA-4.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	23%		
Bt	21%	Chl	10%
Pl	15%	Ser Ep	5% 4%
Kfs	10%	Ser	3%
Sil	7%		
Grt	2%		

CVA-5: Roca metamórfica foliada, de estructura néisica la cual exhibe una textura lepidogranoblástica. Su composición es cuarzo feldespática y denota que el protolito metamórfico ha sido alterado por un fluido hidrotermal donde principalmente los feldespatos han sido reemplazados por minerales del grupo de la epidota y la biotita por clorita, se han formado gran cantidad de cristales medianos y finos de titanita y el cuarzo muestra una recrystalización. Además de tener relictos de cristales de sillimanita.

Tabla 14. Composición mineralógica de la muestra CVA-5.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	20%		
Pl	10%	Ep Clz Zoi	16% 14% 10%
Bt	-	Chl	15%
Ttn	9%		
Sil	3.7%		
Py	2%		
Zrn	0.2%		
Ap	0.1%		

CVA-6: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con una textura lepidogranoblástica. Su composición es cuarzo feldespática y exhibe que el protolito metamórfico ha sido alterado por un fluido hidrotermal donde principalmente los feldespatos han sido reemplazados por minerales del grupo de la epidota y la biotita por clorita, se han formado cristales medianos y finos de titanita y el

cuarzo muestra una recrystalización. Además de que hay una vena de cuarzo en dirección paralela a la foliación de la roca que tiene una textura granoblástica poligonal.

Tabla 15. Composición mineralógica de la muestra CVA-6.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	19%		
Pl	8%	Ep Clz Zoi	18% 12% 10%
Bt	-	Chl	15%
Ttn	8%		
Sil	4%		
Py	3.8%		
Zrn	0.2%		

CVA-7: Roca metamórfica foliada de estructura néisica, donde se denota el contacto entre dos asociaciones mineralógicas con diferentes texturas. En la parte superior la textura es lepidogranoblástica, compuesta por cristales medianos y finos de cuarzo, granates parcial o totalmente alterados a clorita y epidota, y pirita. Hay una vena de epidota que demarca la diferencia de asociación pasando a ser en la parte inferior de textura granolepidoblástica compuesta por la intercalación de cristales de cuarzo, plagioclasa alterándose parcial o totalmente a epidota y clinozoisita, y clorita por alteración de la biotita.

Tabla 16. Composición mineralógica de la muestra CVA-7.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	45%		
Grt	11%	Chl	4%
Pl	8%	Ep Clz	12% 8%
Bt	-	Chl	5%
Py	6.8%		
Rt	0.2%		

CVA-8: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con dos texturas presentes, donde en los bordes inferior y superior es porfidoblástica con la presencia de porfidoblastos de granate en una matriz cuarzo feldespática de cristales finos con poca biotita, siguiendo la dirección de la foliación de la parte media que tiene una textura granolepidoblástica con intercalaciones de niveles cuarzo feldespáticos con granate, clorita por alteración de biotita y pirita. Además de tener fracturas llenas de epidota que también se da por alteración de plagioclasas, y una pátina de oxidación en los bordes.

Tabla 17. Composición mineralógica de la muestra CVA-8.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración	Porcentaje (%)
Qtz	38%		
Grt	18%	Chl Ep	3% 2%
Pl	14%	Ep	5%
Bt	-	Chl	14%
Py	6%		

CVA-9: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con una textura lepidogranoblástica, presenta una intercalación de cuarzo con granate que se altera parcialmente a clorita junto a piritita en cristales finos y medianos. Hay algunos pseudomorfos de granate por clorita, y la muestra presenta fracturas regulares y en una de estas tiene una vena de cuarzo lechoso.

Tabla 18. Composición mineralógica de la muestra CVA-9.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	58%				
Grt	15%	Chl	Ep	17%	3%
Py	6.6%				
Ap	0.2%				
Rt	0.1%				
Zrn	0.1%				

CVA-10: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con dos texturas presentes, en la parte central la textura es granoblástica inequigranular donde los cristales tienen una apariencia ígnea compuesta por cristales gruesos y medianos de cuarzo, plagioclasa alterándose a sericita/epidota, feldespato potásico, biotita cloritizada y granate, se asocia a un proceso de migmatización, ya que tiene una transición hacia los bordes de la roca que tienen una textura lepidogranoblástica donde hay una intercalación de cristales medianos y finos de cuarzo y feldespato potásico con granate, clorita y plagioclasa que ha sido totalmente alterada a epidota, zoisita y sericita.

Tabla 19. Composición mineralógica de la muestra CVA-10.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	27%				
Grt	15%	Chl	Ep	3%	4%
Pl	11%	Ser	Ep	6%	4%
Kfs	9%	Ser		7%	
Bt	-	Chl		8%	
Py	1.8%				
Rt	0.1%				
Zrn	0.1%				

CVA-11: Roca metamórfica foliada de estructura néisica con una textura lepidogranoblástica compuesta por intercalaciones de cristales medianos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico alterándose a sericita, con biotita cloritizada y granate que en algunos cristales ha sido reemplazado por clorita.

Tabla 20. Composición mineralógica de la muestra CVA-11.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	30%				
Kfs	24%	Ser		6%	
Pl	13%	Ser		4%	
Bt	12%	Chl		6%	

Grt	2%	Chl	1%
Py	1.7%		
Ap	0.2%		
Rt	0.1%		

CVA-12: Roca metamórfica foliada de estructura néisica, con textura lepidogranoblástica, con un bandeamiento milimétrico entre cristales finos de cuarzo, plagioclasa alterada a epidota y clinozoisita, biotitas totalmente cloritizadas y titanita. Tiene una intrusión cuarzo – feldespática paralela a la foliación, que enmarca un cambio textural en la parte superior donde los cristales son de mayor tamaño con una apariencia ígnea de composición cuarzo – feldespática, donde los feldespatos se están alterando a agregados micáceos de sericita, además que crea micropliegues en la parte néisica. La roca presenta fracturas regulares rellenas de cuarzo y algunos óxidos, mostrando la deformación presente en la roca.

Tabla 21. Composición mineralógica de la muestra CVA-12.

Mineral	Porcentaje (%)	Alteración		Porcentaje (%)	
Qtz	30%				
Pl	10%	Ep	Clz	20%	12%
Bt	-	Chl		16%	
Ttn	8%				
Ox	4%				

El área de estudio inicia con neises biotítico-sillimaníticos (CVA-1 a CVA-4. Ver Fig. 10) con un bandeamiento de intercalaciones milimétricas de minerales de cuarzo y feldespatos alterándose a sericita, plagioclasas alterándose a epidota y las micas alterándose parcialmente a clorita; que presenta una transición composicional hacia una roca granítica de grano grueso a medio compuesta mineralógicamente por cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa alterándose a sericita y poca biotita cloritizada, la cual es más pronunciada en las muestras CVA-3 y CVA-4 (ver Fig. 13).

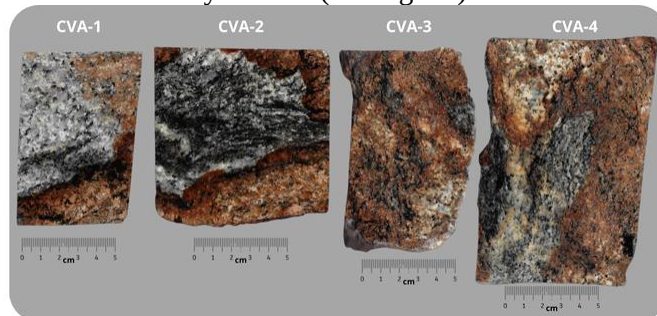


Figura 13. Cortes pulidos de neises biotítico sillimaníticos con una transición composicional hacia una roca granítica, aludida a la migmatización (muestras CVA-1 a CVA-4 del afloramiento de la Figura 10).

Seguido de esto se encuentra un segmento de neises cuarzo-feldespáticos con diferentes grados de alteración

hidrotermal donde se encuentran asociaciones de epidota, clinozoisita, clorita, granate, titanita y cuarzo, y también el contacto de este (CVA-7. Ver Fig. 14) con neises cuarzo granatíferos con clorita y venas de introducción de epidota y cuarzo. Ambos tipos de neises estaban dispuestos irregularmente en la roca de composición granítica que se encontraba muy alterada (ver Fig. 11b y Fig. 11c).

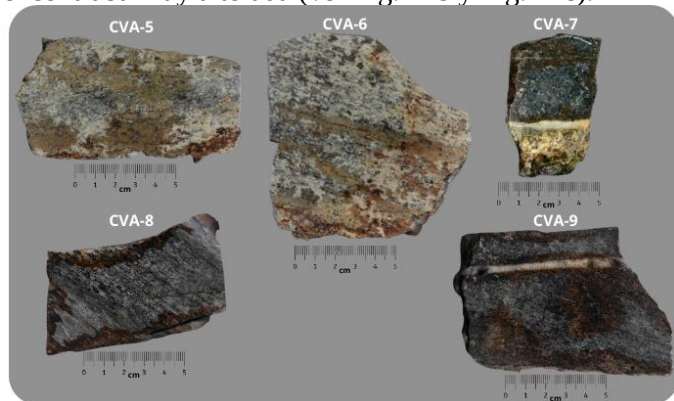


Figura 14. Cortes pulidos de neises cuarzo feldespáticos alterados por un fluido hidrotermal y neises cuarzo granatíferos con clorita oxidados (CVA-5 a CVA-9 del afloramiento de la Figura 11a).

Y en el último tramo estudiado se encontraron neises cuarzo granatíferos con biotita cloritizada, con intrusiones de un contenido granítico de cristales finos y medianos de

cuarzo, plagioclasa, poca biotita en ocasiones cloritizada y pequeños granates; aludido a un proceso migmatítico del neis (CVA-10. ver Fig. 15). Continuo a este hubo un cambio composicional donde el neis pasaba a ser cuarzo feldespático (con ortoclasa) bandeado con poca biotita cloritizada y algunos cristales de magnetita con una alta tasa de deformación en sus cristales en general en la muestra CVA-11; y terminando se encuentra otro neis cuarzo feldespático que ha sido alterado por un fluido hidrotermal denotándose en su asociación de epidota, clinozoisita, clorita y cuarzo (al igual que las muestras CVA-5 y CVA-6) con una vena de un contenido de cuarzo y plagioclasa.

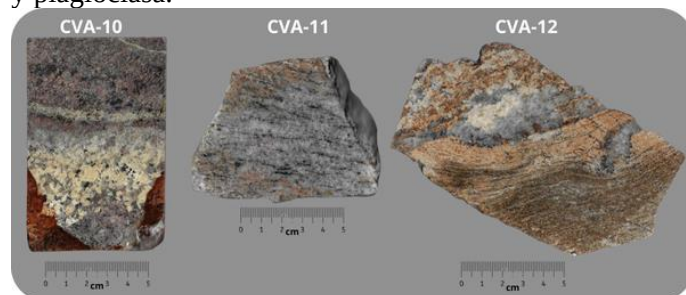


Figura 15. Cortes pulidos de un neis cuarzo granatífero con migmatización y dos neises cuarzo feldespáticos alterados por un fluido hidrotermal (CVA-10 a CVA-12 del afloramiento de la Figura 12).

Tabla 22. Mineralogía de las doce muestras analizadas vía Bucaramanga-Pamplona.

ROCA	SECCIÓN DELGADA	CLASIFICACIÓN	MINERALOGÍA			
			Paragénesis	Accesorios	Alteración	Introducción
CVA – 1		Neis migmatítico biotítico - sillimanítico	Qtz + Pl + Kfs + Bt + Sil		Ser + Ep + Chl	
CVA – 2	CVA – 2A	Neis migmatítico biotítico - sillimanítico	Qtz + Bt + Pl + Sil + Kfs + Grt	Ap + Zr + Ox + Rt	Ser + Ms + Ep + Chl	
	CVA – 2B					
CVA – 3		Neis migmatítico biotítico - sillimanítico	Qtz + Pl + Kfs + Bt + Sil		Ser + Ep + Chl	
CVA – 4		Neis migmatítico biotítico - sillimanítico	Qtz + Pl + Kfs + Bt + Sil		Ser + Ep + Chl	
CVA – 5	CVA – 5	Neis cuarzo - feldespático	Qtz + Pl + Ttn + Bt + Sil + Ox	Rt + Zr	Ep + Clz + Zoi + Chl	
CVA – 6	CVA – 6	Neis cuarzo - feldespático	Qtz + Pl + Ttn + Bt + Sil + Ox	Rt + Zr	Ep + Clz + Zoi + Chl	Qz
CVA – 7	CVA – 7	Neis cuarzo – granatífero / Neis cuarzo - feldespático	Qtz + Grt + Py / Pl + Qz	Rt	Ep+ Chl / Ep + Clz + Chl	Ep
CVA – 8	CVA – 8	Neis cuarzo – granatífero	Qtz + Grt + Chl + Py	Ap + Rt	Chl	Ep
CVA – 9	CVA – 9	Neis cuarzo - granatífero	Qtz + Grt + Chl + Py	Ap + Zr + Rt	Ep + Chl	Ep
CVA – 10	CVA – 10A	Neis migmatítico cuarzo - granatífero	Qtz + Grt + Pl + Kfs + Bt + Py	Zr + Rt	Ser + Ep + Chl + Clz + Zoi	
	CVA – 10B					
CVA – 11	CVA – 11	Neis cuarzo – feldespático (ortoclasa)	Qtz + Kfs + Pl + Ms + Grt + Ox	Ap + Rt	Chl + Ser	
CVA – 12	CVA – 12	Neis cuarzo - feldespático	Qtz + Pl + Ttn + Ox		Ep + Ser + Chl	Qtz + Pl

Nota: Pl - Plagioclasa; Kfs – Feldespato potásico; Qtz – Cuarzo; Grt – Granate; Ms – Moscovita; Bt – Biotita; Sil – Sillimanita; Ap – Apatito; Rt – Rutilo; Ser – Sericita; Chl – Clorita; Ep – Epidota; Py – Pirita; Zoi – Zoisita; Zrn – Zircón; Ttn – Titanita; Clz – Clinozoisita; Ox – Óxidos. Abreviaciones minerales según Whitney y Evans [29].

4.2.2 Petrografía

Según la clasificación que se les ha dado a las rocas en la Tabla 22, se ha realizado la descripción petrográfica de los tipos de roca que se han encontrado, plasmando los aspectos microscópicos que se han detallado en las respectivas secciones delgadas.

Neis migmatítico biotítico-sillimanítico:

Roca metamórfica foliada de estructura néisica, con una lineación determinada por la dirección de las micas, que tiene dos texturas metamórficas presentes, donde en la parte superior predominan cristales medianos y gruesos de plagioclasa alterándose parcial y totalmente (a sericita, epidota y albita), feldespatos con texturas peritíticas en forma de estrías con plagioclasas, cuarzo y poca sillimanita de variedad fibrolita con coronas de sericita y óxidos, asociada a biotitas alteradas en algunos cristales a clorita con inclusiones de rutilo con la macla de la sagenita, donde la textura es lepidogranoblástica y se asocia a un proceso de migmatización del neis por su apariencia ígnea y su transición composicional más félsica, siendo la parte del leucosoma; la parte inferior corresponde a una textura granolepidoblástica donde los agregados de sericita junto a la biotita en algunos cristales cloritizada, la sillimanita y poca moscovita predominan y exhiben la dirección de foliación del neis en cristales medianos y finos, siendo el mesosoma (Fig. 16a).

Neis cuarzo feldespático:

Roca metamórfica foliada, de estructura néisica la cual exhibe una textura lepidogranoblástica. Su composición es cuarzo-feldespática y denota que el protolito metamórfico ha sido alterado por un fluido hidrotermal (Fig. 16b) donde principalmente los feldespatos han sido reemplazados por epidota, clinozoisita y sericita, con clorita primaria en agregados muy finos, clorita muy oxidada reemplazando a la biotita, titanita y cuarzo que muestra una recrystalización. Se encuentran algunos reliptos de sillimanita, y la roca tiene venas de cuarzo cortando en planos de la foliación donde la textura es granoblástica poligonal.

Neis cuarzo granatífero:

Roca metamórfica foliada de estructura néisica con una textura lepidogranoblástica, su lineación va acorde por el alargamiento de agregados granulares, donde hay una intercalación de cristales medianos de cuarzo con fracturas regulares respecto a la foliación de la roca llenas de oxidación, con granate de forma masiva que se altera parcial o totalmente a clorita junto a óxidos de tamaño

fino y mediano (Fig. 16d). Hay algunos porfidoblastos de granate con una gran deformación exhibiendo fracturas llenas de clorita y de óxidos (Fig. 16e). Tiene venas de epidota, en la muestra CVA-7 existe el contacto entre este neis y el cuarzo feldespático que tiene la asociación mineral de epidota, clinozoisita y clorita característica de una alteración por un fluido hidrotermal (Fig. 16c).

Neis migmatítico cuarzo granatífero:

Roca metamórfica foliada de estructura néisica con dos texturas presentes, en la parte superior la textura es granoblástica inequigranular donde los cristales tienen una apariencia ígnea compuesta por cristales gruesos y medianos de cuarzo, plagioclasa alterándose a sericita/epidota, feldespato potásico, biotita cloritizada y granate, se asocia a un proceso de migmatización. La transición que tiene hacia la parte inferior es gradual donde la textura es lepidogranoblástica con una intercalación de cristales medianos y finos de cuarzo y feldespato potásico con granate que en algunos cristales se ha alterado a clorita y plagioclasa que ha sido totalmente alterada a epidota, zoisita y sericita (Figura 16f). Muestra en general una gran deformación de los cristales generando fracturas regulares.

Neis cuarzo feldespático (ortoclasa):

Roca metamórfica foliada de estructura néisica, compuesto por cristales de cuarzo, plagioclasa y ortoclasa alterados parcial y totalmente a sericita, exhibiendo una gran deformación de algunos cristales, además de fracturas regulares en dirección casi perpendicular a la foliación de la roca que va enmarcada por la disposición de cristales de biotita totalmente cloritizada (muestra CVA-11). Tiene algunos cristales de óxidos, catalogados magnetita en muestra macroscópica, y presenta algunos pseudomorfos de granate reemplazados por clorita.

5. Discusión

Bajo los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica y petrográfica de las rocas metamórficas de los sectores analizados a cercanías de las localidades de Los Curos y La Corcova, se ha interpretado que las rocas del basamento Grenvilliano de la unidad litodémica Neis de Bucaramanga de una composición metapelítica, ha sido sometida a un metamorfismo regional tipo Barroviense, que exhiben paragénesis minerales de $Qtz+Pl+Kfs+Bt+Sil\pm Ms$ para los neises biotítico sillimaníticos, siendo asociaciones que se dan en condiciones de alta temperatura en facie anfíbolita, con

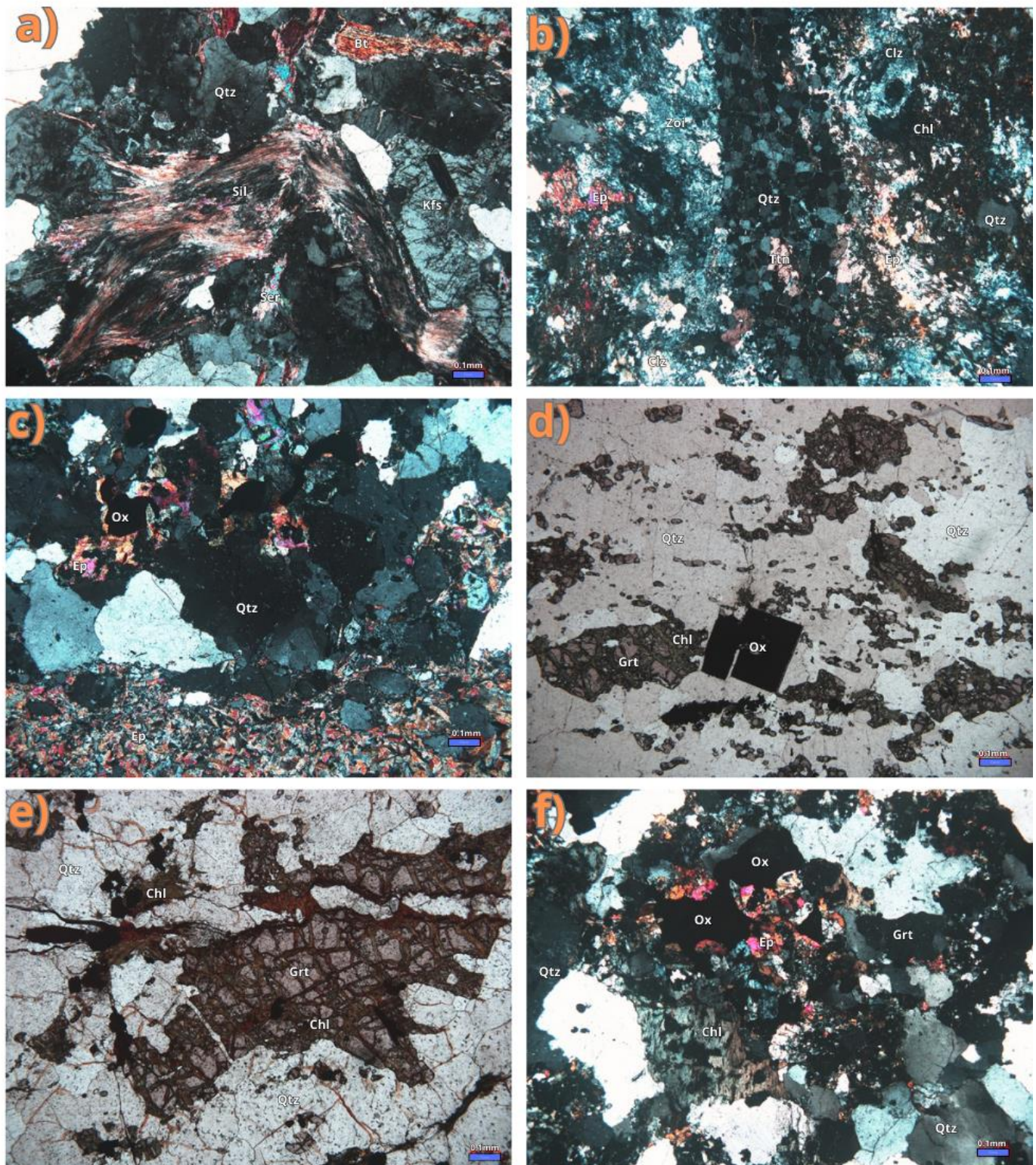


Figura 16. Microfotografías captadas con el lente 4x de: a) Neis biotítico sillimanítico. XPL (CVA-2B). b) Neis cuarzo feldespático con alteración hidrotermal, con una vena de cuarzo paralela a la foliación. XPL (CVA-6). c) Contacto delimitado por una vena de epidota entre neis cuarzo granatífero y neis cuarzo feldespático con alteración hidrotermal. XPL (CVA-7). d) Neis cuarzo granatífero con óxidos. PPL (CVA-8). e) Porfidoblasto de granate reemplazándose a clorita en sus fracturas también oxidadas en neis cuarzo granatífero. PPL (CVA-9). f) Neis cuarzo granatífero con alteración hidrotermal sobrepuesta. XPL (CVA-10B). Escala 0.1mm.

transiciones composicionales diferentes para cada lugar estudiado

5.1 Los Curos

En Los Curos estos neises de alta temperatura se ven sometidos a una gran deformación por el emplazamiento de grandes cuerpos lenticulares de composición félsica de cristales medianos y gruesos, entre los planos de foliación del neis, asociados a la unidad Ortoneis ya que el afloramiento está ubicado en lo que se ha clasificado en el cuadrángulo H-12 como Neis de Bucaramanga con masas de Ortoneis; además, de la exhumación del Plutón del Monzogranito de La Corcova que en la vía Los Curos-Guaca está expuesto según Ward et. al [1]. Para este caso con asociaciones de $\text{Qtz}+\text{Pl}+\text{Kfs}\pm\text{Bt}\pm\text{Grt}$ que han sido clasificados como monzogranitos, con un alto grado de deformación en sus cristales, estas muestras fueron tomadas de un cuerpo lenticular emplazado en el Neis de Bucaramanga (ver Fig.4). En el ejemplar CUR-7 se encuentran porfidoblastos de granate, del cual sería interesante conocer su proveniencia para estimar si su origen fue por un evento metamórfico o si son de carácter ígneo; también, se analizó una parte de composición granítica que estaba bandeada con el neis biotítico-sillimanítico que fue catalogada como Ortoneis con su asociación de $\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Qtz}+\text{Ms}$ y texturas ígneas reconocidas en sección delgada, que ha intruído al neis en dirección paralela a sus planos de foliación.

Justo en la parte inferior del lente félsico analizado se halló un cuerpo rocoso con meteorización esferoidal de protolito máfico compuesto por neises hornbléndico granatíferos también en facie anfibolita de temperatura alta, con la asociación mineral principal de $\text{Hbl}+\text{Grt}1+\text{Qtz}+\text{Py}$ alterados por un fluido hidrotermal reflejado en las alteraciones a epidota, clorita y zoisita, y aparece en un sector del neis una vena compuesta por $\text{Ap}+\text{Grt}2+\text{Qz}$, el granate de esta asociación refleja una zonación textural sectorial que es enmarcada por la disposición de las fases incluidas que se presentan en dirección paralela a los ejes cristalográficos del porfidoblasto luciendo en forma de estrella dentro de los granates (ver Fig. 17d), esto debido al intercrecimiento que han tenido las inclusiones en el crecimiento del granate. En la Figura 7 se muestran los mapas composicionales de Ca, Fe, Mg y Mn de un granate de este tipo del cual bajo sus parámetros texturales y la distribución química que presenta, se ha interpretado como una fase progradada de la zonación por la característica disminución de Mn del núcleo hacia el

borde del cristal e inversamente para el Mg que aumenta del núcleo hacia el borde en su concentración, mientras que el Ca es más abundante hacia las inclusiones que generan esa zonación textural en los bordes de las caras del granate, y el Fe por el contrario disminuye su concentración hacia donde están las fases incluidas, interpretándose que sus concentraciones probablemente reflejan el alcance local de la reacción en las inmediaciones del porfidoblasto en su nucleación.

Las investigaciones petrológicas del granate zonado han jugado un papel importante en la adquisición de información sobre los equilibrios químico-minerales desarrollados durante la evolución de presión y temperatura de las rocas metamórficas, y el granate es uno de los minerales más adecuados ya que, debido a su lenta difusión catiónica, es capaz de preservar conchas con una composición química original según Ague y Carlson [33]. Los patrones de inclusiones e intercrecimientos en los granates pueden dividirse en dos categorías siguiendo la clasificación de Andersen [34], según su forma y orientación y con respecto a la cristalografía del granate huésped (ver Figura 17).

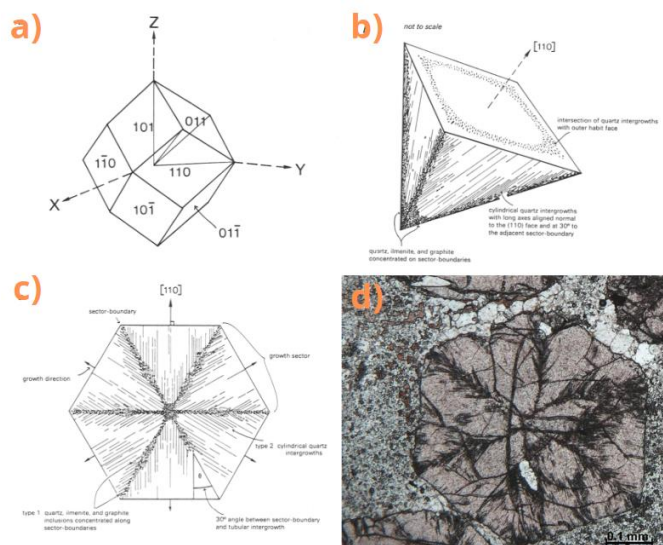


Figura 17. a) Morfología externa de un cristal de granate rombocuboctaédrico delimitado por $\{110\}$ caras cristalinas. b) Pirámide esquemática de crecimiento del granate, mostrando la geometría de inclusión e intercrecimiento. Sinópticamente, el granate está formado por doce pirámides de este tipo, con ápices comunes en el centro del cristal y bases formadas por las $\{110\}$ caras del cristal. c) Sección esquemática a través del centro del granate mostrando la relación de la inclusión y el patrón de intercrecimiento con la cristalografía del granate anfitrión. d) Microfotografía de un porfidoblasto de granate con zonación textural sectorial de la muestra CUR-2C. Escala 0.1mm PPL. Adaptado y modificado de Burton [35].

En este estudio se plantea que la textura de zonación sectorial del granate se dio en una fase de deformación de la roca, que se ha evidenciado petrográficamente, además de la alteración hidrotermal sobrepuesta, donde las fases

incluidas han jugado un factor importante en la distribución química y se reconoce que hay intercrecimiento del granate con inclusiones de cuarzo alargado, apatito y óxidos hacia los bordes de las caras de sus cristales.

El hallazgo de una alta concentración de apatito en neises o esquistos proporciona una oportunidad para explorar las implicaciones geológicas de estas muestras. El apatito es un mineral accesorio que, además de ser común en diversas rocas metamórficas, puede actuar como un indicador clave de las condiciones metamórficas y de la proveniencia de las rocas, ya que el análisis de su composición química puede revelar información significativa sobre la historia térmica y los procesos petrogenéticos que han influido en las rocas en cuestión. La alta concentración de apatito sugiere que las rocas han alcanzado al menos la facies de anfibolita, donde se espera que el apatito sea más abundante y rico en elementos traza como REE y U [36], corroborando así el contexto metamórfico descrito en el estudio.

5.2 La Corcova

En La Corcova los neises biotítico sillimaníticos mostraban una transición muy marcada en su mineralogía hacia una roca de composición granítica muy alterada que fue asumida como migmatización de estos, ya que se diferenciaban capas centrimétricas a milimétricas de leucosomas de composición cuarzo feldespática y melanosomas compuestos por biotita, sillimanita y agregados micáceos muy finos (sericita) por alteración de feldespatos, también con clorita y epidota. Seguidos de cuerpos rocosos de neises cuarzo feldespáticos con asociaciones de $Qtz+Pl+Ttn+Bt\pm Sil$ y neises cuarzo granatíferos con asociación de $Qtz+Grt+Py$ que exhiben una alteración por un fluido hidrotermal expuesta en los minerales de epidota, clinozoisita y clorita, y venas de cuarzo y epidota en la zona; que se encontraban dispuestas irregularmente en una roca de composición granítica muy alterada con cristales gruesos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico (ver Figura 11b). Y más al noreste había una fase del neis cuarzo granatífero con intrusiones de composición granítica asumidas como migmatización del mismo, ya que la tasa de nucleación de pequeños granates era alta y se evidenciaba la transición composicional de la roca en la lámina delgada CVA-10, con su asociación mineral de $Qtz+Grt+Pl+Kfs+Bt+Py$. Seguido de neises cuarzo feldespáticos de asociación $Qtz+Kfs+Pl+Ms+Grt+Ox$ con altos grados de deformación en sus cristales denotados de sus fracturas

regulares en dirección oblicua a su foliación, y otro neis cuarzo feldespático con asociación $Qtz+Pl+Ttn+Bt$, con un bandeamiento milimétrico, que ha sido también alterado por el fluido hidrotermal generando minerales de epidota, clinozoisita y clorita, además de que ha sido intruído por una vena de cuarzo con plagioclasa.

Se tiene presente que en ambos afloramientos analizados las rocas han pasado por cambios composicionales y microestructurales a lo largo de su evolución geológica. En esta ocasión se atribuye al emplazamiento de la unidad Ortoneis durante la orogenia Famatiniana como cuerpos lenticulares grandes de composición monzogranítica y también metamáfica en cuanto a los neises hornbléndico granatíferos (ver Fig. 4), en el sector de Los Curos, en los planos de debilidad del litodema Neis de Bucaramanga representado por neises biotítico-sillimaníticos, además, de la deformación de la zona que es evidenciada en fracturamientos regulares en los cristales de las rocas analizadas generalmente en dirección oblicua a sus foliaciones, y a su vez han sido influenciadas por fluidos hidrotermales que han generado alteraciones a minerales del grupo de la epidota y la clorita, que también se da como producto del metamorfismo en fase retrograda alterando los minerales ferromagnesianos.

En cambio, el cuerpo ígneo que se ha emplazado durante el Triásico – Jurásico en el basamento Grenvilliano en el sector de La Corcova, descrito como el Pluton Monzogranito de La Corcova ha influenciado morfológica y composicionalmente a los neises biotítico-sillimaníticos del Neis de Bucaramanga aflorantes, haciendo que alcancen una migmatización (muestras CVA-1 a CVA-4); los neises cuarzo feldespáticos han sido alterados por un fluido hidrotermal que se ha interpretado por las asociaciones minerales de epidota, clinozoisita, zoisita, sericita y clorita, del mismo modo que los neises cuarzo granatíferos que reflejan su alteración en fase retrograda a clorita del granate y contienen venas de epidota. Los dos últimos tipos de neises se encontraban dispuestos irregularmente mezclados con una roca de composición granítica muy alterada (ver Fig. 11b y Fig.11c), lo cual afirma lo que estipularon Ward *et. al* en [1] como el resultado de la interacción del Plutón adyacente con el basamento, expuesto justo en las vías Bucaramanga - Pamplona y Los Curos - Guaca.

6. Conclusiones

Se cuenta con los resultados de la caracterización mineralógica y la petrográfica de las muestras analizadas, expresadas en las tablas y descripciones de la investigación presentada. De los cuales se ha interpretado que las rocas metamórficas de la unidad litodémica Neis de Bucaramanga del basamento cristalino del Macizo de Santander tienen una amplia complejidad en las zonas estudiadas, debido a los procesos tectono metamórficos en los que se ha visto involucrada y la variabilidad composicional que se encuentra en los diferentes ejemplares estudiados.

Se contempla la posible correlación de que la exhumación de la unidad Ortoneis producto de la orogenia Famatiniana y el emplazamiento del Plutón de Monzogranito de La Corcova perteneciente al cinturón magmático del Triásico Tardío – Jurásico, han afectado a las rocas metapelíticas Grenvillianas que corresponden a neises de alta temperatura de facie anfíbolita en la zona de la sillimanita en estos casos, exhibiendo diferentes alteraciones y variabilidades composicionales por la aparición de rocas de composición félsica percibidas como cuerpos intrusivos emplazados (Los Curos), o la transición a ellas por procesos de migmatización (La Corcova), generando cambios en los ensamblajes minerales ocurrientes. Se alude también, a una alteración hidrotermal sobrepuesta en ambos afloramientos expuesta por asociaciones minerales con epidota, clinozoisita, zoisita, clorita, sericita, cuarzo, y mineralizaciones de pirita, y a su vez por la alta cantidad de venas que intruyen las rocas analizadas.

El crecimiento del granate con zonación textural sectorial en la vena de apatito con cuarzo del neis hornblendico granatífero de Los Curos, se ha dado en una fase de no equilibrio del metamorfismo progrado de esta roca donde las fases incluidas han enmarcado una disposición en la estructura del cristal y han modificado su distribución química.

7. Recomendaciones

Es necesario obtener más datos petrológicos, geoquímicos y geocronológicos para desarrollar una mejor comprensión acerca de la evolución tectono metamórfica de estas rocas de la unidad Neis de Bucaramanga, además de entender el mecanismo de nucleación y crecimiento del granate, lo cual puede ser la base para implementar nuevos conocimientos sobre la

historia geológica y la comprensión cuantitativa en la evolución metamórfica del Macizo de Santander. La petrografía acá presentada es el principio de un estudio geológico que puede servir como la base para posibles interpretaciones petrológicas que se elaboren con técnicas de análisis más avanzadas posteriormente, y generen una mejor perspectiva del objetivo del proyecto y así sustentar con más fundamentos la historia evolutiva de estas rocas.

La capacidad de realizar análisis U-Pb en apatitos en rocas que han sufrido alto metamorfismo puede permitir la datación de eventos metamórficos en las rocas en cuestión, proporcionando un marco temporal que podría ser relevante para entender la evolución geológica de la región. La eficacia del análisis combinado de geocronología y geoquímica del apatito detrítico permite determinar la composición de la roca madre o la edad según O'Sullivan et. al [37]. Es importante recalcar la importancia que representa el hallazgo de una alta concentración de cristales de apatito, ya que proporciona una oportunidad para explorar las implicaciones geológicas de estas muestras. El apatito es un mineral accesorio que, además de ser común en diversas rocas metamórficas, puede actuar como un indicador clave de las condiciones metamórficas y de la proveniencia de las rocas, por lo tanto, el hallazgo de una alta concentración de apatito en las rocas metamórficas del Macizo de Santander no solo resalta su importancia mineral, sino que también abre una vía para un análisis más profundo de la historia geológica y las condiciones metamórficas experimentadas por estas rocas. Si el apatito encontrado presenta características que se asemejan a las reportadas por Henrichs et al. [33], esto podría indicar no solo el grado metamórfico, sino también la estabilidad y comportamiento de otros minerales presentes, como el allanita y la epidota. Las concentraciones de REE en el apatito pueden ofrecer pistas sobre la proveniencia de las rocas. Si se identifica que la composición del apatito se asemeja a otras fuentes conocidas, esto podría ayudar a inferir la historia de sedimentación y origen de los materiales que dieron lugar a las rocas metamórficas

Reconocimientos

Agradezco al profesor Oscar Castellanos por haberme guiado e incentivado en esta investigación, y transmitir su pasión por la petrografía metamórfica.

Referencias

- [1] Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz B., J., & Restrepo A., H. (1973). Geología de los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1–134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>
- [2] García-Ramírez, Carlos Alberto, Rey-León, Vanessa, & Valencia, Víctor. (2017). Ortoneises en la Franja Silos-Babega, Macizo de Santander, Colombia: evidencias de la orogenia famatiniana en los Andes del norte. *Andean geology*, 44(3), 307–327. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeov44n3-a04>
- [3] Ramos, Victor. (2018). The Famatinian Orogen Along the Protomargin of Western Gondwana: Evidence for a Nearly Continuous Ordovician Magmatic Arc Between Venezuela and Argentina.
- [4] Rodríguez G., Correa A., Zapata G., Arango M. (2016). CATÁLOGO DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DE COLOMBIA MONZOGRANITO DE LA CORCOVA Cordillera Oriental- Macizo de Santander Departamento Santander. Servicio Geológico Colombiano.
- [5] Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G., Cosca, M., 1997. Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters* 150, 427–441
- [6] Tschanz, C.M., Marvin, R.F., Cruz, J., Mehnert, H.H., Cebula, G.T., 1974. Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin* 85, 273–284.
- [7] Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Caceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir* 79, p. 815–848.
- [8] Tesón, E.; Mora, A.; Silva, A.; Namson, J.; Teixell, A.; Castellanos, J.; Casallas, W.; Julivert, M.; Taylor, M.; Ibáñez-Mejía, M.; Valencia, V. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 377, 257–283. doi: 10.1144/SP377.10
- [9] Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander – énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. PhD Thesis. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [10] Forero-Ortega, A.J.; Velandia, F.; Barragán-Coy, E.K. (2020). Estilos estructurales y tensores de esfuerzos hacia el suroriente del Macizo de Santander (Colombia). *Boletín de Geología*, 42(2), 129–145. doi: [10.18273/revbol.v42n2-2020007](https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020007)
- [11] Irving, E. M. (1971). La evolución estructural de los andes más septentrionales de Colombia. *Boletín Geológico*, 19(2), 1–90. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol19.2.1971.395>
- [12] Forero, A (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 3, Issues 2–3, Pages 141–151.
- [13] Restrepo, Pedro. (1995). Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological geochemical and isotopic data. The University of Arizona.
- [14] Mantilla L. C., Bissig T., Cottle J. M., Hart C. (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera), *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 38, Pages 1–12.
- [15] López-Isaza, JA & Zuluaga, CA (2020). Magmatismo del Triásico Tardío al Jurásico en Colombia: Implicaciones para la evolución del margen norte de Sudamérica. En: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, AO (editores), *La Geología de Colombia, Volumen 2 Mesozoico*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 77–116. Bogotá.
- [16] Restrepo, Jorge & Toussaint, Jean. (1988). Terranes and Continental Accretion in the Colombian Andes. *Episodes*. 11. 189–193. 10.18814/epiugs/1988/v11i3/006.
- [17] Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 1989. Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. V Congreso Colombiano de Geología, *Memoirs*, I, p. 127–146. Bucaramanga.
- [18] Zuluaga, Carlos & López Isaza, Julián. (2019). Ordovician Orogeny and Jurassic Low-Lying Orogen in the Santander Massif, Northern Andes (Colombia): The Pacific-Caribbean-Andean Junction. 10.1007/978-3-319-76132-9_4.
- [19] Julivert, M. (1961). Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga. *Boletín De Geología*, (8), 39–42. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4266>
- [20] Goldsmith, R., Marvin, R.F. & Mehnert, H.H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U. S. Geological Survey, Professional Paper, 750–D: D44– D49.
- [21] García, C. A.; Ríos, C. A.; Castellanos, O. M. (2005). MEDIUM-PRESSURE METAMORPHISM IN THE CENTRAL SANTANDER MASSIF, EASTERN CORDILLERA, COLOMBIAN ANDES *Boletín de Geología*, vol. 27, núm. 2, julio-diciembre, 2005, pp. 43–68.
- [22] Uruña-Suarez, C. & Zuluaga, C., (2011). Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas – Santander. *Geología Colombiana, Edición Especial*, vol. 36 (1), pp. 37–56.
- [23] Amaya, Sergio (2012). Caracterización Petrográfica y Petroológica de las Migmatitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamentos de Norte de Santander y Santander.
- [24] Zuluaga C. A., Amaya S., Uruña C., Bernet M. (2017). Migmatization and low-pressure overprinting metamorphism as record of two pre-Cretaceous tectonic episodes in the Santander Massif of the Andean basement in northern Colombia (NW South America) *Lithos, Volumes* 274–275, Pages 123– 146.
- [25] Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- [26] Jiménez Triana, C. (2016). Caracterización petrológica y geoquímica de la unidad Ortoneis, Macizo de Santander, Colombia.
- [27] Schmid, R, Fettes, D, Harte, B, Davis E, Desmons, J. A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 1. How to name a metamorphic rock. Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks. *Recommendations*, web version of 01.02.2007.
- [28] Smulikowski, W, Desmons, J, Harte, B, Sassi, F P and Schmid, R. A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 2. Types, grade and facies of metamorphism. Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks. *Recommendations*, web version of 01.02.2007.
- [29] Donna L. Whitney, Bernard W. Evans; Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 2010;; 95 (1): 185–187. doi: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- [30] Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica. Carlos Alberto García Ramírez. 2007.
- [31] Memorias mesa de trabajo sobre normas técnicas para piedras preciosas y semipreciosas de Colombia. LC Díaz López, EO Benavides 2002. Página 27.
- [32] A. Streckeisen, To each plutonic rock its proper name, *Earth-Science Reviews*, Volume 12, Issue 1, 1976, Pages 1–33, ISSN 0012-8252, [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0).
- [33] Ague, J.J., and Carlson, W.D. 2013. Metamorphism as Garnet Sees It: The Kinetics of Nucleation and Growth, Equilibration, and Diffusional Relaxation. *Elements*, 9(6): 439–445.
- [34] Andersen, T.B. 1984. Inclusion patterns in zoned garnets from Magerfj, north Norway. *Mineralogical Magazine*, 48: 21–26
- [35] Burton, K. 1986. Garnet-quartz intergrowths in graphitic pelites: the role of the fluid phase, *Mineralogical Magazine*, 50: 611–620.
- [36] Henrichs, I. A., Chew, D. M., O'Sullivan, G. J., Mark, C., McKenna, C., & Guyett, P. (2019). Trace element (Mn-Sr-Y-Th-REE) and U-Pb isotope systematics of metapelitic apatite during progressive greenschist- to amphibolite-facies Barrovian metamorphism. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 4103–4129. <https://doi.org/10.1029/2019GC008359>
- [37] O'Sullivan, G. J., Chew, D. M., Morton, A. C., Mark, C., & Henrichs, I. A. (2018). An integrated apatite geochronology and geochemistry tool for sedimentary provenance analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 1309–1326. <https://doi.org/10.1002/2017GC007343>