
Uso del análisis digital de imágenes (ADI) como herramienta para el estudio petrográfico en rocas metamórficas.

Use of digital images analysis (DIA) as a tool for petrographic study of metamorphic rocks.

DANIELA LONDOÑO VARGAS ⁽¹⁾

MARIA ISABEL MARÍN-CERÓN ⁽²⁾

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

(1): E-mail: ylondono@eafit.edu.co

(2): E-mail: mmarine@eafit.edu.co

RESUMEN

Los retos en las actividades de innovación en docencia, se basan en la necesidad de proponer nuevos métodos y estrategias que permitan ampliar y armonizar toda clase de recursos que se tengan disponibles, para potencializar los resultados en el proceso de enseñanza - aprendizaje. En el caso de la asignatura de rocas metamórficas, es muy común identificar dificultades en los estudiantes en el análisis petrográfico, identificación de minerales, patrones texturales, y relación con curvas de blastesis; por lo anterior se quiso implementar el tratamiento de análisis digital de imágenes (ADI), como una herramienta pedagógica que facilite el aprendizaje de los mismos.

Palabras clave: Innovación, docencia, enseñanza, aprendizaje, conocimiento, rocas metamórficas, tratamiento, digital, imágenes.

ABSTRACT

The challenges of innovation activities in teaching are based on the need to propose new methods and strategies to expand and harmonize all kinds of available resources, to potentiate the results in the teaching and learning process. In the case of the subject of metamorphic rocks, it is very common to identify the difficulties presented to students in petrographic analysis, identification of minerals, textural patterns, and relationship with blastesis curves. From the foregoing, it was intended to implement the process of digital image analysis (DIA), as a teaching tool to facilitate learning of them.

Key words: Innovation, teaching, learning, knowledge, metamorphic rocks, treatment, digital, images.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis digital de imágenes (ADI), mediante el uso del software *Image Pro Plus*, permite desarrollar una herramienta de apoyo pedagógico para la descripción petrográfica. Para dicho análisis, se seleccionaron 80 muestras existentes en la base de datos del atlas de rocas metamórficas, proyecto desarrollado en conjunto con apoyo del grupo de profesionales del Proyecto 50 de la Universidad EAFIT.

Al finalizar el análisis ADI, aplicado al estudio de rocas metamórficas, se logró identificar que el uso de los diferentes filtros (Thinning, Local Equalization, Test Strips, Hi Pass, Rank, Best Bit Equalization, Sharpen, Invert entre otros) y aplicaciones (Invert Contrast, Invert Image), permiten mejorar las interpretaciones e interpretación petrográfica.

2. METODOLOGÍA

El proceso metodológico que se llevó a cabo para el desarrollo de este proyecto se ejecutó en cuatro etapas (ver Figura 1), descritas a continuación:



Figura 1: Flujograma metodológico para la aplicación del tratamiento de imágenes digitales.

2.1 Análisis petrográfico de secciones delgadas

Durante esta etapa, se realizó una exhaustiva revisión de la colección de rocas metamórficas pertenecientes al laboratorio de geología de la universidad EAFIT, con el fin de elegir las secciones delgadas más representativas de la misma, y de complementar los previos análisis petrográficos que se habían realizado en ellas anteriormente, teniendo en cuenta características importantes como micro-texturas y micro-estructuras bien definidas; según Torres et al., (2004), la posible persistencia de texturas o estructuras relictas. Todo lo

anterior se compiló en la herramienta Atlas de Rocas metamórficas <http://atlas.dis.eafit.edu.co/#/atlas>

2.2 Toma de fotografías para análisis textural mediante análisis digital de imágenes

Para el análisis petrográfico y la toma de las fotografías de las secciones delgadas para el análisis digital, se utilizaron los siguientes materiales:

- Microscopio petrográfico: Olympus BX 41.
- Carro portamuestras: UFMP Olympus
- Cámara adaptable al microscopio con puerto para tarjeta SD: Moticam 580 de 5.0 Megapíxeles.

Una vez realizado el análisis petrográfico, se tomaron 60 fotografías por sección delgada, con el fin de abarcar la mayor parte de la misma y poder identificar de esta manera, los patrones texturales que se pudieran presentar en la roca de una manera más amplia, ya que por lo general, el campo de visión que se permite fotografiar con los microscopios es muy reducido, y puede dar ideas erróneas de la textura y de los patrones dominantes en los minerales. Para hacer más exacta la toma de las fotografías se utilizó el siguiente método:

- I. Se posiciona cada sección delgada sobre el carro porta-muestras y se ajusta de manera que se logre visualizar al microscopio uno de los extremos superiores de la sección como se muestra en la figura 2.



Figura 2: Posicionamiento de la sección delgada sobre el carro porta muestras, el recuadro amarillo corresponde al punto de partida para iniciar la toma sucesiva de muestras y de esta manera abarcar la mayor área posible de esta.

- II. Una vez ajustada la muestra, se toma un punto en las reglillas milimétricas del carro porta-muestras, de manera que corresponda con el inicio de la sección delgada; este punto se usa como partida para iniciar el barrido de la sección delgada.
- III. Para esa primera posición de la sección delgada, se toma la fotografía inicial con la cámara para microscopio, y a partir de esta, se comienza el barrido de la muestra asegurándose de que se tomen puntos compartidos de la sección para cada fotografía. Esta característica, posteriormente nos permitirá unificar las fotografías.
- IV. Se deben tomar 15 fotografías en un sentido vertical de modo ascendente cada 2 mm, y posteriormente se debe tomar otro tramo de 15 fotos en sentido vertical de

modo descendente y de esta manera sucesivamente hasta completar las 60 fotografías.

2.3 Elaboración de mosaicos de fotografías para análisis textural mediante análisis digital de imágenes

Posterior a la adquisición de las fotografías, se realizó el proceso de *photomerge*, el cual consiste en unificar las fotografías mediante cualquier tipo de software que permita traslapar los píxeles semejantes de cada una de ellas, y de esta manera obtener un mosaico con el barrido completo de la sección delgada. Para este caso se utilizó un software común *Photoshop CS6 (Creative Suite 6)*, ejecutando la opción *merge* para cada paquete de 60 fotos.

2.4 Análisis textural mediante análisis digital de imágenes

En esta fase se utilizaron las imágenes resultantes de la etapa anterior, para implementar el tratamiento de imágenes digitales utilizando el software *Image-Pro Plus 7.0*. Este se llevó a cabo mediante la aplicación de filtros, inversiones de contraste, medición de escalas, e intensificación y realce de bordes para facilitar la identificación de los patrones micro-texturales y micro-estructurales presentes en cada sección delgada. Se seleccionaron diferentes rocas representativas de las texturas más importantes en el análisis de rocas metamórficas.

3. RESULTADOS

De acuerdo con la experiencia obtenida en el presente trabajo, se identificaron una serie de parámetros que son aplicables de forma general para el ADI en el estudio de las rocas metamórficas según el siguiente criterio: (1) Rocas con texturas foliadas (lepidó y nematoblásticas); (2) Rocas con texturas granoblásticas y (3) Rocas con texturas miloníticas y cataclásticas.

Los resultados obtenidos, se resumen a continuación

3.1 ADI en rocas con texturas foliadas

En las rocas con texturas foliadas, los minerales se reorganizan y recristalizan como consecuencia a las nuevas condiciones de presión y temperatura a las que se encuentran expuestos, desarrollando orientaciones preferenciales (normalmente perpendiculares a la dirección de los esfuerzos). En general, las foliaciones en las rocas que no han sido afectadas por esfuerzos cinemáticos son causadas por orogenia y metamorfismo regional, y el tipo de foliación que estas presentan, varían de acuerdo con el grado de metamorfismo (Winter, 2010). Este tipo de texturas son comúnmente encontradas en rocas provenientes de metamorfismo regional (orogénico), desarrollando pizarras, filitas, esquistos y gneises. A continuación, se presentan ejemplos de cada uno de estos tipos de roca, exceptuando las pizarras, debido a que su tamaño de grano tan fino, no beneficia la aplicación del ADI, y adicionalmente, se colocan ejemplos de anfibolitas y migmatitas.

3.1.1 Filitas

La roca M.Met 20078 para el ADI que se presenta en la figura 3, corresponde a una filita localizada en el municipio de Cali (Valle del Cauca), correlacionable con la unidad geológica Grupo Dagua, la cual se ha asociado a rocas sedimentarias con alto grado de diagénesis en el límite con el metamorfismo (González & Barrero, 1991), con una posible edad Cretácica (?). A nivel microscópico (ver tabla 1), la roca presenta un tamaño de grano muy fino conformada por una matriz de filosilicatos (sericita y clorita), generando una textura lepidoblástica acentuada por las trazas de grafito. Se observan pequeños cristales de cuarzo dispuestos aleatoriamente. Se logra identificar una vena de cuarzo que atraviesa la roca en forma casi paralela a la foliación.

Tabla 1: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20078 (filita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Clorita	77
Grafito	10
Sericita	5

Calcita	5
Cuarzo	3

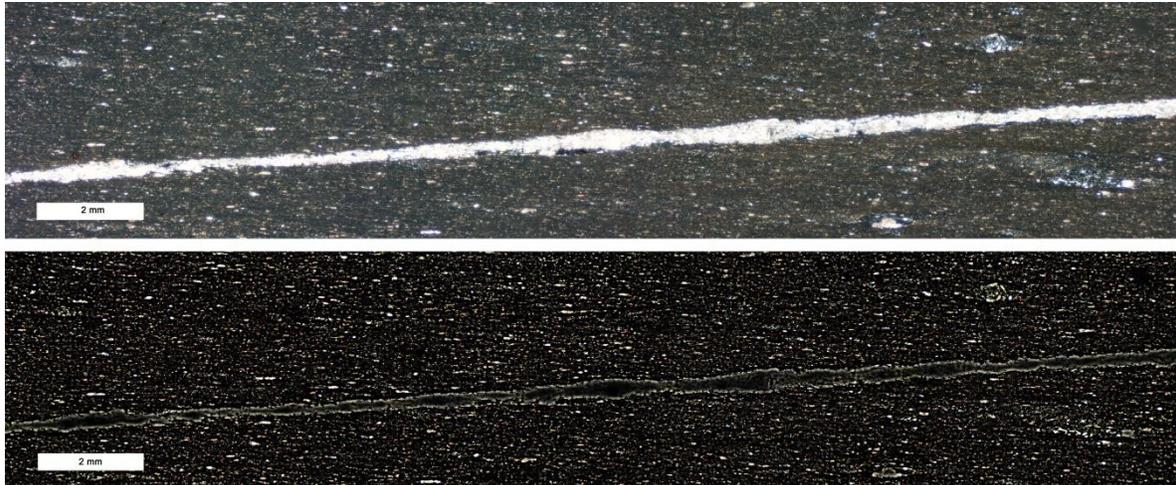


Figura 3: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una filita. Tratada mediante la herramienta *Mask* y posteriormente aplicación de filtro 3D *Pruning* para resaltar los pequeños granos minerales y delimitar la venilla que atraviesa la muestra.

Se identificó que para el análisis ADI de este tipo de rocas, las herramientas más útiles se restringen a filtros 3D (ver figura 3), ya que el tamaño de grano fino obliga a utilizar filtros más potentes a la hora de analizarlas. Se implementaron también filtros de largo espectro, ya que este tipo de filtros permite modificar los parámetros como tamaño del pixel y fuerza de filtrado de acuerdo con las necesidades que se tengan. Lo anterior permite regular con qué intensidad será aplicado el filtro y con ello modificarlo a medida que se obtengan resultados satisfactorios. La foliación de la roca se logra visualizar muy claramente cuando se restringen los valores de fuerza entre 3 y 7 y los valores de tamaño de pixel alrededor de 17, previamente seleccionado para filtro de largo espectro *HiPass*. Igualmente se sugiere implementar la herramienta *Mask* para resaltar los granos finos como muestra la figura 3 y la herramienta *Invert Contrast* para identificar mineralogía, especialmente minerales micáceos como lo muestra la figura 4.



Figura 4: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una filita. Tratada mediante la herramienta Invert Contrast donde se resaltan los blastos que corresponden a minerales micáceos.

3.1.2 Esquistos

La roca seleccionada para el ADI (ver figura 5), corresponde a un esquistos cuarzo micáceo M.Met 20228, localizado en el municipio de Caldas (Antioquia). Colectado en la unidad geológica Grupo Caldas (anfíbolitas granatíferas, esquistos biotíticos, paragneises y cuarcitas, de posible edad Devónico-Carbonífero y tipo bórico Barroviano, (*sensu* Restrepo, 1986). Se ha asociado a un protolito pelítico. Por su asociación mineralógica (ver tabla 2), se define como una roca metamórfica (biotita < moscovita < cuarzo < clorita) en facie esquistos verde (en transición de la zona clorita a la zona biotita). A nivel microscópico, se presenta una clara textura lepidoblástica, marcada por la foliación de los filosilicatos. En los sectores donde predomina el cuarzo, se identifica textura granoblástica poligonalizada fina, la cual se presenta de forma sectorizada y no corresponde a la textura principal de la roca.

Tabla 2: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20228 (Esquistos verde) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	40
Moscovita	30
Biotita	20
Clorita	10

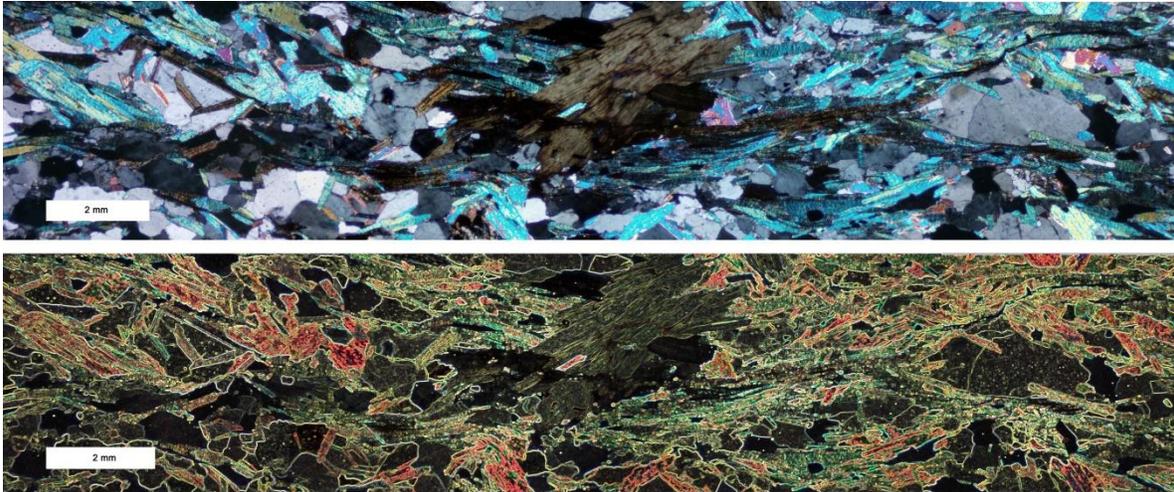


Figura 5: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a un esquisto. Se identifica una textura lepidoblástica que ha sido resaltada mediante la herramienta Test Strips

En general para el análisis ADI se encontró que para la identificación de los tipos de texturas y características de las rocas esquistosas, el uso de herramientas de filtros de realce como *Local equalization*, permite resaltar la orientación de los minerales y texturas específicas como clivajes de crenulación. Otro tipo de herramientas como *Test strips* (ver figuras 5 y 6) permitió identificar microfracturas.

Finalmente, el uso del filtro realce tipo *HiPass* en el análisis ADI permitió identificar con mayor exactitud, minerales como clorita, biotita, moscovita, cuarzo y grafito. Sin embargo, no permitió el uso de la herramienta de medición para calcular el porcentaje mineralógico.

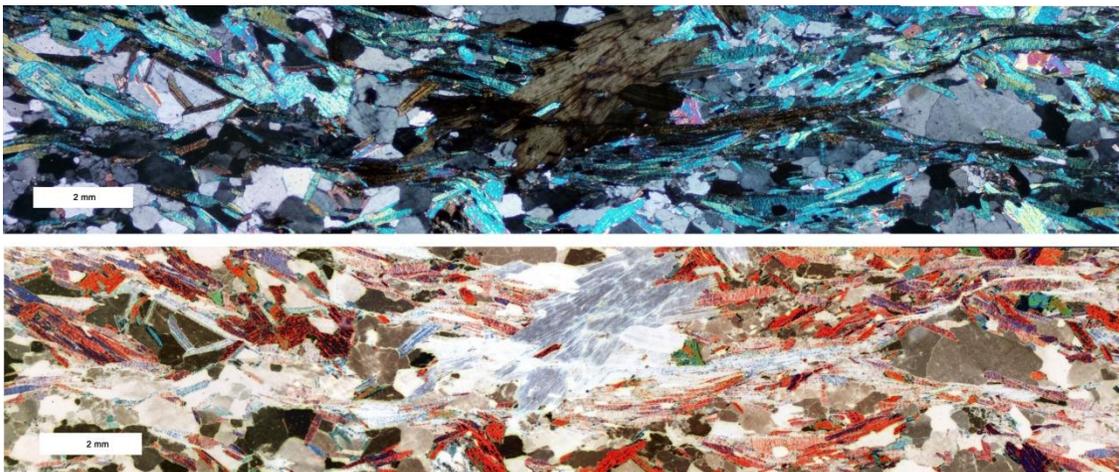


Figura 6: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a un esquisto verde. Se ha utilizado la herramienta *Invert Contrast* para identificar los minerales micáceos, los cuales se encuentran en tonalidades de rojizo.

3.1.3 Gneises

La roca M.Met 20199, corresponde a un gneiss biotítico localizado en el municipio de Envigado (Antioquia), asociado a la unidad geológica Neis de Sajonia, la cual hace parte del Complejo El Retiro de posible edad Proterozóica (Rodríguez et., al 2007) en facie granulita.

A nivel de afloramiento generalmente se presenta saprolito y rocas alteradas con estructura bandeada esquistosa y neísica, la roca está intensamente cizallada, deformada, localmente plegada y fallada y son frecuentes augen de grafito y pequeños poliedros de deformación (Rodríguez et.,al 2007). Por asociación mineralógica se plantea como una roca metamórfica en facie granulita.

A nivel de microscopio (ver tabla 3), la roca presenta una textura grano-lepidoblástica, en donde los blastos de cuarzo y plagioclasa se encuentran intercalados con los minerales planares como la biotita y algo de sericita. La plagioclasa presenta su maclado polisintético característico, y la sericita evidencia estado de alteración en la roca, se encuentra principalmente alrededor de la plagioclasa ocasionalmente sigue el patrón de la foliación. El corte de esta muestra se realizó paralelo a la dirección de foliación de la roca.

Tabla 3: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20199 (Gneis cuarzo biotítico) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	40
Plagioclasa	25
Biotita	20
Sericita	15

En general, para el análisis ADI en gneises (ver figura 7), que en su mayoría se caracterizan por una textura bandeada, se recomienda la utilización de herramientas como filtros de morfología tales como *Thinning*, ya que permiten separar de manera muy clara los minerales que presentan texturas más granoblásticas. También se sugiere implementar filtros de realce tales como *Local Equalization*, *Rank* y *Sharpen* para resaltar la orientación preferencial que se encuentre en la roca. En los casos en que se presenten texturas porfiroblásticas (p.e, granates) el fitro *Thinning* puede ayudar a resaltar la morfología. El procesamiento de imágenes mediante la herramienta *HiGauss* permite resaltar los minerales de bajo relieve.

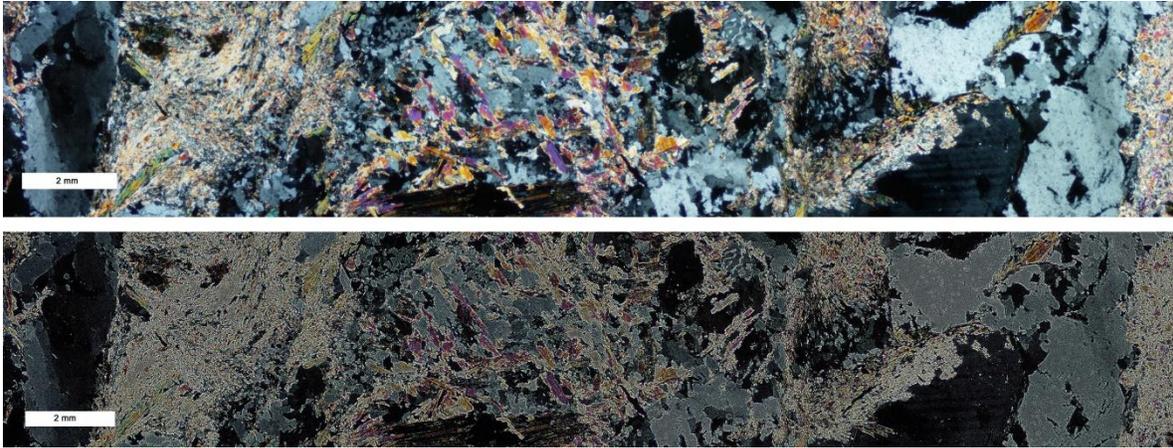


Figura 7: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a un gneiss. Proceso de filtrado mediante *HiGauss* en donde se resalta la foliación que se marca en la roca, al igual que se observa mayor definición en los bordes de granos.

3.1.2 Anfibolitas

La roca M.Met 20108 que se presenta en la figura 8, corresponde a una anfibolita localizada en el municipio de Ituango (Antioquia), es perteneciente a la unidad geológica Anfibolitas de Sucre de edad Paleozóica (?) (Restrepo, 1986). A nivel de afloramiento, se observan cuerpos de textura néisica a localmente esquistosa, en la que sobresalen las hornblendas y plagioclasas orientadas (Restrepo, 1986). Se ha propuesto que proviene de un protolito ígneo posiblemente un gabro hornbléndico que posiblemente alcanzó la facie anfibolita.

A nivel macroscópico se observa una clara foliación marcada por los anfíboles, sin embargo, a nivel macroscópico, debido al corte perpendicular de la sección delgada analizada solo se observan cortes basales de los anfíboles, que se podrían interpretar erróneamente como textura granoblástica. La composición de esta roca (ver tabla 4) está dada por anfíbol > plagioclasa, mayor que piroxenos, mayor que cuarzo y opacos.

Tabla 4: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20108 (Anfibolita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Hornblenda	45
Plagioclasa	20
Clinozoicita	9
Hipersteno	6
Feldespatos	5
Diópsido	5
Opacos	5
Cuarzo	5

En general el análisis ADI en rocas como las anfibolitas, donde generalmente se presentan bandas alternas de anfíbol y plagioclasas y por lo tanto se asocian texturas nematoblásticas, lepidoblásticas y ocasionalmente texturas relicto ígneas; se sugiere utilizar herramientas de contraste principalmente. Una de ellas es la herramienta *Invert contrast* ya que brinda la posibilidad de diferenciar mejor los distintos tipos de minerales que se presentan en la roca y ofrece cambios significativos en la visualización de la imagen los cuales permiten delimitar la textura anastomosada.

Para la identificación de minerales como la biotita que pueden presentarse en menor porcentaje dentro de la roca y que por lo general es poco visible, se recomienda utilizar filtros de realce como el filtro *Higpass* y *Local Equalization* como se aprecia en la figura 5, este proceso de filtrado resultan útil para resaltar el maclado polisintéticos de las plagioclasas y la textura granoblástica de la roca.

Para resaltar las texturas relicto y la nucleación que puedan presentarse en las anfibolitas, se sugiere implementar herramientas de filtros de realce como *Rank*, al igual que la implementación de histogramas de clase uno y clase dos con variación en los dominios de rango.

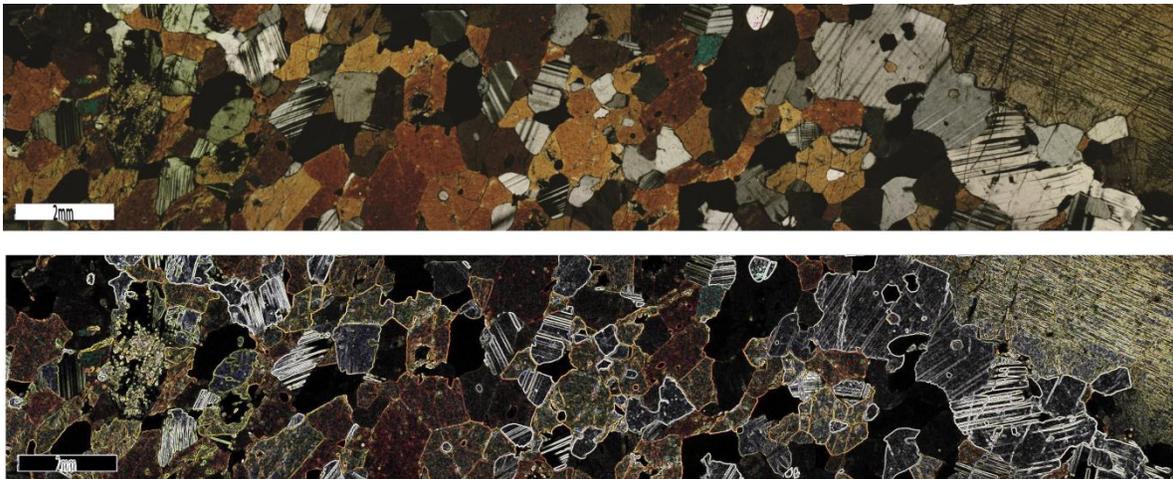


Figura 8: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una anfibolita. La imagen se encuentra bajo el proceso de filtrado con la herramienta *Local Equalization* en donde se observa una textura nematoblástica resaltada por la aplicación del filtro.

3.1.4 Migmatitas

La roca M.Met 20179 (ver figura 10) corresponde a una migmatita biotítica localizada en el municipio de El Retiro (Antioquia), es perteneciente a la unidad geológica Migmatitas de Puente Peláez correlacionable al Complejo El Retiro (*sensu* Rodríguez et.,al 2007) que se encuentran suprayacidas discordantemente por cuarcitas, con posible edad Proterozóica tardía a Paleozóica temprana (González 1976, 1980).

Las migmatitas de Puente Peláez han sido asociadas a protolitos pelíticos en facie anfibolita-granulita (zona biotita-sillimanita). A nivel de afloramiento se observa claramente la presencia de migmatitas con el desarrollo de melanozomas (parte metamórfica en facies anfibolita-granulita) y leucozomas (parte ígnea conformada por cuarzo y plagioclasa) (Rodríguez et.,al 2007).

A nivel microscópico (ver tabla 5), en el análisis de los melanozomas la muestra presenta una clara textura lepidoblástica, marcada principalmente por la foliación de la biotita.

La composición de esta roca, está dada por biotita mayor que cianita, mayor que cuarzo, mayor que plagioclasa con sericita, moscovita y clorita por alteración.

Tabla 5: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20179 (Migmatita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Biotita	55
Cianita	15
Cuarzo	10
Clorita	8
Moscovita	5
Plagioclasa	4
Sericita	3

En el análisis ADI de este tipo de roca, donde se combina la textura granolepidoblástica y granonematoblástica, los mejores resultados en el tratamiento se obtuvieron con la herramienta *Test strips* aplicando la variación de brillo y contraste. En general, se aplicaron los parámetros que se muestran en la figura 10, ya que resultaron ser los más convenientes a la hora de identificar orientaciones preferenciales de los minerales. Cabe aclarar, que los parámetros aplicados en este tratamiento de imágenes pueden presentar variaciones de acuerdo con la mineralogía de la roca, sin embargo se obtuvo que fue más notoria la identificación de las texturas dominantes cuando la variación de los valores para brillo y contraste se mantuvo en el rango aplicado; siendo 51% a 80% para valores de brillo y 67% y 47% para valores de contraste. Este procedimiento permitió el realce de los filosilicatos en contraste con los blastos de cuarzo y plagioclasa.

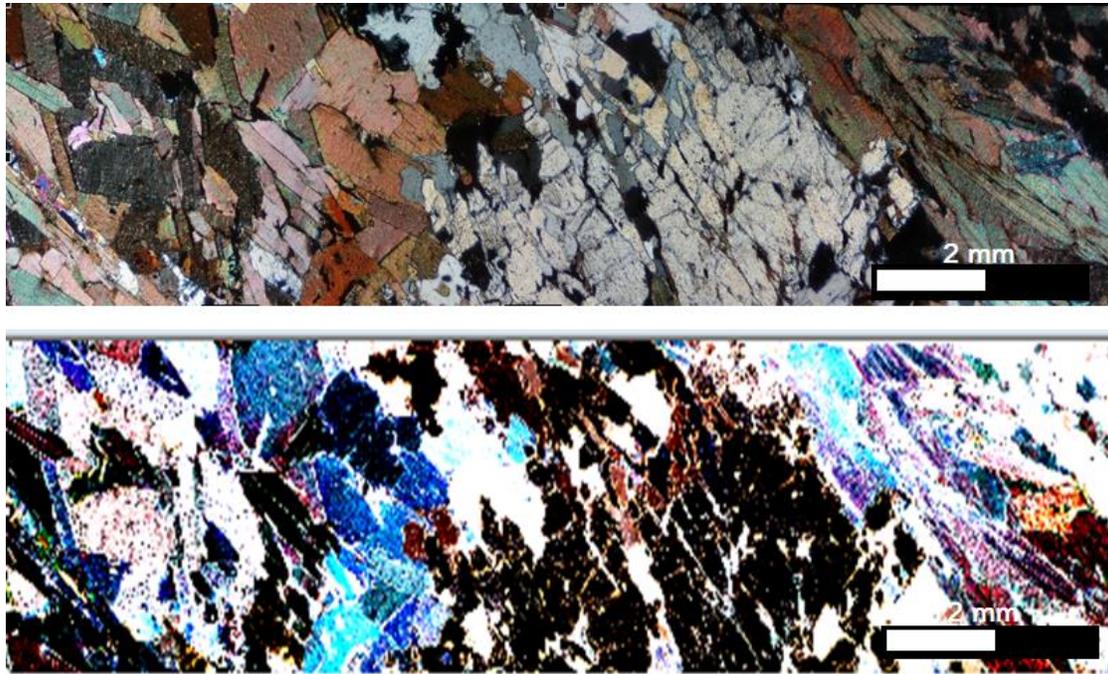


Figura 10: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una Migmatita biotítica. Se observa una textura lepidoblástica en el melanozoma, en donde los minerales micáceos en este caso biotita, se encuentran siguiendo la orientación preferencial de la roca. Se observa también, una textura granoblástica de manera sectorizada asociada al componente ígneo de la roca. Se utiliza la herramienta de contraste para invertir los colores, resaltándose la cianita en negro, los filosilicatos en azul y el cuarzo en blanco.

3.2 ADI en Rocas con texturas granoblásticas

Generalmente las rocas con este tipo de texturas son provenientes de metamorfismo de contacto y metamorfismo regional de alto grado (eclogitas y granulitas). El término de “rocas no foliadas” está dado para cualquier roca isotrópica (rocas sin orientación preferencial de minerales). En sí, corresponden a texturas granofelsicas (Winter, 2010).

A nivel de microscópico se observa como textura granoblástica, tratándose de un mosaico equi o inequigranular de cristales equidimensionales o de cristales inequidimensionales con orientación al azar. Predominan los cristales alotriomorfos, pero también se dan las texturas granoblásticas con cristales subidiomorfos (Gómez, 2006). A continuación se presentan los resultados del ADI en algunas granofels como cuarcitas, mármoles y granulitas.

3.2.1 Cuarcitas

La roca M.Met 20287 que se presenta en la figura 11, corresponde a una cuarcita localizada en la Sierra Nevada de Santa Marta (Magdalena), posiblemente asociada a las rocas grenvillianas de la Sierra Nevada de Santa Marta (Bustamante et al. 2009).

A nivel de microscopio (ver tabla 6) se observa una textura granoblástica dominada por los blastos de cuarzo en agregados de mosaicos heterogranulare, sectorizadamente se observan patrones de plegamiento que son concordantes con la estructura a nivel de muestra de mano. Mineralógicamente presenta cuarzo > feldespato> plagioclasa > filosilicatos, esfena como accesorio.

Tabla 6: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20287 (Cuarcita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	75
Feldespato	7
Biotita	6
Plagioclasa	5
Moscovita	5
Esfena	2

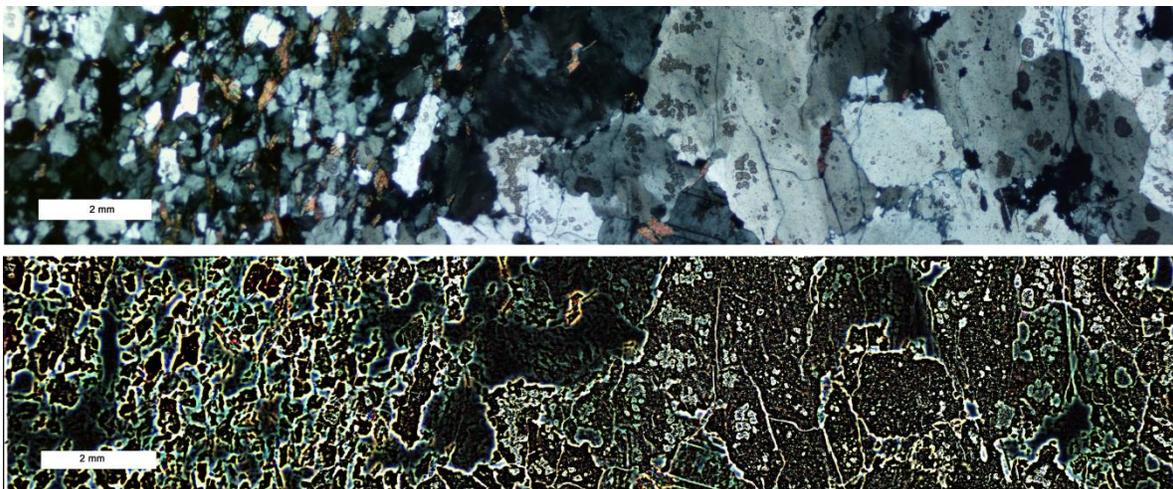


Figura 11: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una cuarcita. Se observa una textura granoblástica en mosaico heterogranular, en donde los granos de cuarzo son resaltados mediante la variación en los rangos de los histogramas de clase 1, los bordes de los minerales son delimitados y resaltados, es posible observar algo de nucleación hacia los bordes de los granos más gruesos.

En el caso de las cuarcitas resultó útil implementar histogramas de clase uno como se observa en la figura 12, ya que estos son los encargados de permitir la identificación de los granos de cuarzo (mineral dominante) principalmente basándose en las coloraciones que estos adquieren tras la aplicación de los rangos de dominio de los histogramas. Para identificarlos es importante jugar con estos rangos, ya que algunos presentan texturas de nucleación que no son visibles bajo un mismo rango, y por lo tanto es importante variarlos para poder identificar mejor esta textura.

Adicionalmente, resultó útil la aplicación de la herramienta de *Measure distance* para cuantificar los tamaños de los blastos de cuarzo que conforman este mosaico heterogranular.

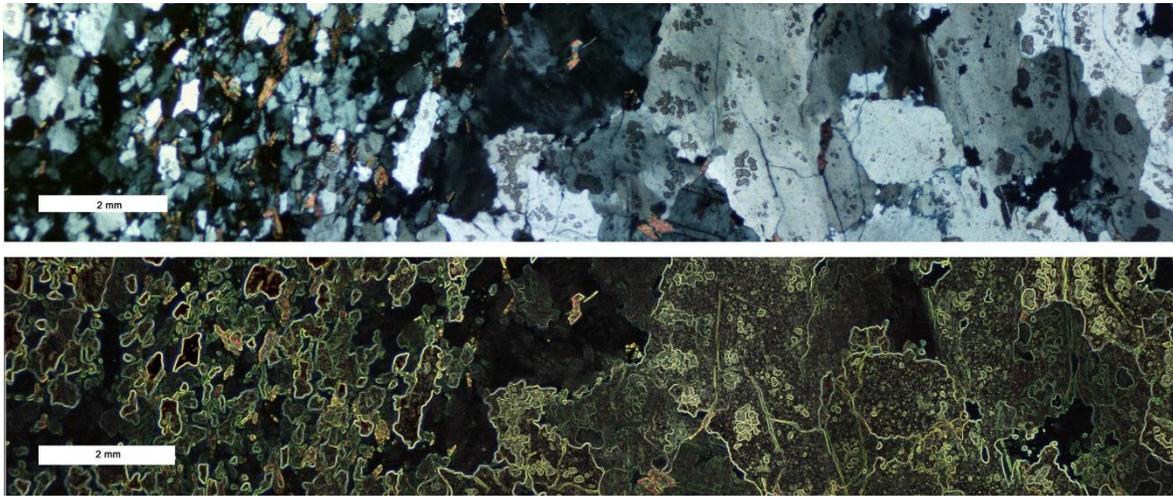


Figura 12: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una cuarcita. Se observa una textura granoblástica de manera sectorizada. Se observa que no hay equigranularidad en la roca. Es posible identificar extinción ondulatoria por posibles eventos dinámicos. Se utilizó la herramienta segmentación para delinear los bordes de los granos que le dan textura granoblástica a la roca.

3.2.2 Mármoles

La roca M.Met 20041 que se presenta en la figura 13, corresponde a un mármol localizado en el municipio de Payandé (Tolima), es correlacionable con las calizas triásicas de la Formación Payandé (Alvarán et. al, 2011), en la zona del skarn.

A nivel de microscopio (ver talbla 7), se identifica una textura granoblástica gruesa en los carbonatos y mosaíco granoblástico fino en la zona dominada por cuarzo. Se observan claramente las maclas tipo *Twins* en los carbonatos. En general se puede clasificar como un mármol impuro con contenido de grafito.

La composición mineralógica de esta roca está dada por Calcita > Cuarzo > Grafito.

Tabla 7: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20041 (Mármol) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Calcita	90
Cuarzo	6
Grafito	4

Para el análisis ADI en mármoles se sugiere la aplicación de filtros de realce como *HiGauss* como se muestra en la figura 13 y filtros de borde como *Roberts* ya que permiten realzar de manera más acertada los bordes de los carbonatos, los tipo de macla *Twins* y otros minerales accesorios.

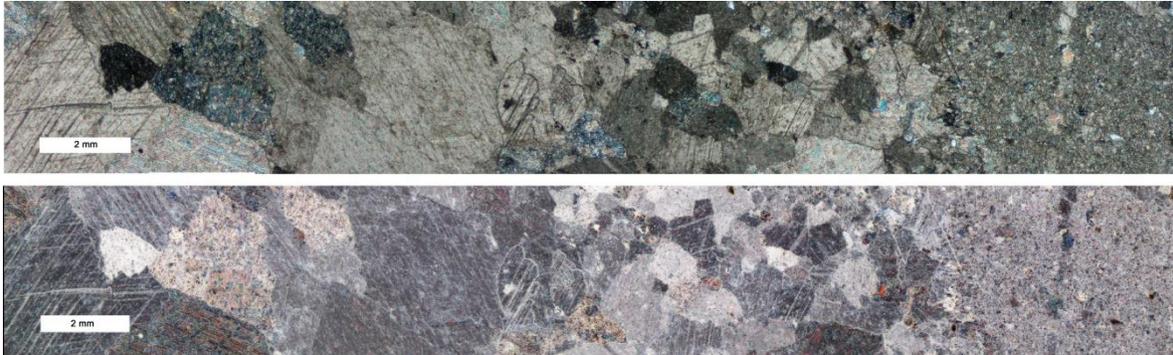


Figura 13: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a un mármol. Se observa una textura granoblástica en mosaicos de diferentes tamaños, reduciéndose el mismo hacia los contactos donde la roca es más fina en muestra de mano. Los granos de calcita son rebordeados y resaltados mediante un proceso de filtrado con *HiGauss*. Note que las maclas *twins* características de los cristales de carbonato son más notorias bajo la aplicación de esta herramienta.

Best Bit Equalization como se observa en la figura 14, permite acentuar los contrastes existentes en los cristales y los procesos de alteración-

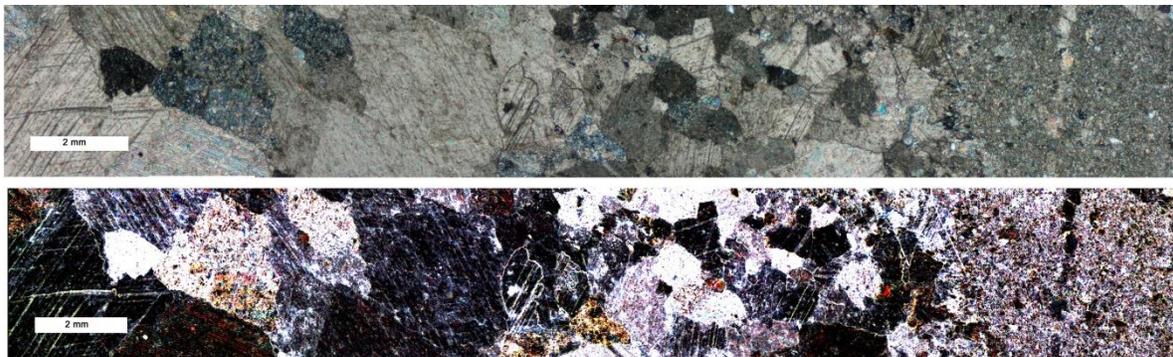


Figura 14: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a un mármol. Se observa una textura granoblástica de manera general, algunos de los granos de calcita presentan un grado bajo de meteorización que es resaltado mediante la aplicación de *Best Bit Equalization*.

3.2.3 Granulitas

La roca M.Met 20184 que se presenta en la figura 15, corresponde a una xenolito de granulita (Royo & Gómez, 1942), localizada en el municipio de Mercaderes (Cauca), inmerso en la unidad geológica Toba de Mercaderes con posible edad Pleistocena(?) (Romero & Rodríguez, 2002), estos xenolitos han sido ampliamente estudiados por (Weber 1998, Weber et al., 2010) y han sido clasificados como hornblenditas, granulitas y neises en facies granulitas, asociadas a un protolito ígneo de la corteza baja.

A nivel de microscopio (ver tabla 8) en la muestra analizada, se observa una textura granoblástica equigranular, polygonalizada muy bien definida, conformada por piroxenos > hornblenda > granate > zoicita. Se observa el fracturamiento de los blastos sugiriendo afectación por metamorfismo dinámico frágil.

Tabla 8: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20184 (Granulita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Hornblenda	40
Clinopiroxeno	30
Ortopiróxeno	15
Granate	10
Zoicita	5

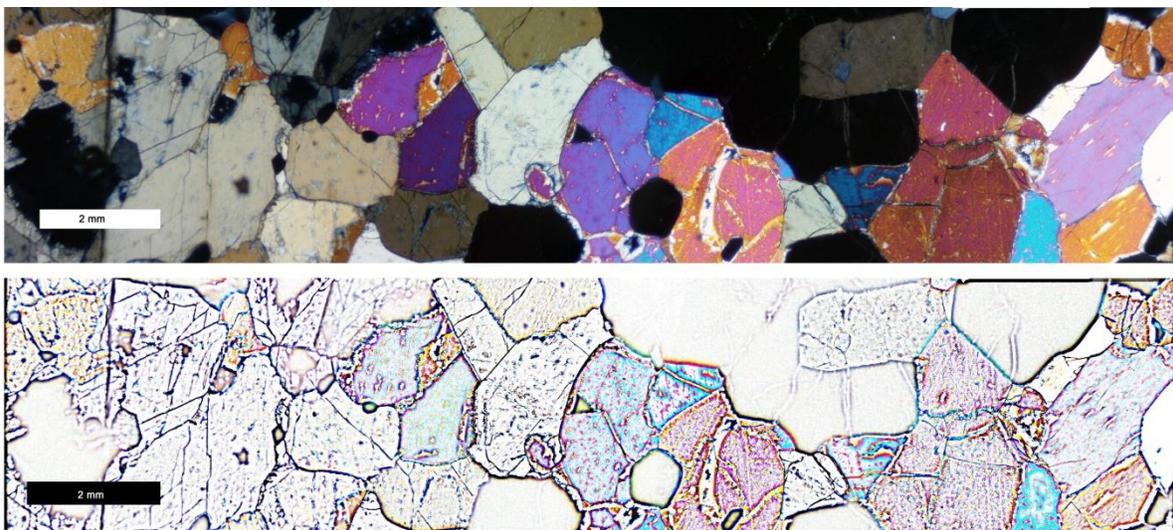


Figura 15: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una granulita. Se observa una textura granoblástica, en donde los bordes de los minerales de hábito prismático son resaltados por la herramienta *Invert Image*.

Para el análisis ADI en granulitas se utilizaron únicamente filtros de contrastes ya que no se distinguen rasgos texturales que indiquen una orientación preferencial de los minerales por causa del metamorfismo. Sin embargo, para algunos de las zonas con dominio de piroxeno, especialmente los clinopiroxenos, se observaron orientaciones que estuvieron sesgadas a las caras prismáticas más elongadas al igual que en algunos cristales de biotita, para estas características de las rocas granulíticas se utilizaron herramientas como *Invert Image* como se observa en la figura 15 con el fin de invertir los contrastes dominantes en las rocas e identificar la variación de la composición mineralógica. Para resaltar el maclado polisintético característico de las plagioclasas se utilizó *Invert Contrast*, en donde se

realzan las maclas y simultáneamente se diferencian los minerales micáceos como las biotitas, las cuales generalmente adquieren una tonalidad azul al aplicar esta herramienta. También resulto útil implementar filtrado tipo *LoPass* para resaltar las fracturas y clivajes de los minerales presentes como se observa en la figura 16.

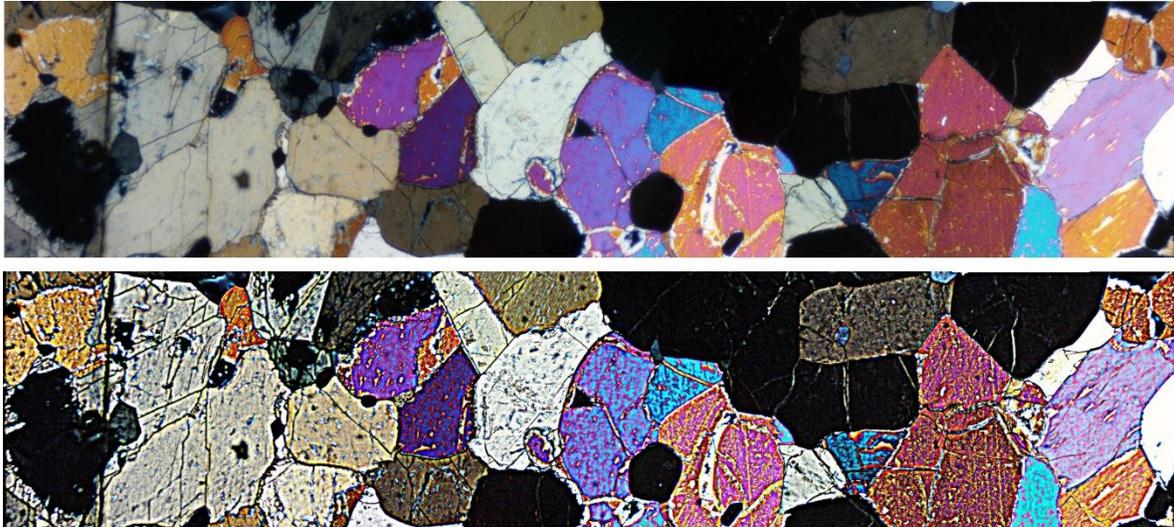


Figura 16: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una granulita. Se ha utilizado un filtro de tipo *LoPass*, permitiendo el realce de las características típicas de los granos minerales, en este caso orto y clinopiroxenos.

3.3 ADI en Rocas con texturas y/o foliaciones de metamorfismo dinámico

Las rocas con foliación por metamorfismo dinámico, en las cuales los minerales conservan una orientación preferente (milonita) o reducción mecánica de los granos (cataclasita), son resultado de procesos deformacionales de este tipo de metamorfismo, en el cual ocurre fragmentación dúctil o frágil. Adicionalmente, es común encontrar texturas secundarias específicas como textura mortero, formas augen, crenulación y extinción ondulatoria en los filosilicatos y el cuarzo principalmente (Winter, 2010).

3.3.1 Cataclasitas

La roca M.Met 20051 que se presenta en la figura 17, corresponde a una cataclasita localizada en el municipio de Los Guros (Santander), es correlacionable con la unidad geológica Gneis de Bucaramanga (Urueña & Zuluaga, 2011).

Se ha asociado a protolito pelítico, metamorfoseado posiblemente en facie esquisto verde y posteriormente expuesto a metamorfismo dinámico dúctil y frágil, desarrollando la textura milonítica y posteriormente cataclástica. La foliación milonítica, está definida por la orientación elongada de biotita y moscovita, extinción y clivaje de crenulación, con reducción progresiva del tamaño del grano; se presentan sectores con cuarzo muy fracturado, evidenciando la deformación en estado frágil. Se observa rotación de los porfidoblastos de plagioclasa embebidos en una matriz altamente deformada y fracturada.

Tabla 9: Porcentajes mineralógicos correspondientes a la muestra de roca M.Met 20051 (Cataclasita) perteneciente a la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	55
Actinolita	15
Moscovita	10
Plagioclasa	8
Microclina	6
Clorita	6

El análisis ADI (ver figuras 17 y 18) para las rocas con metamorfismo dinámico, comprenden tamaños de grano fino y protolitos muy variables, por esta razón, se encontró que es de gran utilidad la implementación de herramientas de máscaras, las cuales brindan la posibilidad de ocultar o resaltar los granos que aún se encuentran más enteros, de esta forma resulta más sencillo el cálculo de un porcentaje de matriz asociado a los procesos de metamorfismo dinámico.

Para identificar evidencias de formación dúctil expresadas en la foliación milonítica de la roca, estrías o texturas de crenulación se sugiere la aplicación de filtros 3D los cuales marcan con mayor facilidad este tipo de características. Lo anterior, se debe principalmente a que el tamaño de grano en este tipo de rocas es muy fino y se requieren filtros de mayor realce a los que se han utilizado para otro tipo de rocas anteriormente. En la figura 17 se observa una roca milonítica tratada digitalmente mediante la aplicación de máscaras con la herramienta *Mask* y posteriormente se le aplicaron filtros en 3D tales como *Dilate* y *Pruning*, en donde se puede observar que se resalta con mayor facilidad la poca foliación que esta tiene.

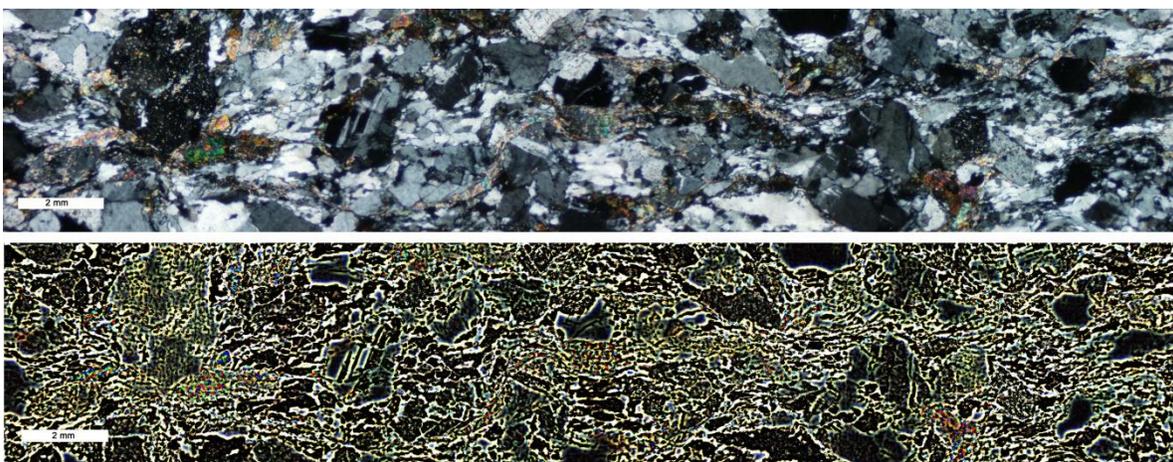


Figura 17: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una cataclasita. Tratada mediante la herramienta *Mask* y posteriormente aplicación de filtro 3D *Dilate* para resaltar la orientación de la foliación de la roca.

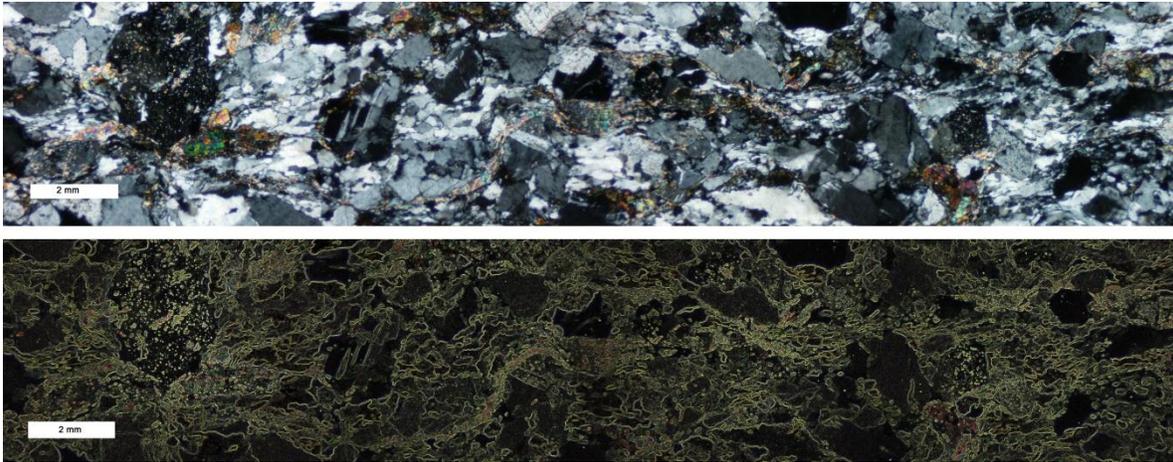


Figura 18: Imagen tratada digitalmente. Corresponde a una cataclasita. Tratada mediante la herramienta Mask y posteriormente aplicación de filtro 3D *Pruning* para resaltar la orientación de la foliación de la roca.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente estudio, han permitido identificar herramientas para el análisis ADI en rocas metamórficas que pueden facilitar los procesos de enseñanza-aprendizaje. Generalmente, el reconocimiento de patrones texturales representa una de las mayores dificultades en el análisis petrográfico de rocas metamórficas; las herramientas que se tenían disponibles hasta ahora para este fin, se encontraban restringidas a los libros y páginas web de petrografía, y aunque, ambos representan herramientas clave para el estudio de las rocas, han sido creados para casos muy específicos y puntuales. El análisis ADI, permite jugar con las diferentes herramientas y aplicaciones y de esta manera darle un tratamiento y una interpretación más acuciosa a cada una de las rocas que se analiza. La identificación del conjunto de herramientas para el análisis ADI en rocas metamórficas permitió agrupar las herramientas para el estudio de las rocas foliadas, no foliadas, miloníticas y cataclásticas

Es importante resaltar que, con este estudio no se pretende desarticular al alumno de la interacción personal con el profesor, por el contrario, se pretende que se siga manteniendo la interacción no solo con los recursos y herramientas para resolver problemas, sino que también sigan existiendo las discusiones entre los alumnos mismos y con el profesor, cuyo papel seguirá siendo el protagonista de la transferencia de conocimientos. Tal como el conocimiento científico se genera a partir de solución de problemas, confirmación de hipótesis, planteamiento de interpretaciones y demás; no se reduce sólo a esto, sino que también aporta y ahonda en futuros problemas por resolver y/o problemas que no fueron resueltos en su totalidad en el pasado. No obstante, todo lo que implique conocimiento y transferencia del mismo, no se verá ejecutado satisfactoriamente si desde ambas partes no se pacta un compromiso inicial, y se siguen a cabalidad las metodologías propuestas para tal fin.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para la identificación de la mineralogía de los diferentes tipos de roca, se utilizó de forma indiscriminada la herramienta *Invert Contrast* o *Invert Image*, ya que ambas resultaron ser las más útiles para la identificación de minerales, en especial los minerales micáceos.
- Los filtros en 3D y de largo espectro, fueron los filtros que más se utilizaron para resaltar texturas en tipos de roca que son de grano fino, ya que resultaron ser lo más potentes para la identificación de los granos minerales y la tendencia de los mismos a marcar ciertas texturas.
- Los filtros en 3D y de largo espectro, también fueron útiles para la identificación de los porcentajes de matriz, en rocas que han sufrido algún evento de metamorfismo dinámico.
- Los filtros de realce fueron los más comunes y útiles para resaltar patrones texturales en rocas que tienen tamaño de grano entre medio y grueso y que presentan orientación preferencial.
- Las texturas granoblásticas, nematoblásticas y lepidoblásticas no pueden ser resaltadas bajo el uso de una sola herramienta, es necesario implementar varias herramientas simultáneamente para resaltarlas.
- Las herramientas que presentan parámetros ajustables resultan ser muy útiles para resaltar texturas específicas que son menos comunes, ya que pueden ser ajustadas de acuerdo con la mineralogía y el tipo de roca que se tiene.
- Aunque se encontraron herramientas de gran utilidad para identificación de minerales, se sugiere llevar a cabo el análisis petrográfico antes de realizar el tratamiento digital de imágenes, de esta manera resulta ser más sencillo identificar patrones texturales o mineralogía que fue previamente descrita.

6. REFERENCIAS

- Alvarán, M. Naranjo, S. Zapata, E. 2011. Skarn de cobre en la mina Río Frío, Payandé-Tolima: Aspectos mineralógicos, metalográficos y microtermométricos. Boletín de Ciencias de la Tierra. 14p.
- Amaya, S. 2012. Caracterización petrográfica y petrológica de los neises, migmatitas y granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamento de Santander. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. 130p.
- Bustamante, C. Cardona, A. Saldarriaga, M. Garcia-Casco, A. Valencia, V. Weber, M. 2009. Metamorfismo de los esquistos verdes y anfíbolitas pertenecientes a los

esquistos de Santa Marta, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia): ¿Registro de la colisión entre el arco Caribe y la margen Suramericana? Boletín de Ciencias de la tierra, Núm. 25.

- Gálvis, J.,R, de la Espriella, A. Fandiño & H. Pinto. 1990. Geología de la Hoya hidrográfica del Río Micay. Academia Colombiana de Ciencia. 17.
- Gómez, J. 2006. Metamorfismo: Apuntes de la asignatura Petrografía Endógena II (Módulo I). Tercer curso de la Licenciatura de Geología. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, 268p.
- González, H., 1976. Geología del Cuadrángulo J8 (Sonsón). Ingeominas. Informe 1704. Medellín. 421p.
- González, H., 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del Mapa Geológico de Colombia. Bol. Geol. Ingeominas, Bogotá. 23 (1), pp. 1174.
- Maya, M., 2001. Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia. INGEOMINAS, 54p.
- Restrepo, J.J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Informe para promoción a profesor titular, Univ. Nacional, Fac. Ciencias, Medellín, pp 1-276
- Rodríguez, G. González, H. Zapata, G. 2007. Complejo El Retiro, Cordillera Central, Colombia. INGEOMINAS. Boletín de Ciencias de la Tierra. Medellín.
- Romero, F.H. & Rodríguez-Vargas, A. I. 2002. Caracterización mineralógica de los corindones de Mercaderes, Cauca (Colombia).- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 27, pp. 121-142, 2 Figs., 10 Láminas, 2 Tablas, Bogotá.
- Royo & Gómez, J. 1942. Contribución a la geología del foso Cauca – Patía CEGOG, n. 5, p. 118 - 211, Bogotá.
- Torres, R.L Roldán. García-Casco, A. Molina Palma. J. F. 2004. Petrología Metamórfica, Asistente de Prácticas. Departamento de Mineralogía y Petrografía Universidad de Granada. Versión 2004a.
- Urueña, L. & Zuluaga, C.A. 2011. Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas - Santander. Geología Colombiana, Edición Especial, 36 No. 1, pp 37-56.

- Weber, M. (1998) The Mercaderes - Rio Mayo Xenoliths, Colombia: Their bearing on mantle and crustal processes in the Northern Andes (Tesis de Doctorado).- 189 p., University of Leicester, Leicester, UK.
- Weber, M.; Tarney &, J.; Kempton, P. & Kent, R. 2001. Crustal make-up of the northern Andes: evidence based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia.- Tectonophysics, vol. 399, p. 49-82, Amsterdam.
- Winter, D. 2010 An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall. Format: Hardbound Book; 720p.