

CONFORMACIÓN DEL ATLAS PETROGRÁFICO Y DE EVENTOS  
MAGMÁTICOS DE ROCAS ÍGNEAS DE COLOMBIA, A PARTIR DE LA  
COLECCIÓN DEL LABORATORIO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT:  
UNA HERRAMIENTA DIVULGATIVA.

SUSANA TORO ZAPATA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Geóloga

Directora:

MARÍA ISABEL MARÍN CERÓN, PhD

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

GEOLOGÍA

MEDELLIN

2016

## TABLA DE CONTENIDO

### CAPÍTULO 1. CONFORMACIÓN DEL ATLAS PETROGRÁFICO Y DE EVENTOS MAGMÁTICOS DE ROCAS ÍGNEAS DE COLOMBIA, A PARTIR DE LA COLECCIÓN DEL LABORATORIO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT: UNA HERRAMIENTA DIVULGATIVA

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>2. OBJETIVO</b> .....	5
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	6
<b>4. DESARROLLO Y RESULTADOS</b> .....	6

### CAPÍTULO 2. ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS DE COLOMBIA, A PARTIR DE LA COLECCIÓN DEL LABORATORIO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT: UNA HERRAMIENTA DIVULGATIVA.

<b>RESUMEN</b> .....	8
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	9
2.1 ETAPA DE COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN .....	10
2.2 ETAPA DE LABORATORIO Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....	10
2.2.1 Georreferenciación de las muestras. ....	10
2.2.2 Análisis petrográfico .....	10
2.2.3 Procesamiento de imágenes digitales.....	11
2.3 ETAPA DE CONSOLIDACIÓN DEL ATLAS.....	11
2.3.1 Consolidación de las Cartas de eventos .....	11
2.3.2 Construcción de mapas conceptuales.....	12
2.4 DESARROLLO TECNOLÓGICO POR PROYECTO 50 .....	14
<b>3. RESULTADOS</b> .....	14
3.1 SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN TECTONO-MAGMÁTICA EN COLOMBIA .....	14
3.2 GEORREFERENCIACIÓN .....	17
3.3 DISEÑO PLATAFORMA WEB .....	20
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	29
<b>5. REFERENCIAS</b> .....	30

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO PETROGRÁFICO EN ROCAS ÍGNEAS**

<b>RESUMEN</b> .....	32
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	33
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	35
A. ANÁLISIS PETROGRÁFICO.....	35
B. TOMA DE FOTOGRAFÍAS .....	35
C. ELABORACIÓN DE MOSAICOS.....	37
D. ANÁLISIS TEXTURAL MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES (ADI) .....	37
<b>3. RESULTADOS</b> .....	37
3.1 EVENTOS VOLCÁNICOS.....	37
3.1.1 Basaltos.....	37
A. BASALTOS DEL COMPLEJO SANTA CECILIA-LA EQUIS.....	38
B. DIABASA COMPLEJO QUEBRADAGRANDE .....	40
3.2 EVENTOS VOLCÁNICOS DE COMPOSICIÓN INTERMEDIA A ÁCIDA.....	41
A. RIOLITA DEL COMPLEJO ÍGNEO DE OCAÑA.....	42
B. PÓRFIDO DACÍTICO DE VILLANUEVA, NARIÑO .....	43
3.3 EVENTOS PLUTÓNICOS.....	45
3.3.1 Rocas Ultramáficas .....	45
A. DUNITA GORGONA.....	47
B. PERIDOTITA MEDELLÍN.....	48
3.3.2 Eventos plutónicos máfico, intermedio y félsico .....	49
A. GABRO DE ANSERMA, CALDAS.....	50
B. DIORITA DE ALTAVISTA.....	51
C. GRANITO DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO.....	52
3.4 EVENTOS PIROCLÁSTICOS.....	53
A. PÓMEZ DEL VOLCÁN AZUFRAL.....	54
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	56
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	57
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	58

**CONFORMACIÓN DEL ATLAS PETROGRÁFICO Y DE EVENTOS  
MAGMÁTICOS DE ROCAS ÍGNEAS DE COLOMBIA, A PARTIR DE LA  
COLECCIÓN DEL LABORATORIO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD  
EAFIT: UNA HERRAMIENTA DIVULGATIVA.**

## 1. INTRODUCCIÓN

La organización actual de la información de las rocas ígneas de la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT, carece de una estandarización clara y georeferenciación, que permita diagnosticar la falta de información, la planificación de toma de muestras y su asociación espacio-temporal a los eventos magmáticos identificados en Colombia, debido a esto se pretende compilar estas muestras en una plataforma tecnológica, para consolidar el Atlas de rocas ígneas de Colombia.

Esta herramienta divulgativa intenta acercarse a los procesos pedagógicos del curso de rocas ígneas, permitiendo a los estudiantes usar plataformas tecnológicas e interactivas, donde puedan relacionar el análisis de las rocas con los eventos magmáticos, la información secundaria como los mapas conceptuales, el glosario y las fotografías con texturas representativas y su debido procesamiento, para afianzar el conocimiento petrográfico de las rocas ígneas.

La finalidad de este trabajo es dejar a los estudiantes, profesores, personal del laboratorio de geología de la universidad y cualquier tipo de usuario interesado en el estudio de las ciencias de la Tierra, una herramienta que sirva para el apoyo a los procesos de enseñanza-aprendizaje, y la formulación de proyectos futuros, además de brindar la posibilidad de complementarlo y enriquecerlo con nuevas muestras, análisis geoquímicos y descripciones más amplias con respecto al tipo de afloramiento, recolector y principalmente su exacta localización.

Esencialmente se trata de presentar un recurso didáctico al estudiante, que pueda explorar en su proceso de aprendizaje y despierte su motivación a las temáticas relacionadas con rocas ígneas.

## 2. OBJETIVO

### 2.1 Objetivo general

Estructurar el Atlas petrográfico y de eventos magmáticos de rocas ígneas de Colombia, a partir de la información secundaria disponible en la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT, como una herramienta divulgativa, por medio de una plataforma tecnológica.

### 2.2 Objetivos específicos

- Revisar y analizar la información secundaria por medio de la conformación de bases de datos: petrográfica y geocronológica del magmatismo en Colombia, así como recopilar información de trabajos de grado donde se hayan trabajado las muestras de la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.
- Georeferenciar las muestras de rocas ígneas existentes en el laboratorio de geología de la Universidad EAFIT y seleccionar las secciones delgadas pertenecientes a Colombia, para realizar el análisis petrográfico (mineralógico y textural) de la colección para la conformación del Atlas.
- Seleccionar las texturas representativas para el procesamiento de las imágenes por medio de software.

- Sintetizar la información colectada en carta de eventos magmáticos y mapas conceptuales, relacionándolos con la información secundaria.
- Estandarizar y organizar la información de la colección de rocas ígneas e integrarla con las bases de datos desarrolladas en la plataforma tecnológica.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Debido a la falta de estandarización de la información disponible en la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT, y de la importancia de la ubicación espacio-temporal de los eventos magmáticos de Colombia, para los estudiantes ha sido una gran dificultad vincular en estudio de las muestras con los eventos de formación y la localización en un mapa regional.

Por lo que se propone esta herramienta más dinámica, donde se puedan identificar las principales características petrográfica (texturales y mineralógicas) y el uso del análisis de imágenes, con el fin de ayudar al estudiante a desarrollar sus habilidades de interpretación.

### **4. DESARROLLO Y RESULTADOS**

Como resultado del análisis y recopilación de las muestras representativas de rocas ígneas de Colombia del laboratorio de geología de la universidad, se presentan dos artículos de divulgación:

1. Atlas de rocas ígneas de Colombia, a partir de la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT: Una herramienta divulgativa.

(Toro & Marín-Cerón, 2016).

2. Análisis digital de imágenes como herramienta para el estudio petrográfico en rocas ígneas (Toro & Marín-Cerón, 2016).

**ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS DE COLOMBIA, A PARTIR DE LA COLECCIÓN  
DEL LABORATORIO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT: UNA  
HERRAMIENTA DIVULGATIVA.**

TORO ZAPATA, S; MARÍN-CERÓN, M.I.

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

Autor de correspondencia: [storoza@eafit.edu.co](mailto:storoza@eafit.edu.co)

## RESUMEN

La consolidación del Atlas de Rocas Ígneas de Colombia (ARI), a partir de la colección existente en la Universidad EAFIT, es el resultado de la clasificación y selección de las muestras de rocas ígneas, su georeferenciación y su relación con los eventos tectono-magmáticos identificados en Colombia, con el propósito de vincular la distribución de las muestras espacio-temporalmente, con el marco geológico colombiano. Adicionalmente, se realizaron mapas conceptuales y glosarios temáticos, compilados en una plataforma interactiva y tecnológica desarrollada con el apoyo de Proyecto 50<sup>1</sup>, de la Universidad EAFIT, cuya plataforma abarca: (1) Mapas conceptuales en CmapTools almacenados en el servidor de mapas de la Universidad; (2) servicio de mapas en la web de Google Earth; (3) repositorio de recursos digitales Dspace, donde se almacenan las descripciones como metadatos; Como resultado final, se desarrolló una herramienta pedagógica-interactiva, que permitirá afianzar los procesos de enseñanza-aprendizaje de la materia de rocas ígneas y de geología colombiana.

**Palabras clave:** Atlas, rocas ígneas, eventos tectono-magmáticos, plataforma interactiva, proceso de aprendizaje, mapas conceptuales.

## ABSTRACT

The consolidation of the Atlas of Igneous Rocks (AIR) of Colombia at EAFIT University, is based on the classification and selection of samples of igneous rocks from the geological lab. The rocks georeferencing and their relationship with the tectono-magmatic events identified so far in Colombia, was done with the purpose to link the spatio-temporal distribution of samples with the geological Colombian framework. In addition, a series of concept maps and the thematic glossaries were compiled in the interactive and technological platform, developed with the support of Proyecto 50 of the EAFIT University. This platform includes the following features: (1) Conceptual maps in CmapTools stored on the server maps of the University; (2) mapping service in Google Earth web; (3) a DSpace repository of digital resources in which the descriptions are stored as metadata; and at the end, the result is an educational tool that will permit to enhance the teaching-learning processes in the subject of Igneous Rocks and geology of Colombia.

**Key words:** Atlas, igneous rocks, tectonic-magmatic events, interactive platform, learning process, conceptual maps.

---

<sup>1</sup> Proyecto 50 es el laboratorio para la Innovación y el Aprendizaje de la Universidad EAFIT.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creación del conjunto de Atlas de rocas que se viene adelantando en el departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT (p.e. rocas metamórficas Marín-Cerón & Londoño, 2015, y de rocas ígneas, presente proyecto), se construye a partir de la necesidad de desarrollar nuevas estrategias, que apoyen los procesos de enseñanza-aprendizaje, y que se conviertan en herramientas para los estudiantes y/o profesionales, en sus estudios y/o trabajos en el campo de las ciencias de la Tierra, a partir de la compilación, georeferenciación y análisis de las muestras de rocas (metamórficas e ígneas) que dispone el laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

La integración de la información, se sintetizó en una plataforma web interactiva, donde se encuentra la descripción de las muestras macro y microscópicas, su distribución en relación con los eventos tectono-magmáticos identificados en los Andes del Norte, apoyo con mapas conceptuales, y glosario de términos claves.

La inspiración del presente proyecto, surgió a partir de la siguientes postulados: (1) Que tipos de rocas (existentes en la colección de rocas del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT) son representativas de los diferentes eventos tectono-magmáticos identificados en los Andes del Norte; (2) Que características presentan esta rocas a nivel macro y microscópico; (3) Cuales son los tipos de texturas más predominantes y como se observan; y (4) Como se ligan los modelos conceptuales de formación de las rocas ígneas en sus diferentes ambientes tectónicos en el marco de la geología colombiana.

Finalmente, el presente artículo, pretende dar a conocer la metodología utilizada para la conceptualización del ARI, y la estructuración final mediante una herramienta web interactiva de consulta, que apoye en los procesos de divulgación de la ciencia y en los procesos de enseñanza-aprendizaje de las ciencias de la Tierra, con el fin de afianzar en los estudiantes los conceptos asociados a las premisas anteriormente mencionadas.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la conceptualización del ARI, y la estructuración final mediante una herramienta web interactiva de consulta, se resume en la figura 1 y se explica en detalle a continuación:

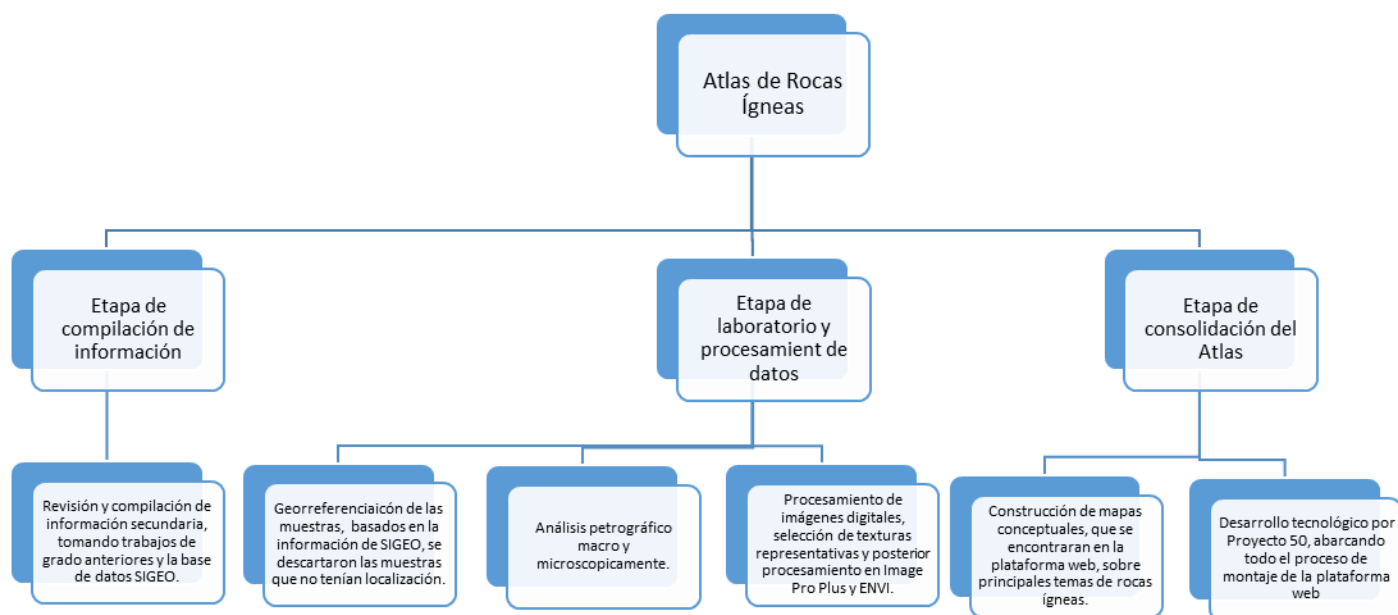


Figura 1. Diagrama de la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del Atlas de Rocas Ígneas.

## 2.1 Etapa de compilación de información

Durante esta etapa se realizó la revisión bibliográfica que incluyó: modelos de atlas realizados en el mundo, modelos de evolución tectono-magmática en los Andes del Norte, información básica sobre petrología y petrografía ígnea (Winter, 2014) y la información disponible en SIGEO<sup>2</sup> (p.e. trabajos de grado, investigaciones, proyectos de campo).

## 2.2 Etapa de laboratorio y procesamiento de datos

### 2.2.1 Georreferenciación de las muestras.

Se localizaron las muestras según la descripción dada por el recolector o el donante que se registra en SIGEO, debido a la inexistencia de coordenadas precisas, se asignaron las ubicaciones teniendo en cuenta la localización existente como: departamento, municipio, corregimiento, vereda, camino y/o quebrada. El proceso inicial se realizó en Google Earth y se trasladaron los puntos de localización al programa ArcGis 10.2.1 de donde se extrajeron las coordenadas finales.

### 2.2.2 Análisis petrográfico

Esta etapa consistió en el análisis petrográfico macro y microscópico (p.e. mineralogía, composición modal y análisis textural), de las muestras de la colección de rocas ígneas del laboratorio de la Universidad EAFIT, conformada por 280 muestras. Para la conformación del

<sup>2</sup> SIGEO: Sistema de información para los laboratorios de geología de la Universidad EAFIT

ARI, se partió de la selección de 85 muestras, basados en el criterio de georreferenciación (Ver anexo I).

El análisis petrográfico comenzó con el análisis macroscópico (p.e. color, tamaño de grano, tipo de roca: plutónica, volcánica, subvolcánica o piroclástica), complementado con el análisis mediante esteromicroscopio binocular. Posteriormente se inició el análisis microscópico, que incluyó: (1) Análisis mineralógico porcentual; (2) relaciones entre granos; (3) Análisis textural (basado en Winter 2014) y (4) Análisis modal (Le Maitre, et al. 2002). En este proceso se identificaron la existencia de procesos de alteraciones y mineralizaciones superpuestas. Durante esta etapa se hizo uso del Microscopio petrográfico Olympus BX 41, con carro portamuestras UFMP Olympus y cámara fotográfica Moticam 580 5.0 MP. Toda la información adquirida fue organizada en forma de base de datos y subida a la plataforma web interactiva en forma de metadatos.

### **2.2.3 Procesamiento de imágenes digitales**

A partir de la base de datos realizada, se hizo la selección de las texturas representativas de cada una de las secciones delgadas que conforman el ARI. Se hizo especial énfasis en el reconocimiento de las texturas típicas como lo resume el mapa conceptual de texturas de las rocas ígneas (figura 2), realizado como material complementario de la plataforma web de mapas conceptuales.

Para el análisis textural y el Procesamiento Digital de Imágenes PDI, se tomaron 94 fotos de 10 secciones delgadas (Anexo V). Cada imagen adquirida, se escaló debidamente para ser procesadas con el software Image ProPlus y ENVI, para resaltar minerales, texturas y alteraciones, con el fin de facilitar el entendimiento de la textura en relación con la formación de la roca. La información obtenida mediante este procesamiento se encuentra ampliamente analizado en el artículo sometido: Análisis digital de imágenes como herramienta para el estudio petrográfico en rocas ígneas (Toro & Marín-Cerón, 2016 en revisión).

## **2.3 Etapa de consolidación del Atlas**

Esta etapa se compone de varios elementos descritos a continuación y dan como resultado el ARI en forma de plataforma interactiva.

### **2.3.1 Consolidación de las Cartas de eventos**

Basado en la carta de eventos de Leal-Mejía (2011), se realizó la vinculación de las muestras con los eventos magmáticos sensu Cediel et al. (2011), de forma que se lograra identificar como las muestras de la colección del laboratorio representan los diferentes eventos tectono-magmáticos (Anexo IV).

### **2.3.2 Construcción de mapas conceptuales**

Con el fin de aportar al afianzamiento de los conceptos básicos en el estudio de rocas ígneas, la siguiente fase constó en la elaboración de los siguientes mapas conceptuales: (1) Definición de magmatismo, (2) Clasificación rocas ígneas, (3) Texturas, (4) Serie de Reacción de Bowen, (5) Rocas Extrusivas - Volcánicas, (6) Rocas Intrusivas - Plutónicas, (7) Ambiente tectónico de Subducción, (8) Ambiente tectónico de Basaltos de islas oceánicas (OIB) y (9) Ambiente tectónico de basaltos en Dorsales Meso-oceánicas (MORB). Para su elaboración se utilizó el software CmapTools versión 6.01.01 y se utilizó el libro de Winter (2014) como documento base (Ver anexo III).



## **2.4 Desarrollo tecnológico por Proyecto 50**

Esta etapa fue desarrollada mediante el apoyo de Proyecto 50 de la Universidad EAFIT, consistió en la implementación de la plataforma web por medio de tecnologías para el frontend como JavaScript, con frameworks como JQuery, AngularJS. Por medio de servicios Restful se comunica con varias plataformas, entre estas Dspace, el cual es el repositorio de recursos digitales donde se almacenan las imágenes, y se describen mediante metadatos las muestras de roca; CmapTools el cual almacena mapas conceptuales; Google Earth que permite señalar donde se encuentran las muestras de rocas.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Síntesis de la evolución tectono-magmática en Colombia**

El magmatismo registrado en Colombia, se puede ver representado a lo largo de los diferentes periodos geológicos (ver figura 3) de la siguiente forma: (1) Precámbrico, se encuentra registrado en la zona del cratón amazónico localizado al oriente de la falla de Guaicáramo. Las unidades geológicas mas representativas son el Granito de Parguaza (1800-1500 Ma. Toussaint, 1996) y las Sienitas de San Jose del Guaviare (485-445 Ma. K/Ar, en biotita. Maya, 1992), estos cuerpos intrusivos de gran extensión se formaron probablemente por anatexia de la base de la corteza en zonas de alto flujo de calor en el denominado Evento magmático Parguense (sensu Toussaint, 1996). Al finalizar este evento se cerró el ciclo de acreciones en el Escudo Guayana (e.g. Toussaint, 1996; Cediel et al., 2003), terminando con la llamada Orogenia Grenville (1200 Ma. Cediel et al., 2003 y referencias allí descritas), marcada por el metamorfismo de alto grado en facie granulita (asociado al proceso de conformación de Rodinia). Seguido al proceso de ruptura de este super continente, se dio inicio a la Orogenia Acadiana (400-465 Ma. Toussaint, 1996), donde se han identificado eventos magmáticos hacia el Ordovícico, los cuales se encuentran restringidos entre los sistemas de falla de Guaicáramo y Otú-Pericos. Las zonas donde se han identificados estas intrusiones graníticas, se encuentran expuestas en el Macizo de Santander (Grupo plutónico de Santander) y en el Macizo de Quetame (Grupo Quetame), asociado a un magmatismo de afinidad calcoalcalina y peralcalina (Cediel et al., 2011).

Hacia el Carbonífero, se reporta magmatismo a lo largo de la falla Otú cerca a Zaragoza y en el Bajo Cauca Antioqueño (p.e. Stock El Carmen – El Cordero, Leal-Mejía (2011)), en estas rocas, se reconocen dos facies: leucotonalitas (El Carmen) y dioritas (El Cordero) a lo largo del corredor estructural del sistema de fallas de Palestina. Finalmente, hacia finales del Paleozoico en la transición del Pérmico-Triásico, asociado a la conformación de Pangea, afloran discontinuamente rocas stocks de composición granodiorítica y diorítica (p.e. Stock del Buey, Stock de Amagá, Stock de Cambumbia, intrusivo néisico de Palmitas, entre otros) a lo largo de Cordillera Central, Valles del Magdalena y Cauca, Sierra Nevada de Santa Marta y península de la Guajira. Estudios geoquímicos, han reportado una signatura geoquímica asociada a proceso de fusión parcial de la corteza, producto de una orogenia tectono-termal asociada con el ensamble y rompimiento de

Pangea (Vinasco et al., 2006). En general estas rocas del magmatismo pre-Jurásico, no tiene una representación alta en los Andes colombianos, su poca exposición y extensión han limitado su estudio, aunque se espera a futuro una mayor abundancia de rocas en esta temporalidad, debido a que se daban como parte del basamento del Precámbrico, pero con el avance en la técnica de U-Pb de alta precisión las nuevas edades datan del Pre-Jurásico.

El magmatismo del Mesozoico está representado por plutonismo y acreción de rocas de afinidad oceánica (Aspden et al., 1987), distribuida en tres episodios: a. Triásico, b. Jurásico y c. Cretácico. De acuerdo con la nomenclatura de Leal-Mejía (2011) estos eventos se conocen como: Permo-Triásico, Jurásico y Cretácico tardío-Paleógeno.

El magmatismo del Jurásico (Triásico tardío - Jurásico tardío), corresponde a la actividad volcánica-plutónica más extensa y representativa de los Andes colombianos, esta se extiende discontinuamente desde el sur cerca a Ecuador hasta la Sierra Nevada de Santa Marta. Entre los batolitos jurásicos se incluyen: Batolito de Mocoa en el Macizo de Garzón, Batolito de Ibagué, Batolito de Segovia y Batolito de Patillal, en general estos intrusivos tienen una estrecha relación con los sistemas de fallas (p.e. Palestina, Bucaramanga-Santa Marta-Suaza (Cediel et al., 2003)).

Dentro de los Andes colombianos, los batolitos de edad Cretácico tardío-Paleógeno (p.e. Batolito Antioqueño, Batolito de Sonsón y plutones menores de la Cordillera Central al sur de Colombia), se encuentran en el Norte de la Cordillera Central, este magmatismo en Colombia se manifiesta en el emplazamiento de plutones, dentro de un régimen tectono-magmático provocado por la Orogenia de los Andes Norte que consistió en la interacción de los componentes alóctonos provenientes del Pacífico y los autóctonos de Suramérica (Cratón amazónico); el proceso tectono-magmático inició al emplazarse el magmatismo por subducción y aperturas de cuencas intracratónicas marginales (p.e. Complejo Quebradagrande, Nivia et al, 2008); seguido de la colisión de terrenos y acreción (p.e. Formación Barroso, Batolito de Sabanalarga, entre otros). En este periodo el denominado Evento Romeral (sensu Cediel et al., 2011), fue el primero de la Orogenia de los Andes del Norte; producto del tectonismo romeral se incluye la instauración de la Falla Romeral y su sistema de sutura. Posteriormente, se registra el Evento Dagua (sensu Cediel et al., 2011) asociado al acercamiento, colisión y acreción del Terreno Dagua (sensu Cediel et al., 2011) a lo largo de la Falla del Cauca y su sistema de sutura.

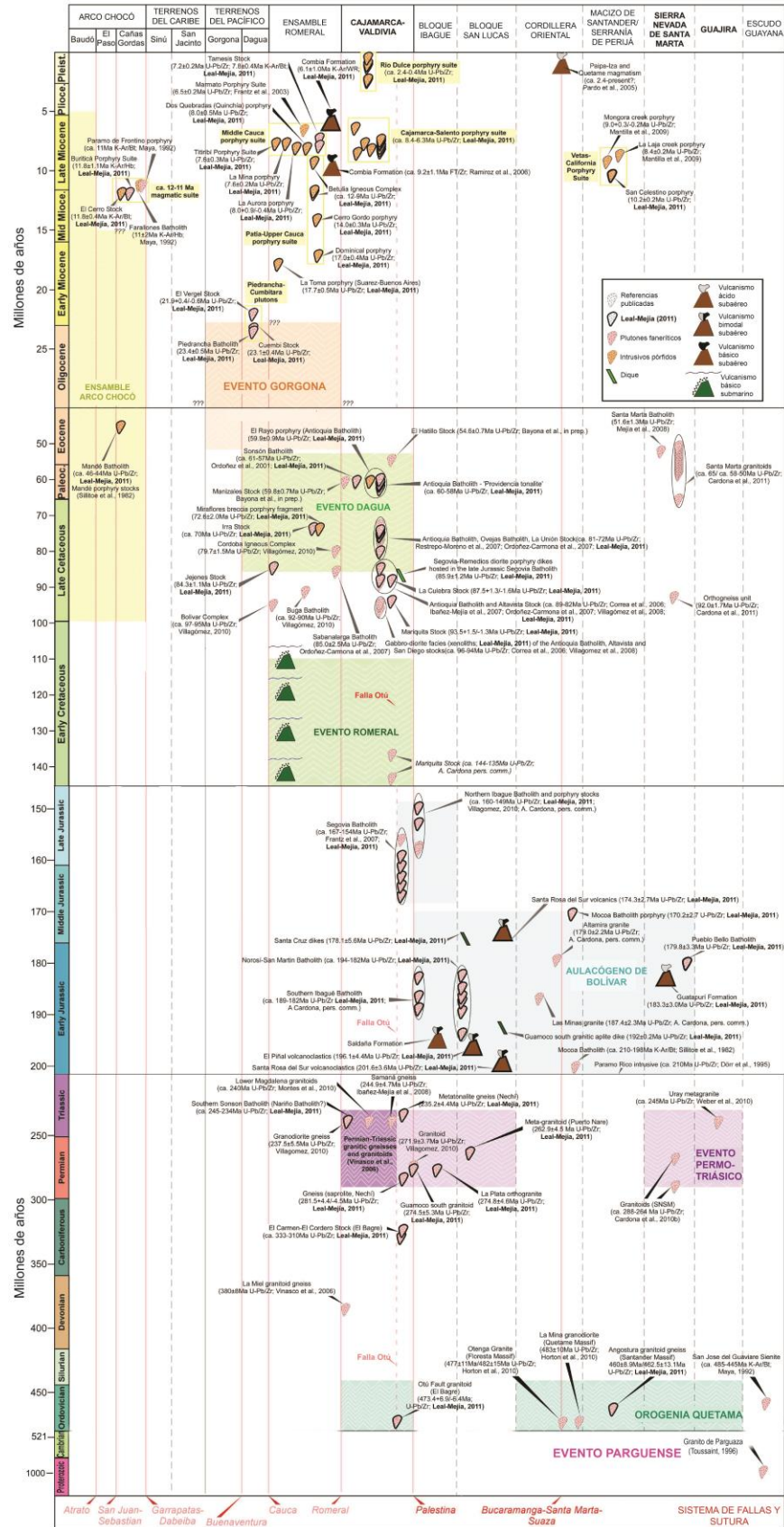


Figura 3. Carta de eventos del magmatismo del Fanerozoico en los Andes Colombianos, tomado y modificado Leal-Mejía 2011. (Ver anexo IV)

El Cenozoico está representado por el evento magmático definido por Leal-Mejía (2011) como Mioceno-Plioceno, ampliamente distribuido de manera irregular en los Andes colombianos, se manifiesta como una compleja distribución de rocas plutónicas, intrusivas hipoabisales y rocas volcánicas, entre ellas las rocas plutónicas se observan principalmente en la Cordillera Occidental numerosos y pequeños batolitos (p.e. Batolito Piedrancha y al norte el Batolito Farallones); la representación de los intrusivos hipoabisales expuesta a lo largo de la margen oriental de la Cordillera Occidental y la margen occidental de la Cordillera Central, que conforman el llamado cinturón porfirítico del Cauca. Este magmatismo fue el resultado de un cambio en el régimen tectónico por la ruptura de la Placa Farallones en placa Cocos y Nazca y el cierre del istmo de Panamá (Aspden et al, 1987). Hacia el Oligoceno-Mioceno se colisionó y acrecionó el Terreno Gorgona (sensu Cediel et al., 2011) prolongándose a lo largo de Falla Buenaventura y su sistema de sutura.

### 3.2 Georreferenciación

El proceso se inició con la clasificación de las muestras dispuestas en SIGEO, de las cuales solo se tenía una breve descripción de su ubicación, así se pudo encontrar localizaciones aproximadas según las quebradas, municipios, veredas o sitios reconocidos, para lograr posicionarlas en Google Earth, sobreponiendo la imagen del mapa de eventos magmáticos de Colombia (Leal-Mejía, 2011 en Cediel et al., 2011). En la figura 4 se puede apreciar la amplia distribución de las muestras a lo largo del territorio colombiano.



Figura 4. Visualización de la distribución de las muestras de la colección del laboratorio de la Universidad EAFIT en el mapa de Colombia, tomado de Google Earth, 2016.

Las muestras se encuentran clasificadas en SIGEO según un consecutivo de entrada y por su composición (Andesitas (AND) - Basalto, Diabasas (BADI) - Dacita, Riolita (DARI) - Gabro, Diorita (GBDR) - Granito (GN)- Granodiorita (GRATO) - Dunita (UBP)- Piroclásticas (PIRO)). La representatividad de este tipo de rocas en el ARI, es de rocas volcánicas 60%, plutónicas 33% y piroclásticas 7%.

Para la plataforma web del Atlas de rocas ígneas, cada muestra fue asignada según su correspondencia con las unidades geológicas, a los diferentes eventos magmáticos de Colombia (según Leal-Mejía, 2011 en Cediél et al., 2011). La figura 5, representa el mapa generado en ArcGis, cada muestra se representa con un color que indica el tiempo geológico del evento magmático de la siguiente forma: Zona 1: Precámbrico; Zona 2: Plz. Ordovícico (Color verde-azul); Zona 3: Plz. Carbonífero (Color azul claro); Zona 4: Plz-Tr. Permo-Triásico (Color morado); Zona 5: Jurásico (Color azul); Zona 6: Cretácico tardío-Paleógeno (Color verde); Zona 7: Mioceno-Plioceno (Color amarillo), Zona 8: Pleistoceno-Holoceno.

Las rocas georeferenciadas en el ARI, permiten identificar la relación porcentual de las rocas analizadas respecto a los diferentes eventos magmáticos de Colombia (Figura 6). Como se puede apreciar, los eventos del Paleozoico-Ordovícico y Paleozoico-Carbonífero no cuentan con muestras en la colección del ARI, el evento del Paleozoico-Permo-Triásico tiene una representación en la colección del 2%, en el Jurásico con un 25.88%, el Cretácico-Paleógeno de 23.52%, y el porcentaje restante (48.23%) caracterizan el evento magmático ocurrido durante el Mioceno-Pliopleistoceno (e.g. Fm. Combia, Secuencia volcánica en el sur del país y pórfidos intrusivos en los alrededores de Marmato, además de la actividad volcánica del norte Cerro Bravo, Santa Isabel, Nevado del Ruiz, Nevado del Tolima, Cerro Machín, en el centro volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotará y al sur Cumbal, Azufral, Galeras y Doña Juana).

Según el diagrama, se evidencia que las zonas preferenciales de estudios e investigaciones, llevadas a cabo en la universidad EAFIT, abarcando en su mayoría el Mioceno-Plioceno; por otro lado los eventos magmáticos del Paleozoico (Ordovícico – Carbonífero) no tienen ninguna representación en la colección del laboratorio de geología y las rocas del Permo-Triásico, tienen una representación muy pobre, lo que se puede atribuir a la poca exposición superficial, su extensa erosión y el hecho de que muchas de estas rocas podrían ser analizadas desde la perspectiva de rocas metamórficas (p.e. intrusivos néisicos de palmitas). En general se puede concluir que el poco conocimiento que hay hasta ahora de la génesis de estas rocas, deja la puerta abierta a futuros proyectos, que permitan la recolección de muestras futuras con la idea de enriquecer la colección del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT, y a su vez el ARI.

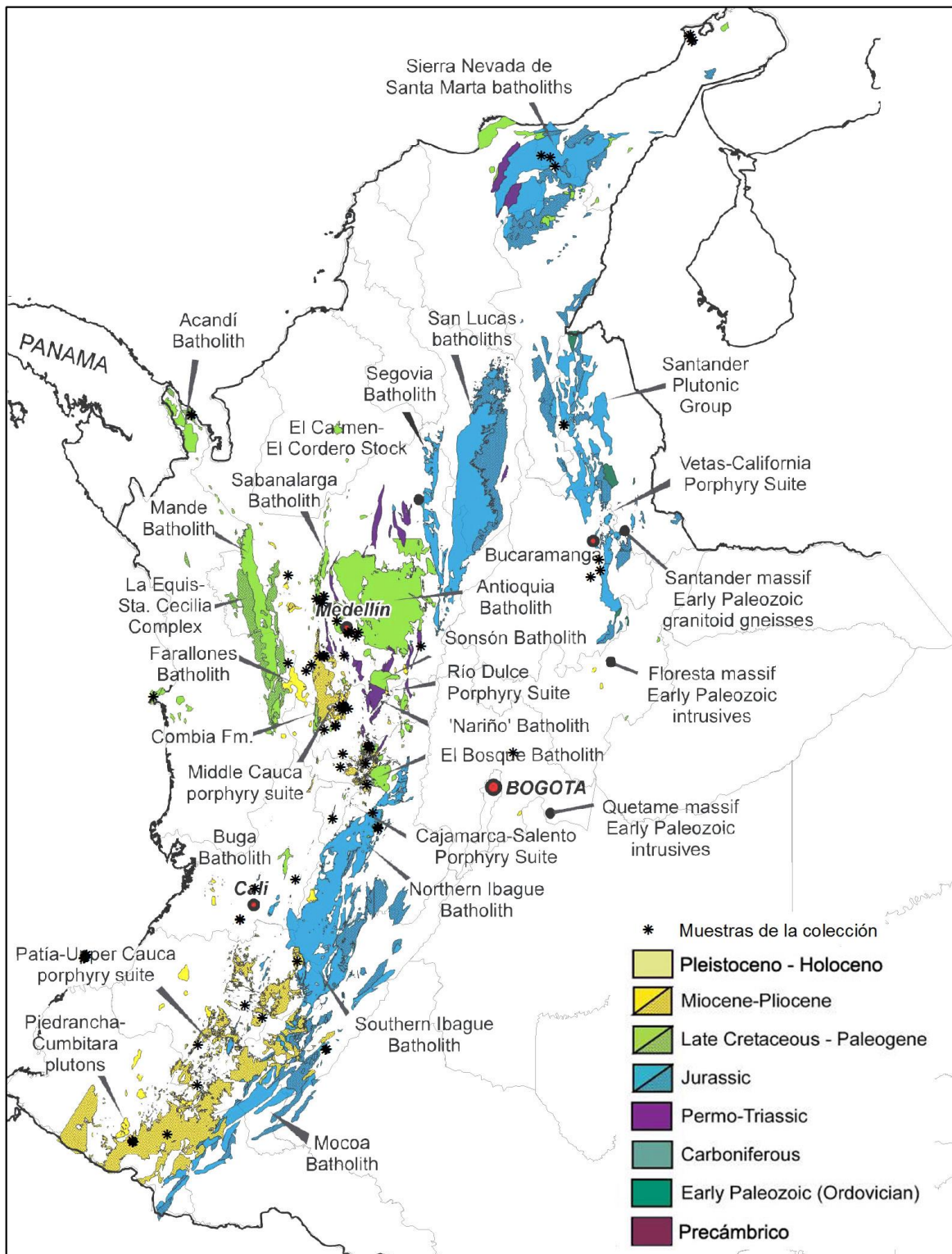


Figura 5. Localización de las muestras en ArcGis, con la superposición del mapa de eventos magmáticos de Colombia.

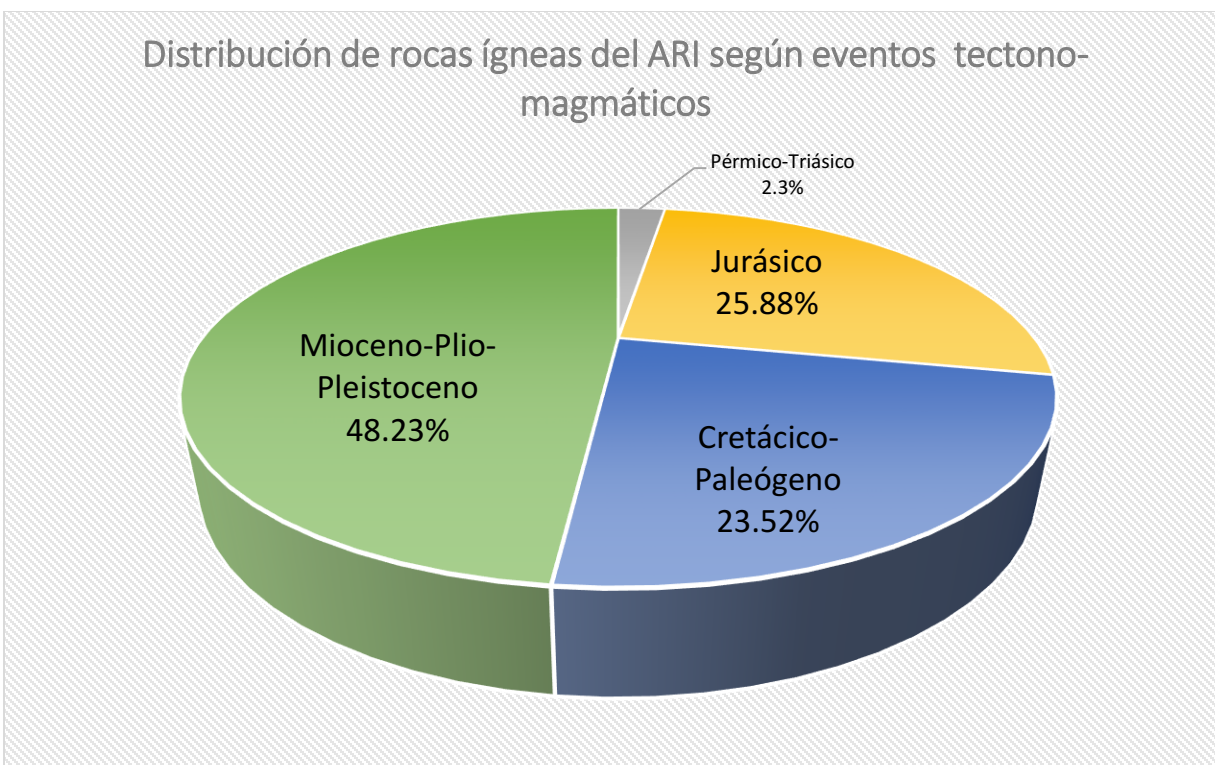


Figura 6. Diagrama de torta con la distribución de las muestras según la temporalidad de los eventos magmáticos.

### 3.3 Diseño Plataforma web

La plataforma web del ARI, se establece a partir de la plataforma creada para el Atlas de rocas metamórficas (Marín-Cerón & Londoño, 2015). Incluyéndose como herramienta de navegación, la distribución del magmatismo colombiano en los diferentes periodos geológicos. El Atlas de rocas ígneas, está integrado a la base de datos de las muestras de la colección, sus respectivas descripciones y fotografías, además de los mapas conceptuales publicados en el servidor de mapas CmapTools de la Universidad EAFIT, las cartas de eventos y el sistema de Google Earth para la visualización de la localización de las muestras. A continuación, se hace un breve repaso por las principales herramientas de la plataforma:

- **Pantalla de ingreso:** en esta zona observa la pantalla de registro e inicio de sesión para todos los usuarios que deseen hacer uso del ARI, solo se debe hacer el registro inicial y conservar la contraseña para futuros ingresos (Figura 7).

### Iniciar Sesión

Correo electrónico

Contraseña

INICIAR SESION

### Regístrate

Nombre

Apellido

Correo electrónico

Contraseña

REGISTRARSE

Figura 7. Registro e inicio de sesión a la plataforma web del Atlas de Rocas Ígneas.

- **Acceso a la localización de la colección:** las muestras localizadas en el mapa de Colombia, se encuentran disponibles en el servidor de Google Earth, cada punto registrado despliega la información sobre la muestra seleccionada y da la posibilidad de visualizarla y llevar a la página de descripción. En la figura 8, se contempla la localización de cada muestra asociada a los diferentes colores que representan los eventos magmáticos de Colombia (Leal-Mejía, 2011 en Cediel et al., 2011).



Figura 8. Visualización de las muestras localizadas en la plataforma del Atlas, diferenciadas con el color del tiempo geológico del evento magmático según Cediel et al., 2011 (Servidor Google Earth, 2016). Realizado Proyecto 50

- **Plataforma introductoria:** El ARI, cuenta con tres secciones introductorias (figura 9), donde se explica la creación del atlas y lo que incentivó su desarrollo, siguiendo con la definición del magmatismo y la distribución del magmatismo en Colombia.

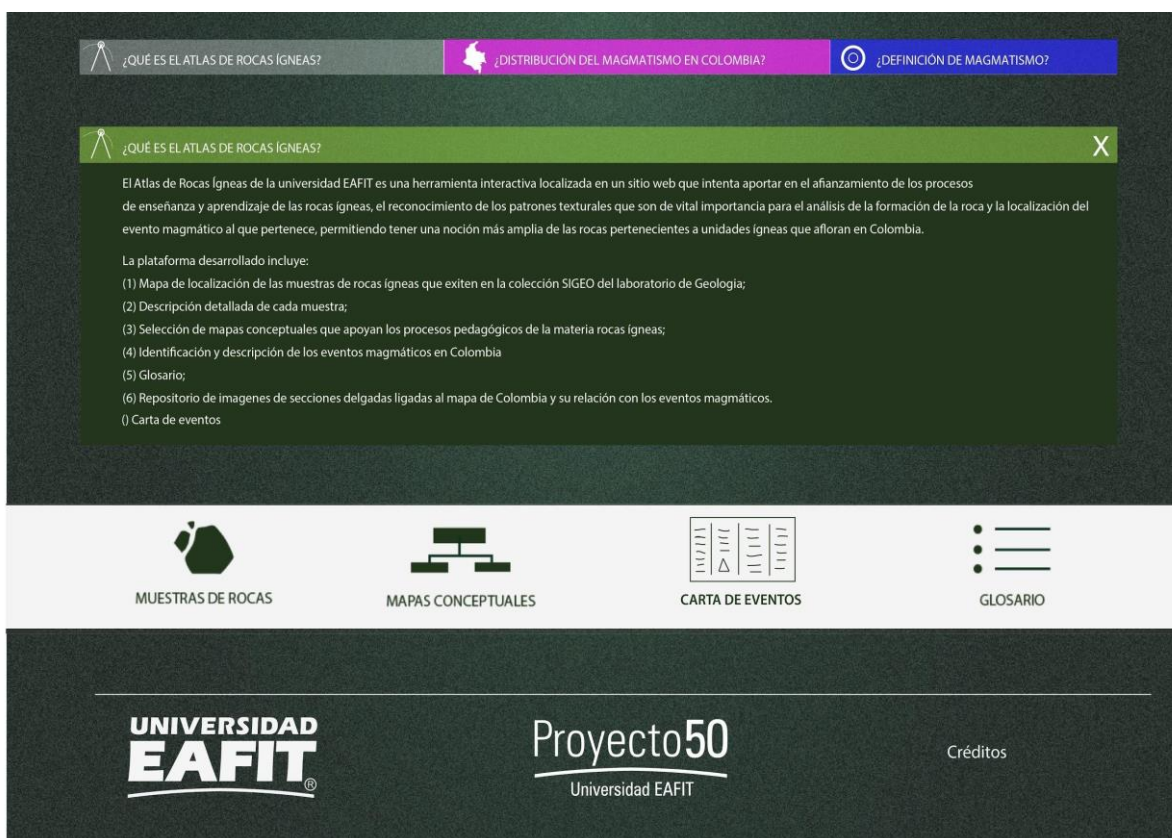


Figura 9. Sección de despliegue de información y acceso a las muestras, mapas conceptuales, carta de eventos y glosario. Realizado Proyecto 50.

- **Acceso directo a las Muestras de roca:** las fichas técnicas de cada muestra analizada, permite acceder a la descripción de las muestras con sus respectivas imágenes. Al momento de ingresar en la sección de “Muestras de rocas”, ésta redireccionará al usuario a la página que compila las muestras como se ve a continuación en la figura 10, allí se podrá visualizar la imagen de cada muestra y su nombre.



Figura 10. Compilación de las muestras disponibles, en forma de búsqueda. Realizado Proyecto 50.

La ficha técnica (figura 11), muestra la información relacionado con la localización en coordenadas geográficas, el nombre de la muestra según SIGEO, la información del recolector, la descripción macroscópica y microscópica, la fotografía se la sección delgada, de las texturas y de la muestra macroscópica, así como la información acerca de las texturas encontradas, el afloramiento del cual se tomó la muestra, el porcentaje mineral y la clasificación modal.

Si bien es cierto que en la actualidad aún no se tiene toda la información registrada en el formato, se espera que las próximas recolecciones y/o donaciones de muestras a la colección, cuente con esta información.

REPOSITORIO DE  
**FICHAS TÉCNICAS DE MUESTRAS DE ROCAS**

Esquisito clorítrico





**LOCACIÓN**  
5,671138889, -74,93201667

**CÓDIGO**  
GN. 0026

**ALTITUD**  
Dato no disponible

Nombre del recolector >

Dato No Disponible

Año de recolección >

Dato No Disponible

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA**

La roca es holocristalina, fanerítica, inequigranular, los cristales son anhedral de tamaño medio, el brillo es vítreo y presenta un hábito masivo.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA**

Podemos observar fenocristales de feldespato potásico, estos son de un tamaño de grano entre grueso y medio, además en la muestra se ven cristales de plagioclasa en gran proporción, así como cuarzo.

**TEXTURAS ESPECIALES**

Presenta una textura peritítica y bordes de reacción entre el feldespato y la plagioclasa



**TIPO DE AFLORAMIENTO**

**TEXTURA GENERAL**

Lepidoblástica inequigranular/irregular

**DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA**

Biotita 7%, plagioclasa 40%, feldespato 30%, cuarzo 15%, opacos, anfíbol, calcita y clorita.

**CLASIFICACIÓN MODAL**

Granito

Volver <

Figura 11. Ficha de muestras de rocas. Realizado Proyecto 50.

- **Acceso directo a los mapas conceptuales:** en esta sección se encuentran almacenados los diferentes mapas conceptuales: (a) Definición de magmatismo (figura 12), (b) Clasificación rocas ígneas (figura 13), (c) Texturas (Figura 2), (d) Serie de Reacción de Bowen (figura 14), (e) Rocas Extrusivas – Volcánicas (figura 15), (f) Rocas Intrusivas – Plutónicas (figura 16), (g) Subducción (figura 17), (h) OIB (figura 18), (i) MORB (figura 19) (Ver anexo III). Estos mapas sintetizan los temas de vital importancia en el estudio de las rocas ígneas.

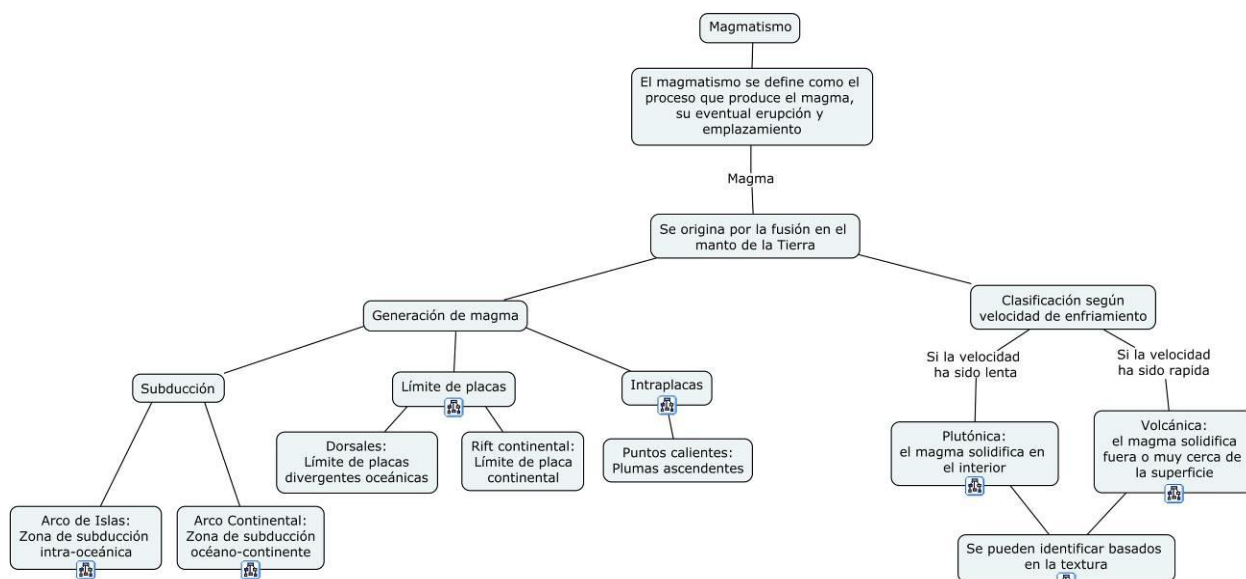


Figura 12. Mapa conceptual sobre el magmatismo desarrollado en CmapTools

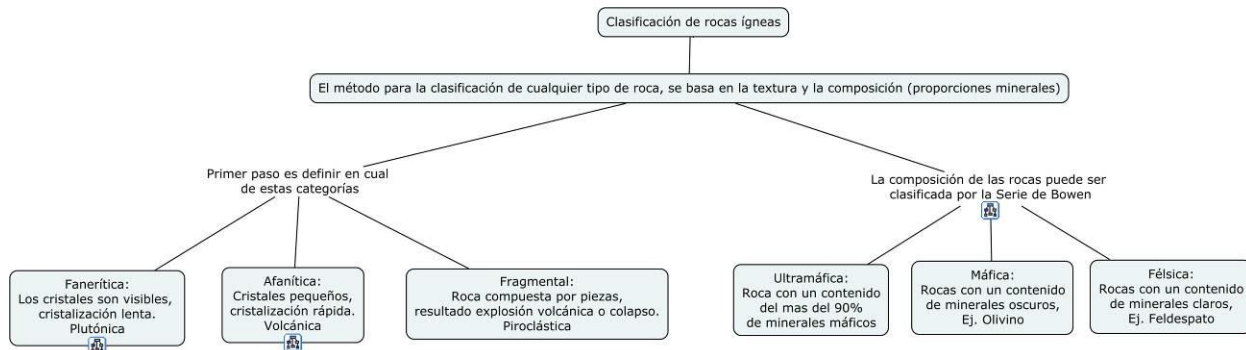


Figura 13. Mapa conceptual sobre la clasificación de rocas ígneas.

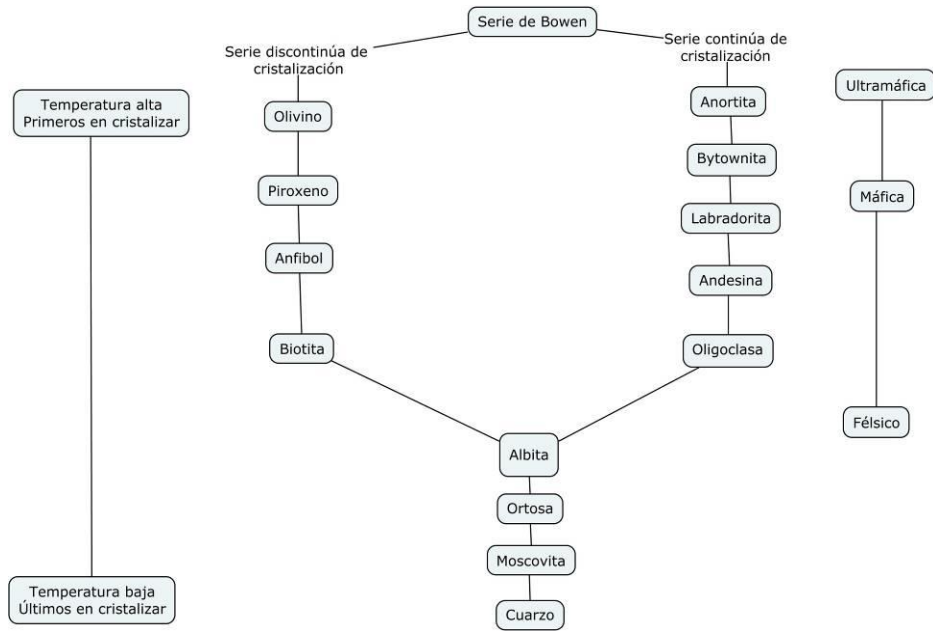


Figura 14. Mapa conceptual sobre la Serie de Bowen

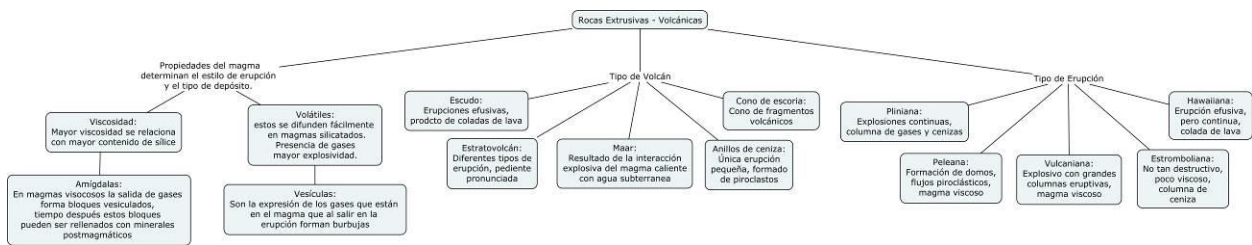


Figura 15. Mapa conceptual de rocas extrusivas – volcánicas

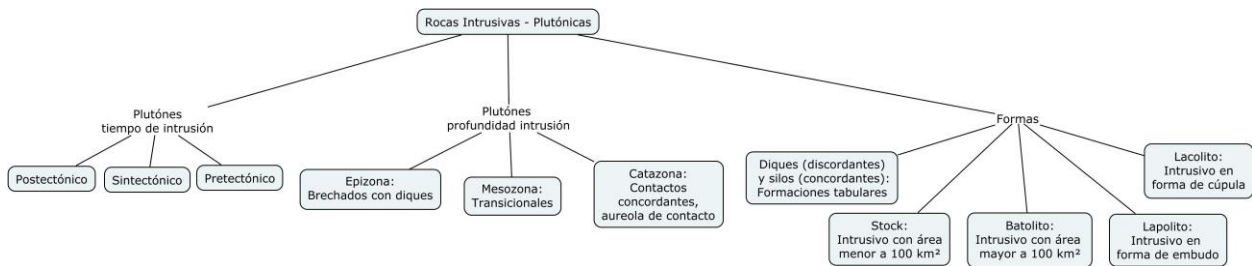


Figura 16. Mapa conceptual de rocas intrusivas – plutónicas

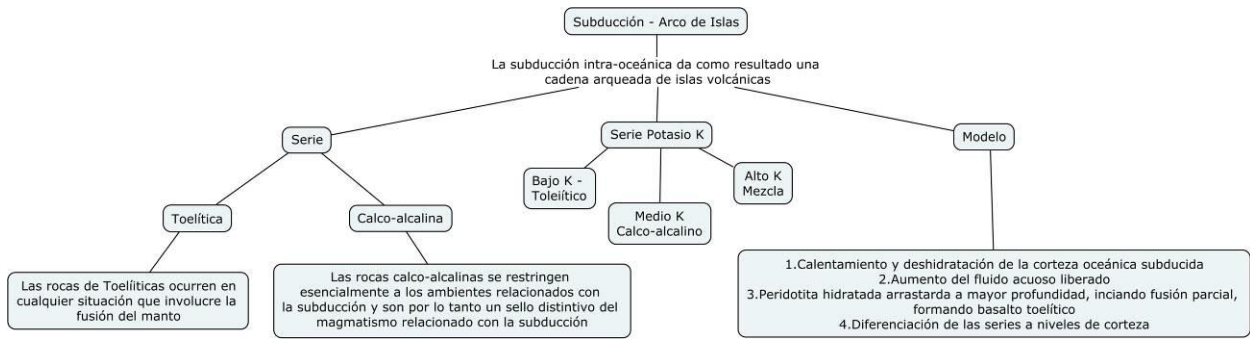


Figura 17. Mapa conceptual de subducción.

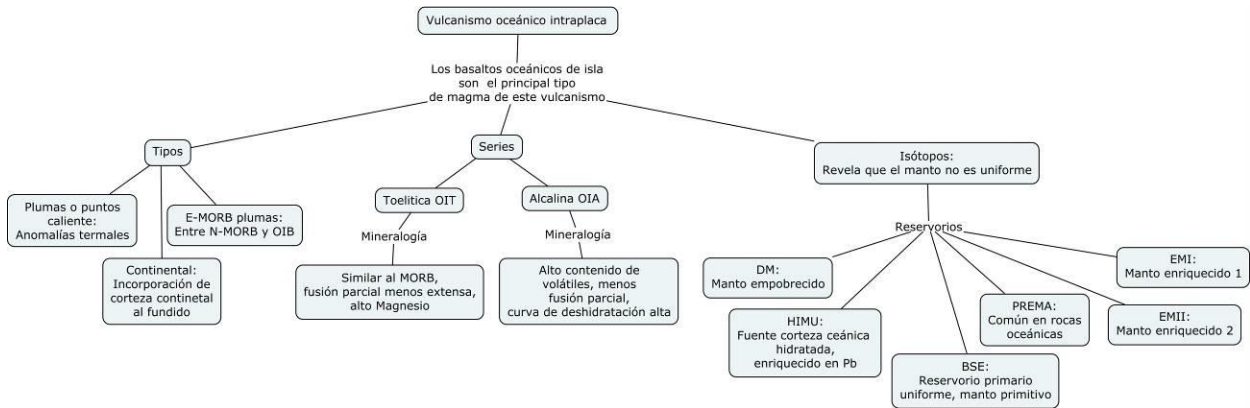


Figura 18. Mapa conceptual sobre Vulcanismo oceánico intraplaca

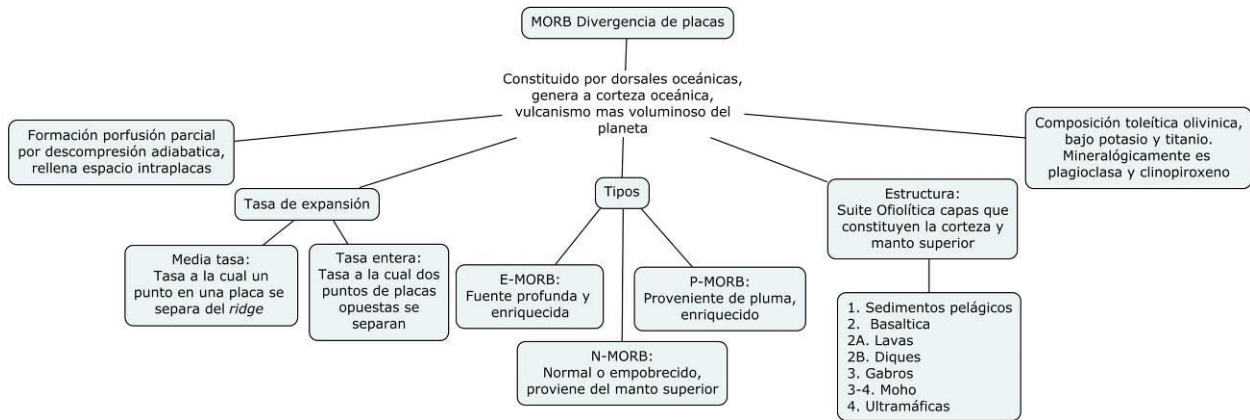


Figura 19. Mapa conceptual sobre divergencia de placas

- **Acceso directo a la carta de eventos:** como herramienta de acercamiento al entendimiento de los procesos de formación (Ver Figura 3). Basados en la carta de eventos de Leal-Mejía (2011), se recopiló y modificó la información presentada en Cediell et al., (2011), donde se presentan los eventos magmáticos, relacionados con el sistema de fallas, las orogenias y discriminado por el tiempo geológico y lugar de ubicación (terrenos). Se presenta el magmatismo desde el Precámbrico (Evento Parguense) hasta la Suite de pórfidos Rio Dulce del Plioceno. Se presenta este recorrido por todos los eventos (con su formación representativa), con el fin de que los estudiantes logren vincular el estudio petrográfico con el origen de la muestra.
- **Acceso directo al glosario de conceptos básicos:** los cuales permitirán el complemento al proceso de aprendizaje de los estudiantes o como ayuda interactiva para el entendimiento de la petrología ígnea (figura 20).

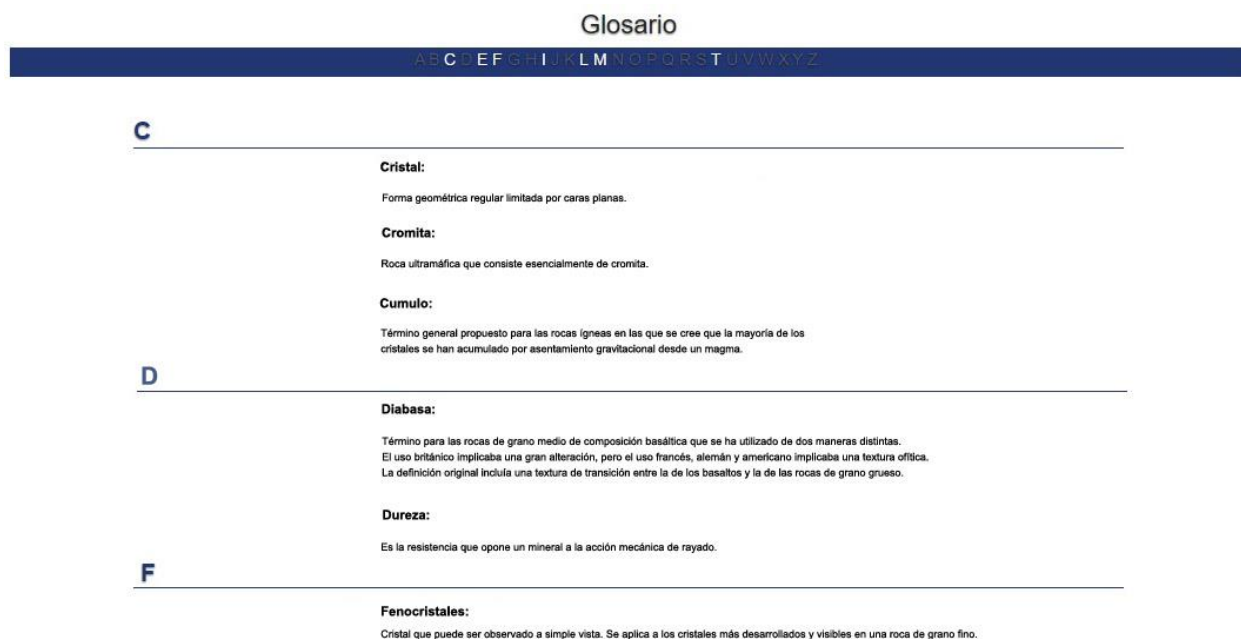


Figura 20. Sección del glosario del Atlas

#### 4. CONCLUSIONES

El ARI es una plataforma web, que brinda al profesor y al estudiante de rocas ígneas, un sistema interactivo donde se puede encontrar la información de las muestras de la colección del laboratorio de geología de la universidad, partiendo de la base de datos en SIGEO, de una forma más dinámica, donde se conecta con información secundaria y conceptos básicos para lograr un entendimiento del proceso de formación de la roca estudiada.

La herramienta ARI, ha permitido realizar el reconocimiento de los principales cuerpos ígneos (volcánicos, plutónicos y piroclásticos), distribuidos espacio-temporalmente a lo largo del territorio colombiano, conectando la información existente a nivel petrográfico con la información reportada por otros autores. Esto podrá contribuir a que el estudiante de geología adquiera una noción mas amplia de los procesos, tipos de rocas, expresión textural y su relación con la geología regional de Colombia.

La integración sistemática del análisis petrográfico, mapas conceptuales, glosarios y la carta de eventos tectono-magmática, enfocado hacia el entendimiento de la distribución espacial del magmatismo en Colombia, permitirá mejorar las estrategias de divulgación científica y de enseñanza-aprendizaje en geología.

La implementación de tecnologías como JavaScript, Frameworks, JQuery, CmapTool entre otras, que tiene disponible la Universidad EAFIT, han permitido la consolidación de un sistema interactivo apto para los procesos de enseñanza y aprendizaje, dejando ver la importancia de la inclusión de nuevas tecnologías a estos procesos.

Finalmente, al realizar un análisis estadístico sobre los tipos de rocas existentes en el ARI, y su relación con los eventos tectono-magmáticos de Colombia, se logró identificar las zonas que aún están desprovistas de información, dando pie a futuros lugares de recolección y/o proyectos a desarrollar, dirigidos a aquellas áreas no exploradas. Adicionalmente, permite plantear estrategias como posibles alianzas con la industria y vínculos con los egresados de Geología, para la obtención de muestras que pueden ayudar al continuo enriquecimiento del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT.

## 5. REFERENCIAS

- Aspden, J. A., McCourt, W. J., Brook, M. (1987). Geometrical control of subduction-related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. *Journal of the Geological Society*, 144(6), 893-905.
- Cediel, F., Leal-Mejía, H., Shaw, R., Melgarego, J., Restrepo-Pace, P. (2011). Petroleum geology of Colombia: Regional geology of Colombia. Fondo Editorial Universidad. EAFIT, Ed, 1, 220.
- Cediel, F., Shaw, R. P., Caceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block, in Bartolini. The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean – hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir, Volumen 79, p. 815-848.
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. Ph.D. Thesis, Barcelona (Cataloia), Spain, University of Barcelona, 1000p.
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., Lameyre, J. (2002). Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences. In Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.
- MacKenzie, W. S., Donaldson, C. H., Guilford, C. (1982). Atlas of igneous rocks and their textures. Longman.
- Marín-Ceron, M. I., Londoño, Y. D. (2015). Atlas de rocas metamórficas como herramienta multimedia en el estudio de la petrografía metamórfica. Universidad EAFIT, Medellín.
- Maya, M. (1992). Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. *Boletín Geológico. INGEOMINAS*, 32(1), 3.
- Toussaint, J. F. (1996). Evolución Geológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 142.
- Vinasco, C. J., Cordani, U. G., González, H., Weber, M., Pelaez, C. (2006). Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 355-371.
- Winter, J. D. (2014). Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson Higher Ed.

**ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA PARA EL  
ESTUDIO PETROGRÁFICO EN ROCAS ÍGNEAS**

TORO ZAPATA, S.; MARÍN-CERÓN, M.I.

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

Autor de correspondencia: [storoza@eafit.edu.co](mailto:storoza@eafit.edu.co)

## RESUMEN

El análisis digital de imágenes (ADI) es una herramienta complementaria e innovativa en el análisis petrográfico, de gran utilidad para la interpretación e identificación de minerales, patrones texturales, alteraciones y conteos modales. En el presente trabajo se propone vincular esta herramienta a los procesos de enseñanza-aprendizaje, con el fin de potencializar los recursos que se tenga disponibles para el análisis petrográfico en las rocas ígneas.

Para este trabajo se analizaron diferentes tipos de rocas ígneas (plutónicas, volcánicas y piroclásticas), incluyendo diversas texturas (p.e. porfirítica, seriadas, sieve, ofítica, poiquilíticas, glomeroporfídicas, etc), con el fin de identificar los tipos de filtros asociados al software Image Pro Plus y ENVI, que ayudan a resaltar las propiedades ópticas de minerales y texturas a nivel de sección delgada. Este tipo de herramientas pretende dejar a disposición de estudiantes y docentes, estrategias que mejoren y complementen la interpretación de los análisis petrográficos, además de incentivar las discusiones en clase sobre las aplicaciones que se pueden lograr con el tratamiento digital.

**Palabras clave:** Innovación, enseñanza, aprendizaje, texturas, rocas ígneas, tratamiento, digital, imágenes, Image Pro Plus, ENVI.

## ABSTRACT

The digital image analysis (DIA) is a complementary and innovative tool for petrographic analysis. It can be a great help for the interpretation and identification of minerals, textural patterns, alterations and modal counting. It is proposed to link this tool with the teaching-learning processes allowing the maximize of the resources available for the petrographic analysis of igneous rocks.

During this work, various types of igneous rocks were analysed (p.e. plutonic, volcanic and pyroclastic rocks), including different types of textures (p.e. porphyritic, seriated, sieve, ophitic, poikilitic, glomeroporphyritic, among others), using the available filters at the Image Pro Plus and ENVI software, that help to highlight the optical properties of minerals and textural patterns at thin section scale. This type of tools seeks to provide students and teachers with strategies, which can improve and complement the interpretation of the petrographic analysis. Simultaneously, it seeks to facilitate discussions in the classroom about the applications which can be achieved with the DIA.

**Keywords** Innovation, teaching, learning, textures, igneous rocks, treatment, digital, images, Image Pro Plus, ENVI.

## 1. INTRODUCCIÓN

El análisis petrográfico en rocas ígneas (p.e. distribución modal, análisis textural, etc), permite inferir las condiciones de cristalización que sufre una roca ígnea en su proceso de enfriamiento, generando una composición determinada. En general permite formarse una idea de las condiciones físicas como lo son la presión, temperatura y profundidad de emplazamiento, y si estas variables se dieron bajo condiciones de equilibrio o desequilibrio (Rayo-Rocha & Zuluaga, 2011). Estas variables son parte fundamental para el entendimiento de los procesos magmáticos, desde la cristalización hasta el ascenso del macizo rocoso a superficie. Sin embargo, en ocasiones el análisis tradicional mediante microscopio petrográfico, puede ser limitado, debido a que solo se tiene la visión de una pequeña ventana de visualización de la muestra analizada. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone como una herramienta adicional, el análisis digital de imágenes (ADI) mediante el uso de software especializado como: Image Pro Plus y ENVI, que permitan resaltar mediante tratamientos digitales las propiedades ópticas y patrones texturales existente en una roca ígnea.

Mediante el presente artículo, se pretende explorar los diferentes filtros existentes en el software Image Pro Plus y ENVI, como apoyo a la descripción petrográfica tradicional. Inicialmente, se partió de la experiencia obtenida con el ADI en rocas metamórficas (Marín-Cerón & Londoño, 2015). Para este proceso en particular, se partió del análisis de 85 muestras existente en el Atlas de Rocas Ígneas (Toro & Marín-Cerón, 2016 manuscrito en revisión), de las cuales se seleccionaron muestras representativas de diferentes eventos magmáticos presentes en Colombia (ver Figura 1), asociados a rocas (1) volcánicas (basaltos, diabasas, riolitas y pórfidos dacíticos); (2) plutónicas (granitos, dioritas, gabros, peridotita y dunitas); y (3) rocas piroclásticas (pómez e ignimbritas).

Como resultado final, se encontró que el ADI, permite identificar filtros especiales que resaltan las características de las texturas estudiadas. En el caso específico del software Image Pro Plus se utilizaron principalmente: Hi Gauss, variance, horizontal, invert contrast, open, dilate y count/size. En cuanto al software ENVI, se procesaron las imágenes cambiando las bandas de colores (Red, Green, Blue) y cada combinación de estos tres colores, con el fin de resaltar un único color que permite identificar e interpretar con mayor facilidad diferentes mineralogías (Berrezueta & Domínguez-Cuesta, 2010).

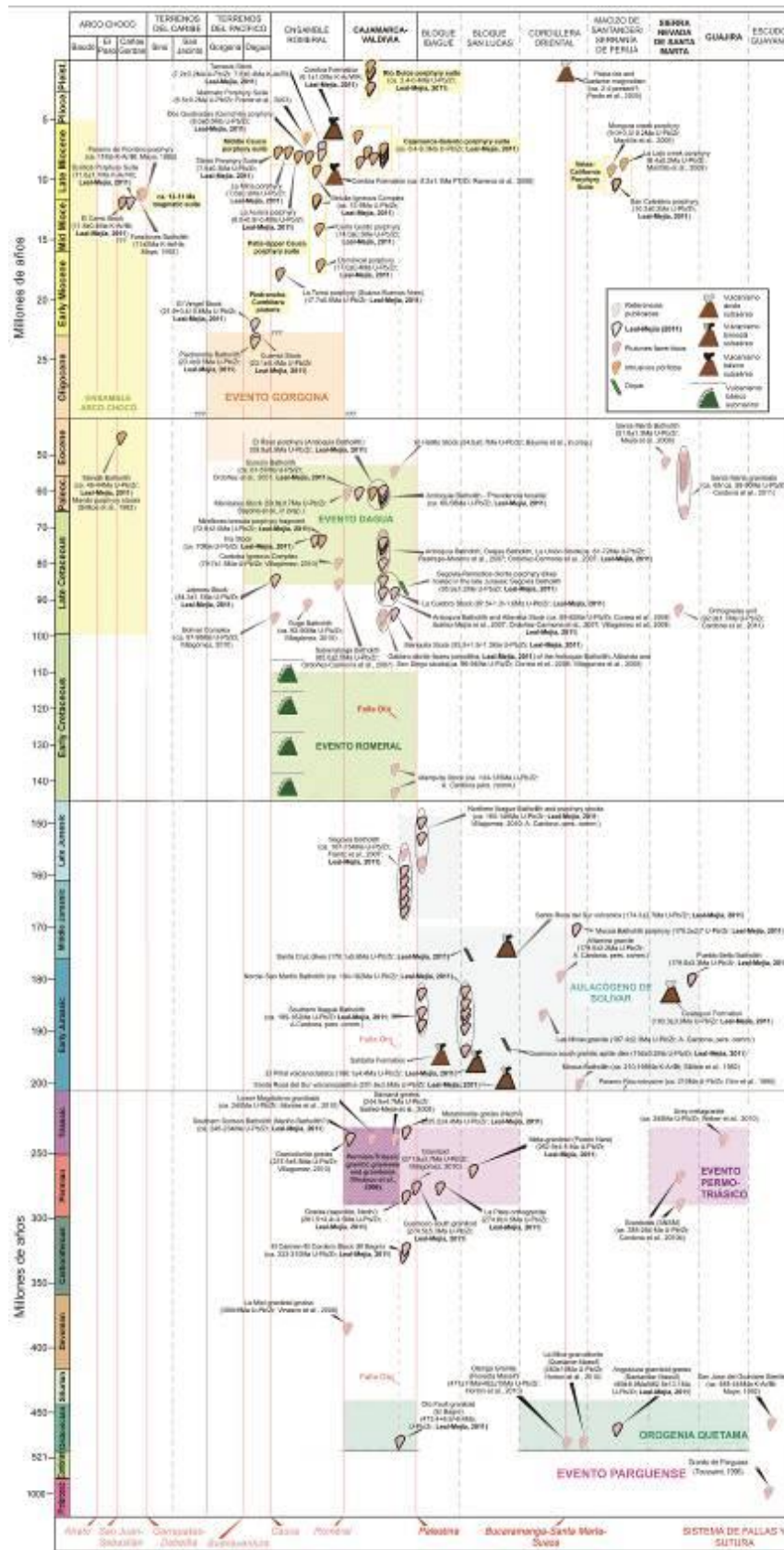


Figura 1. Carta de eventos del magmatismo en los Andes Colombianos, tomado y modificado Leal-Mejía 2011. (Ver anexo IV)

## **2. METODOLOGÍA**

### **a. Análisis petrográfico**

Esta etapa consistió en la revisión de la colección de muestras de rocas ígneas del laboratorio de geología de la Universidad EAFIT, que fueron preseleccionadas en la etapa de conformación del Atlas de rocas ígneas (Toro & Marín-Cerón, 2016 en revisión). Se caracterizaron petrográficamente, identificando el grado de cristalinidad, tamaño de grano, forma de los cristales, relación espacial de los cristales, y se definieron las secciones delgadas en las cuales se encontraron texturas representativas (Ver Figura 2. Mapa conceptual de Texturas) (Anexo I).

### **b. Toma de fotografías**

Para el proceso de análisis petrográfico y para la toma de las fotografías de las secciones delgadas seleccionadas para el ADI se usaron los siguientes instrumentos: (1) Microscopio petrográfico Olympus BX 41, (2) carro portamuestras UFMP Olympus, (3) cámara adaptable al microscopio con puerto para tarjeta SD Moticam 580 de 5.0 Megapíxeles.

La toma de las fotos se hizo con una magnificación de 100X, en una secuencia fotográfica que cubrió un área de 2 cm<sup>2</sup> de la sección delgada, tratando de abarcar gran parte de la sección delgada, con el fin de poder identificar los patrones texturales con mayor facilidad. Se tomaron las fotos con luz polarizada plana y doblemente polarizada. Al finalizar el análisis, el resultado fue de 135 fotografías de las 10 muestras seleccionadas (Anexo V). La toma de muestra se realizó de la siguiente forma para lograr mayor precisión

- I. Posicionamiento de la sección delgada en el carro porta-muestras, empezando desde un extremo superior, donde el desplazamiento permita la toma de las fotografías de forma lineal (ver figura 3).
- II. Toma en forma de barrido para mosaico, se inicia la toma de la primera fotografía con la cámara para microscopio, y se continúa con la toma asegurándose que la siguiente foto comparta por lo menos un 20% de la foto anterior para posteriormente unificar las fotografías.
- III. Se toman así un aproximado de 25 fotos por muestra en sentido vertical y horizontal.

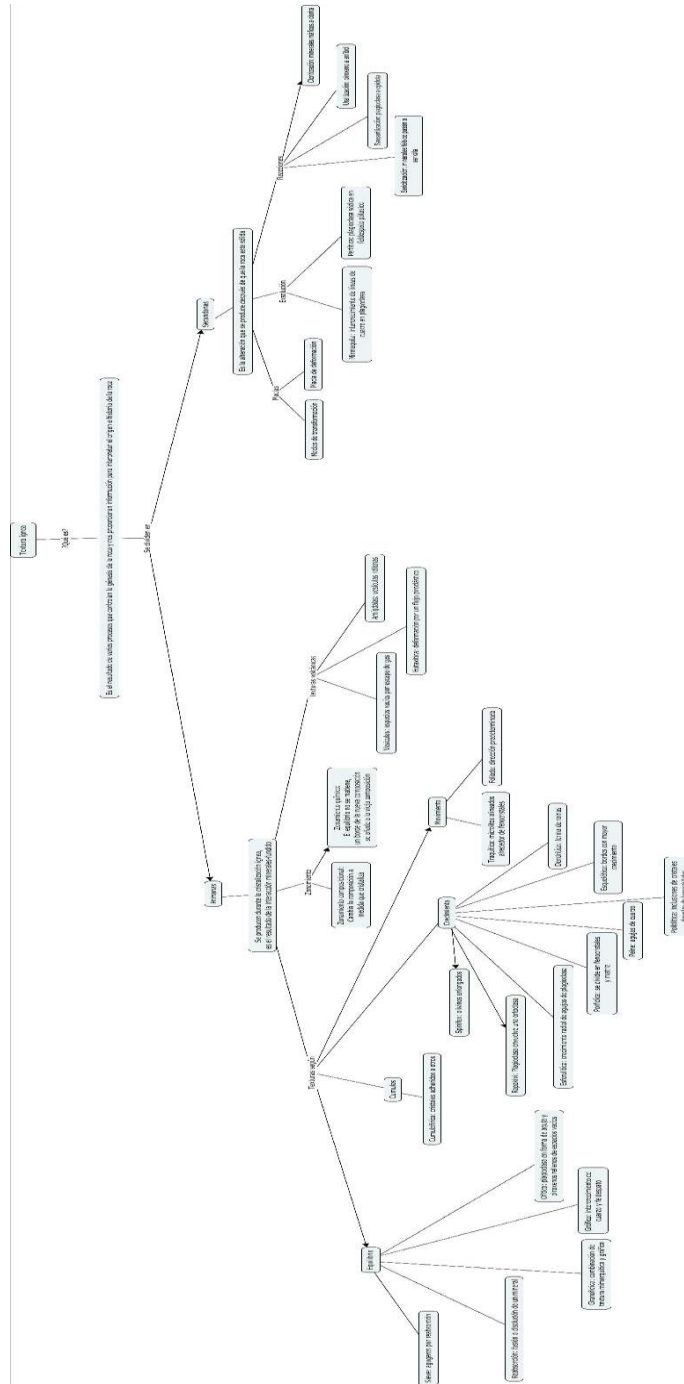


Figura 2. Mapa conceptual sobre las texturas de rocas ígneas, basado en Winter 2014.



Figura 3. Direccionamiento de la toma de fotografía, se inició la toma en la parte superior izquierda y se siguió en el sentido de la flecha.

### c. Elaboración de mosaicos

Finalizada la etapa de toma de muestras, se procedió a la unión de las fotos con el software Photoshop CS4, herramienta *photomerge*, la cual toma todas las fotografías de la sección delgada y las unifica en una sola por medio del traslape de pixeles semejantes, teniendo como resultado el mosaico.

### d. Análisis textural mediante análisis digital de imágenes (ADI)

La etapa de análisis ADI se realizó sobre mosaicos fotográficos. Para el tratamiento de estas imágenes se utilizaron los softwares Image Pro Plus y ENVI, y se aplicaron filtros con los cuales se logró resaltar, contrastar e intensificar patrones texturales presentes en cada sección delgada, se usaron diversas herramientas como el cambio e inversión de las bandas de colores RGB. Las rocas fueron seleccionadas con el fin de presentar texturas típicas en los diferentes tipos de rocas ígneas (Anexo V).

## 3. RESULTADOS

Las muestras analizadas por ADI, corresponden a rocas representativas de eventos magmáticos colombianos: (1) eventos volcánicos (basaltos, riolitas y pórfidos dacíticos); (2) eventos plutónicos: granitos, dioritas, gabros, peridotita y dunitas; (3) y eventos piroclásticos: (pómez e ignimbritas).

### 3.1 Eventos Volcánicos

#### 3.1.1 Basaltos

Se define basalto como la roca conformada por porcentajes modales de 10-0% Cuarzo, 10% Feldespato Alcalino, 0-5% Feldespato y 80-90% Plagioclasa en el diagrama QAPF. Estas rocas volcánicas en general exhiben fenocristales de olivino, piroxeno y plagioclasa cálcica, inmersos en una matriz vítrea con microfenocristales y minerales accesorios. En algunas ocasiones los basaltos se observan altamente vesiculados, asociados generalmente a magmas con altos contenidos de gases. Posteriormente, estas rocas pueden sufrir procesos en los que las vesículas

son rellenadas por fluidos generalmente hidrotermales de variadas composiciones (MacKenzie et al., 1982). En aquellas ocasiones cuando la textura se expresa en el intercrecimiento de plagioclasa con piroxenos (textura ofítica) se les denomina diabasas.

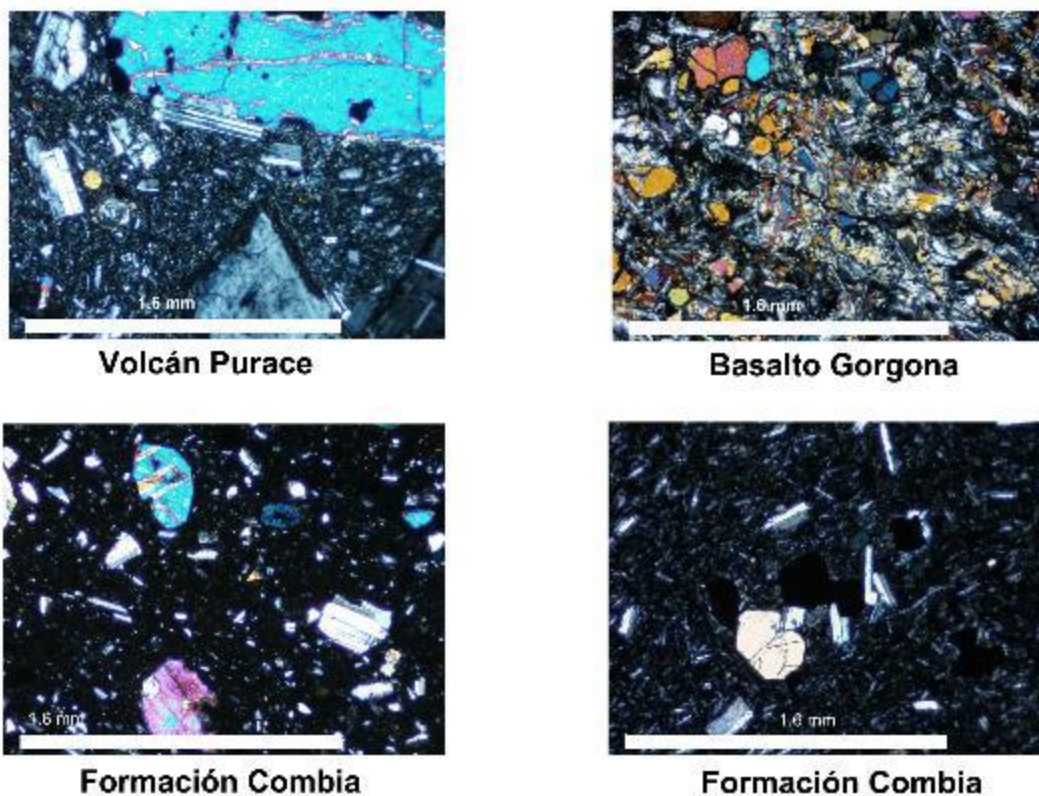


Figura 4. Basaltos típicos del Mioceno-Plioceno (Formación Combia y Volcán Purace) y Cretácico (Gorgona).

Las rocas basálticas en Colombia (figura 4), generalmente están asociadas al conjunto de rocas de afinidad oceánica de edad generalmente Cretácica (p.e. Complejo Quebradagrande, Complejo Barroso, Complejo Santa Cecilia la Equis, Basaltos de Gorgona), localizadas al occidente del sistema de fallas Romeral. Algunos basaltos se han reportado en las rocas miocénicas de la Formación Combia con afinidad geoquímica que varía desde toleítica hasta calcoalcalina (Rodríguez & Zapata, 2013). Para el análisis ADI, se escogieron las siguientes muestras.

a. Basaltos del Complejo Santa Cecilia-La Equis

El complejo Santa Cecilia-La Equis comprende intercalaciones de flujos de lavas, que varían composicionalmente entre basaltos y andesitas, además de secuencias piroclásticas; abarca un amplio espectro de rocas desde aglomerados de bloques hasta tobas de cenizas (Rodríguez & Sierra, 2010).

Estos basaltos presentan fenocristales y microcristales de augita, olivino y plagioclasa, como accesorio se encuentran opacos y alteraciones a clorita, la matriz generalmente es holocristalina o

hialocristalina, los microfenocristales están constituidos por piroxenos; las texturas típicas que se pueden encontrar son porfídicas, glomeroporfídicas a microporfídicas y amígdalares (Rodríguez et al., 2010).

En el Atlas de rocas ígneas de la Universidad EAFIT, se encuentra la muestra BADI 0003, proveniente de Triganá; este basalto por su localización se podría correlacionar con el evento magmático del Cretácico tardío. A nivel macroscópico se observan los fenocristales de color claro y una matriz oscura, con textura porfirítica, las vesículas se logran visualizar en la muestra macroscópica. Microscópicamente, presenta una textura hipocristalina, con fenocristales de plagioclasa (60%), augita (10%) y anfíboles (10%) inmersos en una matriz vítrea, por su relación fenocristales y matriz (85% - 15%) se clasifica como una textura porfirítica con distribución bimodal. Las etapas de enfriamiento sugeridas por esta textura, permitiente inferir un enfriamiento lento que formaría los fenocristales de plagioclasa, augita y piroxeno, seguido de uno rápido que conforma la matriz (Winter, 2014). Las amígdalas se encuentran rellenos de agregados de cristales amorfos de posible composición silíceo. Por medio de la herramienta *Count/Size* (Image Pro Plus), se resalta en color rojo la matriz (10%) y Fenocristales en un 90% (figura 5), la cual es una relación muy similar a la definida mediante el análisis microscópico convencional. Igualmente esta herramienta permite identificar la presencia de inclusiones de fundido (Melt inclusions) en los fenocristales de plagioclasa cálcica, las cuales no son visibles en el análisis petrográfico tradicional.



Figura 5. Tratamiento de imagen por medio de *Count/Size* para sacar un porcentaje de matriz y fenocristales.

La figura 6 presenta el mosaico fotográfico original y con el ADI. Los filtros aplicados son: *Hi Gauss* (Image Pro Plus), el cual incrementa el contraste a partir del valor de pixel de los alrededores, mejora los detalles finos de la imagen y elimina el ruido, este filtro se aplicó a todas las imágenes para hacer un mejoramiento general, el segundo filtro fue *Variance* el cual logró resaltar los fenocristales de la matriz, haciendo énfasis en los bordes, este filtro utiliza la desviación estándar de su vecindad para lograrlo, además este tipo de filtro permite modificar el tamaño de pixel y la fuerza de aplicación, lo que hace posible cambiar los parámetros según la necesidad de intensidad con que se requiera. Este filtro fue de gran utilidad para el análisis de la textura porfirítica (Figura 5).

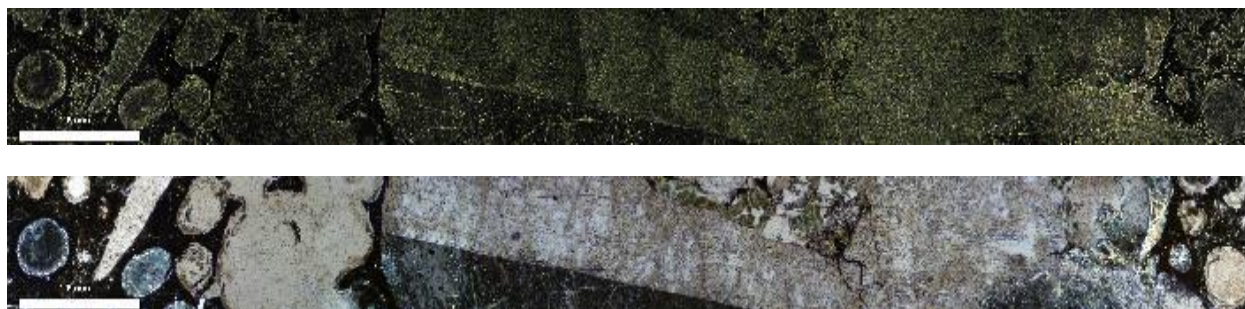


Figura 6. Basalto tratado digitalmente, mediante el filtro *Variance* (superior) *Hi Gauss* (inferior) y de Image Pro Plus, con el propósito de resaltar los fenocristales y amígdalas.

El filtro *Horizontal* (Image Pro Plus), permitió resaltar las amígdalas y el agregado de cristales amorfos de posible composición silícea (figura 7).



Figura 7. Imagen superior original e imagen inferior analizada con el filtro *Horizontal*, tratando de visualizar el intrecrecimiento de minerales amorfos dentro de la vesícula.

#### b. Diabasa Complejo Quebradagrande

El Complejo Quebradagrande cuenta con rocas ultrabásicas, básicas y sedimentitas de origen marino, el origen de este Complejo se liga a sus colindantes: Complejo Arquía y Complejo Cajamarca (Moreno-Sánchez et al., 2008).

La parte volcánica del Complejo Quebradagrande se compone de basaltos, andesitas, brechas y tobas en menor proporción, predominan las texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, además de texturas amigdalares y fragmentales entre las tobas y aglomerados; asociado a lavas porfídicas se encuentran pillow lavas y diabasas (Rodríguez & Zapata, 2013). Álvarez (1987) sugiere que las rocas básicas y ultrabásicas fueron generadas en un centro de expansión oceánica (MORB) y los basaltos en un arco volcánico, por su parte Nivia et al (2006), propone que este complejo se formó en cuenca intracratónica marginal, asociado a procesos de suprasubducción.

Por su correlación con el Complejo Quebradagrande, se escogió la muestra BADI 0054, localizada en el departamento de Caldas en cercanías del Río Chinchina. Macroscópicamente la roca presenta un color verde oscuro, afanítica y se observan zonas; en la descripción microscópica se observan piroxenos (60%) en forma de aguja y alargados y plagioclasas (56%) con alteraciones a clorita y presencia esporádica de cuarzo que no superan el 2%; los cristales tienen una forma subhedral y la roca se define como holocristalina a hipidiomórfica. El tamaño de los cristales va de fino a muy fino (figura 8), definiendo una textura típica ofítica donde se observa el envolvimiento de piroxenos de (1.4 mm) con intercrecimiento de plagioclasa de tamaño más fino, indicando al menos dos etapas de formación de los cristales (Winter, 2014) en condiciones cercanas a la superficie sin el desarrollo de matriz vítrea.

Para el análisis ADI, se utilizó ENVI lo cual permitió el cambio de la banda de colores a BGR (Blue, Green, Red), con el fin de hacer más visible el piroxeno, que con el filtro se observa de color violeta. La ventaja del análisis ADI sobre el análisis petrográfico convencional, se debe a que con la intervención de la imagen se puede confirmar la presencia de la textura ofítica, puesto que la acumulación de pequeños cristales de plagioclasa, su tamaño y la presencia de opacos en la muestra dificulta su diferenciación (Figura 8). El desarrollo de esta textura se basa en la velocidad de nucleación, siendo así el piroxeno de lento crecimiento, formando menos cristales que englobaron los pequeños y enlongados cristales de plagioclasa, común en este tipo de rocas máficas (López & Bellos, 2006).

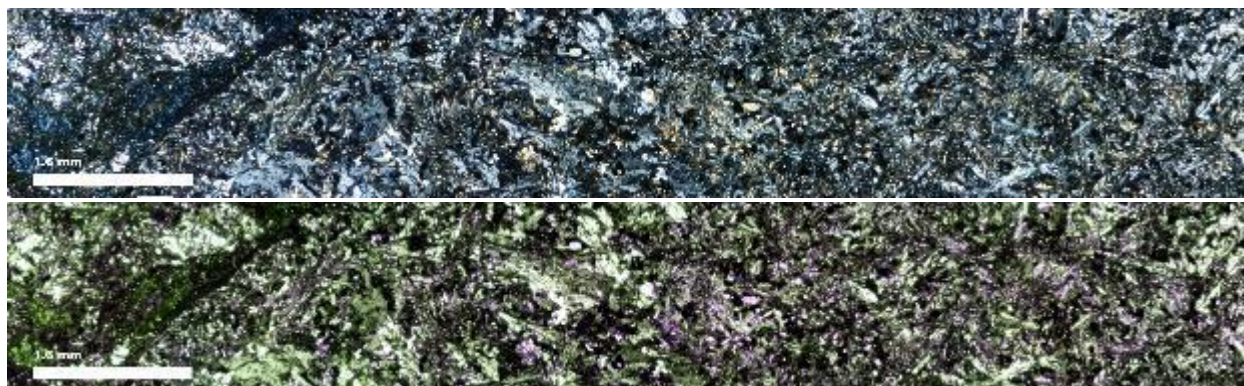


Figura 8. Imagen superior original e inferior con cambio en la banda de colores originalmente RGB a BGR, con el software ENVI, para resaltar la textura ofítica asociado al intercrecimiento de plagioclasas en piroxeno

### 3.2 Eventos volcánicos de composición intermedia a ácida

Las rocas volcánicas intermedias se definen como todas aquellas que han enfriado rápidamente y han salido a la superficie usualmente tras una erupción volcánica y su composición se define por el progresivo enriquecimiento de sílice y plagioclasa intermedia a sódica. Los fenocristales en rocas volcánicas intermedias más frecuentes son los feldespatos, plagioclasas, cuarzos, biotitas y hornblendas, como minerales accesorios suelen presentarse apatito, zircón y granate, variando según su contenido de cristales y matriz vítrea de holocristalinas a hipocristalinas (MacKenzei et al, 1982).

A nivel regional, la roca volcánica intermedia mas representativa a lo largo de las diferentes zonas volcánicas de Colombia, es la andesita, conformando hasta un 80% de los productos volcánicos (Marín-Cerón, 2007). La distribución en el territorio colombiano se relaciona con la actividad volcánica que se inicia en el Mioceno (Vulcanismo Combia) y Plio-Pleistoceno hasta el reciente, asociado a los complejos volcánicas del Ruiz-Tolima, Machín, Huila, Puracé-Coconucos, Sotará, Doña Juana, Galeras, Azufral, Cumbal y Chiles, entre los mas importantes.

La figura 9 se presenta a continuación para ilustrar las rocas típicas de las mencionadas anteriormente.

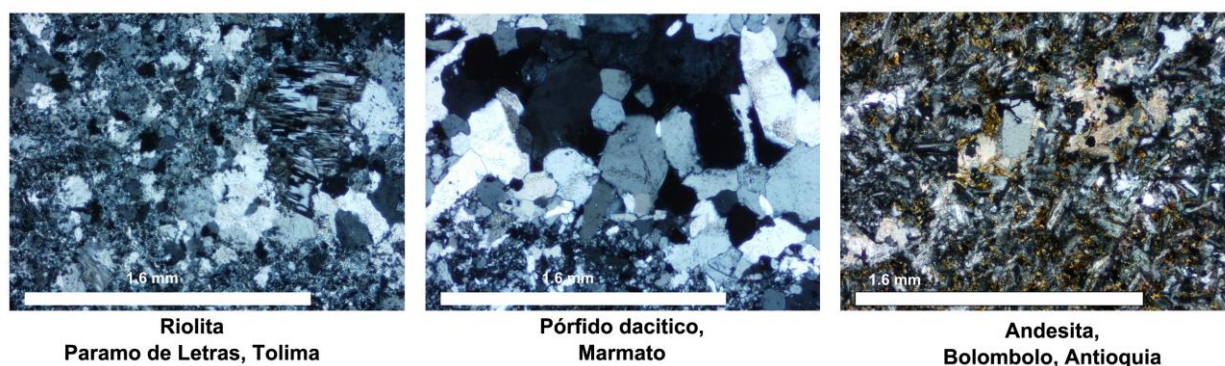


Figura 9. Fotografía de secciones delgadas de una Riolita, Andesita y un Pórfido dacítico.

Para el análisis ADI, se seleccionaron las siguientes muestras del Atlas de Rocas Ígneas:

a. Riolita del Complejo ígneo de Ocaña

El Complejo ígneo intrusivo-extrusivo de Ocaña está constituido por rocas de grano fino a grueso con etapas de volcanismo efusivo-explosivo, en la fase intrusiva predominan las cuarzomonzonitas y granitos, la extrusiva por riolitas y algunas áreas con presencia de zonas pegmatíticas (INGEOMINAS, 1980).

Se define como riolita, a la roca volcánica félsica, cuyo porcentaje en el diagrama QAPF se localiza con un 40-60% de cuarzo, 30-40% feldespato alcalino y un bajo porcentaje de plagioclasa, su composición es muy similar a la del granito, pero se diferencia por su textura afanítica, dada por su corto periodo de cristalización, favoreciendo la aparición de una matriz vítrea y fenocristales tales como cuarzo, biotita, anfíbol y piroxeno (MacKenzei et al., 1982)

Para el ADI, se seleccionó la muestra DARI 0019, localizada en la zona de Ocaña (Santander), correlacionable con el Complejo Ígneo intrusivo-extrusivo, asociada al evento magmático del Jurásico. La muestra macroscópicamente se clasifica como de textura afanítica, presenta un color claro y se observan pequeños cristales identificables microscópicamente, en esta descripción micro

la matriz se define con un porcentaje de 85%, los fenocristales son plagioclasa (3%), cuarzo (10%), ortoclasa (11%) y sericita y moscovita en mínimas cantidades, los cristales tienen una forma anhedral.

Esta muestra presenta una textura porfírica, en donde se observa con mayor claridad la diferencia de tamaños, lo que se logró resaltar con el uso del filtro *HiGauss* e *Invert Contrast*, la inversión de la imagen deja ver el contraste de colores oscuros de los minerales de mayor tamaño, y la matriz de un color claro, como se observa en la figura 10 donde además sobresalen algunas pequeñas venas en color blanco de composición silícea.

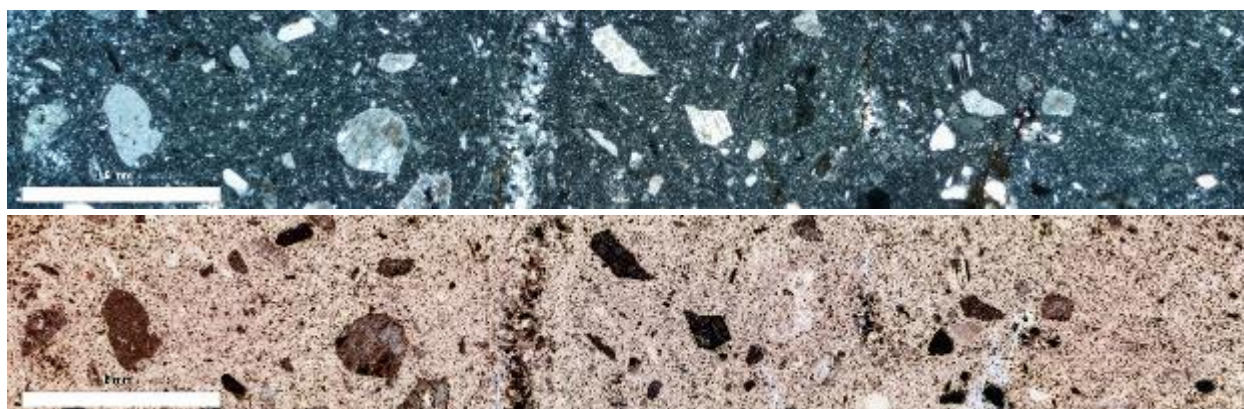


Figura 10. Inversión de colores que permitió la diferenciación de matriz versus cristales de mayor tamaño, mediante el filtro *Invert Contrast* de Image Pro Plus en la segunda imagen.

Con ayuda de la herramienta *Count/Size* de Image Pro Plus, se definió el porcentaje de matriz 91,66% y fenocristales 8,33%, como se aprecia en la figura 11 los fenocristales en color rojo, lo que ajusta el porcentaje determinado en el análisis petrográfico.

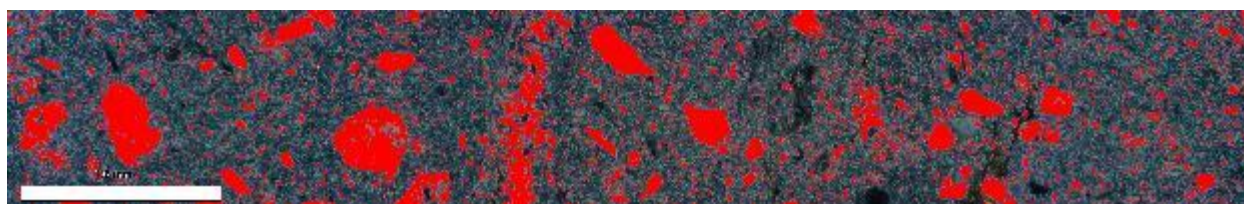


Figura 11. Determinación de porcentaje mineral por medio de *Count/Size*.

#### b. Pórfido dacítico de Villanueva, Nariño

Pórfidos dacíticos-andesíticos del cinturón del Cauca. Estas rocas hipoabisales, están conformadas por rocas de color gris con tonalidades verdes, textura porfírica con abundantes fenocristales de plagioclasas, cuarzo y minerales máficos, estas rocas marcan un episodio magmático durante el Mioceno medio (Nuñez, 2003).

En comparación con la riolita los pórfidos dacíticos tienen mayor porcentaje en plagioclasa entre un 60-30%, en cuanto al cuarzo oscila entre el mismo porcentaje que la riolita y el feldespato alcalino puede estar entre 0-10%. Al ser un pórfido hay una presencia de matriz y fenocristales y en algunas ocasiones fragmentos de roca (p.e. enclaves). Las texturas típicas se asocian a porfirítica seriada, con texturas de desequilibrio como zonamiento complejo, normal e inverso y texturas sieve (Lopez et al, 2006).

Para el ADI se presenta un pórfido dacítico (DARI 0025) de la región Villanueva, Nariño, correspondiente al evento magmático del Mioceno-Plioceno, que se puede relacionar con los Pórfidos dacíticos-andesíticos de la región.

A nivel macroscópico, la muestra analizada es una roca de color gris claro, se observan claramente fenocristales (hornblenda (12%), plagioclasa (22%), cuarzo (6%), biotita) con minerales accesorios de apatito y opacos, embabidos en una matriz vítrea.

La plagioclasa (tipo oligoclasa) que se observa en la figura 12, llega a tamaños aproximados de 2 mm. En general, exhibe maclado polisintético complejo, con el desarrollo de texturas sieve en los bordes de los cristales, asociado a procesos de disolución estando en la masa fundida de la que se formó, por esta reabsorción los cristales quedan con sus esquinas redondeadas (Winter, 2014). Esta textura se caracteriza por el desarrollo de hoyos en forma de cedazo, con algunas ranuras y con apariencia esponjosa debido a la disolución (MacKenzie et al., 1982).

Se usó el filtro el filtro *Open* (Image Pro Plus), que procesó los objetos relacionados y eliminó los espacios vacíos, de esta forma se logró reducir el ruido de la matriz, lo que homogenizó este fondo dando la oportunidad de resaltar la plagioclasa y sus bordes, además en su interior algunos pequeños parches que no se observaban claramente, mediante la petrografía convencional.

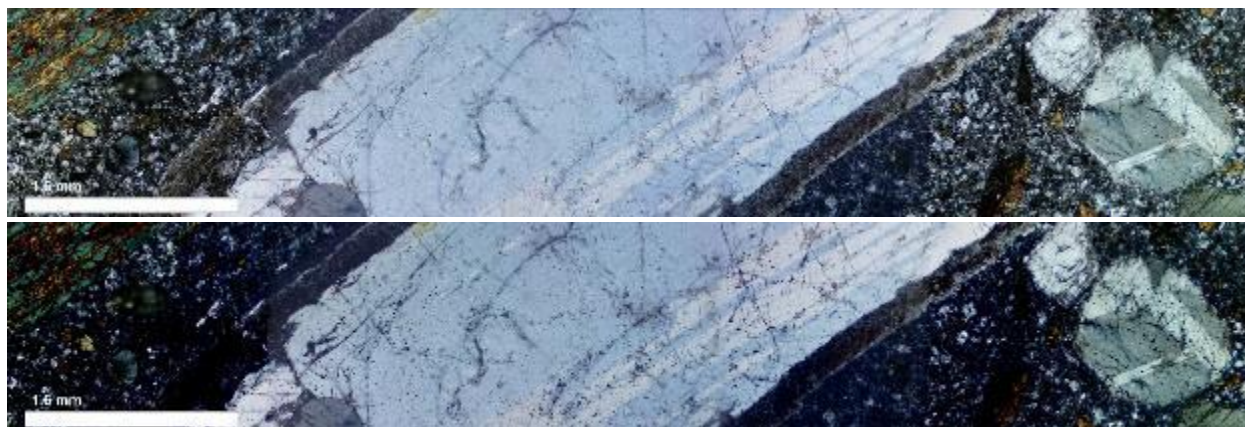


Figura 12. Imagen superior original del pórfido dacítico tratado e imagen inferior después de aplicar el filtro *Open* de Image Pro Plus.

De igual forma se realizó un cambio en las bandas de color que conforman la imagen, como se ve en la figura 13, con el fin de resaltar el maclamiento y zonamiento, los anfíboles alterados y

oxidados en tonalidades verde y lila mediante las combinaciones GRB (Green, red y blue) en ENVI.



Figura 13. Procesamiento de imagen por medio de ENVI con los cambios de bandas de colores a GRD para identificar los anfíboles.

Para el conteo modal, se usó la herramienta *Count/Size* que dio un resultado de 65% matriz y 35% cristales, los microfenocristales de plagioclasa se resaltan como minerales que constituyen la matriz (figura 14). En este caso, se manipuló la herramienta para lograr el mayor grado de diferenciación posible.



Figura 14. Uso de la herramienta *Count/Size* para sacar porcentaje de matriz y fenocristales.

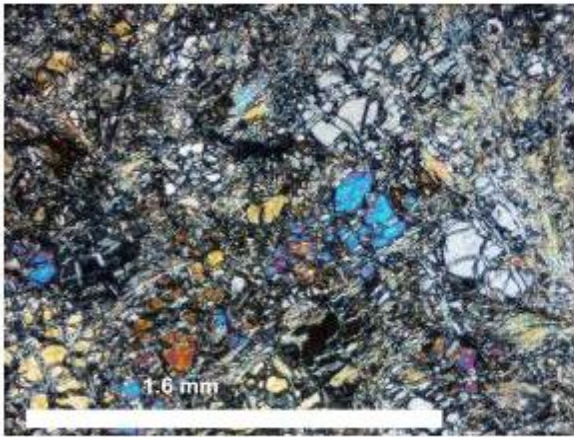
### 3.3 Eventos Plutónicos

#### 3.3.1 Rocas Ultramáficas

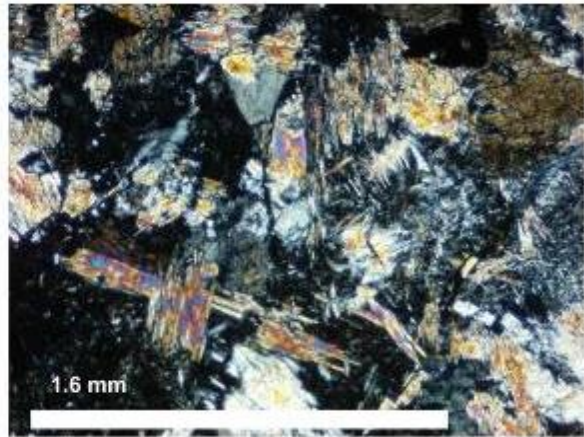
El término de roca ultramáfica se utiliza para aquellas rocas con cantidades mínimas de minerales félsicos, y contenido de minerales máficos es entre 90-100% y alto contenido de magnesio y de hierro. De acuerdo con la clasificación de rocas ultramáficas, pueden variar desde peridotitas (p.e. dunita con 90-100% de olivino; harzburgita con 40-90% de olivino y dominio de Opx; werhrlita con cantidades similares de olivino y dominancia de Cpx y lherzolita donde se presentan tanto Opx como Cpx) (MacKenzei et al., 1982), hasta piroxenitas (variando desde ortopiroxenitas a clinopiroxenitas con olivino o sin olivino).

En general las rocas ultramáficas presentan texturas hipidiomorfa, equigranular, generalmente con diferentes grados de alteración metasomática, asociada a la presencia de fluidos que promueven el crecimiento de cristales de mayor tamaño y/o transformaciones mineralógicas que se mueven en el rango de las rocas metamórficas (Winter, 2014). La textura cumulativa se desarrolla por el proceso de acumulación de cristales durante el proceso de cristalización diferenciado. A lo largo del territorio colombiano se pueden destacar entre los eventos

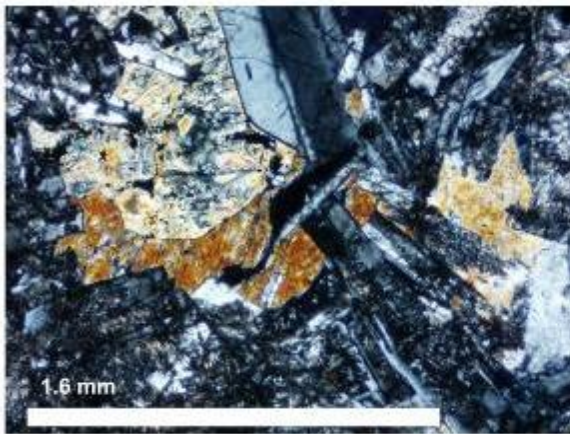
ultramáficos, las peridotitas de La Guajira, Dunitas y Komatiitas de Isla Gorgona y Dunitas de Medellín (figura 15).



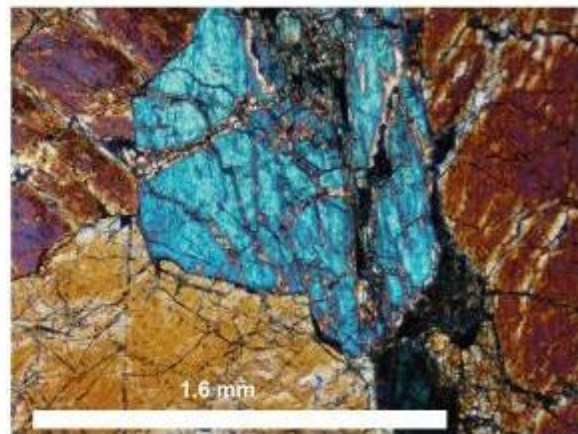
**Dunita de Medellín**



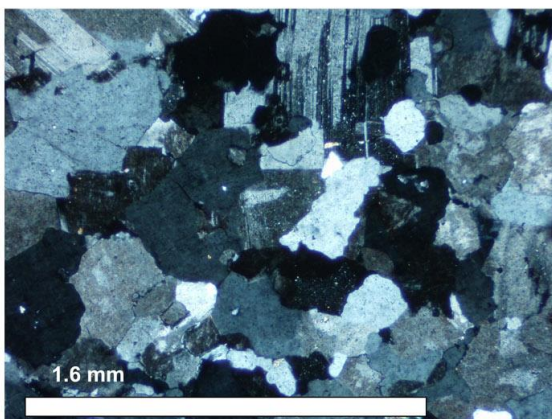
**Peridotita La Guajira**



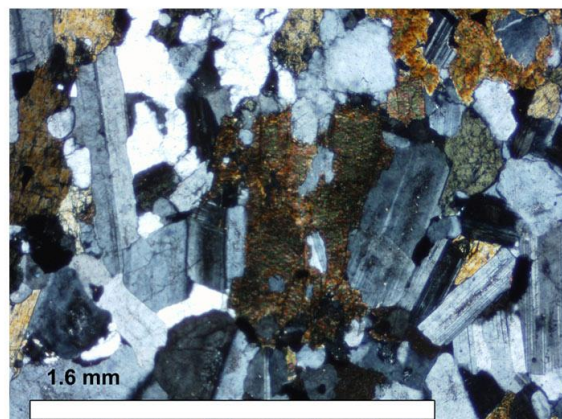
**Gabro Gorgona**



**Gabro La Guajira**



**Granito  
Pescadero, Santander**



**Diorita del Tolima**

Figura 15. Muestras del plutonismo en el territorio colombiano.

A continuación se presentan las muestras seleccionadas para el tratamiento ADI de los eventos plutónicos que están registrados en el Atlas de Rocas Ígneas.

a. Dunita Gorgona

Las dunitas de la Isla Gorgona hacen parte de los intrusivos ultramáficos denominado peridotitas, con una composición del 90% de olivino; en general presentan hasta un 10% de serpentización y están asociados a metasomatismo. Estas dunitas muestran una amplia gama de morfologías en los olivinos, entre ellos granos poliédricos, alargados y redondeados, además del olivino se observan pequeñas cantidades de clinopiroxeno poiquilítico, plagioclasa subédrica y cromita euétrica (Révillon et al., 2000).

La muestra seleccionada para el análisis ADI, es una dunita (UBP 0004) que representa el evento Gorgona del magmatismo colombiano. Macroscópicamente solo se puede observar las venas de serpentina que atraviesan la muestra y su color negro sin poder identificarse ningún mineral. Luego del análisis petrográfico se identificaron los minerales de olivino (90%), piroxeno (5%), serpentina y calcita asociado al metasomatismo. Los cristales van desde un tamaño fino a medio con una forma subhedral, clasificando así la roca como holocristalina; la serpentización representa gran porción de la muestra, a pesar de esta alteración, deja ver los cristales de olivino (figura 16 esquina inferior derecha), la forma y tamaño de los cristales es relativamente igual, tratándose en este caso de la textura hipidiomórfica, definida por cristales predominantemente subhedrales y de tamaño uniforme; las texturas hipidiomórficas registran la acomodación mutua de los cristales, interfiriendo entre sí durante el crecimiento (Winter, 2014).

La figura 16 presenta la imagen original, seguida de la imagen invertirla por medio de Image Pro Plus, lo que facilita distinguir la serpentización y en la tercera imagen se logra visualizar el borde de los cristales, para este efecto se aplicó *Invert contrast* y además *Variance* que detecta y enfatiza los bordes asociado a la reacción de olivino a indigsita.

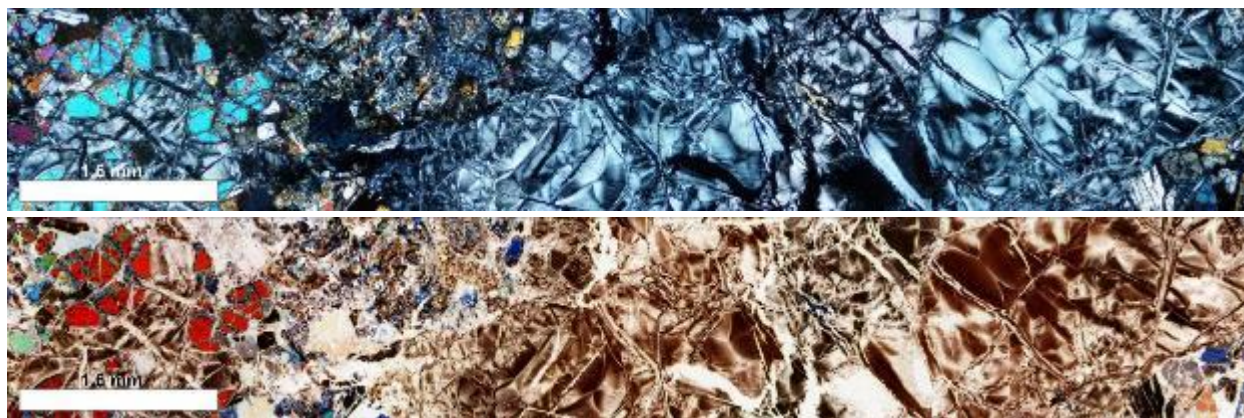




Figura 16. Procesamiento de imágenes primera original, segunda con inversión de imagen y tercera con *variance*, con el objetivo de resaltar la textura hipidiomorfica y granoblastica.

Sensu estricto, esta roca se debe analizar desde la perspectiva de una roca metamórfica, con textura granoblástica posiblemente asociada a metamorfismo dinámico superpuesto evidenciado a los procesos de deformación en estado frágil (figura 16, segunda imagen), se recomienda usar el nombre de dunita cataclástica serpentinizada.

#### b. Peridotita Medellín

Hacia el oriente y norte de la ciudad de Medellín aflora un cuerpo alargado de dunitas, en contacto tectónico con ortoanfibolitas, este contacto exhibe una alteración hidrotermal y hacen forma parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá (Pereira et al., 2006); la dunita es uniforme en composición, altamente magnesiana y contiene cuerpos de cromita podiforme, la serpentización es intensa en las zonas de alta afectación tectónica; este cuerpo se encuentra controlado por las fallas de la Acuarela y Rodas, sensu estricto, esta unidad estuvo sometida a condiciones de metamorfismo de grado medio con metamorfismo dinámico superpuesto (Pereira et al., 2006).

Para el análisis ADI, se analizó la peridotita (UBP 0003) tomada en los alrededores de Medellín, específicamente en el corregimiento de Santa Elena. La muestra macroscópicamente presenta un hábito masivo y en algunas partes fibroso (serpentización), su color es oscuro casi negro, con partes claras asociadas a las alteraciones. Microscópicamente se definieron los porcentajes minerales, dando como resultado el olivino predominante (98%), los cristales están fracturados con formas anhedrales y su tamaño es medio, su textura es hipidiomorfica lo que se trató de acentuar con el uso del filtro *Erode* (figura 17) el cual erosiona los bordes de los objetos brillantes y amplía los oscuros, de esta forma se resaltan los espacios donde se dividen los cristales, además de descartar sus coloraciones. Por su alteración y deformación, se recomienda usar el nombre de peridotita cataclástica serpentinizada.

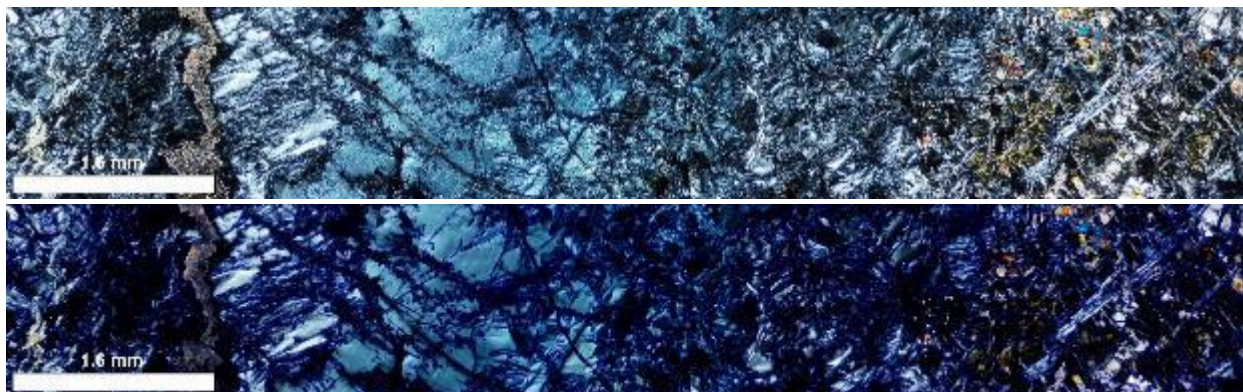


Figura 17. Muestra superior original de peridotita e inferior tratada digitalmente.

### 3.3.2 Eventos plutónicos máfico, intermedio y félsico

Los eventos máficos plutónicos en Colombia se han restringido a algunas localidades de la Guajira, Cabo de la Vela, Isla Gorgona (figura 15), y a lo largo de la sutura Romeral, generalmente de edad cretácica. Se denomina gabro a la roca de grano grueso, color oscuro a medio, en el diagrama QAP su porcentaje se distribuye con un 0-10% feldespato alcalino, 40-70% de plagioclasa y cuarzo puede ser nulo, otros minerales típicos son piroxenos y olivinos. La presencia de augita es común y puede tener una ligera zonificación, mostrado a su vez una textura laminar debido a la exsolución (MacKenzei et al., 1982). Por su contenido de olivino, plagioclasa, piroxenos y hornblenda recibe diferentes nombres (p.e. gabro olivínico, gabro con piroxeno y gabro hornbléndico).

Algunos eventos importantes de emplazamiento de cuerpos plutónicos intermedios, se han registrado desde el Jurásico hasta el Cretácico (p.e. Diorita de Publito, Diorita de Altavista, Batolito de la Plata, entre otros). La diorita es una roca compuesta principalmente por plagioclasa, hornblenda y biotita, algunas rocas presentan en menor proporción cuarzo y piroxenos, la diferencia en cuanto a los gabros es por la composición de la plagioclasa y menos contenido de minerales máficos, un mineral accesorio típico es el apatito en pequeñas porciones (Winter, 2014) (Figura 15).

Finalmente, el plutonismo félsico, se representa ampliamente a lo largo del territorio colombiano, asociado a diferentes periodos geológicos (p.e. Granito de Parguaza de edad precámbrica; Granitos del macizo de Santander y de Quetame (Paleozoico inferior); Stocks del Permo-Triásico (p.e. Buey, Amagá, entre otros); Batolito Jurásicos (p.e. Ibagué, Mocoa, Segovia, Patillal, entre); Batolitos Cretácicos (p.e. Antioqueño, Sabanalarga); Batolitos Cenozoicos (p.e. Sonsón, Pidrancha, Farallones), entre los más representativos (Cediél et al, 2011). Las rocas graníticas, están constituidas esencialmente por Cuarzo 30-70%, feldespato y plagioclasa entre 50%, además de moscovita, biotita y anfíboles en pequeñas proporciones (figura 15). A continuación se presentan las texturas y rocas seleccionadas para el análisis:

a. Gabro de Anserma, Caldas

Los gabros de Anserma, hacen parte del cuerpo llamado Intrusivo Básico, son rocas de color gris-verdoso, tamaño de grano medio a fino y varían entre microgabros, gabros y cuarzo-gabros. Se encuentra en contacto fallado con la Formación Barroso. Microscópicamente las rocas tienen una textura general holocristalina fanerítica y equigranular, con desarrollo de textura cumular. Afloran sobre el flanco oriental de la Cordillera Occidental y al oeste del Sistema de Fallas Cauca-Almaguer (Hincapié et al., 2011).

Se seleccionó el Gabro (GBDR 0006) proveniente de la Carretera Anserma-La Virginia, Caldas, muestra que corresponde al evento magmático del Cretácico - Paleógeno. Macroscópicamente tiene un color oscuro, con textura fanerítica y pátinas de oxidación. Los cristales tienen un tamaño medio de 0,5 cm. Mineralógicamente, está conformado por plagioclasa (42%), piroxeno (51%) y olivino (5%), también hay presencia de serpentina en venas fibrosas, como alteración del olivino, los cristales tienen una forma entre subhedral a anhedral. En sección delgada se puede observar textura poiquilítica de plagioclasa en piroxeno, el cristal que encierra es decir el piroxeno se le conoce como oicocristal y los pequeños chadacristales (MacKenzei et al., 1982). Esta textura es muy importante para entender el orden de crecimiento de los minerales, puesto que si un mineral queda encerrado por otro, se debe que al este primer mineral cristalizó inicialmente, la textura se origina por una diferencia en las tasas de nucleación y crecimiento (López & Bellos, 2006).

Aplicando el filtro *Invert Contrast* (Image Pro Plus) de inversión de imagen, se ven los cristales de plagioclasa en colores oscuros marrones, sobresaliendo del piroxeno que los encierra, como se ve más claramente en la esquina inferior derecha (figura 18).

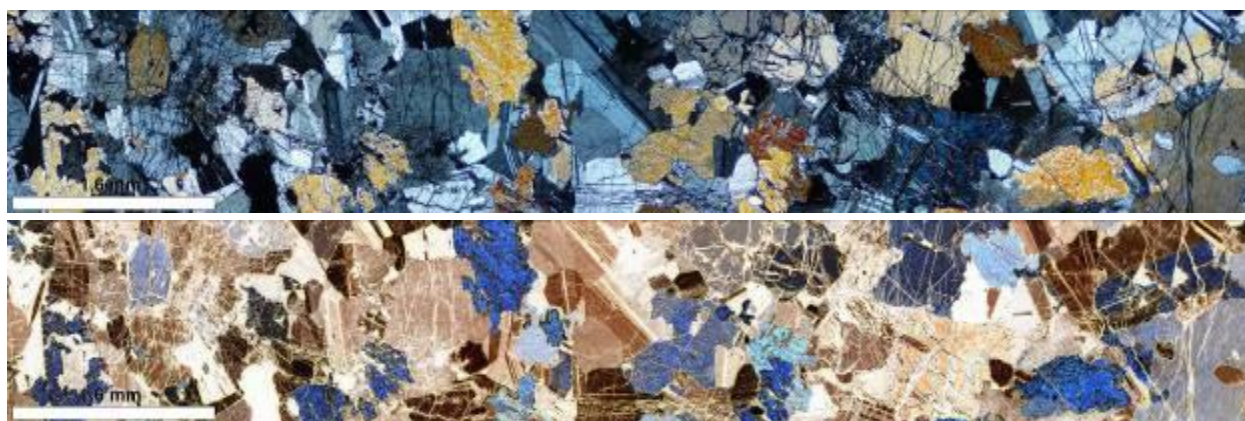


Figura 18. Imagen superior original de la sección delgada a la cual se le aplicó el filtro de inversión (segunda imagen), para resaltar las plagioclasas encerradas en piroxenos.

En la imagen original es difícil reconocer los minerales, sin embargo, con el cambio de la banda de colores a GBR (Green, blue y red) usando ENVI, así se puede apreciar los piroxenos y olivinos

de color lila y púrpura, y las plagioclasas en color verde (figura 19). Adicionalmente, se resaltan los minerales opacos y las fracturas y alteraciones en los cristales de olivino.



Figura 19. Imagen tratada por medio de cambio de bandas de colores con el propósito de resaltar los minerales entre sí.

Otro filtro que se aplicó a esta imagen, fue *Dilate* (Image Pro Plus), con el propósito de resaltar las maclas polisintéticas de las plagioclasas, además del fracturamiento del olivino, el cual amplía los bordes de los objetos brillantes, se observan las maclas con más brillo, al igual que los espacios de la fractura (figura 20)



Figura 20. Aplicación del filtro *Dilate* para mejorar el brillo de la imagen y resaltar maclas y fracturas.

En la figura 21 se observa la imagen tratada por medio de la herramienta *Variance* que enfatiza los bordes de los minerales, de esta forma se ven las superposiciones entre ellos y dan claves para descifrar los tiempos de cristalización.



Figura 21. Imagen digital procesada con Image Pro Plus, por medio del filtro *Variance*.

#### b. Diorita de Altavista

El Batolito de Altavista es una unidad intrusiva de composición diorítica a monzodiorítica, que aflora al oeste de Medellín, la roca es leucocrática con presencia de fenocristales de plagioclasa, cuarzo y ortosa, algunas veces hornblenda y biotita (Mejía, 1983).

La diorita (GBDR 0001) fue la muestra seleccionada para hacer el ADI, esta roca perteneciente a la zona Boquerón, Antioquia, hace parte del stock de Altavista asociado posiblemente al

magmatismo de arco similar al del Batolito Antioqueño (Rodríguez et al., 2012). Esta muestra corresponde al evento magmático del Cretácico tardío-Paleógeno.

A nivel macroscópico, se puede observar el color claro con tonalidad rosa, se observan los anfíboles diseminados por toda la muestra de color oscuro, su textura es fanerítica. Microscópicamente el anfíbol (28%) presenta una cloritización, la plagioclasa (70%) tiene alteración a sericita. El porcentaje restante lo conforman cuarzo, epidota, zoicita y minerales accesorios como apatito y zircón, se puede ver la disposición de los minerales de aproximadamente el mismo tamaño, estableciendo la textura equigranular, esta textura se presenta por una tasa de nucleación y velocidad de enfriamiento similar entre ambos minerales (Winter, 2014). Para facilitar la distinción de los bordes se usó *Invert contrast* y *Variance*, filtros de Image Pro Plus, con el objetivo de definir los bordes; debido a la similitud de colores en algunos minerales, el contraste de la imagen ayudó a acentuarlos (figura 22).

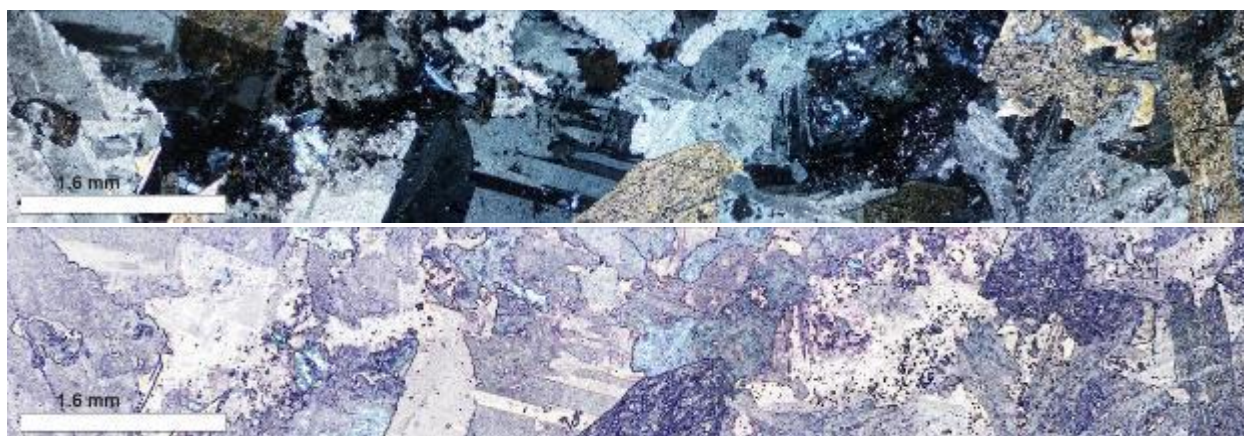


Figura 22. Mosaico de fotografía de la sección delgada perteneciente a una diorita, primera imagen original, segunda tratada digitalmente para resaltar la textura equigranular.

### c. Granito del Batolito Antioqueño

La unidad Batolito Antioqueño, aflora en la parte axial de la Cordillera Central, su composición varía desde tonalitas, granodioritas y monzogranitos, con textura hipidiomórfica, equigranular de grano medio a fino, con predominio de biotita sobre hornblenda. Se pueden localizar afloramientos en el oriente antioqueño como remanentes de rocas aislados (p.e. Peñol de Guatapé), en general presenta una meteorización profunda (Rodríguez et al., 2005).

La roca seleccionada es un granito (GN 0026) perteneciente al evento del Cretácico tardío-Paleógeno, tomada en Santa Fe de Antioquia, en las cercanías a la Quebrada Seca, roca que fue tomada como un canto rodado de la quebrada y según sus características pertenece al Batolito Antioqueño.

Se caracteriza por ser una roca fanerítica, con hábito masivo y cristales de tamaño medio, anhedrales, su color es claro con presencia evidente de feldespato potásico. A nivel microscópico

la composición es de plagioclasa (40%), feldespato (30%), cuarzo (15%), hornblenda (7%), biotita (6%) y en menor opacos, se observa la clorita como parte de la alteración de los anfíboles, se evidencian bordes de reacción entre el feldespato y la plagioclasa, textura peritítica y textura glomeroporfídica, en la cual se centró el tratamiento ADI.

En la parte derecha de la sección delgada (Figura 23), se expone una acumulación de cristales de plagioclasa, tratándose de la textura glomeroporfídica, se define como la agrupación de fenocristales a la textura glomeroporfídica, cristales que se pudieron adherir por la tensión superficial, esta textura se distingue por ser un grupo de un mismo mineral (Winter, 2014). Esta textura se incluye dentro de las porfídicas, su diferencia es la agrupación de cristales (MacKenzie et al., 1982).

Por medio del filtro *Invert contrast* del software Image Pro Plus, se acentuaron los bordes de los cristales y de igual forma dar mayor visibilidad a los cristales, como se aprecia en la figura 23.

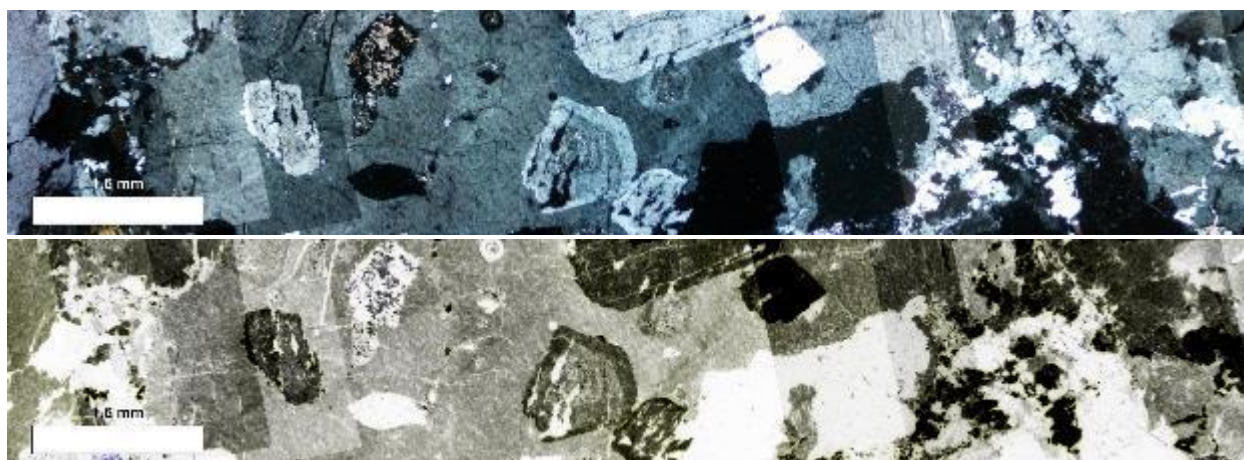


Figura 23. Imagen superior original del granito, inferior luego del procesamiento digital con el objetivo de resaltar la acumulación de minerales de plagioclasa.

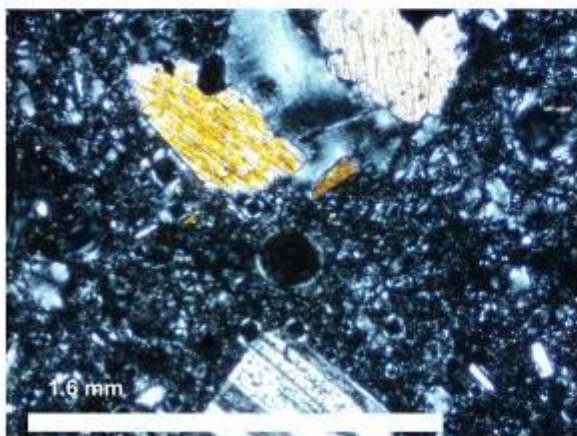
### 3.4 Eventos Piroclásticos

Las rocas de este tipo hacen parte de una actividad volcánica explosiva, cuando el magma se fragmenta y es expulsado en forma de material suelto. Estos fragmentos sueltos se denominan piroclastos. Una de las causas para estas fuertes erupciones es el ingreso de agua, lo que convierte el agua en vapor y desencadena en una explosión. El material puede pasar por procesos como caer desde una nube de cenizas o fluir en una avalancha ardiente. La clasificación de la roca se da por el tamaño de los clastos (p.e. ceniza fina a gruesa, lapilli, bloques) (Winter, 2014).

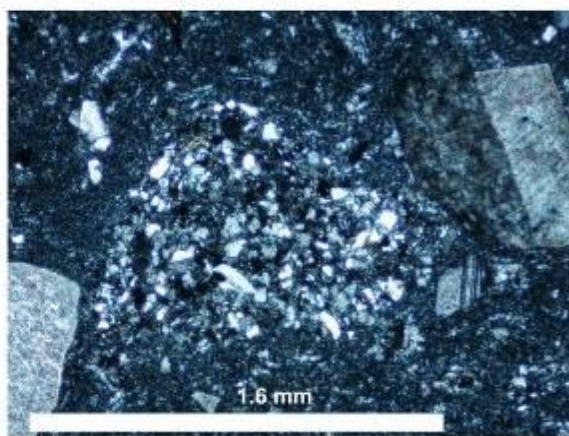
Dos de las rocas más representativas de las piroclásticas son la pómez y las ignimbritas. La pómez es una roca típicamente ligera y espumosa, las muestras generalmente flotan en agua, con más probabilidades si es una muestra fresca, su color predominante es gris claro, su formación es por una desgasificación en este proceso quedan espacios vacíos separados por vidrio volcánico. Las

rocas presentan una matriz vítrea, con algunos cristales de plagioclasa, anfíboles y cuarzo (Winter, 2014).

Las ignimbritas son producto de un colapso de un domo, con abundante material fino de los bloques colapsados. En ocasiones tienen un aspecto de avalancha de bloques, pero estos no generan mucho volumen de flujo, los cristales pasan por un proceso de soldadura debido a las altas temperaturas, lo que genera un aspecto diferenciador de las tobas (Llambías, 2001). La diferencia entre estas rocas parte de su proceso de formación, en el cual la pómez se encuentra altamente vesiculada, mientras que la ignimbrita presenta evidencia de soldamiento (p.e. textura fiammé). La figura 24, presenta dos muestras representativas de estas rocas. Su distribución en el territorio colombiano se encuentra a lo largo del evento volcánico Jurásico (Ignimbritas de los alrededores de la Sierra Nevada de Santa Marta, Fm. Guatapurí), y la cadena de volcanes del Plio-Pleistoceno hasta el reciente, como lo son los complejos Ruiz-Tolima, Huila, Cadena volcánica de los Coconucos, Sotará, Doña Juana, Galeras, Azufral, Cumbal, Chiles, entre los mas representativos.



**Pómez Nevado del Huila**



**Ignimbrita  
Sierra Nevada San Marta**

Figura 24. Imagen digital de dos secciones delgadas de las respectivas rocas piroclásticas descritas anteriormente.

a. Pómez del Volcán Azufral

Los Depósitos piroclásticos asociados al Volcán Azufral, son depósitos piroclásticos riodacíticos, que representan la actividad más reciente del volcán, son rocas efusivas, explosivas y extrusivas que rellenan los valles, estos episodios explosivos se relacionan por el emplazamiento al interior del cráter de domos, que a su vez se asocian con la formación de depósitos piroclásticos (Carvajal et al., 2008).

A partir del Atlas de Rocas Ígneas, se tomó para el ADI, la roca PIRO 0013, localizada en el volcán Azufral, perteneciente al magmatismo del Plio-pleistoceno. Macroscópicamente la muestra tiene una coloración clara, los cristales de hornblenda resaltan por su color en la matriz clara, se pueden

observar los poros ocasionados por vesiculación asociada a los gases. Microscópicamente, se determinaron minerales como hornblenda (20%), plagioclasa (5%), biotita (5%), cuarzo (5%) y una matriz vítrea de aproximadamente 55%. Los granos son finos y de forma subhedral, las plagioclasas tienen apariencia esquelética y la hornblenda en hábito rómbico. Los microfenocristales, marcan la textura de flujo, que se desarrolla en rocas con este tipo de tamaño de grano, una de sus principales características es la ondulación que se forma porque los minerales laminares que están orientados a lo largo del flujo; la alineación de los minerales o foliación magmática es de carácter primario, lo que quiere decir que es originada bajo condiciones magmáticas, posiblemente originado por las interacciones del magma con una parte líquida (López & Bellos, 2006).

Esta alineación de minerales alargados se denomina también como textura traquítica (Winter, 2014). Para resaltar esta textura, se aplicó un cambio de las bandas de colores en ENVI, el cual fue BRG (blue, red y green), donde se observa que los cristales que están orientados con el flujo presentan un borde verde y dejan ver la dirección del flujo (figura 25).

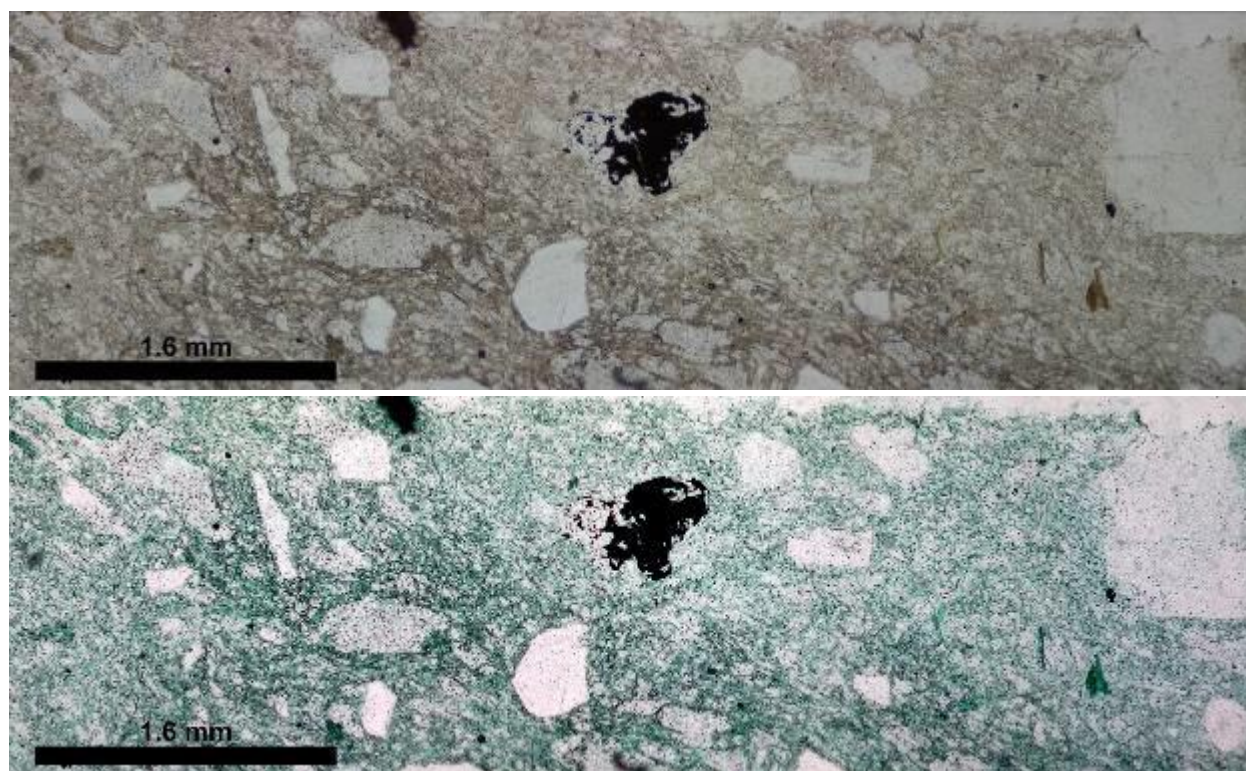


Figura 25. Tratamiento de imagen (primera original) por medio de ENVI (segunda tratada digitalmente) con cambio de colores de banda para resaltar la textura de flujo.

Para esta imagen se utilizó adicionalmente el filtro *Invert contrast* (Image Pro Plus), con el mismo propósito de resaltar los bordes de los cristales que se encuentran direccionados con el flujo, así se puede observar en la figura 26, imagen que contrasta el fondo oscuro con los bordes de los

minerales de color claro. Entre estas dos imágenes se logra hacer una mejor interpretación de la textura.

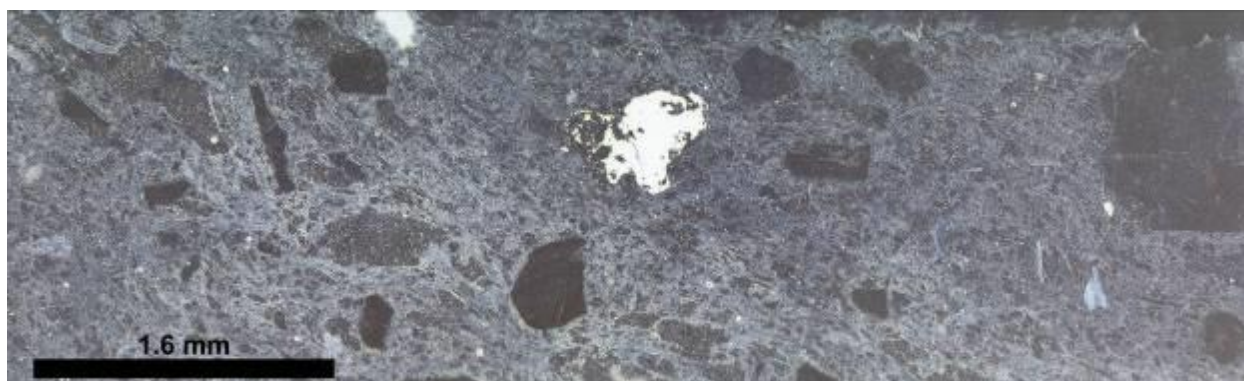


Figura 26. Imagen de la sección delgada de la Pómez, tratada con inversión de imagen, contrastando los cristales y resaltando la dirección de flujo.

Con ayuda de Image Pro Plus y la herramienta *Count/Size* se logró identificar el porcentaje de matriz en este caso 70% y fenocristales de 30%, se observan los cristales en color rojo y la matriz en color oscuro (figura 27).

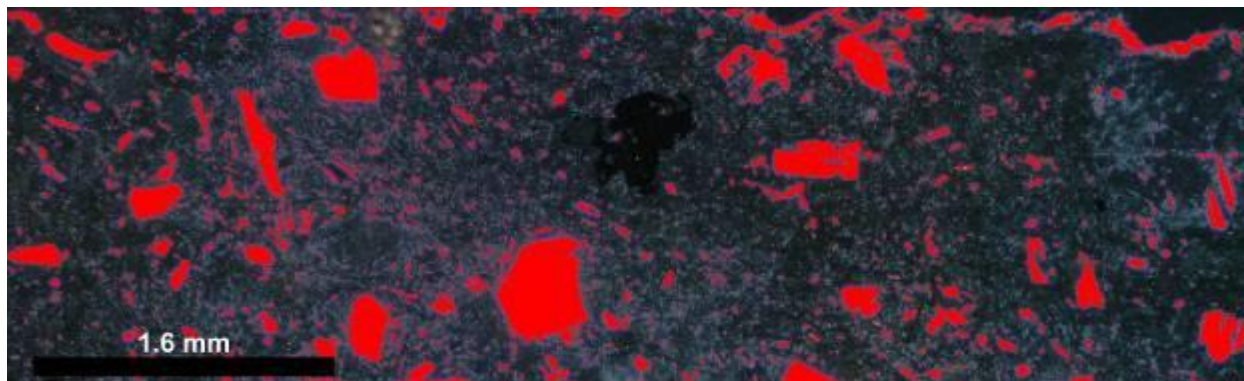


Figura 27. Tratamiento de imagen por medio de *Count/Size* que dio el porcentaje de matriz y fenocristales.

#### 4. DISCUSIÓN

El análisis textural en rocas ígneas, es de vital importancia para el estudio de la petrología ígnea, con el fin de inferir las condiciones de formación del magma, y acercarse a las condiciones de presión, temperatura y profundidad, y si los procesos de cristalización se dieron en condiciones de equilibrio o desequilibrio (MacKenzei et al., 1982). Uno de los problemas principales en el análisis petrográfico tradicional, es que el análisis se basa en una ventana de visualización muy pequeña (aproximadamente de  $4 \text{ mm}^2$ ), en un campo de magnitud de 100X. Para poder tener un análisis que represente la variabilidad petrográfica en una misma muestra, el análisis ADI en mosaicos de fotos de alta calidad, permiten mejorar los procesos descriptivos de la petrografía convencional.

Haciendo un contraste entre el conteo modal por medio de la petrografía convencional y el análisis ADI, se observa que en general este último, permite refinar el conteo modal en las rocas volcánicas, haciendo uso del filtro *Count/Size*, ya que permite discriminar los porcentajes de matriz, microfenocristales y fenocristales, de manera integrada y no a partir del conteo punto a punto de minerales.

Los filtros que más aportaron a la identificación de texturas de desequilibrio (p.e. textura sieve, poikilitica, zonamiento complejo, bordes de crecimiento, bordes o diferenciación de tamaños) fueron *Variance* y *Horizontal*, ya que permiten resalta los bordes de los minerales, ayudando a identificar la relación entre granos. El filtro *Hi Gauss* en general permitió el mejoramiento de las imágenes, incrementando la claridad de la fotografía. Adicionalmente, la manipulación y combinación de las bandas (RGB), permite producir imágenes en color falso en función de las bandas escogidas, con el propósito de hacer visibles minerales que tiene un color similar, y que son difíciles de diferenciar solamente usando el microscopio petrográfico, al darle una intensidad de color a cada uno se logró mejorar la interpretación en cuanto al crecimiento y formación.

La gran diversidad de filtros y sus diferentes características, dan lugar a la manipulación de cada uno según el propósito, su adaptabilidad a las necesidades de cada muestra es de gran ventaja, puesto que cada persona puede incursionar con las diferentes opciones de intensidad. A partir del análisis efectuado se dejan bases para el tipo de rocas seleccionadas, se trató de agrupar el tipo de herramientas más prácticas y útiles para los resultados requeridos. La aplicación del ADI permite afianzar los procesos de enseñanza-aprendizaje, al estimular el intercambio de conocimiento.

## 5. CONCLUSIONES

La posibilidad de ajustar los parámetros de varias herramientas, es de gran utilidad para incrementar la diversidad en los resultados de la imagen. Los dos softwares brindan una amplia variedad en cuanto a herramientas y dejan al usuario con muchas opciones para intentar de acuerdo a las necesidades o requerimientos del estudio.

Los filtros de largo espectro fueron utilizados para el realce de fenocristales versus matriz, puesto que su opción de definir los parámetros manualmente logró imágenes con mayor contraste.

Algunas rocas por la distribución mineral o sus condiciones de formación, requirieron el uso de dos filtros o herramientas para lograr un mejor resultado y una apropiada interpretación.

Es necesario hacer el análisis petrográfico en primer lugar, para que el procesamiento de las imágenes resulte más efectivo y sencillo al momento de saber en qué se debe enfocar.

## 6. REFERENCIAS

- Álvarez, J. A., (1987). Geología del Complejo Ofiolítico de Pacora y secuencias relacionadas de arco de islas (Grupo Quebradagrande). Instituto colombiano de geología y minería, INGEOMINAS. Medellín. 81p
- Berrezueta, E., Domínguez-Cuesta, M. J. (2010). Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológico-mineros. IGME – CYTED. Oviedo, 200 pp.
- Carvajal, D., Alfaro, C., Molano, J. C., Romero, D., & Mojica, J. (2008). Contribución al modelo geotérmico del volcán Azufral a partir de identificación de zonas de alteración hidrotermal. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences*, Volumen. (33), 99-108
- García, G. R., & Sierra, M. I. (2010). Las Sedimentitas de Tripogadí y las Brechas de Triganá: Un registro de Volcanismo de Arco, Corrientes de Turbidez y Levantamiento Rápido Eoceno en el noroccidente de Sur América. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences*, Volumen. (35), 74-86.
- Hincapié, D. F. V., Ríos, A. F. S., Toro, L. M. T. (2011). Petrografía y geoquímica de las rocas intrusivas aflorantes entre los municipios de Mistrató y Velén de Umbría (Departamento de Risaralda, Cordillera Occidental colombiana). *Boletín de Geología*, Volumen 33(2), 47-57.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. (1980). Geología de la plancha 76 Ocaña. Bogotá
- Llambías, E. J. (2001). Geología de los cuerpos ígneos. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.
- López, J. P., & Bellos, L. I. (2006). Texturas y estructuras de las rocas ígneas: significado petrológico e implicancias en las condiciones de formación de las rocas. INSUGEO.
- MacKenzie, W. S., Donaldson, C. H., & Guilford, C. (1982). Atlas of igneous rocks and their textures. Longman.
- Marí-Ceron, M. I., Londoño Y. D. (2015). Uso del análisis digital de imágenes (ADI) como herramienta para el estudio petrográfico en rocas metamórficas. Universidad EAFIT, Medellín.
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. D. J., Toro, L. M. (2008). Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Volumen (22), 27-38.

Nivia, A., Marriner, G., Kerr, A., Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes". En: Países Bajos Journal Of South American Earth Sciences p.423 – 436.

Nuñez, A. (2003). Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo. Instituto colombiano de geología y minería, INGEOMINAS. Bogotá

Pereira, E., Ortiz, F., & Prichard, H. (2006). Contribution to the knowledge of amphibolites and dunitas of Medellín (Complejo Ofiolítico of Aburrá). Dyna, Volumen (149), 17-30.

Rayo-Rocha, L., & Zuluaga, C. A. (2011). Procesos magmáticos en el Volcán Nevado del Ruiz: Un análisis cuantitativo textural. Boletín de Geología, 33(2), 59-72.

Révillon, S., Arndt, N. T., Chauvel, C., & Hallot, E. (2000). Geochemical study of ultramafic volcanic and plutonic rocks from Gorgona Island, Colombia: the plumbing system of an oceanic plateau. Journal of petrology, 41(7), 1127-1153.

Rodríguez, G., Arango, M. I., & Bermúdez, J. G. (2012). Batolito de Sabanalarga, Plutonismo de arco en la zona de sutura entre las cortezas oceánica y continental de los Andes del Norte. Boletín de Ciencias de la Tierra, (32), 81-98.

Rodríguez, G., Sierra, M. I. (2010). Las Sedimentitas de Tripogadí y las Brechas de Triganá: Un registro de Volcanismo de Arco, Corrientes de Turbidez y Levantamiento Rápido Eoceno en el noroccidente de Sur América. Geología Colombiana, Volumen (35), 74-86.

Rodríguez, G., Sierra, M. I., Zapata, G., Correa, T., Peláez, J. R. (2010). Geología de las planchas 58 Sapzurro (Capurganá), 68 Acandí y 79 Bisunguía (Cerro Tagarí). Instituto colombiano de geología y minería, INGEOMINAS. Medellín

Rodríguez, G., Zapata, G. (2013). Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el sistema de Fallas de Romeral en los Andes del norte?. Boletín de ciencias de la Tierra, Volumen (33), 39-58.

Solarte. B. (2010). Esquema de ordenamiento territorial Municipio de Colón-Genova. Nariño.

Winter, J. D. (2014). Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson Higher Ed.