

Shape Preferred Orientation (SPO) methodology for oriented hand specimens of rock and outcrops through digital image processing

Manuela Botero-García; Sara Paulina Marín-López & Cesar Javier Vinasco-Vallejo

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín. bgmanuela@unal.edu.co; spmarinl@unal.edu.co; cvinasco@unal.edu.co

Received: Agust 1rd, 2014. Received in revised form: December 10th, 2015. Accepted: July 7th

Abstract

The shape-preferred orientation (SPO) is a technique, which allows the study of the fabric of deformed rocks and understanding its dominant deformational style and partitioning. This work presents SPO results and methodological aspects for one hand specimen of rock and a high-resolution composed image of an outcrop through digital image processing. The technique involves imaging of three semi-orthogonal oriented sections for digital processing and subsequent implementation in structural software. The image processing consists of digital separation of a phase of interest, i.e. defining the deformational fabric. The processed images are then implemented in the SPO2003® software for acquisition of sectional ellipses and finally implemented in the Ellipsoid2003® software to obtain the characteristic ellipsoid of deformational fabric. For outcrops, due to the difficulty to finding three appropriate sections for photography, it was only obtained a sectional ellipse, characteristic of the rock fabric based on contrasting deformed quartz segregates in mylonitic schists.

Keywords: Shape preferred orientation (SPO), digital image processing, high resolution, Anfíbolita de Sucre, tectonites.

Metodología para el estudio de Orientación Preferencial de Forma (OPF) en muestras de mano de roca y afloramiento a través de procesamiento digital de imagen

Resumen

Los estudios de orientación Preferencial de Forma (OPF) permiten estudiar la fábrica de una roca deformada y comprender su estilo deformacional y partición. Presentamos estudios de OPF y aspectos metodológicos para secciones pulidas de roca en muestra de mano y afloramiento a través de tratamiento digital de imagen. La técnica consiste en la captura de imágenes de tres cortes de roca semi-ortogonales orientadas para tratamiento digital y posterior implementación en software estructural. El tratamiento de imagen consiste en la separación digital de una fase mineral que defina la fábrica deformacional. Las imágenes tratadas, son implementadas en el software SPO2003® para la obtención de elipses seccionales e implementadas en el software Ellipsoid2003® para la obtención del elipsoide característico de la fábrica deformacional. Para el caso de afloramiento, se presentan resultados para una sección vertical métrica. Se obtiene la elipse representativa de la fábrica bidimensional definida por los segregados milonitizados de cuarzo.

Palabras clave: Orientación preferencial de forma (OPF), tratamiento digital de imagen, alta resolución, Anfíbolita de Sucre, tectonitas.

1. Introducción

Los estudios de Orientación Preferencial de Forma OPF (SPO por sus siglas en inglés) permiten analizar la anisotropía geométrica en rocas deformadas, la cuantificación y comparación entre estados deformados y la determinación de los regímenes de deformación [4] a través de la medición de la forma de los minerales o fragmentos deformados. La fábrica es la configuración espacial y

geométrica de todos aquellos componentes desarrollados de forma penetrativa y repetitiva a través del volumen de roca [5] incluyendo la foliación, la lineación y la distribución del tamaño de grano.

La OPF resulta ser un método de caracterización de la fábrica anisotrópica de rápida adquisición de datos para la determinación de las orientaciones preferenciales y obtención de parámetros cuantificables de deformación.

Existen varias técnicas para estudios de OPF, incluyendo principalmente la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) a través de sus parámetro P' (grado de anisotropía magnética) y T (forma del elipsoide) [8]. En esta contribución, la adquisición de los parámetros de forma se realiza a través de fotografía en tres secciones de roca pulidas y orientadas para obtención de elipsoides de forma (3D) y en afloramiento para la obtención de elipses de forma (2D).

Las técnicas digitales de tratamiento de imágenes se realizan a través de software especializado comercial tipo Photoshop® y software gratuito desarrollado por Robin [7] y Launeau y Robin [2,3] para la obtención de elipses seccionales en el caso del SPO2003® y posterior adquisición del elipsoide de forma a través del software ELLIPSOID2003®. Adicionalmente, fueron aplicados conceptos de OPF en afloramientos del orden métrico a decamétrico para obtención de elipses (2D) seccionales de forma en fases leucocráticas deformadas contrastantes, del tipo bandas de segregación en metamorfitas.

A pesar de que las técnicas de OPF están bien desarrolladas y existen abundantes contribuciones en la literatura, son pocos los trabajos desarrollados sobre bloques pulidos orientados, pues la mayoría de trabajos se realizan sobre secciones delgadas orientadas. Por otro lado, no se conoce ningún trabajo que utilice imágenes de afloramiento para estas aplicaciones. En este sentido, el trabajo busca aplicar técnicas de fotografía de alta resolución a estudios de geología estructural.

La discusión presentada es fundamentalmente de tipo metodológico y se abordaron brevemente las potencialidades de la técnica tanto para muestras de mano orientadas como para afloramiento. En el caso de imágenes de afloramiento, la técnica se basa en la adquisición de imágenes de alta resolución obtenidas a través de la toma de panorámicas gigapixeladas por medio de la combinación de decenas a centenas de fotografías obtenidas con el sistema GigaPan®, un montaje robótico que controla la toma automática de fotografías que son posteriormente ensambladas utilizando software comercial tipo Autopano Pro 3.5® y posteriormente tratadas digitalmente en Photoshop® para ser finalmente implementadas en SPO2003®.

Los estudios de OPF en secciones pulidas y afloramientos presentan dos ventajas particulares frente a los estudios a escala microscópica: (1) no existe limitación práctica en el área de observación y estudio estadístico de la fábrica dado que se trata de fotografía de afloramiento o de bloques pulidos, y por tanto se puede realizar el trabajo para rocas con textura grueso-granular o de distribución de tamaño variable, incluyendo rocas de textura porfídica o néisica y (2) los bajos costos asociados a la preparación de las muestras pues no requieren elaboración de secciones delgadas.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del presente trabajo fue colectada una muestra de mano orientada de la Anfibolita de Sucre en cercanías de Olaya (Figs. 1 y 2a-c), y fue obtenida una imagen de alta resolución de afloramiento de orden métrico

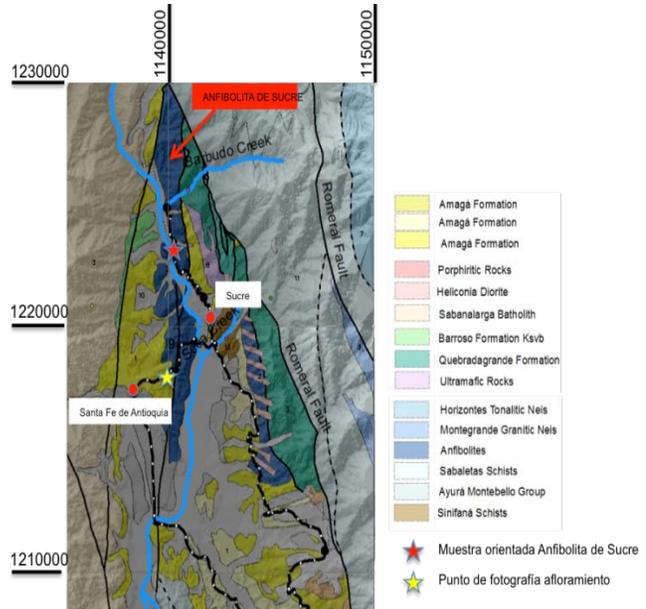
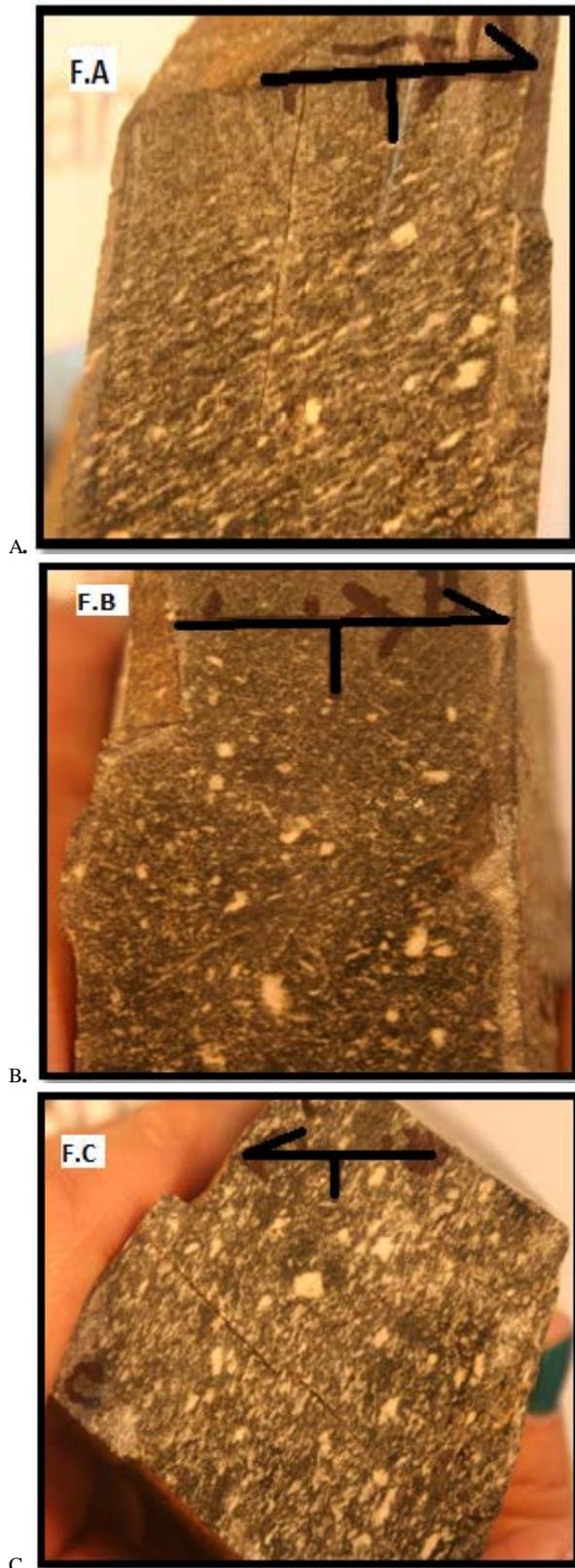


Figura 1. Mapa Geológico y de localización.
Fuente: Los autores

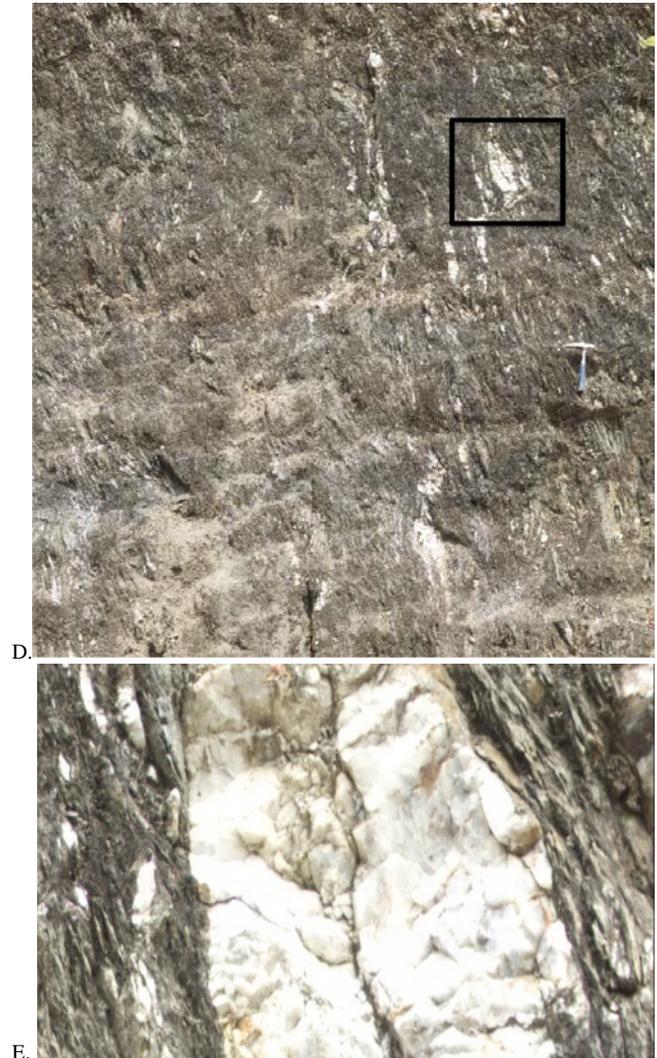
(Figs. 1 y 2d-e) de esquistos presumiblemente del complejo Arquía cerca del puente de Occidente en jurisdicción del municipio de Santa Fe de Antioquia. Con estas muestras no se pretende realizar un trabajo de geología con alcance estadístico sino presentar una contribución fundamentalmente metodológica. La Anfibolita se encuentra inmersa en la zona de deformación del sistema de fallas de Romeral en su sector norte (Fig. 1). El cuerpo presenta características particulares texturales incluyendo una estructura LS general, es decir, con leve dominancia de estructuras lineales sobre estructuras planares o foliadas con evidente dominancia de estructuras lineales (L) en algunos sectores y apreciable variación del tamaño de grano. La muestra usada para este estudio está compuesta principalmente por anfíbol y plagioclasa (Pl) y se caracteriza por un índice de color entre 40 y 50. Los cristales de Pl se observan estirados y budinados con formación de augens milimétricos y ocasionalmente porfiroblastos alados (Figs. 2a; 2c y 3a). Es posible también observar microplegamientos y en algunas secciones la textura predominante es isotrópica porfídica con cristales de Pl euédricos de hasta 4mm (Figs. 2b,c y 3b,c). La muestra presenta un claro contraste visual entre la fase leucocrática y la fase oscura y permite separar digitalmente con alguna facilidad las fases susceptibles de ser estudiadas estructuralmente (Fig. 3).

Por otro lado, las dimensiones del área fotografiada del afloramiento son aproximadamente de 8m de ancho x 5m de altura. Los esquistos son principalmente cuarzo-micáceos de coloración oscura, presenta bandas y augens deformados de cuarzo de escala centimétrica con esquistosidad sub-vertical (aprox. N-S) y plegamientos apretados. En este afloramiento aparecen bien marcados y contrastados visualmente los lentes deformados de cuarzo susceptibles de ser tratados digitalmente y estudiados estructuralmente (Fig. 3d). Las



C. Figura 2. Fotografías de las tres fases o cortes orientadas para una misma muestra de mano con marcación utilizando la regla de la mano derecha. A. Fotografía Fase A. B. Fotografía Fase B. C. Fotografía Fase C. Dimensiones centimétricas. (Escala 1cm). Fuente: Los autores

estructuras deformacionales son desarrolladas a diferentes escalas (Fig. 2d-e) y por tanto, una fotografía convencional solo tendría resolución suficiente para discriminar los budines mayores mientras que las texturas deformacionales centimétricas pasarían completamente inadvertidas.



D. Figura 2. Cont. D. Imagen de afloramiento obtenida a partir del ensamble de 189 fotografías tomadas con lente de 300 mm utilizando el sistema de montaje robótico Gigapan® y el software de stitching Autopano Pro 3.5®; E. Detalle de la imagen de afloramiento (recuadro en D) ilustrando la alta definición. Fuente: Los autores

3. Metodología

Las muestras de roca son orientadas en campo para obtener posteriormente las orientaciones de las tres secciones pulidas de interés después de cortar la muestra en tres caras o fases semi-ortogonales (Fig. 2). En el laboratorio, las fases son orientadas a través de un orientador manual construido para este trabajo con acero inoxidable, que permite mantener la muestra con la orientación original tomada en el campo y la fácil medición de las

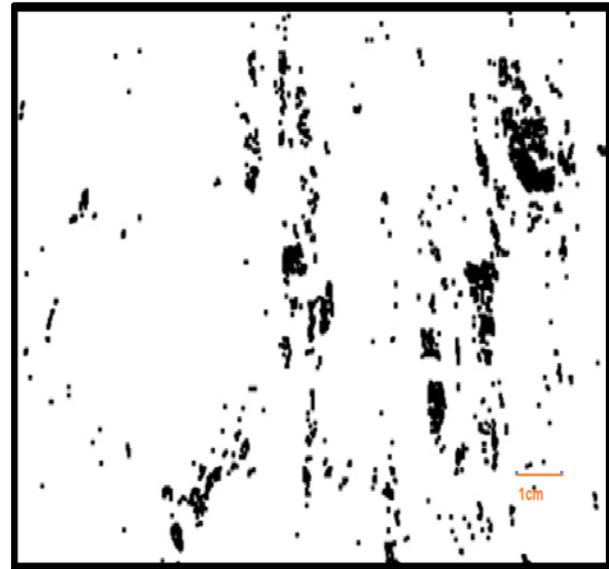
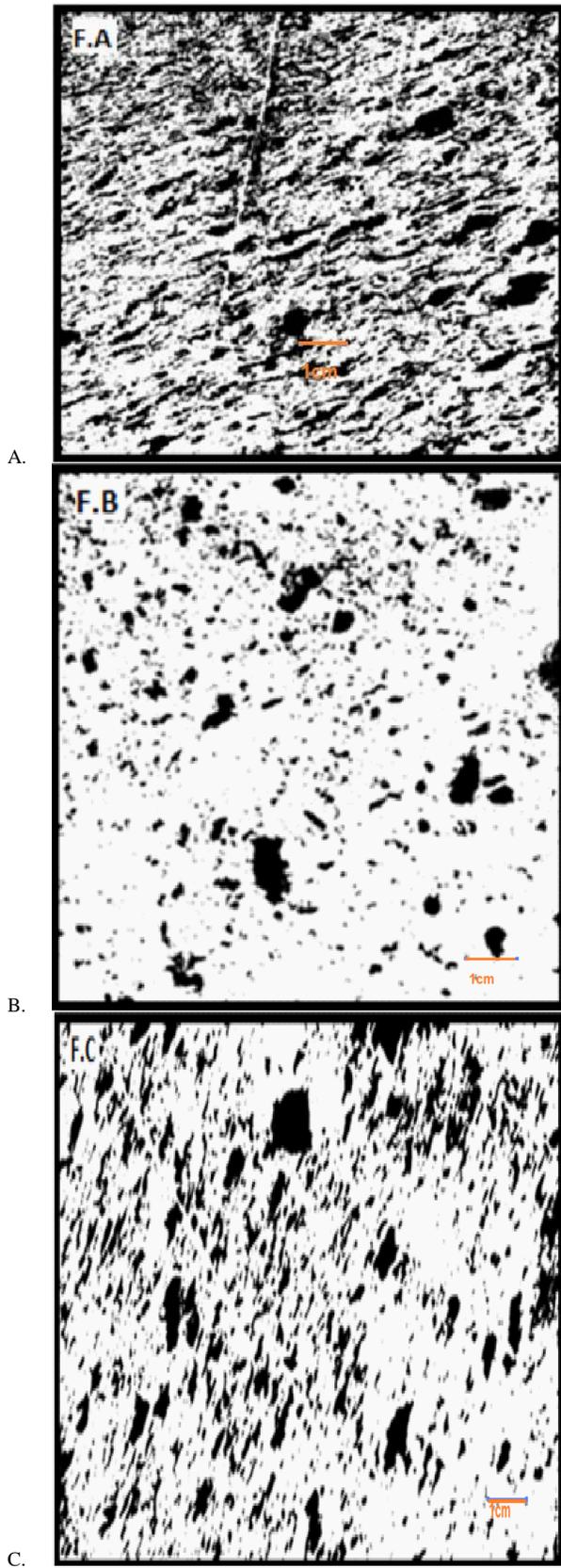


Figura 3. Imágenes tratadas digitalmente en Photoshop® para las tres fases y la imagen de afloramiento, con la fase de interés en negro: A. Fase A, B. Fase B, C. Fase C, D. Imagen para el afloramiento.
Fuente: Los autores

orientaciones de las fases cortadas en la muestra de mano (Fig.4). Idealmente, el bloque de roca debe tener dimensiones entre 10 y 15 cm, debe ser compacta y con bajo grado de meteorización para garantizar el éxito en el corte de las secciones utilizando una cortadora de disco de diamante. Las fases cortadas son orientadas según la regla de la mano derecha como notación requerida por el software SPO-2003®. La regla de la mano derecha consiste en la orientación del plano utilizando la mano derecha, donde el pulgar señala la dirección (y sentido) del rumbo y los cuatro dedos indican el sentido del buzamiento (Fig. 5). Las secciones pulidas deben ser marcadas con indicación del rumbo y el buzamiento y una escala gráfica para consideraciones de distribución de tamaño de grano.

3.1. Técnicas digitales y fotografía

Las técnicas digitales inician con la captura de imagen de las tres secciones orientadas de la muestra de mano, utilizando los parámetros de captura adecuados para lograr el mayor contraste posible de la fase mineral de interés. Estas imágenes son tratadas digitalmente en Photoshop®. El procesamiento subsecuente consiste fundamentalmente en maximizar el contraste en blanco y negro entre las fases minerales para proceder a su separación digital y limpieza, que incluye borrado de granos menores y completamiento de las estructuras mayores cuando sea necesario a través de la herramienta maximizar. De esta forma, el software reconoce estructuras individuales en el caso de que estén fragmentadas o fracturadas (Fig. 3). El tratamiento digital también puede realizarse en el propio software SPO2003® sólo para imágenes de bajo peso a través de las herramientas *Thresholding*, *B & W*, *delete small objects* (*hole and objects*)



Figura 4. Orientador en acero inoxidable, permite la fácil orientación y rotación de la muestra en tres ejes.
Fuente: Los autores



Figura 5. Ilustra la regla de la mano derecha. Observar la dirección del dedo pulgar que corresponde con el rumbo (sentido) del plano.
Fuente: Los autores

y *morpho math*, para contrastar las fases y eliminar las uniones indeseables entre los granos minerales.

3.1.1. Fotografía de afloramiento – Sistema Gigapan

Los GigaPan son panorámicas giga-pixeladas, imágenes digitales con billones de píxeles para la exploración en detalle de imágenes panorámicas utilizando un sistema de montura robótica para cámaras, operada automáticamente para la toma de cientos de fotografías para la obtención de una única imagen compuesta. Para el estudio de caso, se tomó una panorámica de afloramiento elegida de tal manera que presentara características apropiadas para una exitosa separación digital de la fase de interés, que adicionalmente presentara elementos geométricos a diferentes escalas con información susceptible de ser interpretada estructuralmente. La fase de interés corresponde a cuarzo organizado en bandas de segregación budinadas en contraste óptico con la fase esquistosa oscura (Fig.2d-e).

El procesamiento digital resulta idéntico para la imagen de afloramiento en Photoshop® excepto por la consideración del peso de la imagen y el cuidado para evitar pérdida de resolución. Las fotografías tomadas son ensambladas en el software comercial Autopano Pro 3.5® y exportada a Photoshop® como una imagen en formato TIFF. El tratamiento digital finaliza con la reducción de resolución de la imagen para su ulterior implementación en el SPO2003® importada desde Photoshop® en formato BMP.

3.1.2. Software estructural

El software estructural corresponde a los desarrollos de Launeau y Robin [3,4] y Robin [7], que incluyen el SPO2003® y el ELLIPSOID-2003®, donde se discuten ampliamente los pormenores de la técnica y su desarrollo matemático. El primero permite la obtención de parámetros de elipses seccionales para cada sección de roca mientras que el segundo implementa las tres elipses en un elipsoide que caracteriza la forma de fábrica de la roca.

SPO2003®.

Los análisis efectuados fueron ejecutados en SPO2003® por el “método de interceptos”[4] para la obtención de elipses seccionales correspondientes a cada una de las tres secciones de la roca. El conteo de los interceptos es un método paramétrico de análisis numérico de forma de una imagen bidimensional. Consiste en la determinación del número de intersecciones (número de píxeles) entre el límite de un grano determinado y la matriz de roca a través del barrido completo de una imagen por una sucesión de líneas paralelas que giran entre 0 y 180°. El resultado es un diagrama de rosas donde la dirección de máximo alargamiento corresponde a la dirección donde se registró el menor número de conteos. De esta manera, la magnitud y orientación de la anisotropía son obtenidas a partir del diagrama de rosas ponderada por el área total del grano[1].

ELLIPSOID 2003®

El Elipsoid2003® es un software para la obtención del elipsoide de forma con los datos arrojados por el SPO2003® que corresponden básicamente a los ejes mayor y menor y el rake de las elipses seccionales representadas en proyección estereográfica junto a los parámetros para construir los diagramas de Flinn.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos permiten establecer un protocolo de trabajo para la obtención de elipsoides de forma (deformación para rocas tectonizadas) en muestras de mano orientadas y pulidas y abre un espectro de posibilidades de análisis textural y estructural en observación a escala afloramiento.

Para la obtención exitosa de parámetros de anisotropía y de forma 3D es fundamental la realización de un cuidadoso procesamiento digital de imagen y una adecuada transferencia de orientación hacia los tres cortes de roca (Figs. 4 y 5). Las dificultades en la traslación de la orientación desde el campo hasta las fases del bloque en el laboratorio fueron superadas a través del desarrollo de un montaje en acero inoxidable que permite orientar fácilmente el bloque de roca y la traslación precisa de la orientación y su marcación en las diferentes fases.

El tratamiento de imagen en el software Photoshop® debe ser detallado y cuidadoso para lograr la mejor diferenciación posible de la fase de interés además de la más adecuada limpieza digital. Son normalmente utilizadas las herramientas de maximización, minimización y borrador para eliminar el ruido digital y permitir que los granos o agregados aparezcan bien definidos y contrastados. El trabajo de tratamiento digital es clave para la obtención adecuada de las elipses seccionales en el SPO2003® (Figs. 6-8). Cada sección de roca tiene sus propias características texturales y de contraste y por lo tanto debe ser tratada individualmente utilizando las herramientas más apropiadas de acuerdo a las necesidades requeridas.

Las Figs. 6-8 muestran los resultados generados en SPO2003® para la muestra de mano orientada (Figs. 6a, 7a y 8a). Cada figura presenta además la rosa de orientación para cada fase o corte de roca (recuadro en 6a, 7a y 8a), un ejemplo magnificado de una elipse de forma para un único grano mineral (Figs. 6b, 7b y 8b) y la elipse media representativa de la fábrica para la fase (corte) correspondiente (Figs. 6c, 7c y 8c). El elipsoide final obtenido en el software ELLIPSOID2003® (Fig. 9) para la muestra de mano de la Anfibolita de Sucre, presenta una fábrica deformacional LS con dominancia de componente lineal. En el diagrama de Flinn aparece en el campo de los elipsoides “Prolatos” (forma de cigarrillo) que corresponden a Tectonitas L-S (Fig. 10a). La Fig. 10b ilustra gráficamente el resultado obtenido, incluyendo la propia fábrica bidimensional por corte con sus respectivas elipses seccionales.

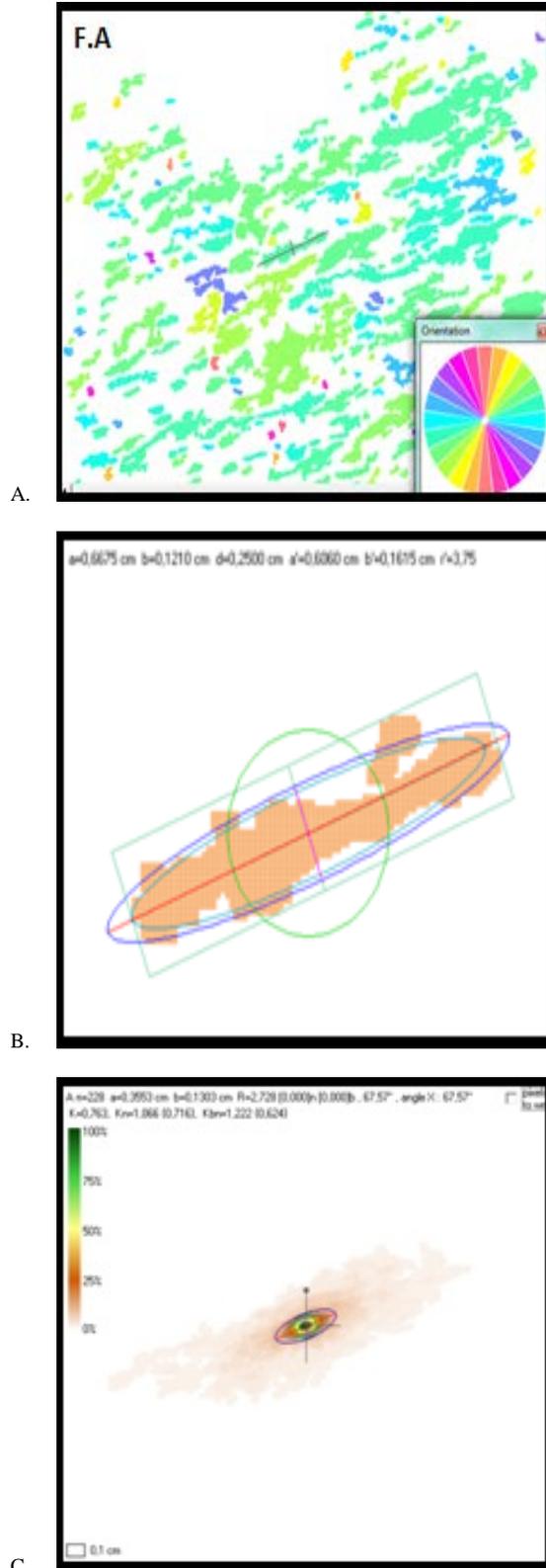


Figura 6. Resultados arrojados por el software SPO para la Fase A (corte A): A. Rosa de orientaciones con código de colores; B. Elipse seccional para un único grano de la figura a; C. Elipse seccional media para la fase A. Fuente: Los autores

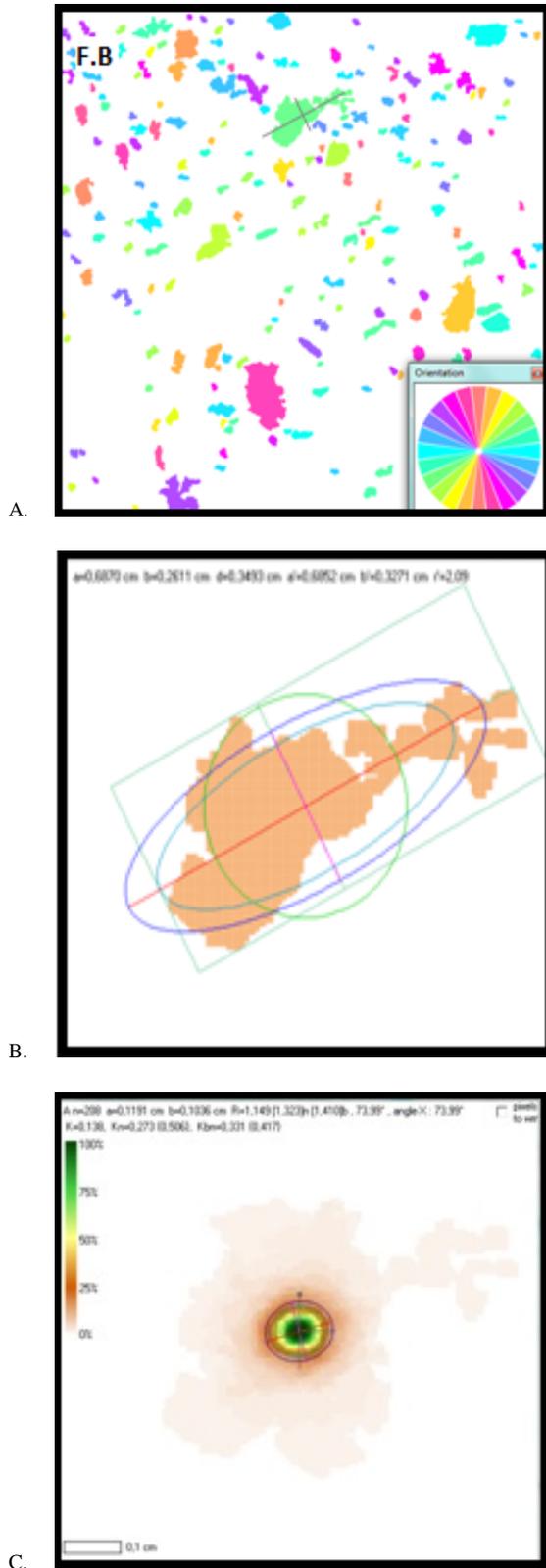


Figura 7. Resultados arrojados por el software SPO para la Fase B (corte B): A. Rosa de orientaciones con código de colores; B. Elipse seccional para un único grano de la figura a.; C. Elipse seccional media para la fase B. Fuente: Los autores

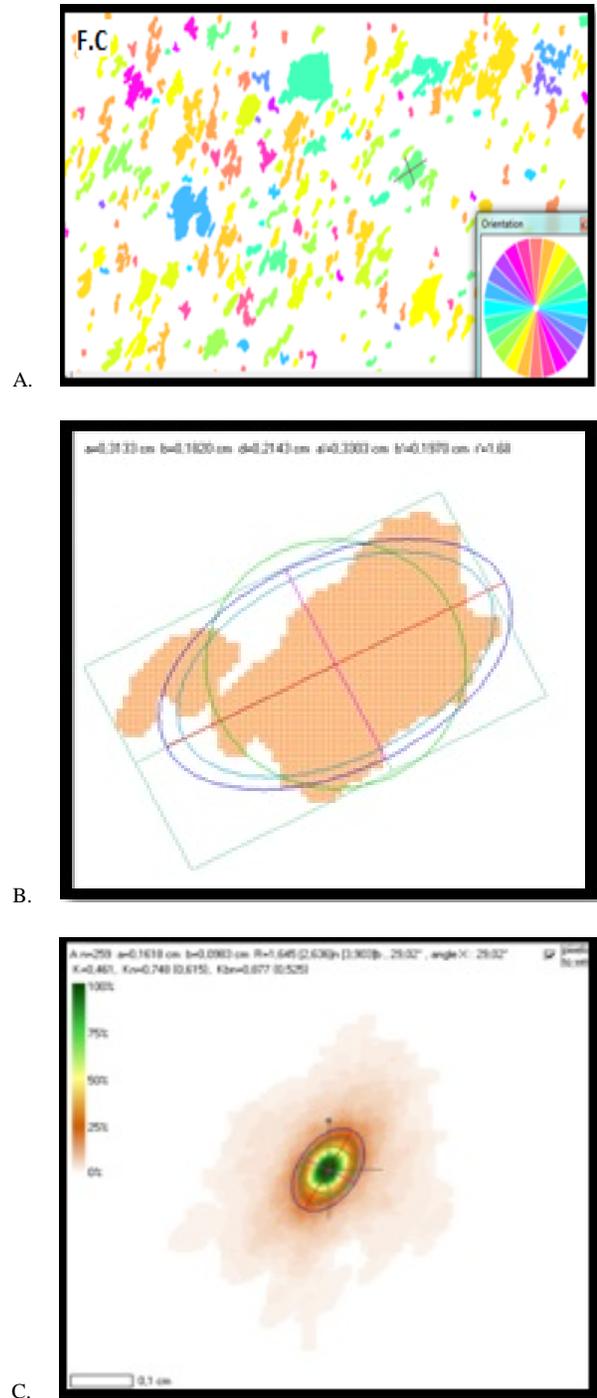


Figura 8. Resultados arrojados por el software SPO para la Fase C (corte C): A. Rosa de orientaciones con código de colores; B. Elipse seccional para un único grano de la figura a.; C. Elipse seccional media para la fase C. Fuente: Los autores

En contribuciones futuras se pretende caracterizar la deformación del cuerpo completo, con la implementación de técnicas de OPF, ASM y petrografía en bloques y secciones delgadas colectadas en una malla regular de muestreo, con el objetivo de entender la partición de la deformación a lo largo del cuerpo y cuál es el papel que juega dentro de la zona de deformación asociada al sistema de fallas Cauca - Romeral.

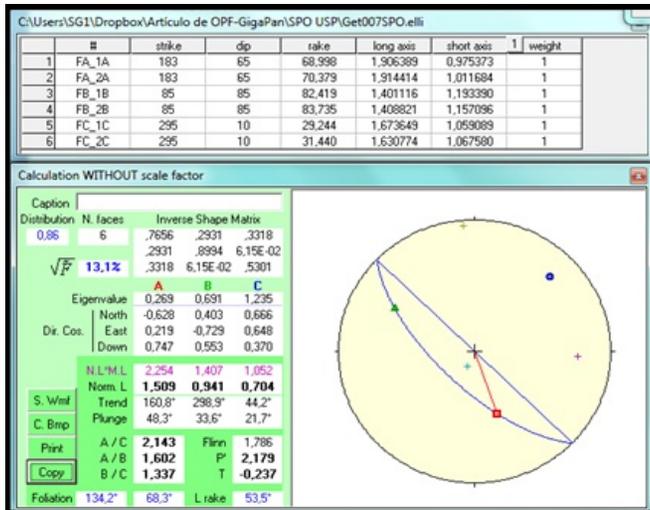
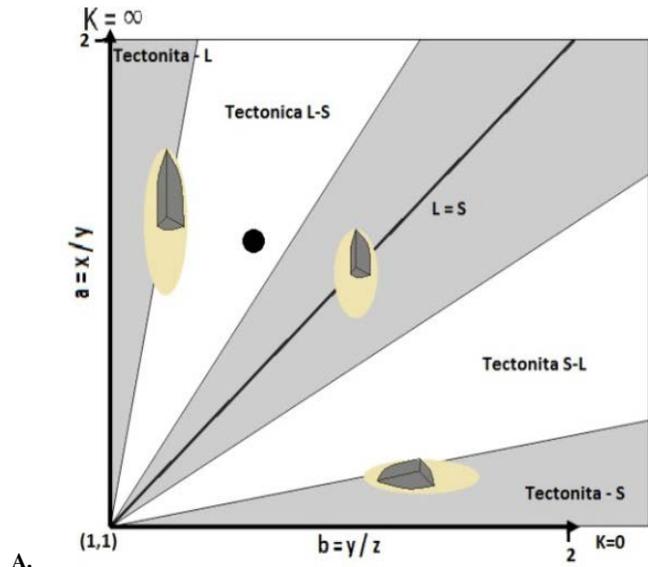


Figura 9. Resultado arrojado por el software Ellipsoid2003®. Orientación de los ejes principales del elipsoide en proyección estereográfica. El cuadro de resultados incluye datos de orientación y magnitud para la construcción del diagrama de *Flinn* y obtención de parámetros de anisotropía y forma del elipsoide. Cuadro rojo: dirección X del elipsoide; círculo azul: dirección Z del elipsoide; triángulo verde: dirección Y del elipsoide. Fuente: Los autores

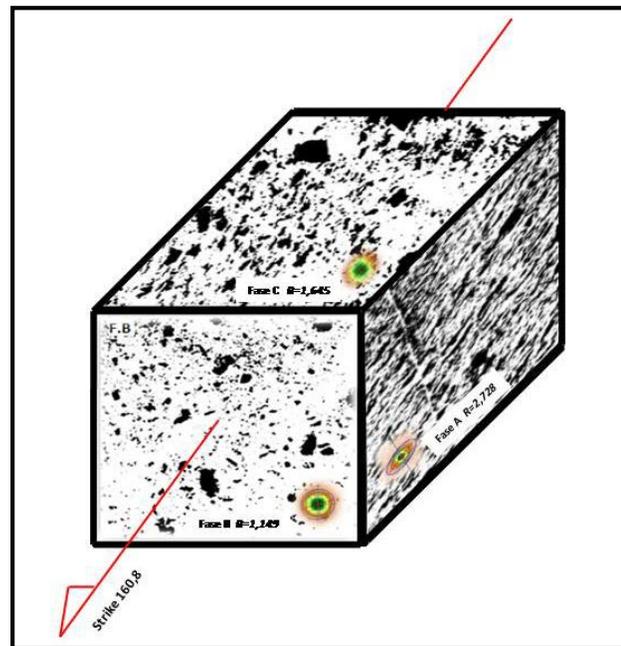
Por otro lado, los estudios texturales en afloramiento están condicionados por la propia naturaleza de la deformación, su carácter fractal, por el detalle necesario de observación y los requerimientos estadísticos. Teóricamente, un afloramiento de decenas de metros de ancho puede ser estudiado texturalmente si se cuenta con teleobjetivos de suficiente zoom óptico. Normalmente, estudios texturales para rocas deformadas, incluyendo milonitas, esquistos, franjas de cizallamiento, conglomerados deformados, entre otros, se logran con objetivos de 300 a 400 mm. La condición mínima es que la fase de interés pueda ser efectivamente separada digitalmente en virtud de su contraste natural (Figs. 2d-e). El punto más relevante para trabajar con escalas de afloramiento es la posibilidad de manipular y tratar una imagen que puede resultar excesivamente pesada para un PC con prestaciones promedio. Para esta contribución, se utilizó una *Precision Workstation* con procesador Intel® Xeon® E5-2620 v2 con capacidad de gerenciar imágenes de esta naturaleza. Por otro lado, el SPO2003® solo acepta imágenes de tamaños por debajo de aproximadamente 1 Mb. Esta condición inhibe cualquier posibilidad de tratamiento en el propio software estructural y por esta razón debe procesarse completamente en Photoshop®. El ensamble de la imagen requirió la utilización del software comercial Autopano Giga 3.5® para *stichting* de tal manera que se pudiera obtener una imagen con la resolución requerida para los estudios estructurales. En el caso de estudio tratado las texturas de deformación relevantes para estudio varían entre la escala decimétrica (Fig. 2d) y la escala centimétrica (Fig. 2e). Este rango de escala solo es posible ser analizado a través de fotografía de alta resolución.

La Fig. 11 ilustra los resultados obtenidos de SPO2003® para la imagen de afloramiento. La Fig. 11a muestra la rosa

de orientaciones con código de color después del tratamiento digital que incluye limpieza y remoción de elementos menores. La Fig. 11b muestra la distribución de elipses seccionales obtenidas para cada grano o aglomerados de granos y finalmente la Fig. 11c presenta la elipse de forma representativa del afloramiento basada en los lentes deformados de cuarzo.



A.



B.

Figura 10.A. Diagrama de *Flinn* que representa la fábrica de forma de la muestra de mano orientada (punto negro); Fuente: Modificada de Ramsay y Huber 1984
Figura 10.B. *Cartoon* ilustrando el resultado obtenido en términos de los parámetros estructurales y su representación real (elaboración propia). Muestra la dirección de la lineación L y la forma como se define la estructura general LS. Son representadas (en color) las elipses seccionales medias para cada fase semi-ortogonal (corte). Fuente: Los autores

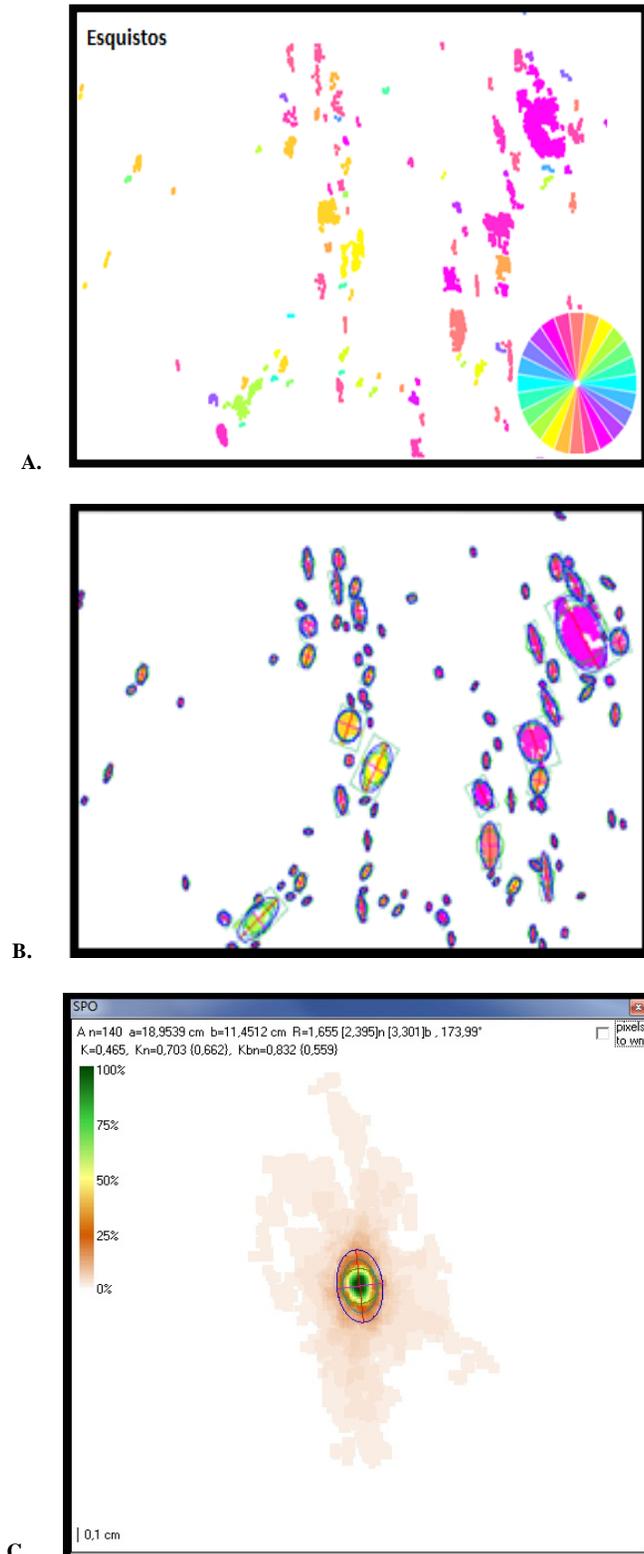


Figura 11. Resultados arrojados por el software SPO2003® para el afloramiento: A. Rosa de orientaciones con código de colores; B. Distribución de elipses para los elementos de fábrica individuales del afloramiento; C. Elipse seccional media para el afloramiento. Fuente: Los autores

5. Conclusiones

A través de esta contribución se discuten y presentan los pasos metodológicos simples para realizar trabajos estructurales basados en las técnicas de Orientación Preferencial de Forma (OPF) en muestras de mano y afloramiento. Resulta fundamental el tratamiento adecuado y cuidadoso de la imagen para generar el mejor contraste posible en blanco y negro de tal manera que el software SPO2003® consiga discriminar la fase de interés y a través de una adecuada limpieza digital, calcule adecuadamente los parámetros longitudinales que caracterizan la elipse de forma. Para el caso del afloramiento, el tratamiento digital resulta idéntico pero debe considerarse la dificultad de manipular imágenes de considerable peso. En este caso, basta ensamblar adecuadamente la imagen y tratarla enteramente en Photoshop®. Solo después del tratamiento digital puede re-muestrearse (*resampling*) para disminuirle tamaño de tal forma que pueda cargarse en SPO2003®.

Los resultados obtenidos con este tipo de estudio permiten caracterizar la fábrica de una muestra o de una unidad litológica, comprender su estilo deformacional dominante y estudiar la partición de la deformación regionalmente.

Para el caso de afloramientos, se abre un amplio espectro de posibilidades de estudios texturales, que incluyen los propios trabajos estructurales o trabajos de distribución de tamaño de grano y eventualmente la búsqueda de proxies para estudios de porosidad y permeabilidad efectiva, además de estudios de neotectónica en afloramientos y caracterización de macizos rocosos a través de análisis de fracturamiento.

Referencias

- [1] Launeau, P., Archanjo, C., Picard, D., Arbaret, L. and Robin, P., Two- and three-dimensional shape fabric analysis by the intercept method in grey levels. *Tectonophysics* 492, pp. 230-239, 2010. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.06.005
- [2] Launeau, P. and Robin, P., Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses—implementation and applications. *Journal of Structural Geology* 27, pp. 2223-2233, 2005. DOI: 10.1016/j.jsg.2005.08.003
- [3] Launeau, P. and Robin P., Shape preferred orientation. [Online]. Available at: <http://www.sciences.univ-nantes.fr/geol/SPO>.
- [4] Launeau, P. and Robin, P., Fabric analysis using the intercept method. *Tectonophysics* 267, pp. 91-119. 2003. DOI: 10.1016/S0040-1951(96)00091-1
- [5] Passchier, C and Trouw, R., *Microtectonics*. Springer Verlag, Second edition, 2005.
- [6] Ramsay, J. and Huber, M., *The techniques of modern structural geology*, London, 1984.
- [7] Robin, P., Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses — Theory. *Journal of Structural Geology*, 24, pp. 531-544, 2002. DOI: 10.1016/S0191-8141(01)00081-5
- [8] Tarling, D.H. and Hrouda, F., *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall, London. 1993.

M. Botero-García y S.P. Marín-López, son estudiantes activas del programa de Ingeniería Geológica de último semestre, miembros grupo de investigación en Estudios Tectónicos GET, de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

C. Vinasco-Vallejo, es PhD en Geoquímica y Geotectónica. Profesor Asociado de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Director del grupo de investigación en Estudios Tectónicos GET, de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia sede Medellín