

PETROGRAFÍA ESTRUCTURAL DE LAS ROCAS AFLORANTES EN EL  
SECTOR DE ANGOSTURA, MUNICIPIO DE CALIFORNIA - SANTANDER

OSCAR JHOVANY RUEDA BARRERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2014

PETROGRAFÍA ESTRUCTURAL DE LAS ROCAS AFLORANTES EN EL  
SECTOR DE ANGOSTURA, MUNICIPIO DE CALIFORNIA - SANTANDER

OSCAR JHOVANY RUEDA BARRERA

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
GEÓLOGO

DIRECTOR:

JUAN CARLOS BALLESTEROS ARDILA  
GEÓLOGO

CODIRECTOR:

ANDREAS KAMMER  
GEÓLOGO PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2014

## DEDICATORIA

En honor a mi hijo **David** que me motivo a iniciar esta carrera, a mi **hija Ana Sofía** que ha sido la luz más hermosa para seguir y no desfallecer y a mi compañera, amante y mujer gracia.

A mis padres y hermanos.

A mis compañeros de lucha durante mi estadía en la universidad

## AGRADECIMIENTOS

Mis más profundos agradecimientos a **DIOS** por ser mi soporte y eje fundamental en el proceso de formación, a mi familia por su amor incondicional y apoyo. A mis profesores por el compromiso que aportaron a mi formación,

Agradezco al Profesor **Julián Andrés López Isaza** por brindarme su confianza, apoyo y conocimiento; espero haberle podido aportar algo como persona y profesional.

Agradezco al Doctor **Andreas Kammer**, a mi director **Juan Carlos Ballesteros** por sus aportes y a mis compañeros **Edwin Díaz** y **Juna José Villabona**.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....   | 21 |
| 1. OBJETIVOS .....  | 22 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....                                  | 22 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                              | 22 |
| 2. METODOLOGÍA.....   | 23 |
| 2.1 FASE DE PRE-CAMPO.....                                  | 23 |
| 2.2 FASE DE CAMPO .....                                     | 23 |
| 2.3 FASE DE LABORATORIO.....                                | 24 |
| 2.4 FASE DE ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....   | 25 |
| 3. LOCALIZACIÓN .....                                       | 27 |
| 4. ANTECEDENTES.....  | 28 |
| 5. CONCEPTOS PRELIMINARES.....                              | 30 |
| 5.1 MICROTTECTÓNICA .....                                   | 30 |
| 5.1.1 Mecanismos de Deformación.....                        | 30 |
| 5.1.1.1 Flujo cataclástico .....                            | 31 |
| 5.1.1.2 Presión solución.....                               | 31 |
| 5.1.1.3 Deformación intracristalina.....                    | 31 |
| 5.1.1.4 Maclado mecánico .....                              | 32 |
| 5.1.1.5 Restitución. ....                                   | 32 |
| 5.1.1.5.1 Recristalización.....                             | 32 |
| 5.1.1.6 Deslizamiento por difusión en estado sólido .....   | 32 |
| 5.1.1.7 Reducción del área de borde de grano. ....          | 33 |
| 5.1.2 Foliación y el plano X-Y del esfuerzo tectónico. .... | 33 |
| 6. GEOLOGÍA REGIONAL .....                                  | 34 |
| 6.1 CONTEXTO ESTRUCTURAL REGIONAL .....                     | 35 |
| 6.2 GEOLOGÍA LOCAL .....                                    | 36 |
| 6.2.1 Rocas Metamórficas .....                              | 37 |
| 6.2.1.1 Gneis cuarzo-feldespático.....                      | 37 |
| 6.2.1.2 Gneis biotítico .....                               | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 6.2.1.3 Migmatitas. ....   | 38 |
| 6.2.2 Diques de metadiorita .....  | 38 |
| 6.2.3 Rocas ígneas.....  | 39 |
| 6.2.3.1 Tonalita.....  | 39 |
| 6.2.3.2 Monzogranito .....   | 39 |
| 6.2.3.3 Granodiorita .....   | 39 |
| 6.2.4 Rocas de falla .....   | 40 |
| 6.2.5 Estructuras definidas durante el trabajo de campo.....   | 40 |
| 7. RESULTADOS .....  | 41 |
| 7.1 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA FALLA LA PEREZOSA, UTILIZANDO DATOS<br>ADQUIRIDOS EN AFLORMIENTOS CERCANOS ..... | 41 |
| 7.1.1 Análisis De Fracturas.....   | 41 |
| 7.1.2 Tendencia y Densidad de las Vetillas.....  | 42 |
| 7.1.3 Tendencia y Densidad de los <i>Stringer</i> .....  | 43 |
| 7.1.4 Tendencia y Densidad de las Venas .....  | 44 |
| 7.1.5 Patrones De Fracturamiento .....   | 45 |
| 7.1.6 Tensor De Paleoesfuerzos.....  | 47 |
| 7.1.7 Tensor De Paleoesfuerzos con todos los datos .....   | 48 |
| 7.2 PETROGRAFÍA Y MICROTTECTÓNICA.....   | 50 |
| 7.2.1 Gneis Biotítico (Gneis De Bucaramanga).....  | 50 |
| 7.2.1.1 Características estructurales y mecanismos de deformación .....  | 50 |
| 7.2.1.2 Microestructuras .....   | 54 |
| 7.2.2 Milonita (Esquisto De Moscovita Y Sillimanita Deformado, Perteneciente Al Gneis De<br>Bucaramanga) .....     | 55 |
| 7.2.2.1 Características estructurales y mecanismos de deformación.....   | 55 |
| 7.2.2.2 Microestructuras. ....   | 57 |
| 7.2.3 Anfibolita (Gneis De Bucaramanga).....   | 58 |
| 7.2.3.1 Características estructurales y mecanismos de deformación.....   | 58 |
| 7.2.3.2 Microestructuras. ....   | 60 |
| 7.2.4 Granodiorita (rocas ígneas del triásico – jurásico).....   | 62 |
| 7.2.4.1 Características estructurales y mecanismos de deformación.....   | 64 |
| 7.2.4.2 Microestructuras .....   | 67 |
| 7.2.5 Monzogranito (Rocas Ígneas del Triásico – Jurásico) .....  | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.2.5.1. Características estructurales y mecanismos de deformación.....  | 72  |
| 7.2.5.2 Microestructuras.....  | 76  |
| 7.3 SECCIONES DELGADAS DEL SECTOR DE LA FALLA LA PEREZOSA .....  | 78  |
| 7.3.1 Leucogranito - Sienogranito (Gneis de Bucaramanga).....  | 78  |
| 7.3.1.1 Características estructurales y Mecanismos de Deformación .....  | 79  |
| 7.3.1.2 Microestructuras.....  | 83  |
| 7.3.2 Leucogranito – Monzogranito (Gneis De Bucaramanga).....  | 88  |
| 7.3.2.1 Características estructurales y mecanismos de deformación.....   | 88  |
| 7.3.2.2 Microestructuras .....   | 91  |
| 7.3.3 Leucogranito- Monzogranito (Gneis De Bucaramanga) .....  | 93  |
| 7.3.3.1 Características estructurales y mecanismos de deformación.....   | 93  |
| 7.3.3.2 Microestructuras .....   | 97  |
| 7.4 ANÁLISIS DEL TENSOR DE PALEOESFUERZOS PARA LA FALLA LA PEREZOSA,<br>UTILIZANDO INFORMACIÓN DE LOS INDICADORES CINEMÁTICOS,<br>IDENTIFICADOS EN LAS SECCIONES DELGADAS..... | 100 |
| 7.4.1 Procesamiento de la Información.....   | 105 |
| 7.4.1.1 Calculo de Tensor de Paleoesfuerzos.....   | 106 |
| 8. DISCUSIÓN.....  | 107 |
| 8.1 EVENTOS DEFORMATIVOS IDENTIFICADOS EN EL GNEIS DE BUCARAMANGA<br>.....   | 107 |
| 8.2 CONDICIONES DE DEFORMACIÓN RELACIONADAS CON LA FALLA LA<br>PEREZOSA.....   | 108 |
| 8.3 RELACIÓN ENTRE LOS TENSORES DEFINIDOS.....   | 109 |
| 8.4 RELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FALLAS ROMERAL-CUCUTILLA Y LA BAJA-<br>ANGOSTURA, CON LA MINERALIZACIÓN DEL PROYECTO ANGOSTURA.....  | 110 |
| CONCLUSIONES.....  | 112 |
| RECOMENDACIONES.....   | 115 |
| BIBLIOGRAFÍA.....  | 116 |
| ANEXOS .....   | 121 |

## TABLA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Localización geográfica del proyecto Angostura.....   | 27 |
| <b>Figura 2.</b> Tres situaciones en donde la foliación no es paralela al plano XY .....   | 33 |
| <b>Figura 3.</b> Mapa geológico del Proyecto Angostura.....  | 36 |
| <b>Figura 4.</b> Diagramas de rosetas y de densidad de fracturas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.....  | 42 |
| <b>Figura 5.</b> Diagramas de rosetas y de densidad, para los datos estructurales de vetillas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.....                               | 43 |
| <b>Figura 6.</b> Diagramas de Rosetas y de densidad, para los datos estructurales de stringer. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.....                               | 44 |
| <b>Figura 7.</b> Diagramas de Rosetas y de densidad de las venas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.....  | 45 |
| <b>Figura 8.</b> A. Diagrama de rosetas y de densidad para los datos de fracturas limpias en los cuatro sectores. B. Diagrama de rosetas y de densidad para los datos de vetillas, stringer y vetas de los sectores 2, 3 y 4. .... | 46 |
| <b>Figura 9.</b> Tensor con todos los datos de fracturas limpias de los sectores 1, 2, 3 y 4.....  | 47 |
| <b>Figura 10.</b> Tensor de esfuerzos usando datos de vetillas, vetas y stringer de toda el área.....  | 48 |
| <b>Figura 11.</b> Tensor de paleoesfuerzos total para la zona de la Falla La Perezosa.   | 48 |
| <b>Figura 12.</b> Diagrama de rosetas y densidad de polos, utilizando todos los datos registrados. ....  | 49 |
| <b>Figura 13.</b> A. Biotita (Bt) con textura decusado; luz polarizada, aumento 5x. B. Cristal de Cianita (Ky) el cual se presenta fracturamiento en varias direcciones  |    |

|   |    |
|---|----|
| rellenos por biotita (Bt); luz polarizada, aumento 10x C. Microfracturamiento transgranular en el que se puede apreciar relaciones de corte entre las diferentes fracturas, en cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada aumento 10x. D. Microfracturamiento intragranular en moscovita (Ms). Algunas fracturas tienen depositación de óxidos provenientes de la alteración hidrotermal. Luz polarizada, aumento 10x. .... | 53 |
| <b>Figura 14.</b> Sericita (Ser) en nódulos, luz polarizada, aumento 20x .....  | 54 |
| <b>Figura 15.</b> A. Cristal de cordierita (Crd) el cual presenta microfracturamientos intergranulares. B. Límites de grano lobulado entre biotita y cuarzo. Las dos microfotografías se presentan en luz polarizada y con un aumento de 20x .....  | 55 |
| <b>Figura 16.</b> A. Agregados de moscovita (Ms) rodeada por sillimanita (Sil); luz polarizada, aumento 10x. B Cristal de moscovita (Ms), el cual presenta un leve doblamiento, luz polarizada aumento 10x. C. Cristales prismáticos de Sillimanita (Sil) embebidos en una matriz de sericita. Luz plana, aumento 5x. ....  | 56 |
| <b>Figura 17.</b> A Microboudines de minerales opacos (Opq); luz polarizada, aumento 10x. B Porfiroblastos de minerales opacos (Opq); luz polarizada, aumento 5x. .   | 57 |
| <b>Figura 18.</b> A. Cristales de Hornblenda (Hbl) en contacto con cuarzo (Qz); B Alteraciones de Clorita (Chl) y Epidota (Ep); C. Textura poiquiloblastica en plagioclasa (Pl); D. Plagioclasa (Pl) alterándose a Sericita (Ser) y con inclusiones de cuarzo (Qz). Todas las microfotografías se tomaron con luz polarizada y un aumento de 5x. ....   | 59 |
| <b>Figura 19.</b> Textura de exsolución del tipo antiperitita, Luz polarizada, aumento 10x .....  | 60 |
| <b>Figura 20.</b> A. Microfracturamiento intragranular en cristales de cuarzo. B Vena de cuarzo microcristalino. C. Cuarzo (Qz) con microfracturamiento, recristalización y extinción ondulante. D. Generación de subgranos en cristales de cuarzo (Qz). ....   | 61 |
| <b>Figura 21.</b> Cristales de cuarzo fracturados y posteriormente recristalizados por el mecanismo de migración de borde de grano junto a fases de anfíbol; algunas partes del cuarzo evidencia generación de subgranos. Luz polarizada, aumento 5x .....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22.</b> A. Inclusiones de cuarzo dentro de un cristal de feldespato; luz polarizada, aumento 5x B) Antipertita de morfología lamelar; luz polarizada, aumento 10x. C. Feldespato alcalino presenta una pertita lamelar; luz polarizada, aumento 5x. D. Subgranos (1) en cristales de cuarzo (Qz) y fracturas transgranulares; luz polarizada, aumento 20x..   | 63 |
| <b>Figura 23.</b> Venillas del tipo ataxial rellenas de cuarzo microcristalino; luz polrizada y aumento de 20x  | 64 |
| <b>Figura 24.</b> A. Cristales de cuarzo con recristalización de migración de borde de grano. B. Subgranos en cristales de cuarzo, se observan en el centro de la microfotografía. C. Macla mecánica en cristal de feldespato, con un posterior microfracturamiento intragranular. D. Microfracturamiento transgranular de la plagioclasa y el cuarzo. Todas las microfotos fueron tomadas con luz polarizada y aumento de 10x. | 65 |
| <b>Figura 25.</b> Intercrecimiento entre cuarzo y moscovita; luz polarizada, aumento 5x   | 67 |
| <b>Figura 26.</b> Se muestra el microfracturamiento transgranular, e intergranular en cristales de cuarzo (Qz) y feldespato (Fsp) y un dibujo esquemático donde se muestran las relaciones de los diferentes mecanismos de deformación predominantes en la sección. Luz polarizada, aumento 5x.   | 68 |
| <b>Figura 27.</b> Microfracturamiento intragranular en feldespato (Fsp); luz polarizada, aumento 5X.  | 69 |
| <b>Figura 28.</b> A. Fragmentos de cristales de cuarzo (Qz), con bordes angulosos y generación de porfidoclastos B. Venillas en las que se observan minerales opacos. C. Macla mecánica en un cristal de feldespato (Fsp).  | 70 |
| <b>Figura 29.</b> Estructuras tipo Riedel; luz polarizada, aumento 5x.  | 71 |
| <b>Figura 30.</b> A. Matriz de cuarzo microcristalino y Sericita (Ser) B. Contacto entre cristales de cuarzo (Qz) lobulados. C. Cristal de cuarzo en el que se observa extinción ondulante de barrido. D Cristal de cuarzo con lamenas de deformación. E. Generación de subgranos orientados en cristal de cuarzo. F. Evidencias de recristalización por migración de borde de grano en un cristal de cuarzo.                   | 73 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 31.</b> A. Vena de cuarzo microcristalino cortando la sección y feldespato con fracturas transgranulares; luz polarizada, aumento 10x. B. Venilla de cuarzo (Qz) de habito hexagonal; luz polarizada, aumento 20x. C. Plagioclasa (Pl) con borde irregular; aumento 5x. D. Venillas de cuarzo 2 y 3 cortándose; aumento de lente de 10x. E. Cristal de moscovita (Ms), con evidencias de doblamiento. F. Agregados de hematita (Hem) de color rojo parduzco, aumento 10x. ....   | 75 |
| <b>Figura 32.</b> A. Cristal de cuarzo (Qz) en el que se observan fracturas intragranulares; algunas con inclusiones fluidas. B. Se aprecian cristales de cuarzo fracturados evidenciando microfallamiento. El aumento de la lente para las dos microfotografías es de 10x.....  | 76 |
| <b>Figura 33.</b> Libros rotados en cristales de Cuarzo (Qz), aumento 10x .....  | 77 |
| <b>Figura 34.</b> Bandas de deformación en cristal de Cuarzo, aumento 10x.....   | 78 |
| <b>Figura 35.</b> Cristal de cuarzo (Qz), en el que se observa lamenas de deformación (1) y fracturas intragranulares (2) en el borde; en las que se presenta inclusiones. Luz polaizada, aumento 20x. ....  | 79 |
| <b>Figura 36.</b> A. Microfracturamiento transgranular sobreimpuesto a la extinción ondulante de un cristal de cuarzo (Qz). Luz polarizada, aumento 10x. B. recristalización por rotación de subgranos en cuarzo (Qz), este proceso se desarrolla solo en un sector del cristal de cuarzo generado por bandas de deformación. Luz polarizada, aumento 10x C. Abultamiento (bulging), entre cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada, aumento 10x. D. Vena de cuarzo (Qz) y oxido de hematites (Hem), que ha tenido un crecimiento sintaxial. Luz polarizada y aumento de lente de 5x ..... | 80 |
| <b>Figura 37.</b> Feldespato tipo Ortoclasa (Or) el cual presentan microfracturamiento. B. Cristal de plagioclasa (Pl) alterándose en los borde y con fracturamiento. C. Banda <i>Kink</i> en Moscovita. D. Sericita escamosa (Ser). Todas las microfotografías tienen un aumento de lente de 10x, a esepción de la foto B que su aumento es de 5x. ....   | 82 |
| <b>Figura 38.</b> A. Microfracturamientos intragranulares en cristales de cuarzo (Qz). B. microfracturamiento transgranular en cristal de plagioclasa (Pl). C.   |    |

|   |    |
|---|----|
| microfracturamiento intergranular en cristales de cuarzo, asociado a presión por inyección de fluidos hidrotermales .....   | 83 |
| <b>Figura 39.</b> Se observan maclas mecánicas en cuarzo, y fracturamientos transgranulares en cristales de cuarzo (Qz). Se muestran las microfotografías en luz polarizada y plana, además de un dibujo esquemático donde se aprecia microfallamiento; el aumento de lente se encuentra a 5x. ....                   | 84 |
| <b>Figura 40.</b> Texturas tipo mortero en cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada, aumento de lente de 5x, .....  | 86 |
| <b>Figura 41.</b> A. Fallas extensionales y microfallas en cristal de plagioclasa (Pl). B. estructuras tipo Riedel en las que se observan fracturas R1, R2 y T rellenas por material de la matriz. Aumento de lente de 10x, para las dos fotos.....   | 86 |
| <b>Figura 42.</b> A. Microfallamiento en cristales de cuarzo (Qz). B. Banda de cizalla. C. Rompimiento del cristal acompañado de recristalización en cuarzo. Aumento de lentes a 10x, para las tres fotos. ....   | 87 |
| <b>Figura 43.</b> A. Recristalización de cuarzo (Qz) en el que se envuelve parte de la matriz. B. Generación de nuevos granos de cuarzo por recristalización dinámica. C. Bordes irregulares entre cristales de cuarzo (Qz). D. Recristalización mediante el mecanismos de rotación de subgranos .....                | 89 |
| <b>Figura 44.</b> A. Cristal de plagioclasa (Pl) con microfracturamiento. B. Cristal de feldespato (Fsp) con fracturamiento transgranular en el que se han depositado minerales opacos. C. fracturas en cuarzo rellenas por minerales opacos. D. matriz de sericita (Ser), cuarzo (Qz) y minerales opacos (opq) ..... | 90 |
| <b>Figura 45.</b> A. Cristal de cuarzo (Qz) con microfracturamientos intragranular. B. microfracturamiento transgranular que afecta cristales de cuarzo (Qz). C. Microfracturamiento circungranular en cuarzo (Qz). ....  | 91 |
| <b>Figura 46.</b> Estructuras tipo <i>Riedel</i> ; se observa como las fracturas transgranulares afectan varios tipos de cristales, además se puede ver porfidoclastos de cuarzo en la parte central de la foto .....   | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 47.</b> A Se puede observar en el centro de la imagen una estructura del tipo pull apart. B. venas en échelos incipientes desarrolladas sobre un cristal de cuarzo. Nicoles cruzados y aumento de 5X en las dos microfotografías .....   | 93  |
| <b>Figura 48.</b> A y B. Fracturamiento intragranular acompañada de generación de extinción ondulante posterior. C. Doblamiento mecánico de un cristal de cuarzo en el que se puede observar la línea de fractura incipiente. D. Recristalización por rotación de subgranos localizada a un cristal de cuarzo. E y F. Recristalización por migración de límite de grano en cristales de cuarzo ..... | 94  |
| <b>Figura 49.</b> A. Vena de cuarzo (Qz). B. Vena de cuarzo (Qz) generada por reemplazamiento .....  | 96  |
| <b>Figura 50.</b> A. Minerales opacos (Opq) dispersos en la sección. B. Venillas de óxidos en una matriz de sericita y cuarzo con recristalización por rotación de subgranos .....   | 97  |
| <b>Figura 51.</b> A. Microfracturamiento transgranular en cristal de cuarzo (Qz). B. Brecha en la que se observa fragmentos de cristales orientados y con una matriz de arcillas.....  | 98  |
| <b>Figura 52.</b> A. Microbudines en feldespatos. B. Agregado de cuarzo alargado simulando un objeto tipo sigma. C. Fracturas intragranulares en cristal de cuarzo; se puede identificar algunas de las fracturas de las estructuras tipo Riedel. D. Microfallamiento evidenciado por el desplazamiento relativo de los fragmentos del grano. Nicoles cruzados, aumento 10X .....                    | 99  |
| <b>Figura 53.</b> Esbozo de la muestra 3 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera paralela al estiramiento mineral.....  | 101 |
| <b>Figura 54.</b> Esbozo de la muestra 3 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera normal al estiramiento mineral.....  | 102 |
| <b>Figura 55.</b> Esbozo de la muestra 1 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera paralela al estiramiento mineral.....  | 103 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 56.</b> Esbozo de la muestra 1 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera normal al estiramiento mineral ..... | 104 |
| <b>Figura 57.</b> Ejes principales de deformación estimados manualmente .....  | 105 |
| <b>Figura 58.</b> A. Diagrama de rosetas en el que se muestra las orientaciones estadísticamente preferentes. B. Buzamientos promedio de los planos.....                       | 105 |
| <b>Figura 59.</b> Tensor de paleoesfuerzos en el que se muestra la orientación de los principales ejes de deformación.....   | 106 |
| <b>Figura 60.</b> Manera de tomar una muestra orientada.....   | 122 |
| <b>Figura 61.</b> Mapa de ubicación de muestras para la Falla La Perezosa.....   | 130 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Ejes principales de deformación, de los tensores identificados. .... | 110 |
|---|-----|

## LISTA DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| ANEXO A. MÉTODOS PARA MEDIR ESTRUCTURAS LINEALES .....  | 121 |
| ANEXO B. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS ORIENTADAS .....   | 122 |
| ANEXO C. DATOS ESTRUCTURALES TOMADOS EN AFLORAMIENTOS CERCANOS<br>A LA FALLA LA PEREZOSA..... | 124 |
| ANEXO D. ABREVIATURAS DE LOS NOMBRES DE MINERALES.....  | 128 |
| ANEXO E. MAPA DE UBICACIÓN DE MUESTRAS ORIENTADAS .....                                       | 130 |
| ANEXO F. DATOS DE LAS ESTRUCTURAS IDENTIFICADAS EN SECCIONES<br>DELGADAS.....                 | 131 |

## RESUMEN

**Título: PETROGRAFÍA ESTRUCTURAL DE LAS ROCAS AFLORANTES EN EL SECTOR DE ANGOSTURA, MUNICIPIO DE CALIFORNIA; SANTANDER\***

Autor:  
RUEDA Barrera Oscar Jhovany \*\*

### Palabras Clave

Petrografía estructural, procesos y mecanismos de deformación, indicadores cinemáticos, tensor de paleoesfuerzos, Angostura.

### Resumen

La finalidad de este trabajo fue realizar un estudio de petrografía estructural en la parte central del Macizo de Santander, haciendo énfasis en la descripción de las texturas y mecanismos de deformación generados por el trazo de la falla La Perezosa, la cual corta el área del Proyecto Angostura, conectando el sistema de fallas Romeral – Cucutilla y La Baja – Angostura.

A través de esta herramienta se estableció que los principales mecanismos de deformación presentes en el sector están relacionados con: recristalización dinámica, recuperación, cataclasis y deslizamiento friccional, procesos de dislocación y maclado mecánico; registrados en cristales de cuarzo y feldespatos; lo cual indica que las temperaturas de deformación se encontraban por debajo de los 400°C. Aprovechando esta información y asumiendo un gradiente geotérmico para el sector de 300°C/Km, se puede sugerir que la profundidad de deformación se encontraba alrededor de 1 a 2 kilómetros.

Por otra parte, se utilizaron los indicadores cinemáticos para precisar los principales ejes de esfuerzo y determinar la cinemática de la falla. Además se estableció la relación que tiene con el emplazamiento de los trenes mineralizados.

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingeniería fisicoquímica. Escuela de geología. Director: Geólogo.

## ABSTRACT

**TITLE: STRUCTURAL PETROGRAPHY OF THE ROCK OUTCROPPING IN THE PROJECT ANGOSTURA, MUNICIPALITY OF CALIFORNIA; SANTANDER \***

**Author:**

RUEDA Barrera Oscar Jhovany \*\*

**keywords**

Structural petrography, process and deformation mechanisms, kinematic indicators, paleostress tensor, Angostura.

The purpose of this work was to study structural petrography in the central part of the Santander Massif, emphasizing the description of textures and deformation mechanisms generated by the stroke of The Perezosa fault, which cuts the Project area Angostura connecting Romeral-Cucutilla and La Baja – Angostura systems.

Through this tool was established that the main deformation mechanisms present in the sector are related to: dynamic recrystallization, recovery, cataclasis and frictional sliding, dislocation and mechanical processes twinned; recorded in quartz and feldspar crystals, which indicates that deformation temperatures are below 400°C. Taking this information and assuming a geothermal gradient for the sector of 300° C/km, it can be suggested that the depth of deformation was around 1-2 kilometers.

On the other hand, kinematic indicators define the principal axes of stress and determine the kinematics of the fault. Also was established the relationship with the location of the mineralized train.

\* Grade Project

\*\* Physics and Chemicals Sciences Faculty, Geology School. Director geologist Ballesteros J and Codirector Kammer A.

## INTRODUCCIÓN

Para definir las condiciones de deformación del sector del Proyecto Angostura se utilizó como herramienta descriptiva la microtectónica, la cual estudia los procesos y mecanismos de deformación que conducen al cambio de forma de la estructura de los minerales (Passchier and Trouw, 2005). Para el caso en mención, estos procesos se encuentran sujetos a las características estructurales del Bloque Norandino, las cuales se han generado como producto de la interacción entre las placas de Nazca, Cocos, Caribe y Sur América. La partición de la deformación al interior del continente se debe a la interacción entre las placas y se encuentra representada por los estilos estructurales que en el área del Distrito Minero de Vetas - California (DMVC), se asocian a fallas con cinemáticas dextrales, inversas y normales, entre las que se encuentran los sistemas de fallas Romeral–Cucutilla y La Baja–Angostura. Desde el punto de vista descriptivo, ambos sistemas (Romeral-Cucutilla y La Baja - Angostura), junto con la falla La Peresoza, la cual las conecta, han sido reportadas con una componente cinemática dextral, y se presume que controlan la distribución de los depósitos minerales en el Distrito Minero de Vetas – California (Felder *et al.* 2000).

El presente trabajo, desarrollado bajo la modalidad de investigación, tiene por objeto presentar los resultados del análisis petrográfico de muestras ubicadas en el sector del Proyecto Angostura haciendo énfasis en la descripción de las texturas y mecanismos de deformación de las muestras afectadas por el trazo de la falla La Perezosa, para confirmar su cinemática y determinar preliminarmente el impacto que tiene sobre la distribución espacial de los trenes mineralizados aflorantes en el sector Angostura, Distrito Minero Vetas – California, centrandose en la caracterización de este rasgo tectónico mediante el estudio y determinación de las condiciones de deformación e identificación de las principales microestructuras relacionadas, a partir de cortes orientados de roca sobre muestras orientadas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar la petrografía estructural de las rocas aflorantes en el sector de Angostura, ubicado en el Municipio de California - Santander.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la cartografía geológica de las rocas que afloran en el sector de Angostura con el fin de caracterizar las litologías asociadas.
- Elaborar cortes orientados en las muestras con el fin de identificar las direcciones de esfuerzos y eventos deformativos en el sector.
- Caracterizar petrográficamente los mecanismos de deformación dominantes en las litologías encontradas.

## **2. METODOLOGÍA**

Para ejecutar este proyecto se desarrollaron una serie de actividades encaminadas a dar cumplimiento de los objetivos propuestos. Algunas de las fases que se indican a continuación se realizaron de manera simultánea o se complementaron entre sí, razón por la cual no debe considerarse la descripción metodológica como una relación cronológica de etapas investigativas.

### **2.1 FASE DE PRE-CAMPO**

En este punto del proyecto se realizó la revisión, selección e interpretación de la información relacionada con el Distrito Minero de Vetas – California (DMVC), en especial la que menciona el control estructural de la mineralización. Esta revisión incluyó los trabajos técnicos disponibles publicados por las empresas que han desarrollado actividades de exploración y explotación minera en el sector, tesis de grado y estudios realizados por entidades públicas. Adicionalmente se mencionan los autores más relevantes en el desarrollo de esta investigación: en cartografía, McClay (1987); en microtectónica, Passcheir & Trouw (2005), Blekinsop (2000), Vernon (2004), Vernon & Clarke (2008), y Snoke *et al.* (1998); y en geología estructural, Davis & Reynolds (1996).

### **2.2 FASE DE CAMPO**

En esta fase se realizó la cartografía geológica en la que se recorrió de forma sistemática la zona de estudio aprovechando los drenajes, vías y caminos; con lo que se delimitaron los contactos litológicos y se hizo el levantamiento de los datos estructurales (en las zonas afectadas por el trazo de la falla La Perezosa), siguiendo la metodología de McClay (1987), con el fin de realizar una correcta obtención y registro de los datos estructurales, fábricas macroscópicas y

recolección de muestras orientadas para el estudio microtectónico. La recolección de las muestras orientadas se realizó de manera metódica, tomando como referente para tal efecto lo establecido por Passcheir & Trouw (2005).

Para la recolección de los datos estructurales, se hizo énfasis en realizar el levantamiento en proximidades del trazo de la falla La Perezosa, incluyendo la información relacionada con diaclasas, fallas, venas, vetillas y *stringers*.

### **2.3 FASE DE LABORATORIO**

A partir de cortes realizados de manera paralela al lineamiento mineral o de estiramiento y perpendiculares a los planos de esquistosidad, tal como lo sugieren Passcheir and Trouw (2005), se elaboraron secciones delgadas de las muestras en los laboratorios de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS), con el fin de observar adecuadamente las características cinemáticas. Para la elaboración de las secciones delgadas se usaron abrasivos a base de carburo de silicio, con tamaños de grano de diferentes diámetros, con el fin de desbastar las muestras en un principio y de pulirlas en su fase final. Posteriormente, una vez que cada sección delgada estuvo lista para su estudio (teniendo en cuenta que los colores de interferencia del cuarzo y los feldespatos, correspondían a colores de primer orden), se procedió a cubrirlas con un cubreobjetos, dándoles su acabado final. Posteriormente, se procedió al trabajo de laboratorio que correspondió a estudios petrográficos, mineralógicos, análisis de los mecanismos de deformación y la caracterización de las microestructuras.

La caracterización petrográfica se llevó a cabo en el laboratorio de microscopía óptica de la UIS, en un microscopio de luz transmitida marca **NIKON ECLIPSE 50i**, el cual tiene una cámara adaptada para la toma de microfotografías. Para el análisis modal de las muestras se hizo un conteo entre 300 a 500 puntos. La clasificación modal de las rocas ígneas se realizó con base la metodología

propuesta por Streckeisen (1979), mientras que la clasificación de las rocas metamórficas se hizo de acuerdo con la guías propuestas por la Subcomisión sobre Sistemática de Rocas Metamórficas de la IUGS - SCMR, en el año 2007. Para la determinación de los mecanismos de deformación y la caracterización de los indicadores cinemáticos, se manejaron las metodologías propuestas por Blenkinsop (2000), Vernon (2004), y Passcheir & Trouw (2005).

Una vez identificados los indicadores cinemáticos se realizaron dibujos esquemáticos de algunos sectores del interior de las láminas delgadas con el fin de mostrar las relaciones entre las estructuras. Para obtener la orientación real de las estructuras obtenidas a partir del análisis de las secciones delgadas fue necesario reorientar la muestra de mano con respecto a la orientación original de las muestras en el afloramiento. Una vez obtenidos los planos, se realizó el procesamiento y obtención del tensor de paleoesfuerzos en el programa Win\_Tensor (versión 4.0.4), se ingresaron los datos de dirección de buzamiento y buzamiento de las estructuras. Posteriormente, para caracterizar los planos se debe elegir el tipo de fractura (de tensión, de compresión o de cizalla), y el tipo de activación, (planos de tensión, planos de compresión, planos no activados, fallas o fracturas neoformadas, fallas o fracturas reactivadas o tipo de activación desconocida).

## **2.4 FASE DE ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL**

Después de ordenar los datos de campo, se empleó el programa TectonicsPF (versión 1.7.7) con el fin de elaborar diagramas de rosetas y diagramas de densidades de polos. Para ello se tabularon los datos en hojas de cálculo en Excel, registrando el azimut, la dirección de buzamiento y el buzamiento de los diferentes tipos de estructuras. Los diagramas obtenidos permitieron apreciar la tendencia de las estructuras y la densidad con que ocurren en el área, con lo que se pudo estimar el tensor de esfuerzo relativo (asumiendo que las estructuras se

generaron por esfuerzos tensionales) y posteriormente se comparó con el tensor obtenido utilizando el programa Win\_Tensor (versión 4.0.4). Para estimar el tensor con este programa se ingresaron los datos de dirección del buzamiento y buzamiento de los planos de fractura, se eligió el tipo de fractura (Tensión -T-, Compresión -C-, o de cizalla -M-) y el tipo de activación (planos de tensión, planos de compresión, planos no activados, fallas o fracturas neoformadas).

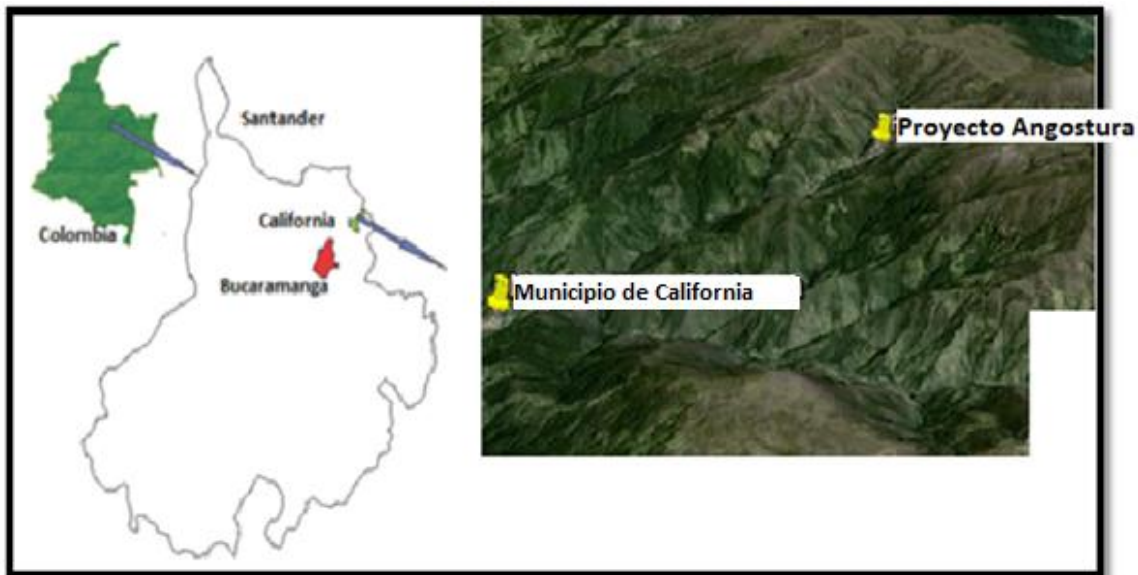
La parte final del trabajo consistió en la integración de la información obtenida durante las fases anteriores, el análisis de los resultados, la tabulación de la información y la elaboración del informe final, donde se realizó una discusión acerca de la posible relación de los sistemas de fallas presentes en el sector, con la ubicación espacial de los trenes mineralizados.

En el desarrollo de estas fases se requirió del manejo de metodologías que son descritas en los anexos 1 y 2.

### 3. LOCALIZACIÓN

El Proyecto Angostura se encuentra localizado en el cuadrante nororiental del Departamento de Santander, en el Municipio de California, aproximadamente a unos 67 kilómetros al Noreste de Bucaramanga (figura 1).

**Figura 1.** Localización geográfica del proyecto Angostura



Fuente: adaptado de Google Earth

Dentro de los levantamientos cartográficos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el área está contenida en la plancha 110-1-C a escala 1:25000, que forma parte del cuadrángulo H-13 Pamplona. En donde se presenta una topografía abrupta con elevaciones que fluctúan entre 2.000 y 3.450 metros, y las pendientes generalmente son mayores de 30° (Mendoza y Jaramillo, 1979).

El principal afluente que aparece en la zona corresponde con la quebrada La Baja, la cual está controlada por la falla La Baja - Angostura y nace de la intersección de las quebradas Angostura y Páez. Esta red hidrográfica hace parte de la subcuenca del Río Suratá, que a su vez forma parte de la cuenca del Río Lebrija.

#### 4. ANTECEDENTES

El Macizo de Santander, ha sido sujeto de múltiples estudios enfocados a determinar la geología, geoquímica y el potencial minero, siendo este último el más desarrollado por entidades públicas y privadas. De ahí que se cuente con material de referencia suficiente que pueda ser tomado como antecedente metodológico, teórico e investigativo para este trabajo. A continuación se mencionan algunos de los trabajos realizados en la zona, que indican la posible relación estructural con la ubicación de las venas.

Un primer referente es el trabajo llevado a cabo por Wokittel (1954), quien realizó estudios en el sector de La Alta, La Baja y Vetas, con el fin de caracterizar minerales, tanto radiactivos, como los ya conocidos en la región (oro, plata, y cobre). Más adelante, Bueno (1955) hace una descripción de los yacimientos uraníferos más importantes en la región de La Baja, que corresponden con el Filón de San Celestino, área de San Antonio y los filones de las Ánimas y San Cristóbal. Además reconoce que los metales preciosos se presentan en zonas de alta concentración separados por zonas estériles.

Entre los primeros y más importantes trabajos cartográficos, en el que se describen las unidades litológicas, edad y rasgos estructurales principales, se encuentra el de Ward *et al.* (1973); en su trabajo de cartografía a escala 1:100000 de los cuadrángulos H12 y H13, correspondientes a Bucaramanga y Pamplona respectivamente. En la misma década, Mendoza y Jaramillo (1979) determinaron mediante estudios geológicos y geoquímicos las características litológicas y las relaciones estructurales del emplazamiento de las venas en la zona de estudio **(California)**, y determinaron que el oro presente en el sector asociado con la mineralización es de tamaño submicroscópico. Más recientemente, Pinto (1991), en su trabajo titulado “Geología y evolución de la Mina la Bodega, California

(Santander)", identificó sulfuros como bornita, digenita y calcopirita en venas de cuarzo. Esto lo relacionó con pulsos magmáticos que generaron fluidos mineralizantes, los cuales arrastraron y depositaron la mineralogía presente. Además menciona que la ubicación de los pulsos mineralizados está controlada por el tectonismo regional y local.

De igual manera, Pérez y Vargas (1993), en su trabajo titulado "Geología y Geoquímica de los Yacimientos Filonianos de Oro en la Mina San Cayetano, Municipio de California (Santander)", describen tres fases mineralizantes en filones orientados en una dirección preferencial, paralela a la dirección de máximos esfuerzos compresionales (N50 – 60W), y además establecen una relación directa entre Au:Ag y Au:As. Ese mismo año, Aceros y Castellanos (1993) también mencionan que la mineralización presente en el sector de California posee una fuerte relación estructural, relacionando así fracturas tensionales con direcciones preferentes entre N60 – 85E y 60 – 80NE con la mineralización.

Otro estudio importante fue el realizado por Felder *et al.* (2000), quienes hacen una descripción de la geología regional y local, así como de las mineralizaciones, alteraciones, control estructural y estimaciones económicas del depósito (Angostura) y precisan que este depósito es de alta sulfidización con presencia de oro libre o asociado en teluros de oro-plata y teluros de bismuto. Además, menciona que las estructuras mineralizadas con alta ley parecen coincidir con las zonas de intenso cizallamiento y brechificación.

## 5. CONCEPTOS PRELIMINARES

El marco teórico se basa en los conceptos fundamentales de la microtectónica, los cuales se encuentran relacionados con deformaciones a escala microscópica.

### 5.1 MICROTTECTÓNICA

La microtectónica estudia los procesos y mecanismos que conducen a la deformación de los minerales. Varios de estos procesos tienden a aumentar la deformación de los cristales y otros tienden a disminuirla, y como consecuencia se genera una serie de microestructuras visibles a escala microscópica que permiten caracterizar las condiciones de la deformación (Passhier & Trouw, 2005).

**5.1.1 Mecanismos de Deformación.** A la deformación se asocian un gran número de procesos que se generan a escala granular. Los procesos involucrados dependen de factores internos como la mineralogía, la composición del material intergranular, el tamaño de grano, la orientación preferencial, la porosidad y la permeabilidad, y de factores externos como la temperatura, presión litostática, el esfuerzo diferencial y la presión de fluidos (Passcheir & Trouw, 2005; Davis & reynold, 1986). Cuando las rocas son sometidas a un régimen de esfuerzos que excede su resistencia mecánica tienden a deformarse; esa deformación puede ser dúctil o frágil.

Los procesos y características que son visibles dentro de las rocas como producto de la deformación son llamados mecanismos de deformación y son clasificados como: a) flujo cataclástico; b) disolución por presión; c) deformación intracristalina; d) maclado; e) restitución; f) recristalización; g) reptación por difusión en estado sólido; h) deformación cristal-plástica; i) reducción de área de borde de grano; y j) recristalización estática, entre otros (Passchier & Trouw, 2005). Para Davis &

Reynolds (1996), son clasificados en cinco categorías: a) microfracturamiento o deformación frágil; b) maclado mecánico y *kinking*; c) deslizamiento (*creep*) por difusión; d) deslizamiento por disolución; y e) deslizamiento por dislocación. Estos procesos pueden actuar solos o acompañados de recuperación y recristalización, en cuyos casos las redes cristalinas de los minerales tienen menos defectos. La temperatura y los fluidos intergranulares favorecen los procesos de recuperación y de recristalización, mientras que las velocidades de deformación altas favorecen los procesos de distorsión de la red cristalina.

5.1.1.1 Flujo cataclástico. Este proceso frágil es generado por el rompimiento mecánico, deslizamiento y rotación de los granos que constituyen las rocas (Blenkinsop, 2000), ocurre en condiciones de baja temperatura y altos esfuerzos dirigidos; como se mencionó anteriormente.

5.1.1.2 Presión solución. Se refiere a la disolución del borde los granos a una fase fluida bajo condiciones de esfuerzo alto. La disolución por presión se localiza donde los granos están en contacto a lo largo de superficies con un alto ángulo respecto a la dirección de acortamiento instantáneo, y donde el esfuerzo sobre el grano es considerable (Passcheir & Trouw, 2005).

5.1.1.3 Deformación intracristalina. Los cristales pueden deformarse en el interior, afectando la configuración de sus celdas cristalinas, sin llegar a fracturarse. Es un proceso conocido como deformación intracristalina en el que hay una orientación preferencial de la celda cristalina (*Lattice-Preferred Orientation*, Passcheir & Trouw, 2005). La deformación intracristalina también puede generarse mediante la reptación por dislocaciones dentro de la celda cristalina (Blenkinsop, 2000). En este caso el movimiento de dislocación posee una orientación distintiva con respecto a la celda cristalina y puede moverse solo en planos cristalográficos específicos.

5.1.1.4 Maclado mecánico. Algunos minerales pueden deformarse mediante maclas de deformación o maclas mecánicas (diferentes a maclas de cristalización), acompañadas por fenómenos de dislocación. El maclado opera siempre en la misma dirección cristalográfica, puede acomodar solo una cantidad de deformación y ocurre generalmente en un rango bajo de temperatura.

5.1.1.5 Restitución. Los mecanismos de la restitución se originan cuando aparecen subgranos, en los que las redes cristalinas están libres de deformación gracias a que las dislocaciones y defectos se han reagrupado formando bandas de deformación (Hatchert, 1995).

5.1.1.5.1 Recristalización. Este proceso produce un re-ordenamiento de los átomos que constituyen un mineral. Existen varios mecanismos básicos de recristalización: a) Recristalización por abultamiento (*Bulging Recrystallisation*); b) Recristalización por rotación de subgranos (*Subgrain Rotation Recrystallisation - SGR-*); y c) Recristalización por migración del límite de grano (*Grain Boundary Migration Recrystallisation -GBM-R*). El primero ocurre mediante un abultamiento del mineral antiguo a lo largo de sus fronteras y en los puntos triples. El segundo mecanismo ocurre cuando las dislocaciones se mueven hacia el borde del grano, hasta el punto en que la orientación de estas celdas no haga parte del cristal original. Y el tercero ocurre en los cristales que se encuentran en contacto y que presentan diferencia en sus densidades de dislocación, y se manifiesta como un movimiento del límite del grano por el crecimiento de un mineral que tiene menor deformación (Passcheir & Trouw, 2005).

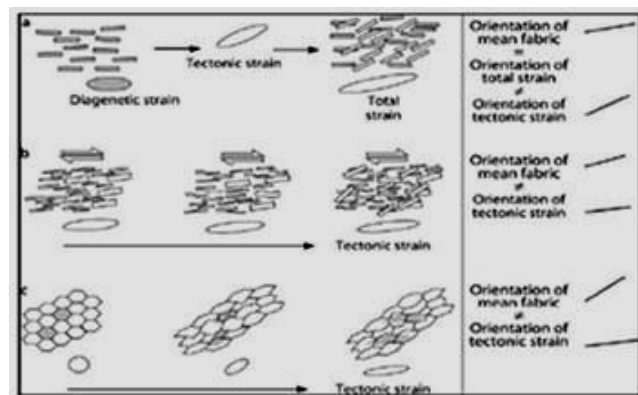
5.1.1.6 Deslizamiento por difusión en estado sólido. Cuando la temperatura durante la deformación es alta (mayor a la temperatura de fusión de los minerales que componen las rocas), los minerales se deforman por el movimiento de las vacancias de la red cristalina. Este proceso recibe el nombre de deslizamiento por difusión en estado sólido y se pueden distinguir dos tipos: El deslizamiento de

Coble y el deslizamiento de Nabarro-Herring. El primero opera por difusión de vacancias a lo largo de los bordes de grano, y el segundo opera por difusión en el interior de la red cristalina y se le denomina también deslizamiento por difusión volumétrica.

5.1.1.7 Reducción del área de borde de grano. Durante la recristalización estática, los minerales inestables son reemplazados por otros estables en las condiciones de presión y temperatura reinantes. Los vacíos de dislocaciones se eliminan, los límites de grano se rectifican y los granos tienden a aumentar de tamaño. Estos dos últimos procesos tienden a reducir el área de los límites de grano y conjuntamente definen el mecanismo de reducción de área de los bordes de grano, que conlleva una reducción de la energía total del agregado cristalino.

5.1.2 Foliación y el plano X-Y del esfuerzo tectónico. La relación simétrica entre foliación secundaria y el plano axial ha sido investigada desde el siglo XIX. Con esto se pudo observar que las foliaciones pueden ser paralelas al plano XY del elipsoide de esfuerzo finito. Para ser más específicos, se supone que algunas foliaciones secundarias trazan el plano XY del elipsoide de esfuerzos relacionado a la fase de deformación en el cual ellos se desarrollan (En Passcheir & Trouw 2005). La figura 2 muestra los ejemplos de no paralelismo

**Figura 2.** Tres situaciones en donde la foliación no es paralela al plano XY



Fuente: Passcheir & Trouw, 2005

## 6. GEOLOGÍA REGIONAL

En el flanco oeste de la Cordillera Oriental las rocas más antiguas corresponden a unidades metamórficas identificadas como Gneis de Bucaramanga y Formación Silgará (Ward *et al.*, 1973). El Gneis esta representado por rocas pelíticas (gneises biotítico), rocas semipelíticas (gneises cuarzo-feldespáticos) y rocas máficas (gneises hornbléndicos, biotítico-hornbléndicos y anfibolitas) de la edad Neoproterozoico (García y Ríos, 1999). Sobre el Gneis de Bucaramanga se encuentra la Formación Silgará de edad Paleozoico temprano, la cual se encuentra compuesta por rocas pelíticas (esquistos micáceos, granatíferos y estaurolíticos), rocas semipelíticas (esquistos cuarzo-feldespáticos, micáceos y cuarzosos; y cuarcitas), rocas máficas (esquistos anfibólicos) y rocas carbonatas (García, 2000), que debieron alcanzar las condiciones de presión y temperatura de la facies anfibolita baja (Ward *et al.*, 1973; García y Ríos, 1999). Esta unidad no aflora en el área del Proyecto Angostura pero sí en sus alrededores.

De otro lado, el ortogneis, considerado como un representante del Ordovícico Temprano, intruye a la Formación Silgará y tiene una composición granítica a tonalítica y diorítica (Ward *et al.* 1973; Royero y Clavijo, 2001).

En el Distrito Minero de Vetas – California no se han reportado rocas ígneas o sedimentarias entre los 470 – 210 Ma. El magmatismo se reanudó a finales del Triásico y comienzos del Jurásico. En la parte sureste de la región de California, Goldsmith *et al.* (1971) documentaron la existencia de tonalitas y granodioritas en Páramo Rico, mientras que cuarzomonzonitas fueron documentados en la parte central del DMVC. La secuencia sedimentaria en esta región está representada por rocas de edad Cretácica que afloran al oeste del Municipio de California, suprayaciendo las rocas del basamento como parte de una secuencia transgresiva compuesta por limonitas de color negro, blandas y localmente calcáreas (Royero y Clavijo, 2001).

Las unidades recientes corresponden a depósitos fluvio-glaciares, terrazas aluviales y coluviones conformados por fragmentos de roca de tamaños de grano variados (Felder *et al.*, 2000).

Adicionalmente, la mineralización se atribuye a la actividad magmática del Cenozoico (Shaw, 2000), más exactamente a la del Neógeno (Mantilla *et al.*, 2009), que está representada por pórfidos dacíticos y andesíticos, que aportaron fluidos mineralizantes. Dichos fluidos migraron por estructuras que se encuentran alineadas al NE, acorde a los **sistemas de fallas** Romeral-Cucutilla y La Baja-Angostura.

## 6.1 CONTEXTO ESTRUCTURAL REGIONAL

Estructuralmente el Macizo de Santander corresponde a un bloque levantado limitado al oeste por **el Sistema de fallas de Bucaramanga** y al este por la falla de Pamplona-Cubogón-Mercedes (Restrepo-Pace, 1995). De acuerdo con Cediell y Cáceres (2003), el **Sistema de fallas de Bucaramanga** es uno de los principales y más marcados rasgos tectónicos de Colombia y aflora en superficie con un marcado rumbo N15°W (INGEOMINAS, 2006). Este rasgo está clasificado como una estructura activa esencialmente de rumbo con cinemática sinextral (Paris y Romero, 1994; Boinet *et al.*, 1985; Clavijo *et al.*, 1993), cuyo desplazamiento se ha calculado entre 100 y 110 km (Ward *et al.*, 1973). Según Ward *et al.* (1973), el sistema tiene una componente vertical importante, que hace que se comporte en algunos sectores como inversa, con buzamientos hacia el este y en su extremo meridional como un cabalgamiento.

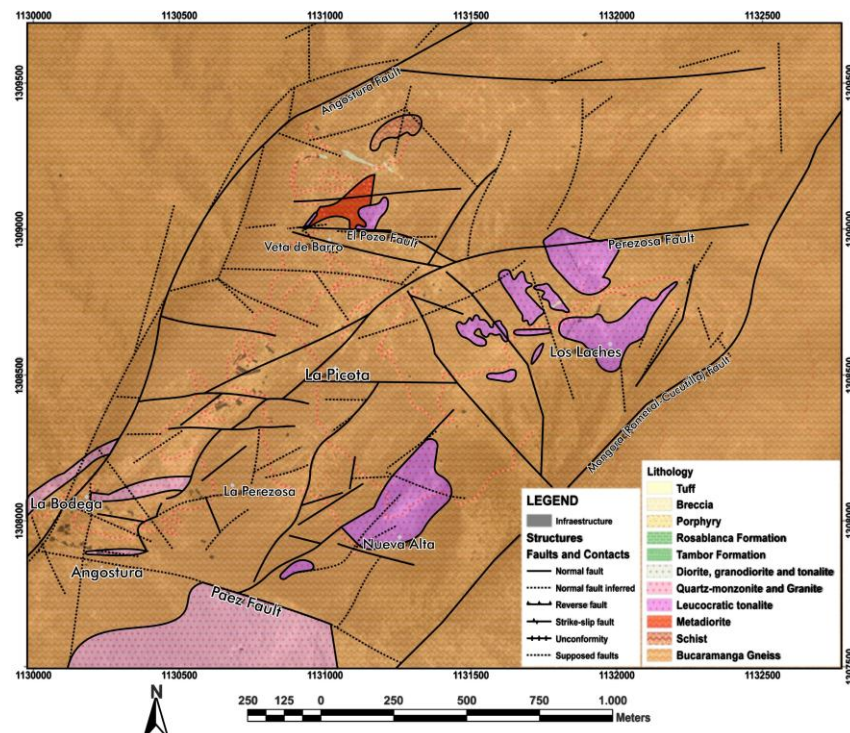
Las fallas de importancia regional-local que se presentan en el sector de California y Vetas tienen una tendencia NE. En el caso del **sistema de fallas Romeral-Cucutilla**, ésta se desplaza a lo largo de la quebrada Romeral, marcando un lineamiento importante, que cruza por el Rio Vetas y el Páramo Rico donde se

choca con la falla de Charta. Sobre la quebrada La Baja, aparece **el sistema de fallas La Baja – Angostura**, interpretado como un sistema producto de esfuerzos tensionales en un ambiente de cizallamiento (Ward *et al.*, 1973).

## 6.2 GEOLOGÍA LOCAL

En la cartografía de las unidades geológicas que afloran en el área del Proyecto Angostura, se logró definir que la unidad Gneis de Bucaramanga presenta algunas variaciones composicionales y que a su vez se encuentran intruidas por rocas ígneas del tipo tonalita, diorita-granodiorita y granito. A continuación se describen y se presenta la distribución espacial de las litologías observadas (Figura 3). Además, se observaron afloramientos de metadiorita en la zona occidental, sobre la quebrada Páez y la vía Veta de Barro, así como pequeños afloramientos de rocas de falla asociadas a los trazos de las estructuras locales que atraviesan la zona de estudio.

**Figura 3.** Mapa geológico del Proyecto Angostura



Fuente: Tomado y modificado de López *et al.* (2013)

Los procesos de mineralización han sido el producto de la actividad hidrotermal, la cual generó grandes zonas de alteración en las rocas encajantes, hasta el punto de hacer desaparecer sus características texturales (Felder *et al.*, 2000; López *et al.*, 2013). Otra evidencia de la mineralización se relaciona con una alta concentración de venas de cuarzo, filones mineralizados y zonas en forma de bandas con minerales arcillosos, sericita, clorita y epidota. A continuación se describen las características más importantes identificadas para cada una de las unidades mapeadas.

**6.2.1 Rocas Metamórficas.** Las rocas más antiguas representadas por el Gneis de Bucaramanga, a lo largo del área del proyecto de estudio muestran evidencias múltiples de eventos deformativos dúctiles (estos eventos no han sido determinados con exactitud), y tampoco es objeto de este trabajo; sin embargo son anteriores a los eventos mineralizantes. Felder *et al.* (2000), son Pre-Cretácicos.

Las variedades están representadas por gneis cuarzo – feldespático, gneis biotítico, anfibolitas y migmatitas, exhibido una distribución heterogénea en el sector del Proyecto. Esta unidad es la roca caja de la mineralización principal, y ha sufrido alteraciones hidrotermales del tipo argílica avanzada, argílica, propilítica, silicificación y sericitización (Felder *et al.*, 2000), además, en la mayoría de los afloramientos se evidencia la oxidación de los sulfuros, caracterizada por la generación de pátinas de hematita y/o limonita.

Para el Gneis de Bucaramanga, se registran dos direcciones de foliación, la primera entre 220° y 260°, se encontró en la zona norte (Veta de Barro y Nueva Alta), mientras que la segunda tiene una dirección aproximadamente a 330° y se distribuye en toda la unidad.

6.2.1.1 Gneis cuarzo-feldespático. Se encuentra en la zona noreste del área del Proyecto, los mejores afloramientos son visibles en el borde de la carretera Nueva

Alta-Laches. Su característica principal se refiere al bandeamiento, el cual está constituido por bandas de cuarzo y feldespato, intercaladas con bandas de biotita, el espesor promedio de las bandas no supera 1 mm. Es de color grisáceo, brillo vítreo y los tamaños de grano son finos a medios. Presenta una composición mineralógica constituida por cuarzo (53%), feldespato alcalino (20%), biotita (15%) y plagioclasa (12%).

6.2.1.2 Gneis biotítico. Se encuentra aflorando sobre la vía Veta de Barro y el lado izquierdo de la vía que conduce a Laches. Presenta un bandeamiento composicional y en algunos sectores estructuras migmatíticas en las que se puede diferenciar los leucosomas y mesosomas. Es de color verdoso y tamaño de grano medio. Está constituido por hornblenda (45%), biotita (38%), plagioclasa (8%), cuarzo (6%) y minerales opacos (3%).

6.2.1.3 Migmatitas. Los mejores afloramientos se observan sobre la quebrada Angostura, sobre la vía que conduce al campamento desde el túnel La Perezosa II y en la carretera Campamento – Veta de Barro. La estructura principal se relaciona con un bandeamiento que oscila entre 3 y 15 cm de espesor con micropliegues. Se puede diferenciar el melanosoma (bandas oscuras adyacentes a los leucosomas) y está constituido principalmente por hornblenda y/o biotita, el leucosoma (bandas claras), compuesto por cuarzo, plagioclasa y feldespato, y el mesosoma por presentar una composición con cuarzo, plagioclasa, feldespato, biotita y hornblenda en mucha menor proporción.

6.2.2 Diques de metadiorita. Los diques afloran en el lado izquierdo de la vía Veta de Barro – Campamento, después de la intersección con la quebrada Pozo. Se encuentra en contacto con el gneis biotítico, de manera regular. Es una roca de color negro, estructura masiva, compuesta por hornblenda (43%), plagioclasa (23%), cuarzo (16%), feldespato potásico (12%) y biotita (2%).

6.2.3 Rocas ígneas. Los diferentes tipos de roca que afloran están definidos por la presencia de tonalita, diorita, granodiorita y granito. Presentan menor alteración hidrotermal que el gneis, sin embargo se puede apreciar silicificación, sericitación y argilización. La característica más importante y de interés en este trabajo es que estas rocas presentan fracturamientos visibles a diferentes escalas de observación y se encuentran en contacto neto intrusivo con el gneis biotítico.

6.2.3.1 Tonalita. Estos cuerpos afloran en la parte noreste del sector Laches y sobre la quebrada Páez extendiéndose hacia el sector Nueva Alta y al norte de Veta de Barro. No presentan una geometría definida. La tonalita presenta colores blanco grisáceos a rosados, textura fanerítica hipidiomórfica de tamaño de grano medio y se encuentra compuesta por cuarzo (47%), plagioclasa (36%), feldespato alcalino (12%) y moscovita (5%).

6.2.3.2 Monzogranito. En la parte sureste de la quebrada Páez y en la margen derecha de la carretera que va hacia la veta de Barro, son los lugares donde se identificó este tipo de roca. Se caracteriza por ser fanerítica hipidiomórfica de tamaño de grano medio a fino. Se diferencia composicionalmente por presentar cuarzo (52%), feldespato alcalino (25%), plagioclasa (20%) y moscovita (3%).

En sección delgada se pudo definir una variación composicional a sienogranito caracterizado por presentar cuarzo (46%), feldespato alcalino (30%), plagioclasa (22%) y moscovita (2%).

6.2.3.3 Granodiorita. Se observó en la parte noroeste del área. Corresponde a pequeños cuerpos de forma alargada con colores grises verdosos a blancuzcos. Es fanerítica, hipidiomórfica granular. Composicionalmente presenta cuarzo (45%), plagioclasa (35%), feldespato alcalino (18%) y moscovita (2%).

6.2.4 Rocas de falla. Son rocas que varían entre cataclasitas y protomilonitas, producidas por las fallas que atraviesan el sector. Se observan afloramientos en la zona de Nueva Alta, sobre las fallas satélites a la falla Páez. En la zona de veta de Barro, sobre estructuras satélites a la falla Angostura y sobre el trazo de la falla La Perezosa. El principal rasgo tectónico se relaciona con bandas de deformación y la presencia de porfidoclastos de cuarzo y plagioclasa. Está constituida principalmente por hornblenda (40%), biotita (30%), plagioclasa (18%) y cuarzo (12%). Los minerales neoformados en la matriz de las cataclasitas corresponden a una asociación de clorita+sericita y sericita+cuarzo

6.2.5 Estructuras definidas durante el trabajo de campo. Dentro del Proyecto Angostura se presentan las fallas Páez, La Perezosa, El Pozo, El Mortiño y Cristo Rey; las cuales se originaron por la interacción de los sistemas de falla Romeral-Cucutilla y La Baja-Angostura. La distribución espacial de los cuerpos mineralizados en la zona, se encuentra controlada por estas mismas fallas (Felder *et al.*, 2000; Horner, 2005; López *et al.*, 2013). Adicionalmente, estas fallas producen un patrón de diaclasamiento variado, presentando direcciones NW y NE, con buzamientos entre 40° y 80°, siendo notorio un aumento en su densidad en las rocas ígneas.

## 7. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las actividades desarrolladas durante las fases de campo y laboratorio, las cuales incluyen el análisis de los datos estructurales obtenidos en campo y de las secciones delgadas de cortes orientados en muestras orientadas.

### 7.1 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA FALLA LA PEREZOSA, UTILIZANDO DATOS ADQUIRIDOS EN AFLORMIENTOS CERCANOS

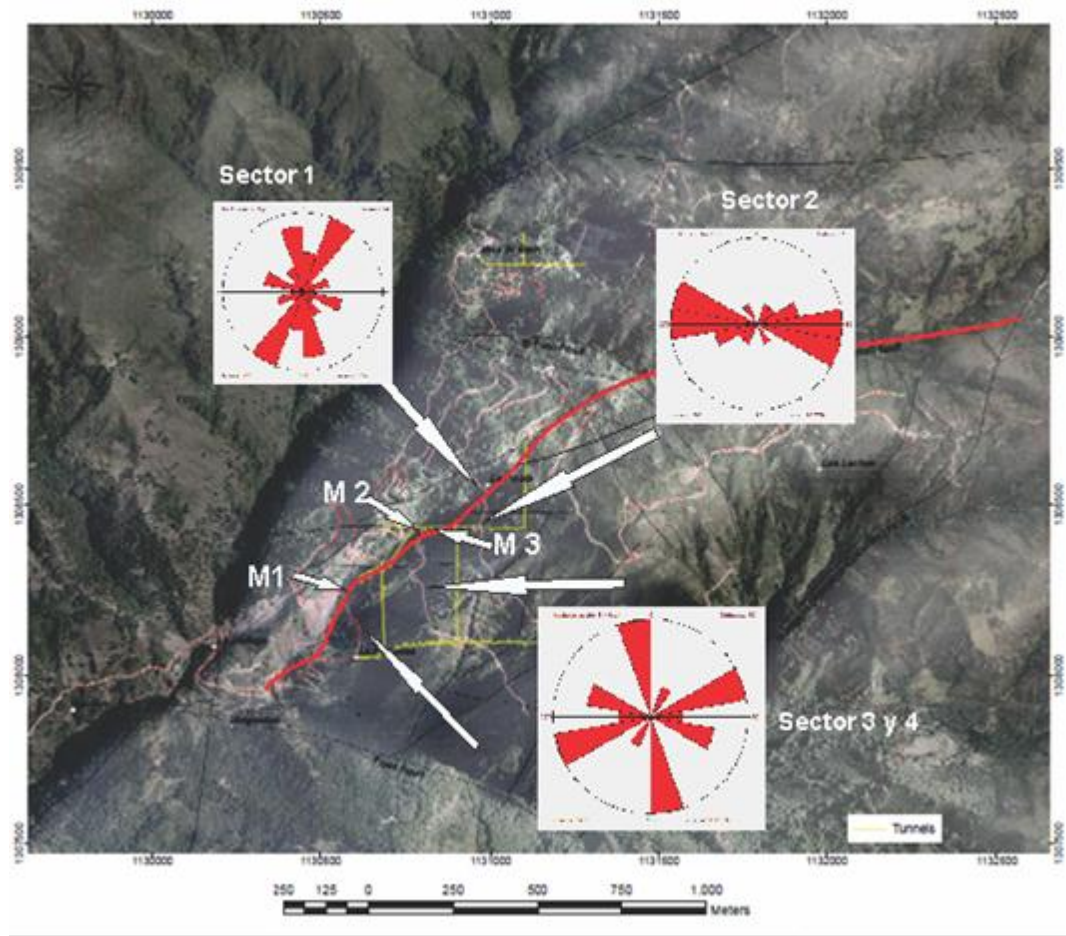
Durante el trabajo de campo se realizó la toma de datos de fracturas, vetillas, *stringer*, venas y fallas (anexo 3), en afloramientos cercanos a la falla La Perezosa. Estos datos fueron agrupados por sectores con base en su ubicación con respecto a la falla, y adicionalmente fueron procesados en los programas TectonicsPF (versión 1.7.7) y Win\_tensor (versión 4.0.4), con el fin de obtener los diagramas de Rosetas, de polos y el tensor de esfuerzos, para observar las direcciones preferenciales, densidad de los datos y orientación de los ejes principales del paleoesfuerzo.

**7.1.1 Análisis De Fracturas.** Para el análisis de las fracturas se eligieron 4 afloramientos cercanos a los lugares de donde se extrajeron las muestras para análisis microtectónico (Figura 4). Se midieron un total de 46 datos de planos de fracturamiento, que se procesaron en el programa TectonicsPF (versión 1.7.7).

Los sectores 3 y 4 se unieron por su proximidad y la baja cantidad de datos en cada uno de ellos. Al observar el patrón de fracturamiento, se pueden distinguir dos estilos: uno en dirección NE – SW, paralelo a la dirección de la Falla La Perezosa, y otro en dirección NW – SE (sobre todo en los sectores 3 y 4), donde se caracterizaron algunas fallas de menor magnitud, con esa misma tendencia estructural. Además se puede distinguir que la mayoría de las fracturas están

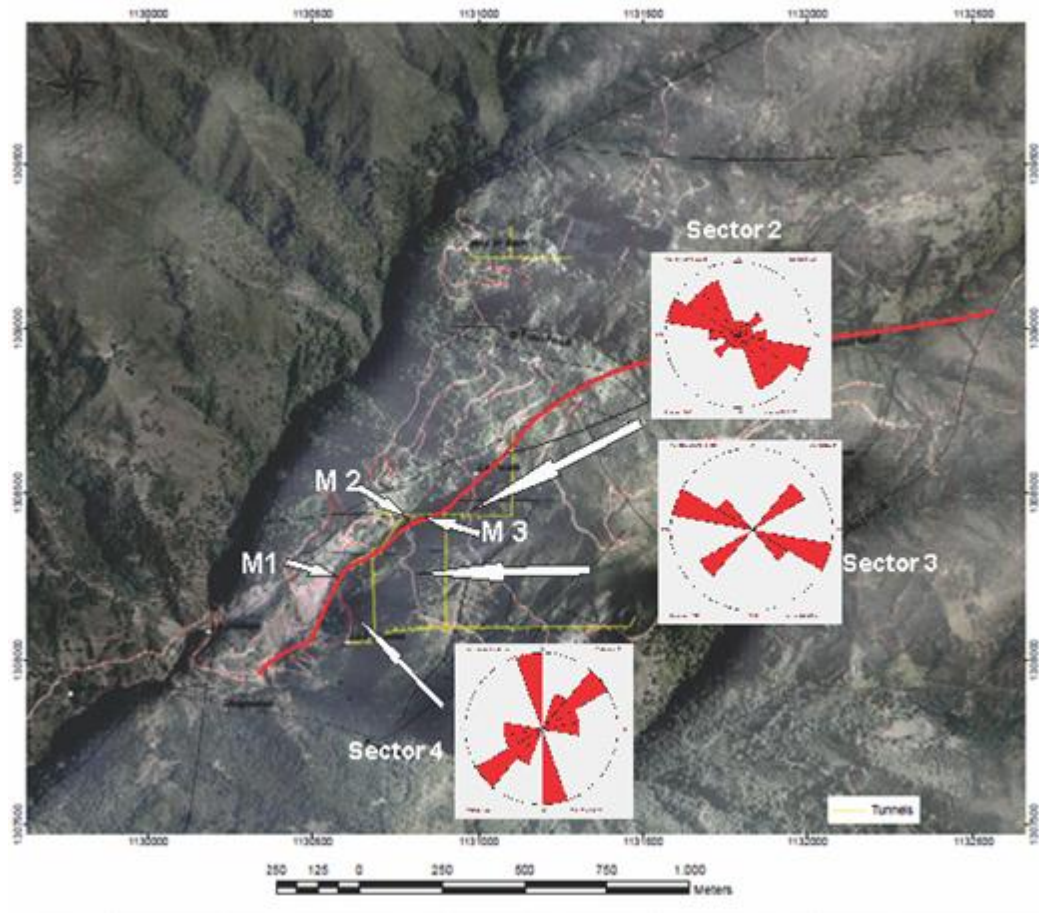
limpias, a excepción de algunas pátinas de FeOx en los sectores 3 y 4.

**Figura 4.** Diagramas de rosetas y de densidad de fracturas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.



**7.1.2** Tendencia y Densidad de las Vetillas. Se registraron 37 vetillas en tres de los afloramientos, las cuales tienen una tendencia NW (sector 2), asociada a la falla La Perezosa, en las que se encuentra mayoritariamente FeOx + Sulf + Si, mientras que en los sectores 3 y 4 (Figura 5), la orientación es NW – SE, asociadas a fallas satélites, en donde se encuentra rellenas por asociaciones de Si + Qz + FeOx + Sulf. La característica más importante es la presencia de familias de vetillas conjugadas en el sector.

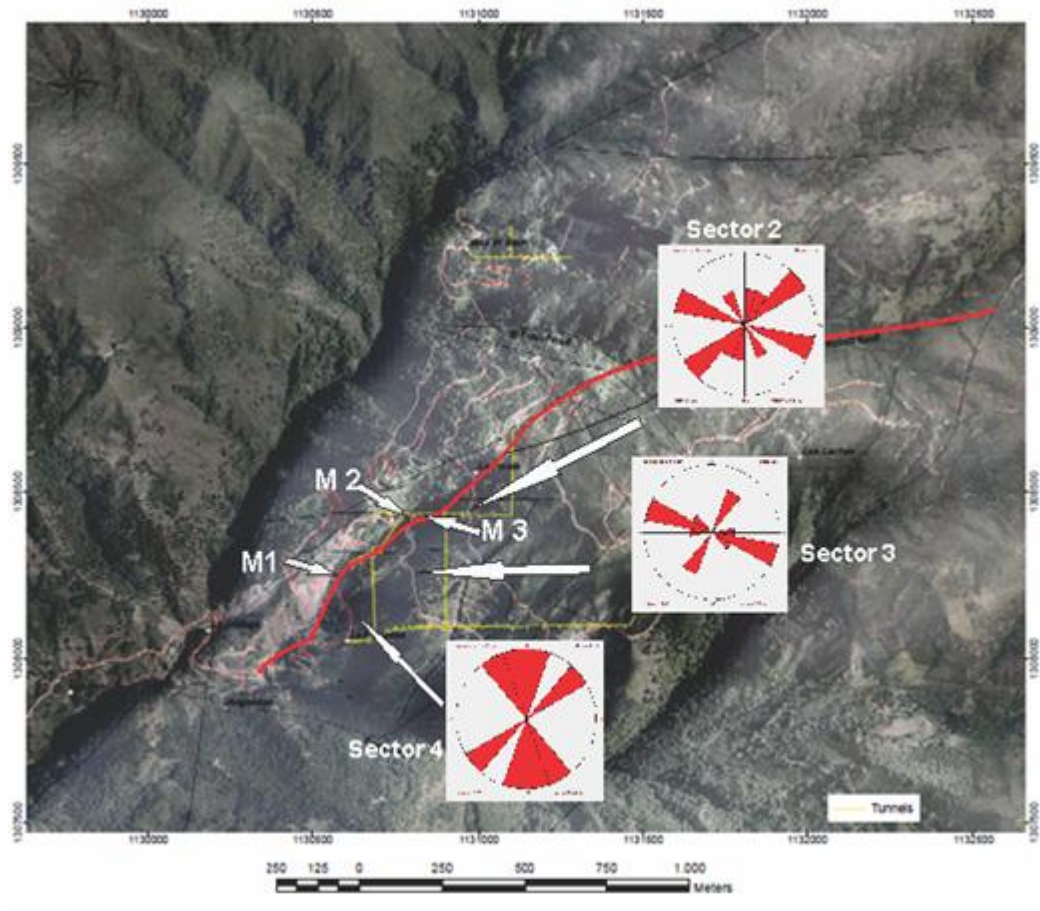
**Figura 5.** Diagramas de rosetas y de densidad, para los datos estructurales de vetillas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano



### 7.1.3 Tendencia y Densidad de los *Stringer*

Los *stringer* son pequeños “hilos” de mineral que se encuentran cortando los afloramientos. Se midieron 18 datos los cuales se presentan en la Figura 6. En el sector 2 tienen una tendencia NE – SW y NW – SE, se encuentran rellenos por FeOx, mientras que los sectores 3 y 4, las orientaciones presentan tendencias NE – SW y NW, y se identificó BIOx + FeOx, como su principal componente.

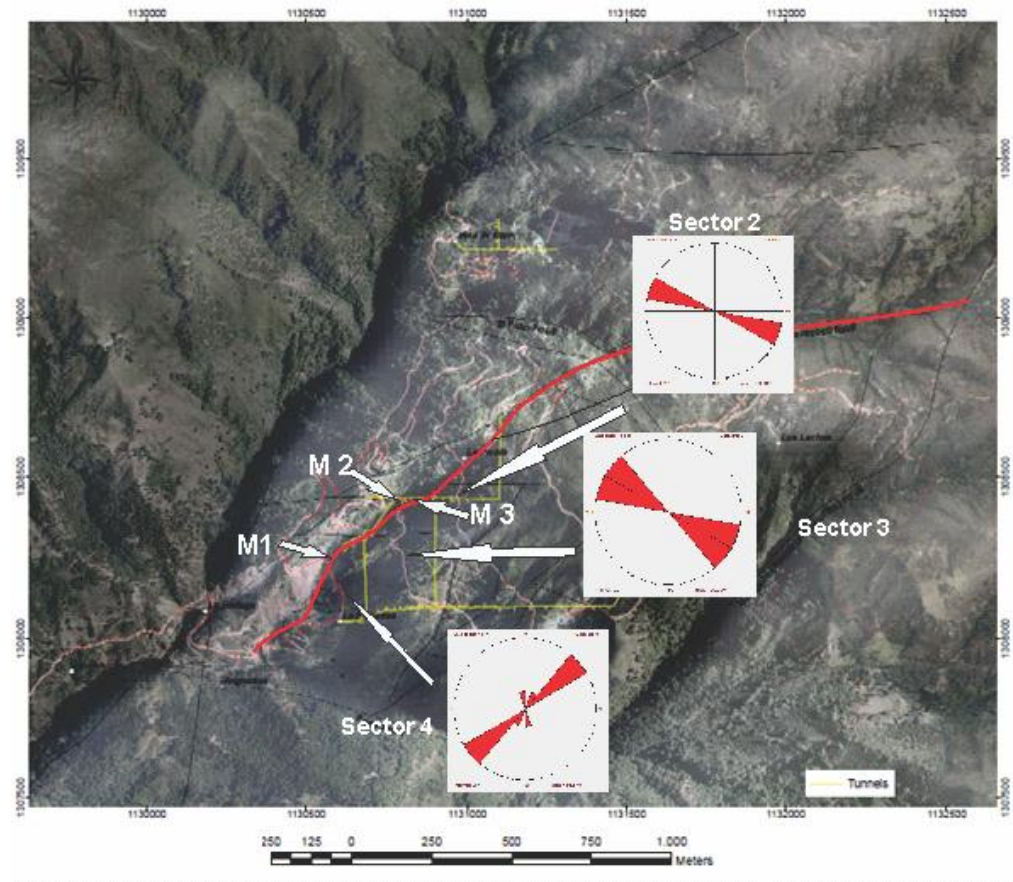
**Figura 6.** Diagramas de Rosetas y de densidad, para los datos estructurales de stringer. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano



#### 7.1.4 Tendencia y Densidad de las Venas

Este tipo de estructura se encontró en los sectores 2, 3 y 4. Se midieron 8 datos estructurales que son mostrados en diagramas de Rosetas (Figura 7); se definen dos tendencias principales, la primera NE y la segunda NW-SE, además las asociaciones minerales de las vetas de la primera dirección, en general es Si + Qz + FeOx + Sulf, y en las estructuras hacia el NW-SE, se encontró Si + FeOx + BIOx.

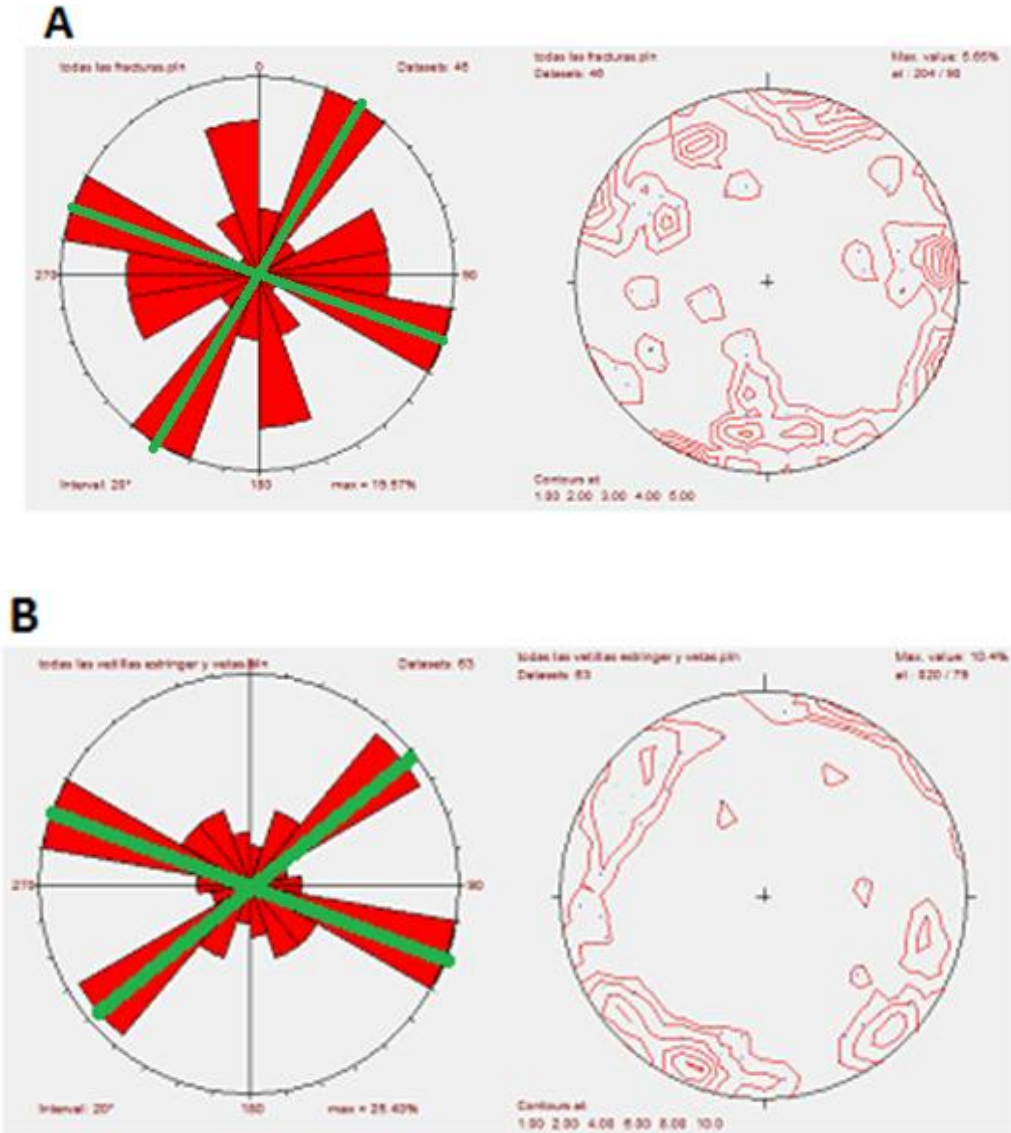
**Figura 7.** Diagramas de Rosetas y de densidad de las venas. Los números antepuestos por la letra M indican el lugar de donde se tomaron las muestras de mano.



### 7.1.5 Patrones De Fracturamiento

Una vez caracterizados los datos de fracturas (limpias), vetillas, stringer y venas para todos los sectores representados en cada una de las figuras anteriores, se logró definir, en general, que las dos tendencias que dominan la distribución de los diagramas de rosetas se encuentran acordes con: fracturas limpias y venillas, stringer y venas (Figuras 8A y 8B).

**Figura 8.** A. Diagrama de rosetas y de densidad para los datos de fracturas limpias en los cuatro sectores. B. Diagrama de rosetas y de densidad para los datos de vetillas, stringer y vetas de los sectores 2, 3 y 4.



En las figuras anteriores se muestra que la tendencia NE - SW aparece en los dos grupos, mientras que la orientación NW- SW es predominante en fracturas limpias, asociadas a los sectores 3 y 4. Con esto se puede asumir que han existido eventos repetidos, que, para el caso de las fracturas limpias puede implicar un fracturamiento conjugado posiblemente asociado a los esfuerzos que originaron la

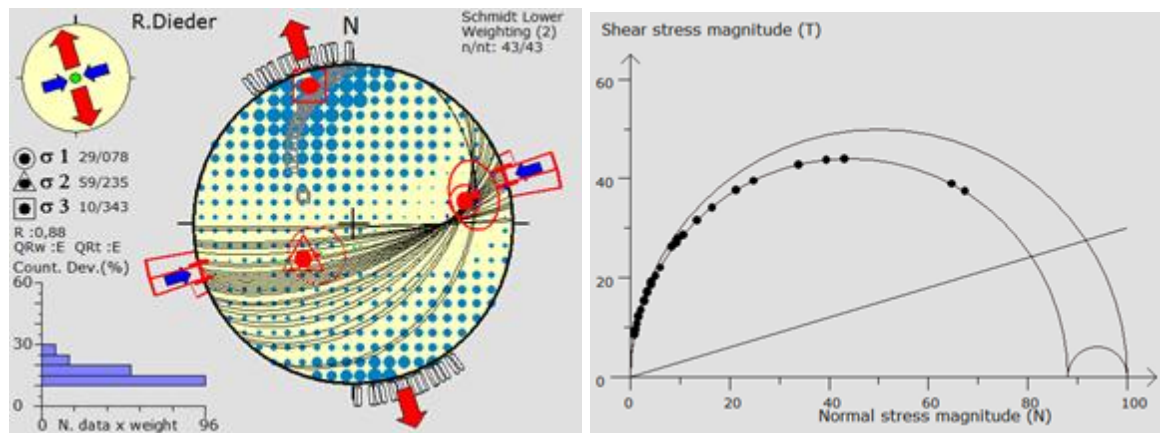
la falla La Perezosa. Otra característica que se resalta es que las venas que se encuentran en dirección NE tienen una composición en general de **Si + Qz + FeOx + Sulf**, mientras que las orientadas en sentido NW-SE contienen **Si + FeOx + BIOx**.

### 7.1.6 Tensor De Paleoesfuerzos

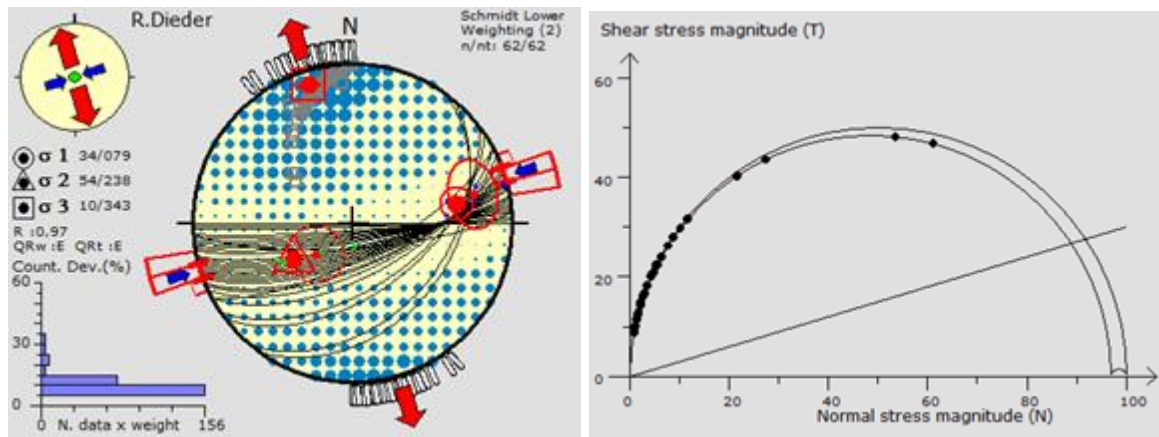
A continuación se presentan los resultados del modelado de los datos realizado en el programa Win\_Tensor 4.0.4, con lo que se determinaron los ejes principales de esfuerzos, para las fracturas limpias, vetillas, stringer y venas totales, presentes en los tres sectores.

Para las fracturas limpias (Figura 9), las direcciones son: eje de compresión ( $\sigma_1$ ) N78E/29, el eje de esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) N25W/59 y el eje de tensión ( $\sigma_3$ ), N17°W/10. Para los datos de vetillas, stringer y venas totales (Figura 10), las direcciones son: eje de compresión ( $\sigma_1$ ) N79E/34, eje de esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) N22W/54 y el eje de tensión ( $\sigma_3$ ) N17°W/10

**Figura 9.** Tensor con todos los datos de fracturas limpias de los sectores 1, 2, 3 y 4



**Figura 10.** Tensor de esfuerzos usando datos de vetillas, vetas y stringer de toda el área

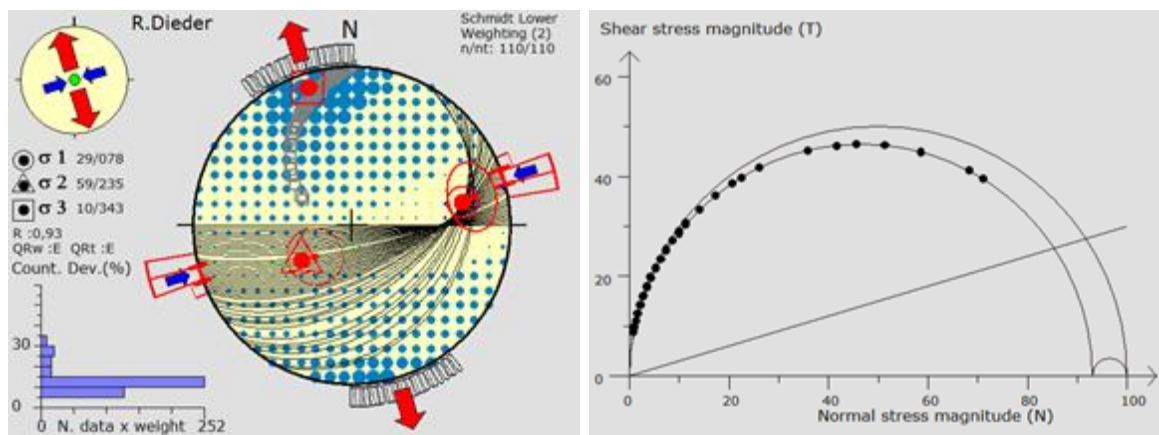


Al observar el resultado de los tensores de paleoesfuerzos, en relación con lo mostrado en el Círculo de Mohr, se puede sugerir que los eventos de deformación posteriores se han dado por reactivación de la falla La Perezosa.

### 7.1.7 Tensor De Paleoesfuerzos con todos los datos

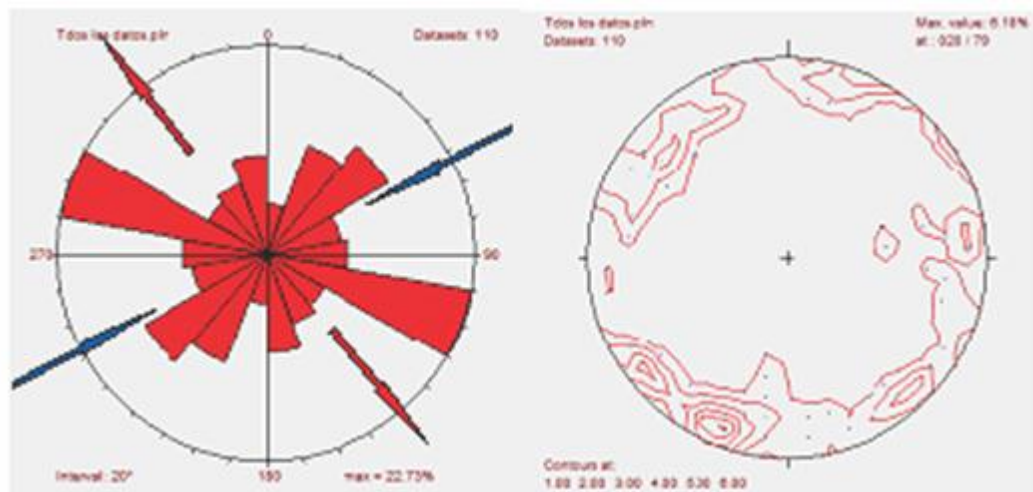
El tensor general para el sector de la falla La Perezosa (Figura 11), tiene su eje de compresión ( $\sigma_1$ ) en dirección N78°E/28, su eje de esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) en dirección N25°W/59 y su eje de tensión ( $\sigma_3$ ) en dirección N17°W/10

**Figura 11.** Tensor de paleoesfuerzos total para la zona de la falla La Perezosa



Por otra parte es bien sabido que los planos de fractura son el resultado de una dislocación tensional (vetillas, venas y stringer), cizalla o híbrido, y por lo tanto existe una relación directa entre los ejes de esfuerzo principales y la orientación de las fracturas. Con esta información se puede utilizar el diagrama de rosetas (Figura 12), de todos los datos de fracturas tensionales que se anotaron en el sector, para aproximar un resultado de la ubicación de los ejes principales y compararlos con los obtenidos anteriormente.

**Figura 12.** Diagrama de rosetas y densidad de polos, utilizando todos los datos registrados.



De la figura anterior se puede acentuar que la orientación del eje de compresión ( $\sigma_1$ ), se encuentra en el cuadrante NE, similar al obtenido mediante el análisis con el programa Win\_Tensor, aunque se resalta que este diagrama de rosetas utilizó datos de fracturas tensionales y la zona presenta igualmente evidencias de cizalla paralelas a la dirección del eje de compresión.

## 7.2 PETROGRAFÍA Y MICROTTECTÓNICA

A continuación se describirán las características petrográficas y los diferentes mecanismos de deformación encontrados en muestras de las litologías que afloran en el área del Proyecto Angostura, haciendo énfasis en las características microtectónicas de las muestras colectadas en las inmediaciones de la falla La Perezosa. Así, a partir de la clasificación petrográfica se definieron los tipos de rocas metamórficas (gneises biotíticos, anfibolitas, milonita (esquisto rico en sillimanita y moscovita) y rocas ígneas de composición intermedia a ácida (tonalita y sienogranito). Para la nomenclatura (anexo 4), de los minerales en las microfotografías se tuvieron en cuenta las abreviaturas propuestas por Whitney and Evans (2010). Adicionalmente, cabe anotar que el tema será desarrollado por tipo de litología en primer grado para determinar los mecanismos relacionados con el metamorfismo regional o flujo y emplazamiento en el caso de las rocas ígneas, y en segundo grado para hacer énfasis en el análisis microtectónico de la deformación relacionada con la falla La Perezosa.

### 7.2.1 Gneis Biotítico (Gneis De Bucaramanga)

La unidad gneis biotítico es de tamaño de grano medio a fino y está conformada principalmente por biotita, plagioclasa tipo albita ( $An\ 0\% - An\ 10\%$ ), cuarzo, hornblenda, cianita, cordierita, sillimanita y moscovita en proporciones menores. Los minerales secundarios son la sericita como alteración de feldespatos, epidota como producto de alteración hidrotermal, clorita a partir de biotita y pinnita como alteración de cordierita. En los sectores donde hay mayor fracturamiento se presenta asociaciones minerales sericita+cuarzo (característica de alteración hidrotermal).

7.2.1.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. El gneis biotítico se caracteriza por presentar un bandeamiento composicional con alternancia de bandas oscuras ricas en biotita  $\pm$  hornblenda, con texturas lepidoblásticas a lepidogranoblásticas y localmente con texturas decusada (Figura

13A); y bandas claras compuestas por plagioclasa, cordierita, moscovita y cuarzo con texturas granoblásticas. Localmente el bandeamiento es incipiente debido a la acción de la alteración hidrotermal.

La biotita se presenta como agregados de color marrón pleocroico, subidioblástico y hábito hojoso, se encuentra en contacto neto con la hornblenda conformando la foliación principal; algunos cristales presentan alteración de sus bordes a clorita. Los mecanismos de deformación observados corresponden a microfracturamientos intragranulares y microplegamientos más o menos paralelos a la dirección de exfoliación.

La hornblenda, está en contacto neto con la biotita y presenta cristales con formas subidioblásticas de hábito alargado con bordes alterándose a clorita y/o epidota, los contactos son rectos y algunos presentan mínimas evidencias de disolución por presión. Los mecanismos de deformación caracterizados se relacionan con flujo cataclástico: microfracturamientos intragranulares (acorde a los planos de foliación) fracturas de extensión rellenas por sílice y microdesplazamientos (microfallas).

La plagioclasa consta de individuos incoloros en luz no polarizada, algunos se ven sucios por alteración retrógrada, otros tienen maclas polisintéticas, en general presentan formas subidioblásticas y bordes irregulares en contacto con cuarzo. Se altera a sericita. No evidencia mecanismo de deformación más allá de pequeñas zonas (en la sección), donde se aprecian microfracturamientos intergranulares.

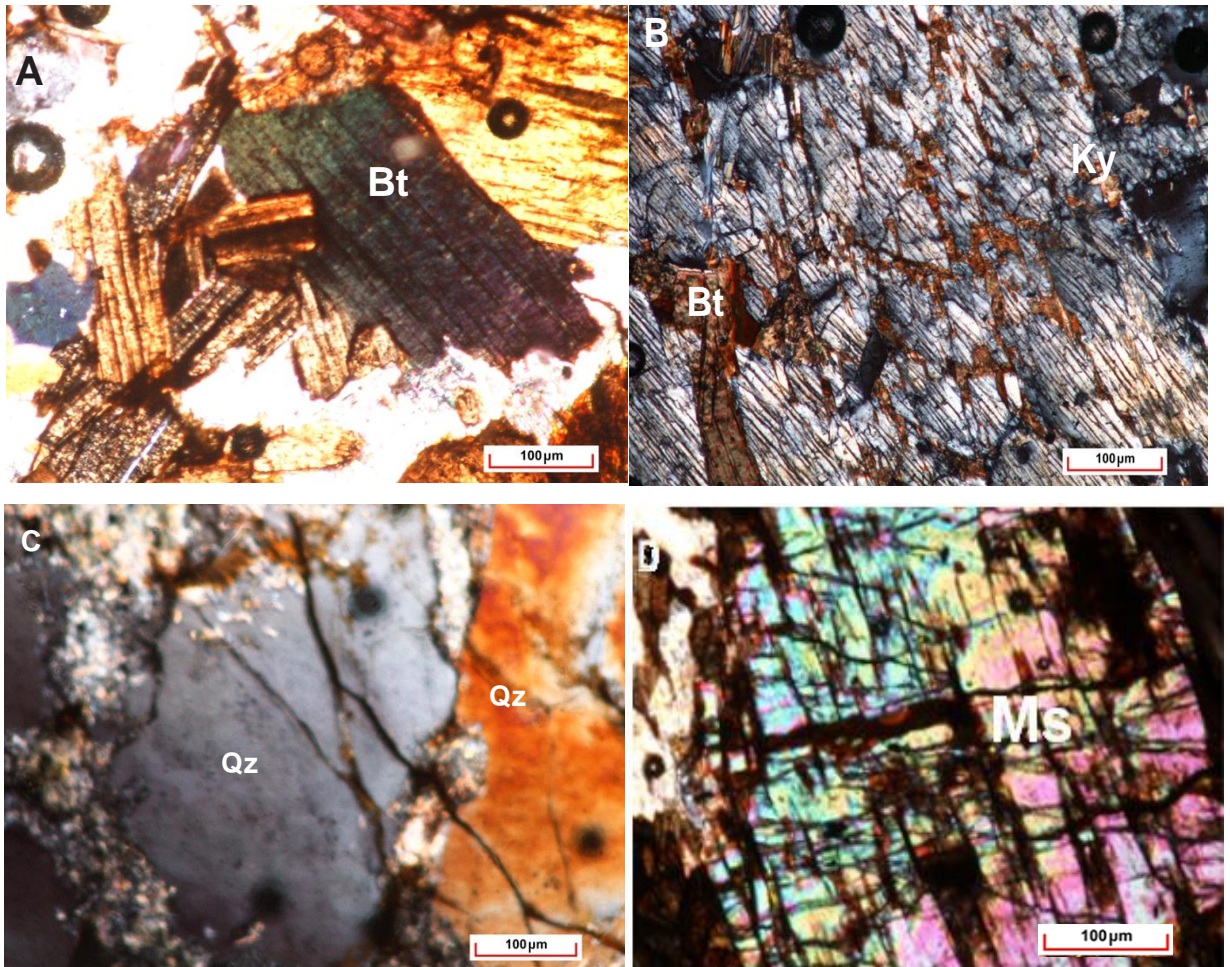
Por otra parte los cristales de cuarzo son heteroblásticos y xenoblásticos, se encuentran de forma interlobulada con las plagioclasas y la biotita, formando parte del bandeamiento de la sección. Exhibe recristalización por migración de borde de grano, extinción de barrido y microfracturamiento transgranular sobreimpuesto, lo que indica mecanismos de deformación intracristalinos, generados a partir de

generación y migración de dislocaciones (Figura 13C). La cianita se encuentra de manera discreta en la sección en contacto con hornblenda y biotita. Algunos cristales se encuentran fracturados (Figura 13B); estas fracturas aparecen rellenas por fases de biotita; en algunos sectores de las mismas fracturas, se encuentran alteraciones a sericita.

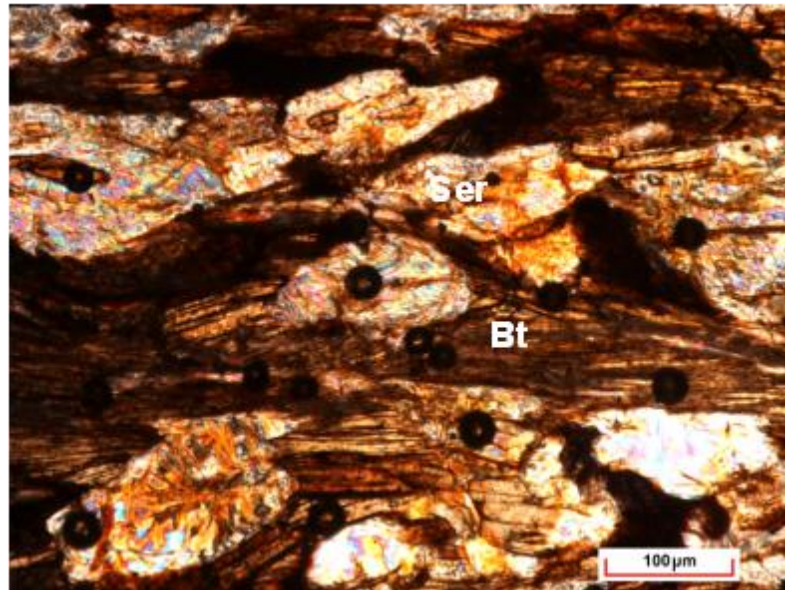
También se observa la presencia de cordierita con formas subhidioblásticas, colores de interferencia de primer orden, y mecanismos de deformación frágil representados por microfracturamientos intergranulares e intragranulares. La moscovita se caracteriza por su color de interferencia anómalo y su hábito laminar (Figura 13D); en la que se observaron microfracturamientos transgranulares normales a la dirección exfoliación. La sillimanita se caracteriza por presentar formas tabulares y colores de interferencia anómalos, se encuentra en contacto con cordierita; de igual manera sus mecanismos de deformación están relacionados con microfracturamientos transgranulares y microfallamientos.

La sericita hidrotermal se presenta en forma de nódulos (Figura 14) dentro de los arreglos nematoblásticos de la biotita y de forma escamosa en el resto de la sección.

**Figura 13.** A. Biotita (Bt) con textura decusado; luz polarizada, aumento 5x. B. Cristal de Cianita (Ky) el cual se presenta fracturamiento en varias direcciones rellenos por biotita (Bt); luz polarizada, aumento 10x C. Microfracturamiento transgranular en el que se puede apreciar relaciones de corte entre las diferentes fracturas, en cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada aumento 10x. D. Microfracturamiento intragranular en moscovita (Ms). Algunas fracturas tienen depositación de óxidos provenientes de la alteración hidrotermal. Luz polarizada, aumento 10x.



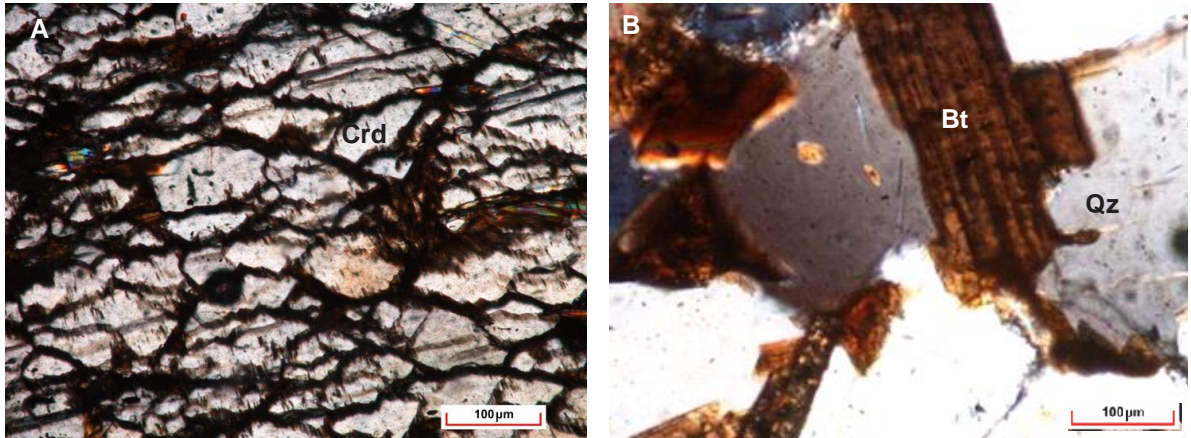
**Figura 14.** Sericita (Ser) en nódulos, luz polarizada, aumento 20x



7.2.1.2 Microestructuras. Las microestructuras identificadas en el gneis Biotítico permiten sugerir condiciones de deformación relacionadas con el metamorfismo regional dúctil, dúctil–frágil y localmente frágil, que afectaron la zona.

Las microestructuras frágiles diferenciables corresponden a microfracturas intragranulares, intergranulares y transgranulares en el sentido de Blenkinsop (2000). Las microfracturas intragranulares se identificaron en minerales tales como moscovita, cianita y cuarzo (Figuras 13A y 13B). Las microfracturas transgranulares se observaron en cristales de cuarzo y plagioclasa (Figura 13C), mientras que las microfracturas intergranulares (Figura 15A) se observaron en cristales de cordierita, y se encontraron rellenas por óxidos de hierro. Por otra parte las condiciones de alto metamorfismo se evidencian en la Figura 15B.

**Figura 15.** A. Cristal de cordierita (Crd) el cual presenta microfracturamientos intergranulares. B. Límites de grano lobulado entre biotita y cuarzo. Las dos microfotografías se presentan en luz polarizada y con un aumento de 20x



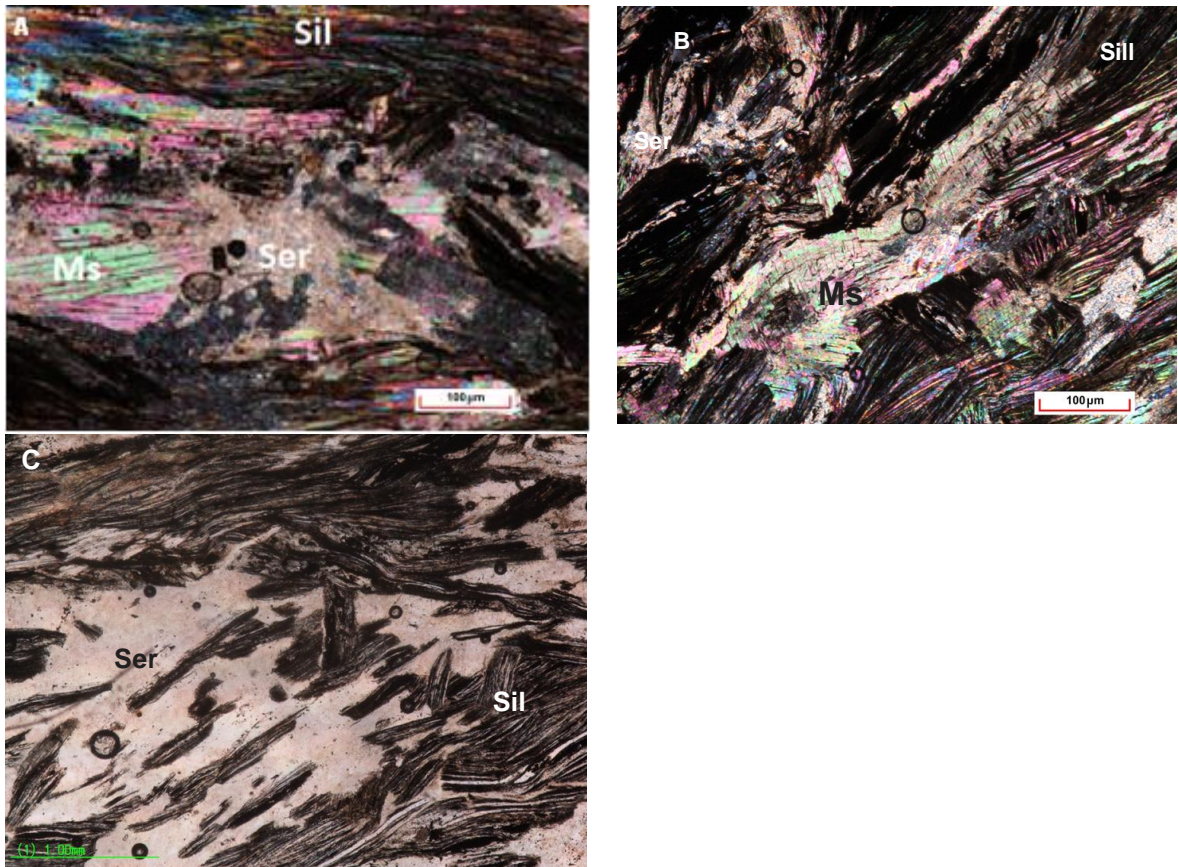
### **7.2.2 Milonita (Esquisto De Moscovita Y Sillimanita Deformado, Perteneciente Al Gneis De Bucaramanga)**

La milonita esta caracterizada por una foliación bien definida (C) y una foliación S, remanente; dentro de la primer foliación se encuentran porfidoblastos de minerales opacos que localmente presentan microbinague, que además permite definir la posible ubicación del eje de compresió máximo que originó esta textura.

7.2.2.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. La unidad mineralógicamente se encuentra conformada por moscovita, sillimanita variedad prismática, minerales opacos y rutilo.

La moscovita (Figura 16A) se dispone en agregados (monominerales), compuestos por individuos heteroblásticos de hábito laminar a fibroso, con terminaciones irregulares. Se puede observar algunos minerales curvados y moteados (Figura 16B), se encuentra en contacto neto y difuso con sillimanita, rutilo y minerales opacos. Los mecanismos y procesos de deformación definidos para este tipo de mineral son escasos, pero de acuerdo con las texturas identificadas, se puede sugerir que corresponden con distorciones de la red cristalina.

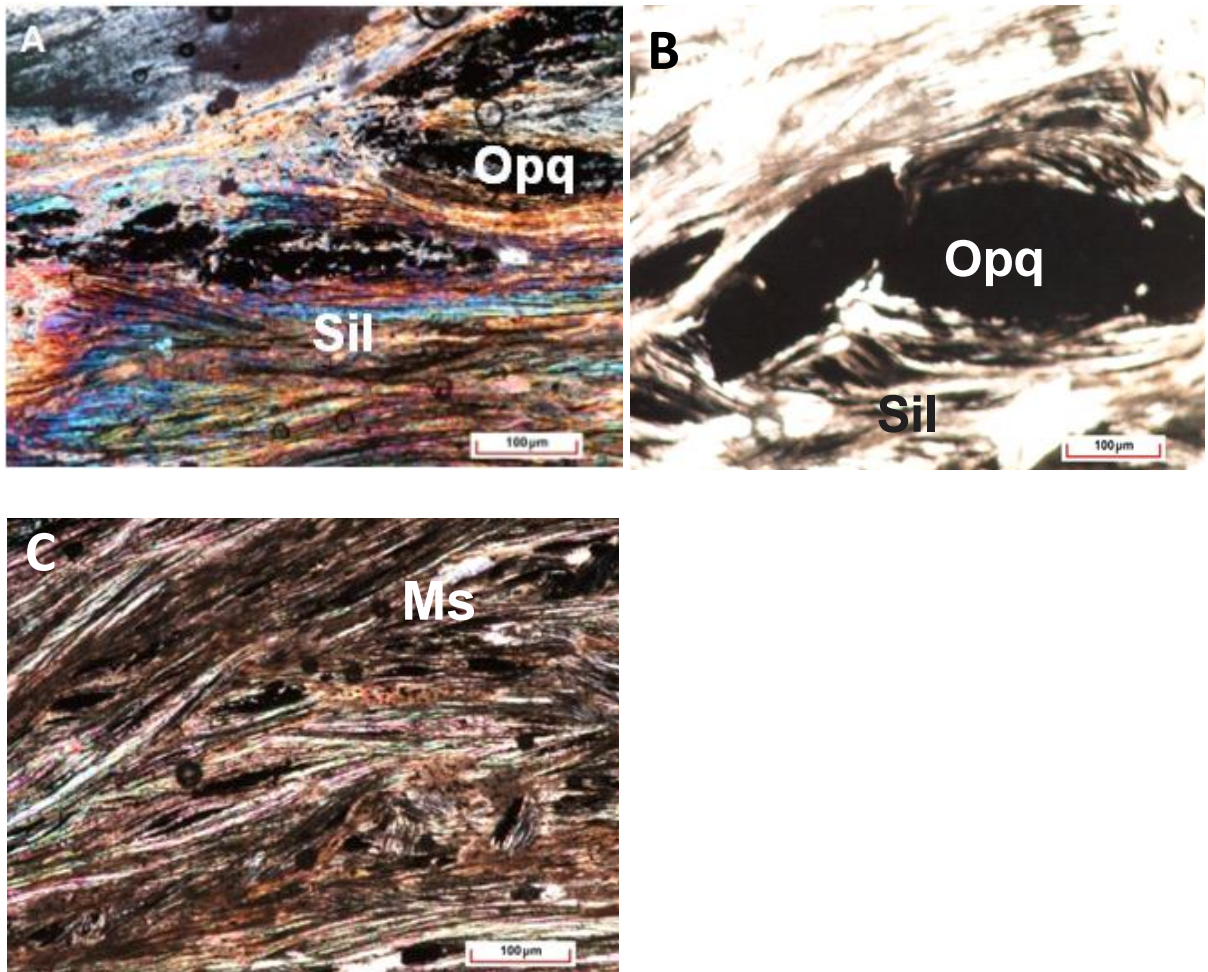
**Figura 16.** A. Agregados de moscovita (Ms) rodeada por sillimanita (Sil); luz polarizada, aumento 10x. B Cristal de moscovita (Ms), el cual presenta un leve doblamiento, luz polarizada aumento 10x. C. Cristales prismáticos de Sillimanita (Sil) embebecidos en una matriz de sericita. Luz plana, aumento 5x.



Por su parte, la sillimanita se dispone en agregados de cristales prismáticos, compuestos por individuos café verdosos, heteroblásticos, con terminaciones irregulares, colores de interferencia altos y siguiendo la dirección de esquistosidad C. Está asociada con moscovita (Figura 16C). Los mecanismos de deformación sobre este tipo de material son frágiles (cataclasis). El rutilo se caracteriza por presentar colores rojizos, tiene relieve medio a alto, es heteroblástico, la mayoría muy pequeños, se encuentra asociado con la moscovita y la sillimanita. La unidad presenta una textura general lepidoblástica y alcanza la facies anfibolita.

7.2.2.2 Microestructuras. Las microestructuras identificadas corresponden a microboudines de minerales opacos (Figura 17A) y porfidoblastos (Figura 17B); como producto de la contracción regular y repetida de las zonas competentes dentro de la matriz dúctil (Vernon, 2004). El otro tipo de microestructura está definida por cristales de moscovita y sillimanita que definen foliaciones truncadas y de cizalla (Figura 17C).

**Figura 17.** A Microboudines de minerales opacos (Opq); luz polarizada, aumento 10x. B Porfidoblastos de minerales opacos (Opq); luz polarizada, aumento 5x. C foliación (C) y vestigios de la foliación S. Luz polarizada, aumento 5x.



### **7.2.3 Anfibolita (Gneis De Bucaramanga)**

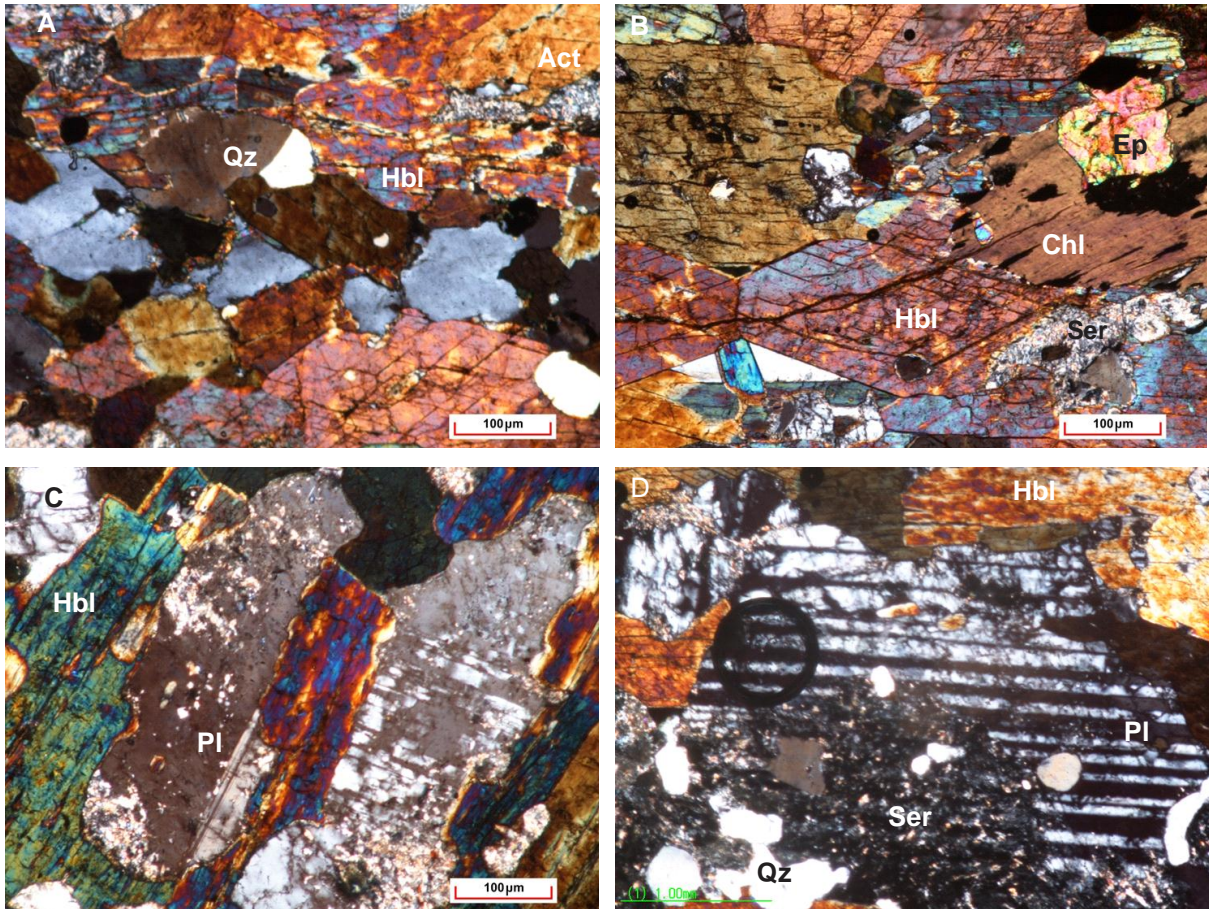
La anfibolita se caracteriza por presentar textura nematoblástica y localmente granoblástica, tiene un tamaño de cristal medio a grueso y su mineralogía esta definida por la presencia de anfíboles (hornblenda y actinolita), plagioclasa, rutilo, cuarzo y biotita; minerales de alteración: clorita, epidota y sericita; y en algunos sectores venas rellenas de sílice relacionadas con la actividad de fluidos hidrotermales.

7.2.3.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. Los minerales que registran la deformación son: cuarzo, plagioclasa y los anfíboles en menor proporción. Cabe anotar que todos presentan deformación frágil, caracterizados por la presencia de microfracturamientos.

La hornblenda presenta colores verdosos en luz plana y relieve medio a alto; exhibe una exfoliación en dos direcciones y colores de interferencia de 2°orden, los cristales son subhidioblásticos, con variedades morfológicamente prismáticas (Figura 18A). Se altera a clorita y epidota (Figura 18B), y desarrolla contactos netos e interpenetrativos con biotita y actinolita, así como microfracturamientos intragranulares y transgranulares. Algunos ejemplares presentan evidencias de procesos de deformación a escala cristalina definidas por su forma de extinción.

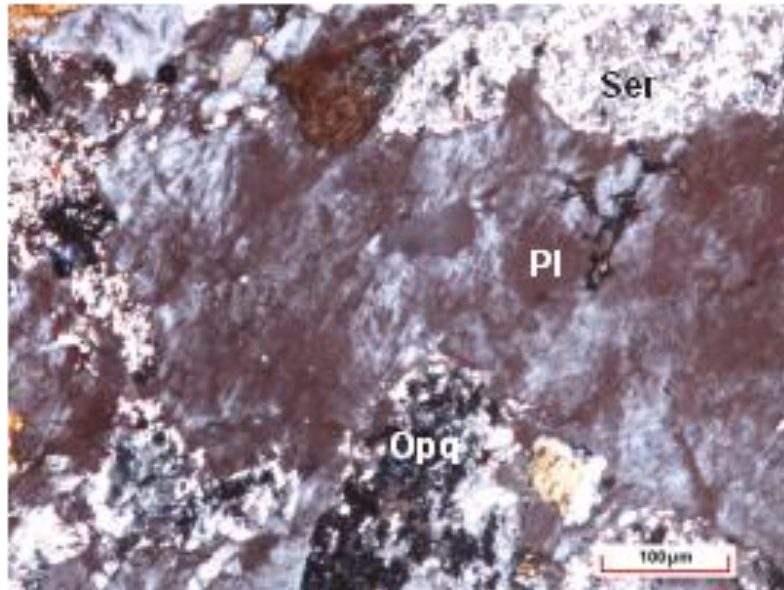
La actinolita se encuentra distribuida en toda la sección de forma desordenada, tiene una forma prismática tabular, pleocroísmo moderado: desde verde oliva a verde amarillento y se exhibe asociada a la hornblenda; registra mecanismos de deformación asociados a deformación frágil (microfracturamientos transgranulares e intergranulares), y alteraciones a epidota.

**Figura 18.** A. Cristales de Hornblenda (Hbl) en contacto con cuarzo (Qz); B Alteraciones de Clorita (Chl) y Epidota (Ep); C. Textura poiquiloblastica en plagioclasa (Pl); D. Plagioclasa (Pl) alterándose a Sericita (Ser) y con inclusiones de cuarzo (Qz). Todas las microfotografías se tomaron con luz polarizada y un aumento de 5x.



Por otro lado, la plagioclasa (albita-oligoclasa) es incolora, de relieve bajo y de menor tamaño que el cuarzo, su forma es euhedral y tiene colores de interferencia de primer orden; algunos individuos tienen macla polisintética y otros presentan texturas poiquiloblastica (Figura 18C); está asociada al cuarzo, hornblenda y actinolita, con los que genera contactos interlobulados y difusos; se altera a sericita (Figura 18D). Las evidencias de deformación se caracterizan por la presencia de recristalización, microfracturamiento y texturas de exsolución (Figura 19).

**Figura 19.** Textura de exsolución del tipo antipertita, Luz polarizada, aumento 10x



El Cuarzo es subhidioblástico y esta asociado a la hornblenda, actinolita y plagioclasa, formando contactos irregulares. Los mecanismos de deformación observados, están relacionados con extinción ondulante (distorsión de la red cristanila), microfracturamientos (cataclasis) y recristalización por migración de borde de grano (procesos de recuperación). El rutlio se conforma de cristales de color rojizo, de relieve medio, heteroblasticos, xenoblásticos; asociado con el cuarzo, hornblenda. Los minerales opacos (posiblemente sulfuros) que se encuentran diseminados en la matriz, acompañados de sericita. Estos minerales no presentan evidencias de deformación.

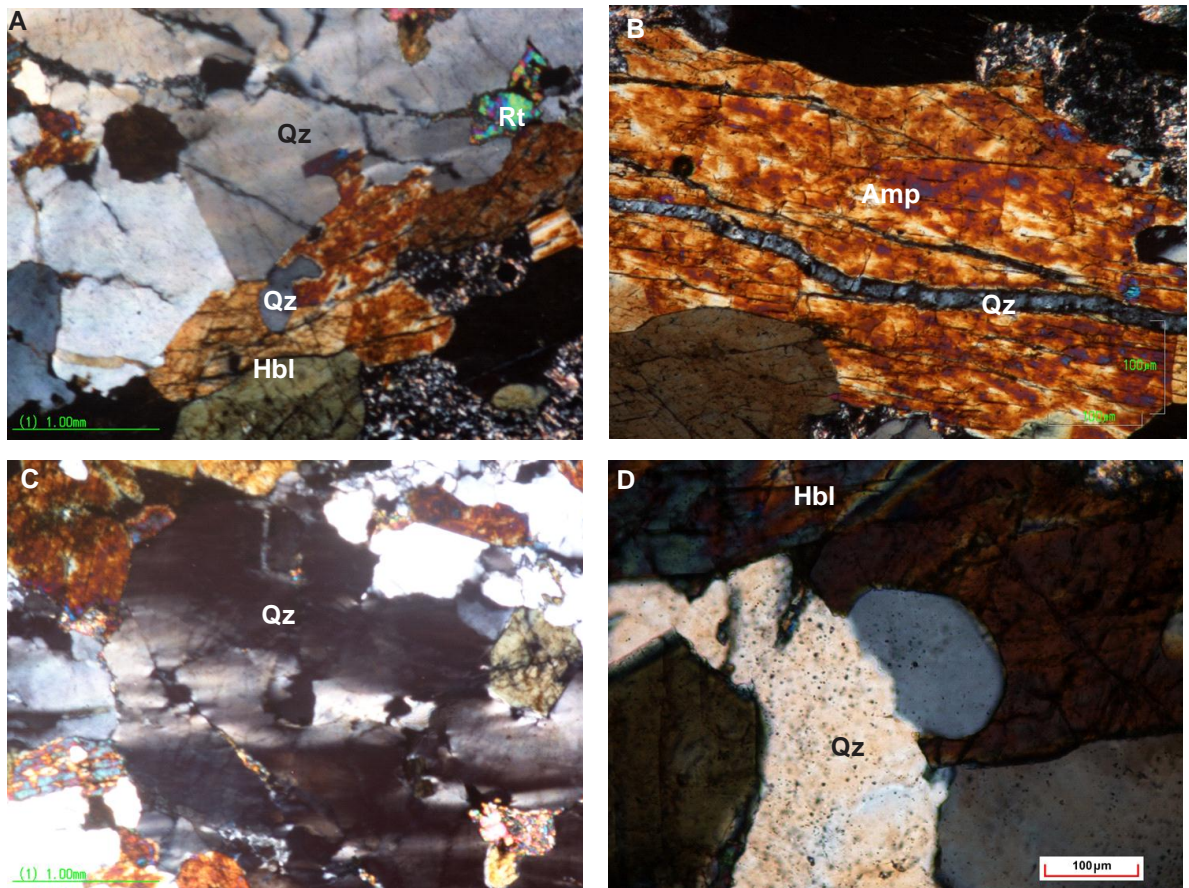
7.2.3.2 Microestructuras. Los mecanismos de deformación caracterizados en la anfibolita se han identificado en cristales de diferente composición, los cuales han generado algunas microestructuras que permiten inferir las condiciones de deformación (Passcheir and Trouw, 2005; Vernon, 2004).

Las microestructuras frágiles corresponden a microfracturamientos intragranulares y transgranulares (Blenkinsop, 2000), las cuales no presentan evidencias de

microfallamiento. Las microfracturas intragranulares, generadas por mecanismos de deformación de la red cristalina, afectan cristales de cuarzo y en menor medida a plagioclasas (Figura 20A). Y las microfracturas transgranulares se identificaron en minerales de cuarzo, plagioclasas y hornblenda; gran parte de este tipo de fractura se encuentra rellena de sílice (Figura 20B).

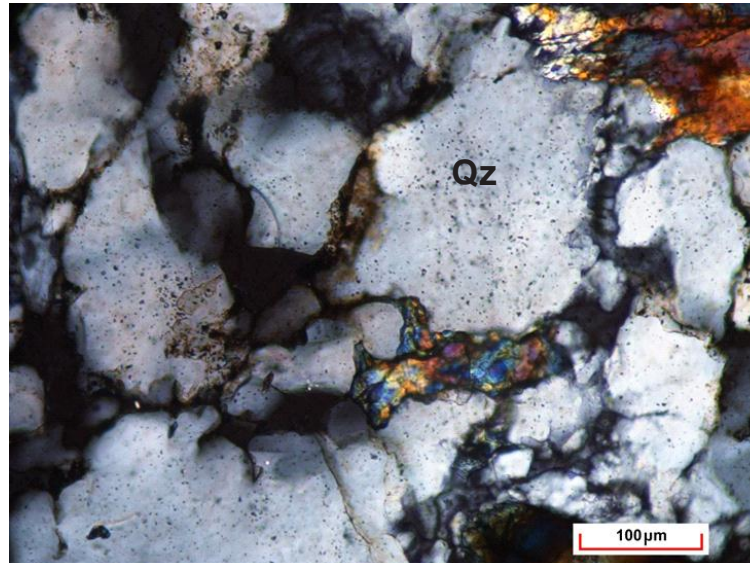
**Figura 20.** A. Microfracturamiento intragranular en cristales de cuarzo. B Vena de cuarzo microcristalino. C. Cuarzo (Qz) con microfracturamiento, recristalización y extinción ondulante. D. Generación de subgranos en cristales de cuarzo (Qz).

Todas las microfotografías, se capturaron con luz polarizada y un aumento de 10x



Otras microestructuras identificadas están relacionadas con la extinción ondulante de barrido y generación de subgranos en cuarzo (Figura 20C y 20D); y el intercrecimiento de fases de anfíbol y cuarzo (Figura 21).

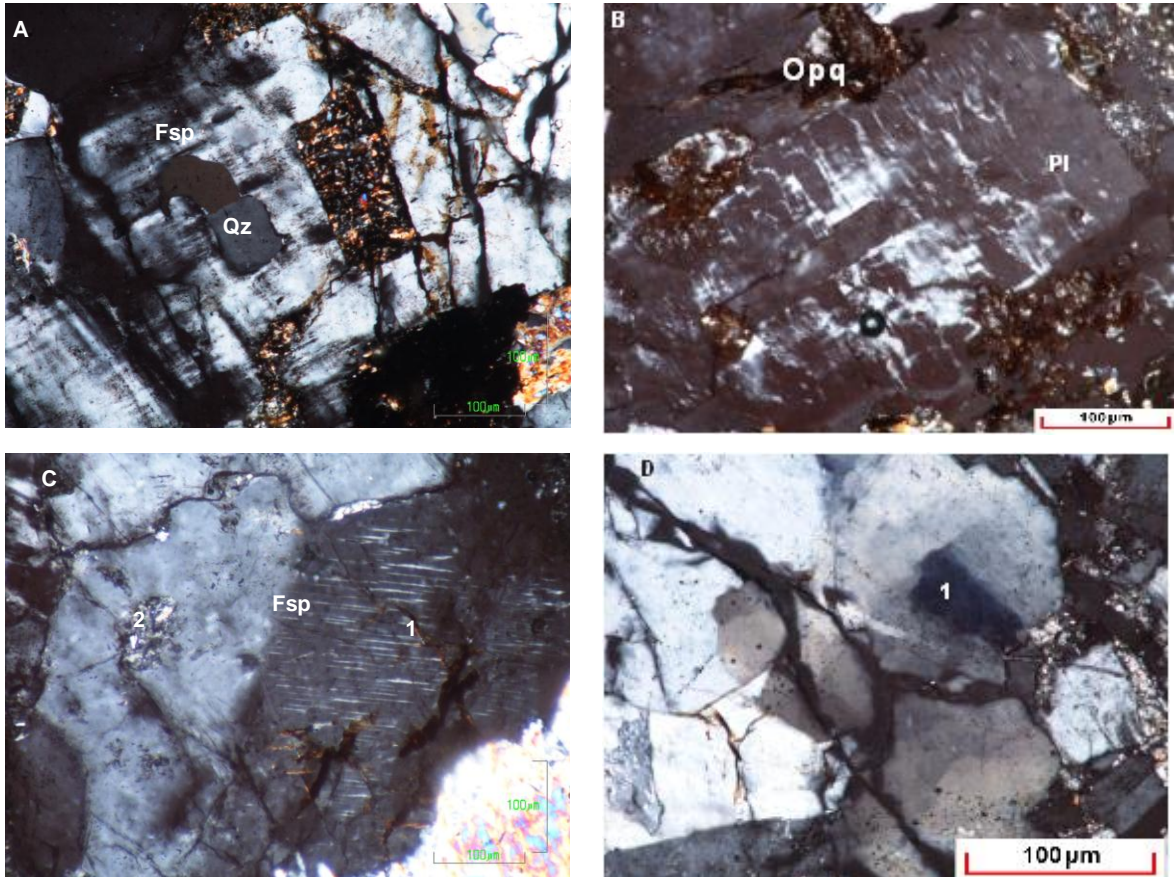
**Figura 21.** Cristales de cuarzo fracturados y posteriormente recrystalizados por el mecanismo de migración de borde de grano junto a fases de anfíbol; algunas partes del cuarzo evidencia generación de subgranos. Luz polarizada, aumento 5x



#### **7.2.4 Granodiorita (rocas ígneas del triásico – jurásico)**

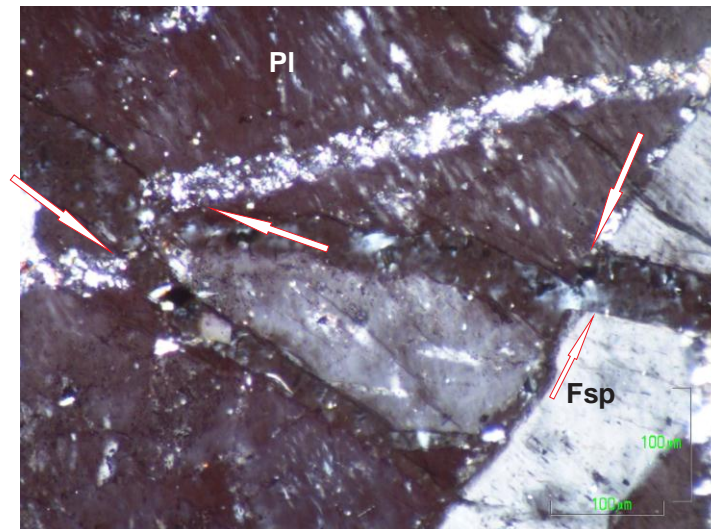
Microscópicamente se reconoce evidencias de deformación frágil (fracturas rellenas por óxidos y venas de cuarzo). En secciones delgadas la identificación de la mineralogía refleja presencia de cuarzo, plagioclasa, feldespato tipo microclina y ortoclasa, y minerales accesorios como la moscovita, óxidos y minerales opacos. Los minerales secundarios definidos son la sericita y la clorita. Las texturas primarias identificadas son la alotriomórfica y la hipidiomórfica, inclusiones de cristales de cuarzo en plagioclasa (Figura 22A), texturas poiquiliticas, pertitas y antipertitas en feldespatos (Figura 22B y 22C).

**Figura 22.** A. Inclusiones de cuarzo dentro de un cristal de feldespato; luz polarizada, aumento 5x B) Antipertita de morfología lamelar; luz polarizada, aumento 10x. C. Feldespato alcalino presenta una pertita lamelar; luz polarizada, aumento 5x. D. Subgranos (1) en cristales de cuarzo (Qz) y fracturas transgranulares; luz polarizada, aumento 20x..



Los cristales en su mayoría son faneríticos con formas euhedrales y subhedrales; algunos de los cuales presentan reducción de tamaño por cataclasis y microbreccificación (Figura 22D); adicionalmente la continuidad óptica de los minerales evidencian procesos de recuperación asociados a la generación de subgranos, presentes en su mayoría en cristales de cuarzo.

**Figura 23.** Venillas del tipo ataxial rellenas de cuarzo microcristalino; luz poltrizada y aumento de 20x

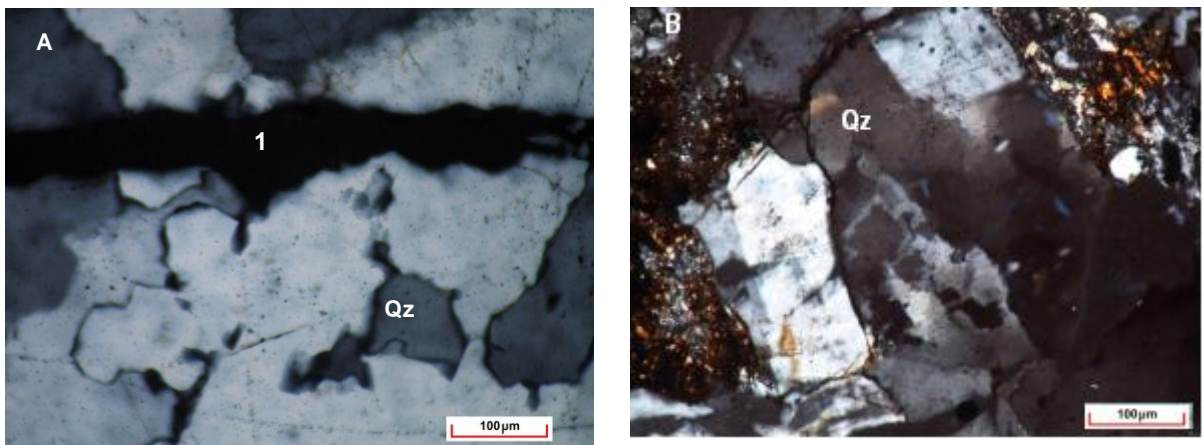


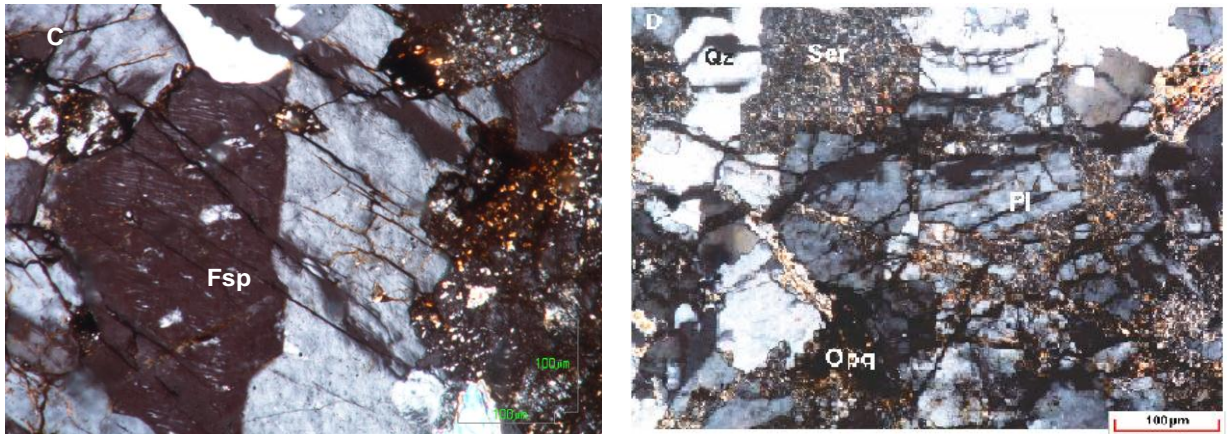
Además es común observar venas en las que ha recrystalizado cuarzo microcristalino o sericita producto de alteración hidrotermal con espesores promedios que oscilan entre 0.02 y 0.05 milímetros generadas por tensión; algunas de estas fracturas rellenas, presentan micro-desplazamiento (Figura 23).

7.2.4.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. La sección presenta una distribución homogénea de las evidencias de deformación frágil (microfracturamientos), en minerales de cuarzo, plagioclasa y feldespato, los cuales en su mayoría son relictos, sin embargo algunos se han generado como producto de recrystalización dinámica y recuperación (Figura 24A y 24B). La distribución de la mineralogía en la sección es homogénea, con excepción de los minerales accesorios, que por lo general se limitan a las zonas de fracturamiento transgranular en las que se encuentran como relleno. Otros mecanismos de deformación definidos son: *creep* por dislocaciones (extinción ondulante), se encuentran sobre cristales de cuarzo, maclas mecánicas (distorsión de la red cristalina), en feldespatos (Figura 24C), y algunos cristales de moscovita evidencian doblamientos (bandas *kink*).

El cuarzo aparece como individuos incolores, con bajo relieve, sus bordes son irregulares en contacto con plagioclasa y feldespato; en algunos sectores de la sección presentan reducción de tamaño de grano por cataclasis (Figura 24D). Los mecanismos de deformación evidencian generación de subgranos (Figura 24A), recrystalización por migración del límite del grano, microfracturamientos (Figura 24D), y contactos interlobulados. De otro modo, la plagioclasa exhibe formas subhedrales y euhedrales, su tamaño varía de medio a fino, y tiene maclas siguiendo la ley de la albita (albita-carlsbad). Los mecanismos de deformación se distinguen por microfracturamiento intragranular y transgranular (Figura 24D), y contactos interlobulados con cuarzo y feldespato; se altera a sericita.

**Figura 24.** A. Cristales de cuarzo con recrystalización de migración de borde de grano. B. Subgranos en cristales de cuarzo, se observan en el centro de la microfotografía. C. Macla mecánica en cristal de feldespato, con un posterior microfracturamiento intragranular. D. Microfracturamiento transgranular de la plagioclasa y el cuarzo. Todas las microfotos fueron tomadas con luz polarizada y aumento de 10x.

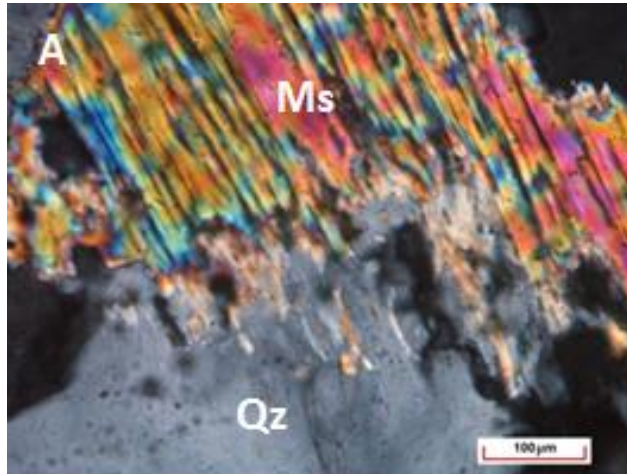




El feldespato potásico, es de relieve bajo, de menor tamaño que el cuarzo, con formas euhedrales y subhedrales, colores de interferencia de primer orden, algunos individuos presentan maclas genéticas en forma de malla. Los mecanismos de deformación están representados por: concentración alta de fracturamientos, maclas mecánicas (Figura 24C), texturas de desmezcla (pertitas), extinción ondulante y recristalización (Figura 22B).

La moscovita presenta su exfoliación basal y colores de interferencia característicos, algunos ejemplares se encuentran alterando a clorita, sus formas son bien definidas (euhedrales), y se encuentra asociada al cuarzo (Figura 25) y plagioclasa; con el cuarzo presenta contactos interpenetrativos, que indican condiciones de deformación altas.

**Figura 25.** Intercrecimiento entre cuarzo y moscovita; luz polarizada, aumento 5x



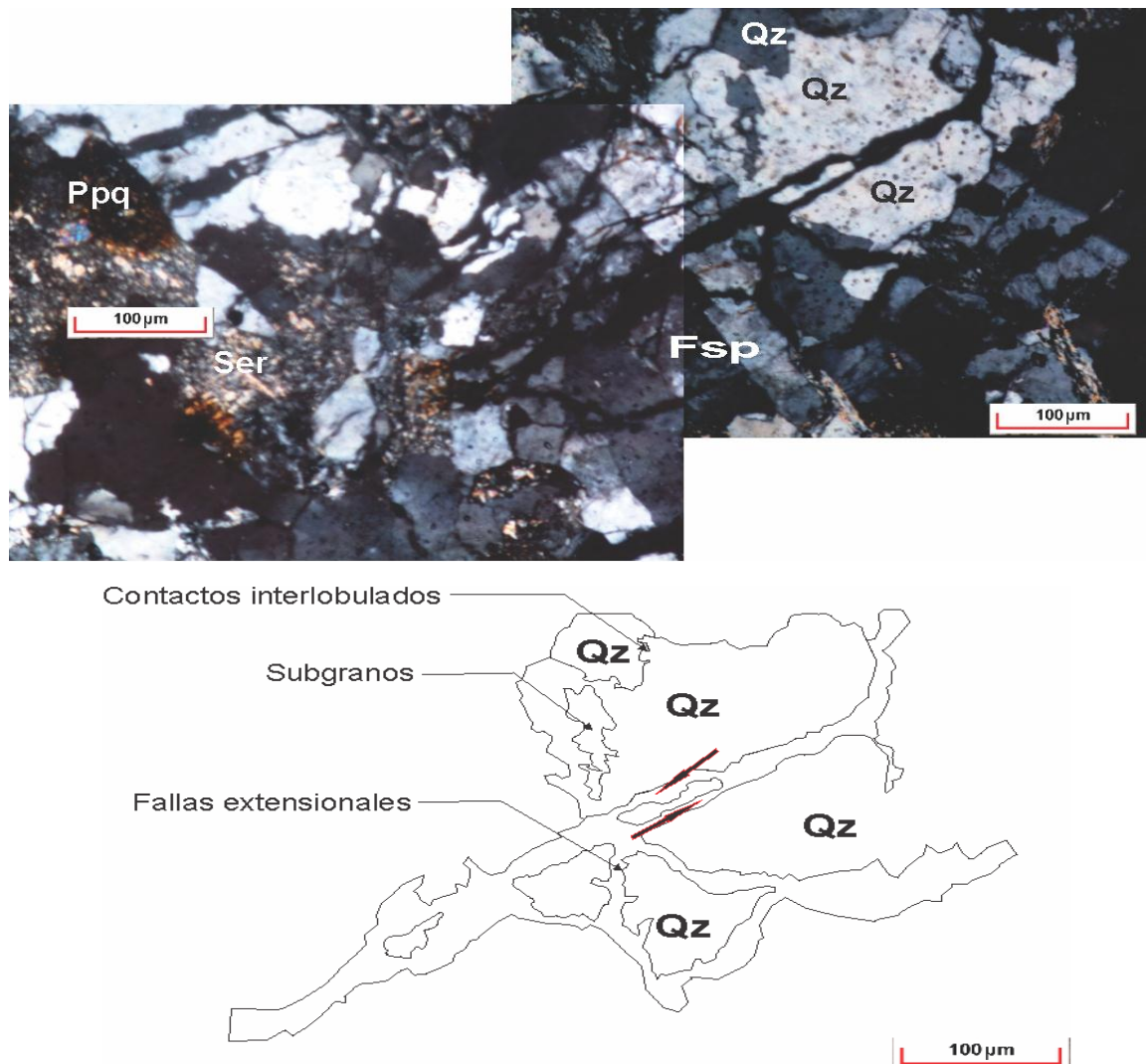
7.2.4.2 Microestructuras. Las evidencias de deformación frágil están representadas por microfracturamientos intergranulares, intragranulares y transgranulares (Blenkinsop, 2000). Algunas de ellas rellenas por material constituyente de la matriz (sericita y/o cuarzo microcristalino); varias de las microfracturas presentan pequeños desplazamientos que ocasionan la fragmentación de cristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa.

Las microfracturas transgranulares son el resultado de defectos de la red cristalina que pueden migrar ayudados por las microfallas (Blenkinsop, 2000); se encuentra en cristales cuarzo, y en menor proporción en feldespatos y plagioclasa (Figura 26); es común encontrar estas microfracturas como puntos de debilidad por donde se generaran las microfracturas transgranulares. Las fracturas intergranulares son identificadas como fracturas secundarias que limitan cristales de cuarzo - plagioclasa y cuarzo – feldespato. Las microfracturas intragranulares (Figura 27) aparecen en cristales de feldespato, en donde obedecen a mecanismo de deformación Intracristalina (dislocaciones), de acuerdo al planteamiento de Blenkinsop, (2000).

Para Passcheir & Trouw, (2005); las fracturas intergranulares se generan a baja

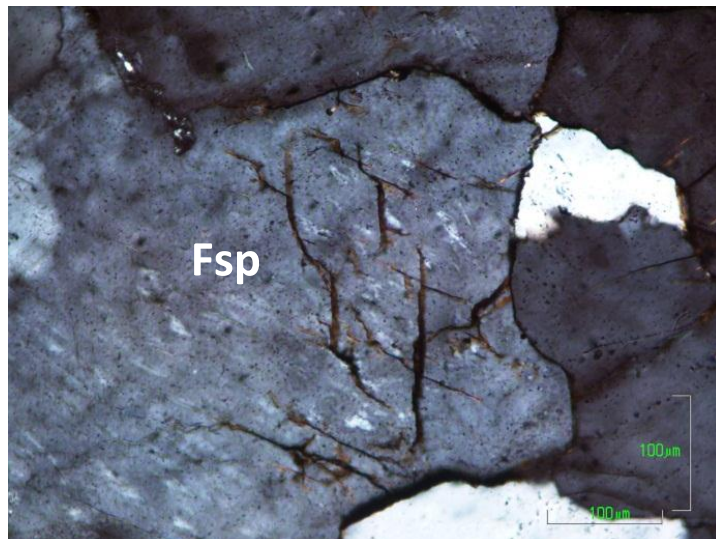
temperatura y/o regímenes de strain altos, debido a la concentración de esfuerzos alrededor de los bordes de los contactos entre granos (Barker, 1998), y son responsables de la reducción del tamaño de grano por cataclasis (Figura 26 y 28A), generadas por extensión y/o cizalla.

**Figura 26.** Se muestra el microfracturamiento transgranular, e intergranular en cristales de cuarzo (Qz) y feldespato (Fsp) y un dibujo esquemático donde se muestran las relaciones de los diferentes mecanismos de deformación predominantes en la sección. Luz polarizada, aumento 5x.

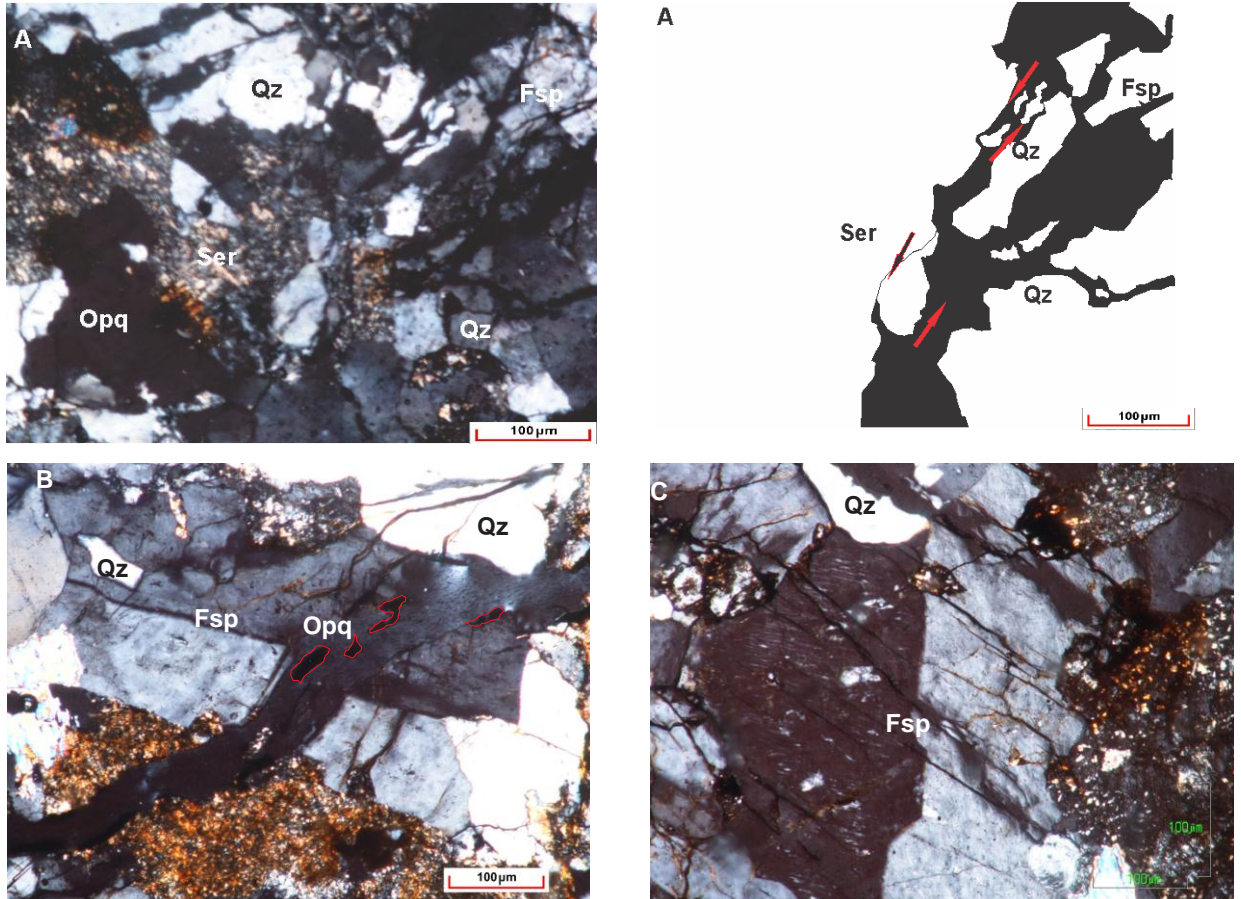


En la microfotografía anterior se observan contactos interlobulados (asociado posiblemente a recristalización por abultamiento), entre cristales de cuarzo, microfallas extensionales y porfidoclastos de cuarzo que indican sentido del movimiento. De acuerdo a las observaciones microscópicas se puede inferir que el microfracturamiento corresponde a uno de los últimos eventos registrados en la roca.

**Figura 27.** Microfracturamiento intragranular en feldespato (Fsp); luz polarizada, aumento 5X.

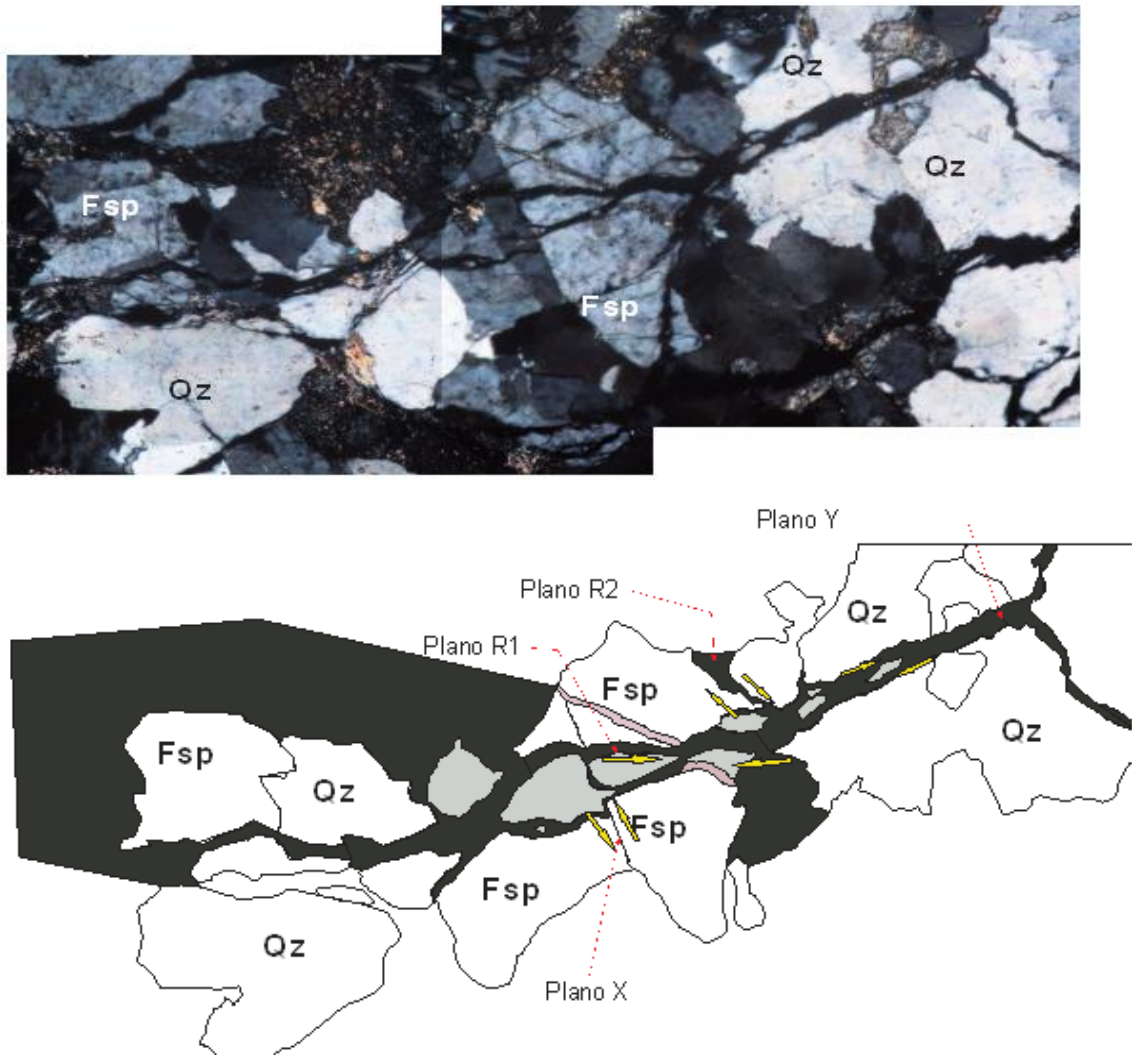


**Figura 28.** A. Fragmentos de cristales de cuarzo (Qz), con bordes angulosos y generación de porfidoclastos B. Venillas en las que se observan minerales opacos. C. Macla mecánica en un cristal de feldespato (Fsp).



Relacionado a las microfracturas se encuentran los indicadores cinemáticos tipo *Riedel* útiles para identificar y describir el sentido de cizalla; las cuales están conformadas por una serie de estructuras distribuidas con una orientación acorde, que permite subdividirlas en: R1, R2, P, X y Y, (Figura 29).

**Figura 29.** Estructuras tipo Riedel; luz polarizada, aumento 5x.



En estas zonas se observan reducción del tamaño de grano por cataclasis. Las flechas amarillas indican la dirección del posible movimiento. La primera imagen corresponde a las microfotografías y la segunda a un dibujo esquemático que permite observar la distribución de las fracturas.

Por otra parte las microfallas (Figura 23) se evidencian por venillas que han sufrido desplazamiento; dentro de estas venillas se observan fragmentos de cristales angulosos (Figura 28A) y minerales opacos orientados (Figura 28C); que junto con

las venas extensionales (Figura 26); indican las direcciones preferenciales del esfuerzo. Las maclas mecánicas que se han generado en feldespatos (Figura 28C), junto con extinciones ondulantes en cuarzo y plagioclasa indican mecanismos de deformación menos agresivos que la cataclasis.

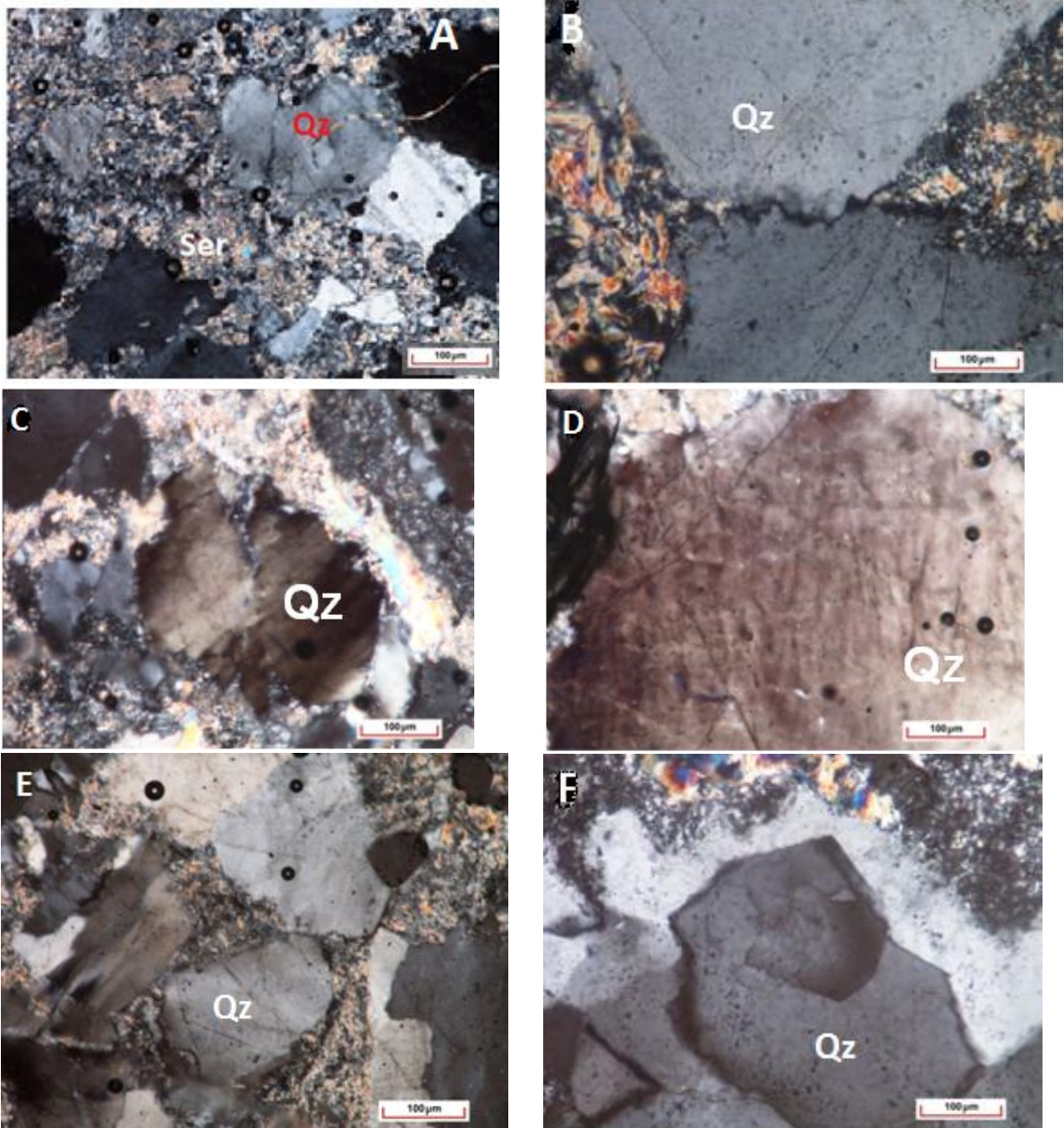
### **7.2.5 Monzogranito (Rocas Ígneas del Triásico – Jurásico)**

La unidad litoestratigráfica monzogranito es de color grisáceo, de grano medio a grueso, subporfirítico, compuesta por plagioclasa, cuarzo y moscovita. Esta unidad presenta evidencias de deformación frágiles, asociadas al sistema de fallas del sector.

7.2.5.1. Características estructurales y mecanismos de deformación. La sección presenta una composición general constituida por cuarzo, plagioclasa, feldespato, moscovita, hematita y minerales opacos en una matriz de sericitica y cuarzo microcristalino (Figura 30A); la textura predominante es aliotromórfica, con tamaños de cristales porfiríticos de plagioclasas y cuarzo, con formas subhedrales y anhedrales.

El cuarzo presenta varias fases. El primero tiene un color blanco grisáceo, inequigranular, anhedral, en contacto lobulado con plagioclasa y moscovita (Figura 30B). Evidencia mecanismos de deformación intracristalina relacionados con extinción ondulante (Figura 30C), lamenas de deformación (Figura 30D), microfracturamiento intragranular, transgranular e intergranular, desarrollo de subgranos (Figura 30E), y recristalización por migración de borde de grano (Figura 30F).

**Figura 30.** A. Matriz de cuarzo microcristalino y Sericita (Ser) B. Contacto entre cristales de cuarzo (Qz) lobulados. C. Cristal de cuarzo en el que se observa extinción ondulante de barrido. D. Cristal de cuarzo con lamenas de deformación. E. Generación de subgranos orientados en cristal de cuarzo. F. Evidencias de recristalización por migración de borde de grano en un cristal de cuarzo. Microfotografías tomadas con luz polarizada y un aumento de 10x.

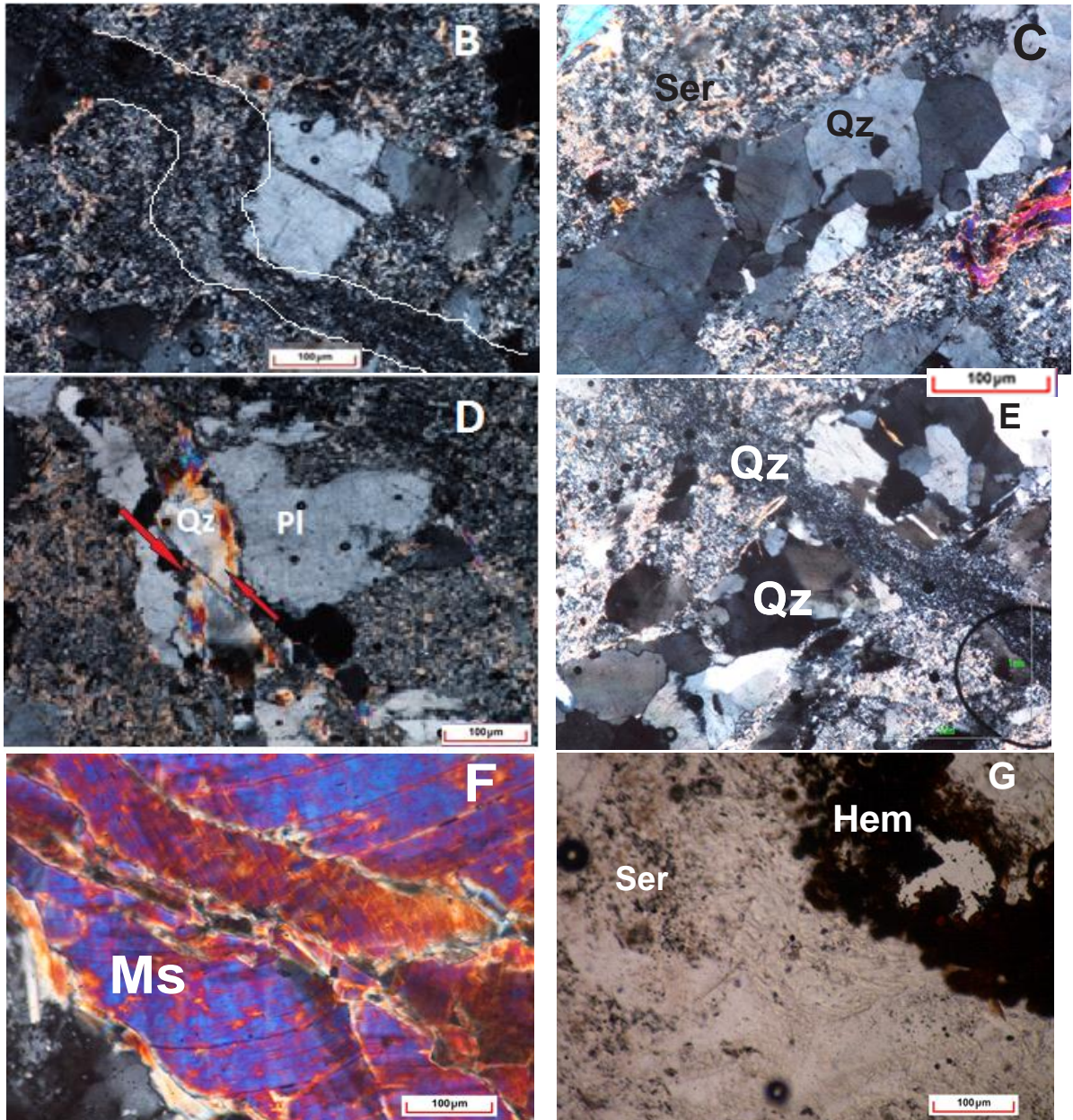


El segundo tipo de cuarzo presenta una forma euhedral, hexagonal y esta depositado en venillas donde se puede apreciar procesos de poligonización (Figura 31A), sin evidencias de deformación. El tercer tipo de cuarzo aparece como agregados microcristalinos depositados en venillas que cortan la sección en dirección NW-SE (Figura 31B). Atravesando al segundo tipo de cuarzo (Figura 31C).

La plagioclasa se presenta como cristales anhedrales a subhedrales, la mayoría de ellos solo exhiben sus moldes pues presentan alteración a sericita y otras tienen sus bordes corroídos (Figura 31D). Y el feldespato tiene formas subhedrales a anhedrales, dispuestos aleatoriamente a lo largo de la sección, se encuentra fracturado y en algunos sectores recristalizando junto al cuarzo. Mientras que la moscovita se encuentra dispuesta en concentración muy baja; se caracteriza por presentar su exfoliación basal (Figura 31F), e incolora en paralelo. Algunos cristales presentan procesos de deformación relacionados con flexión de la red cristalina (bandas *kink*).

La hematita se dispone en agregados de color rojo parduzco, introducido en la roca a través de fracturas (Figura 31E). Los minerales opacos se distribuyen de manera aleatoria en la sección con formas subhedrales a euhedrales asociados a las sericita producto de alteración hidrotermal.

**Figura 31.** A. Vena de cuarzo microcristalino cortando la sección y feldespato con fracturas transgranulares; luz polarizada, aumento 10x. B. Venilla de cuarzo (Qz) de habito hexagonal; luz polarizada, aumento 20x. C. Plagioclasa (Pl) con borde irregular; aumento 5x. D. Venillas de cuarzo 2 y 3 cortándose; aumento de lente de 10x. E. Cristal de moscovita (Ms), con evidencias de doblamiento. F. Agregados de hematita (Hem) de color rojo parduzco, aumento 10x.

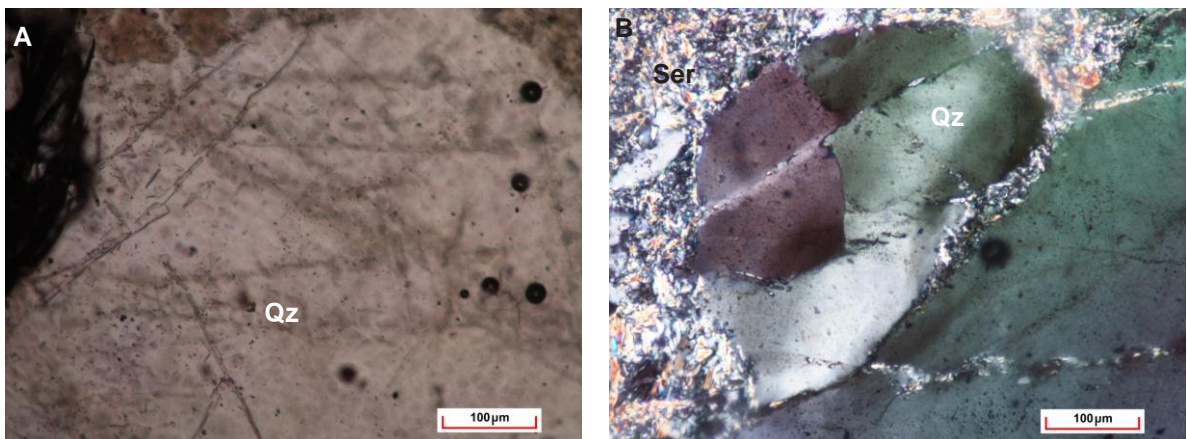


7.2.5.2 Microestructuras. Los mecanismos de deformación han generado algunas microestructuras que permiten identificar las condiciones de deformación. Para Passcheir & Trouw, (2005) y Vernon, (2004), se generan como respuesta a los diferentes cambios de las condiciones iniciales en las rocas.

Los mecanismos frágiles se manifiestan mediante microfracturas intragranulares y transgranulares (Blenkinsop, 2000), en las que algunas evidencian pequeños desplazamientos (cizalla) y otras rellenas por el material de la matriz o por cuarzo microcristalino (tensión).

Las microfracturas intragranulares se identificaron en minerales de cuarzo (Figura 32A) y en algunas plagioclasas, generadas por mecanismos de deformación en la red cristalina (Dislocaciones). Las microfracturas transgranulares se observaron en cristales de cuarzo donde algunas revelan microfallamiento (**Figura 32B**), probablemente generado por esfuerzos de cizalla.

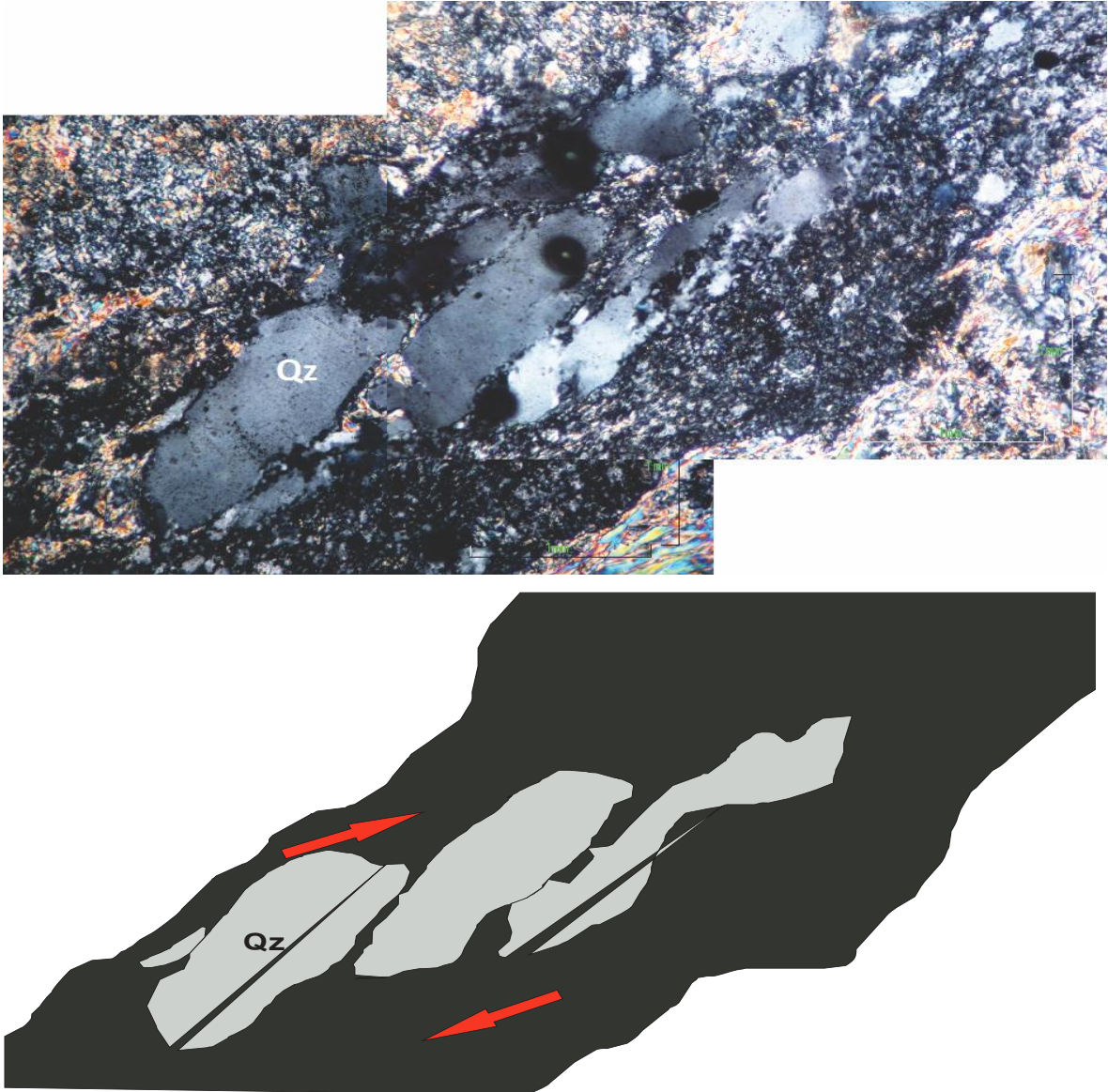
**Figura 32.** A. Cristal de cuarzo (Qz) en el que se observan fracturas intragranulares; algunas con inclusiones fluidas. B. Se aprecian cristales de cuarzo fracturados evidenciando microfallamiento. El aumento de la lente para las dos microfotografías es de 10x.



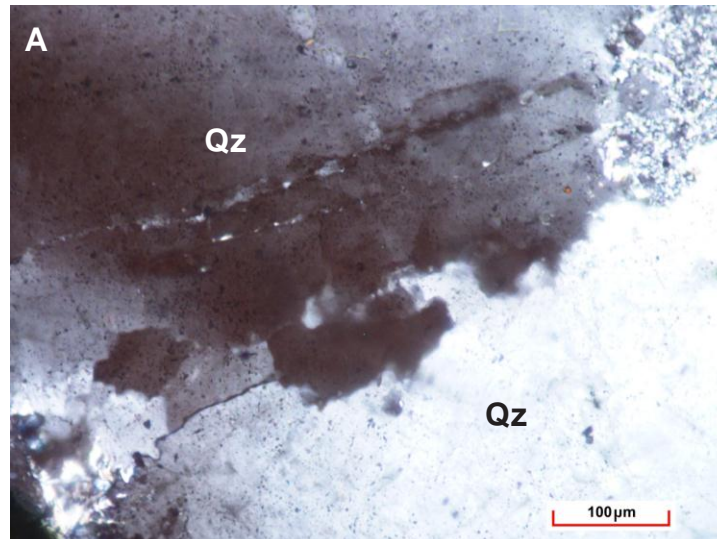
Por otra parte, existen ciertas microestructuras que permiten identificar el sentido de la cizalla que para la sección en estudio se determinaron como: libros rotados

de cuarzo (Figura 33), bandas de deformación en cristales de cuarzo (Figura 34) y fracturas extensionales en las que se observan fragmentos angulosos de cuarzo y feldespatos relacionados con cataclasis.

**Figura 33.** Libros rotados en cristales de Cuarzo (Qz), aumento 10x



**Figura 34.** Bandas de deformación en cristal de Cuarzo, aumento 10x



### **7.3 SECCIONES DELGADAS DEL SECTOR DE LA FALLA LA PEREZOSA**

A continuación se describe petrográficamente y se identifican los principales procesos y mecanismos de deformación que dieron origen a las microestructuras que se utilizaron para determinar el tensor de paleoesfuerzos asociado a la falla La Perezosa. Las secciones orientadas (Passcheir & Trouw. 2005), se realizaron sobre muestras colectadas en el sector del túnel de La Perezosa; en el **Anexo 5** se presenta el mapa de la distribución espacial de cada una de las muestras y a continuación se describen en el mismo orden de numeración.

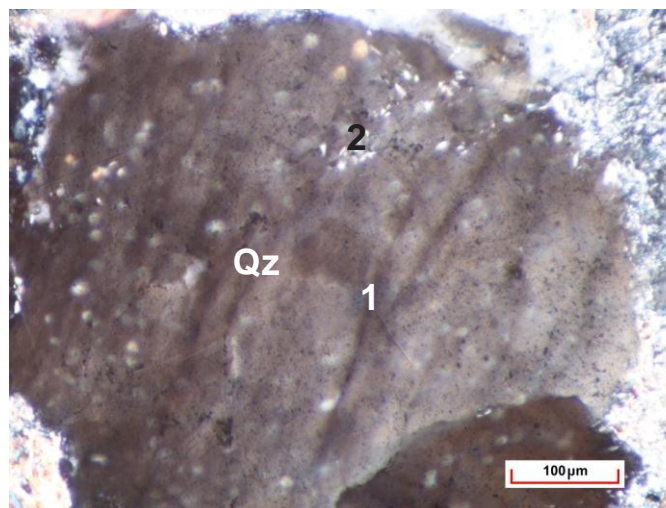
#### **7.3.1 Leucogranito - Sienogranito (Gneis de Bucaramanga)**

Presenta un textura hipidiomorfica, holocristalina e inequigranular, tamaño de grano medio a grueso con formas anhedrales, y subhedrales; composicionalmente la muestra posee cuarzo, feldespato, plagioclasa, moscovita, venillas de óxidos y minerales opacos diseminados en la sección. Los minerales secundarios como la sericita y la caolinita, son producto de alteración de los feldespatos.

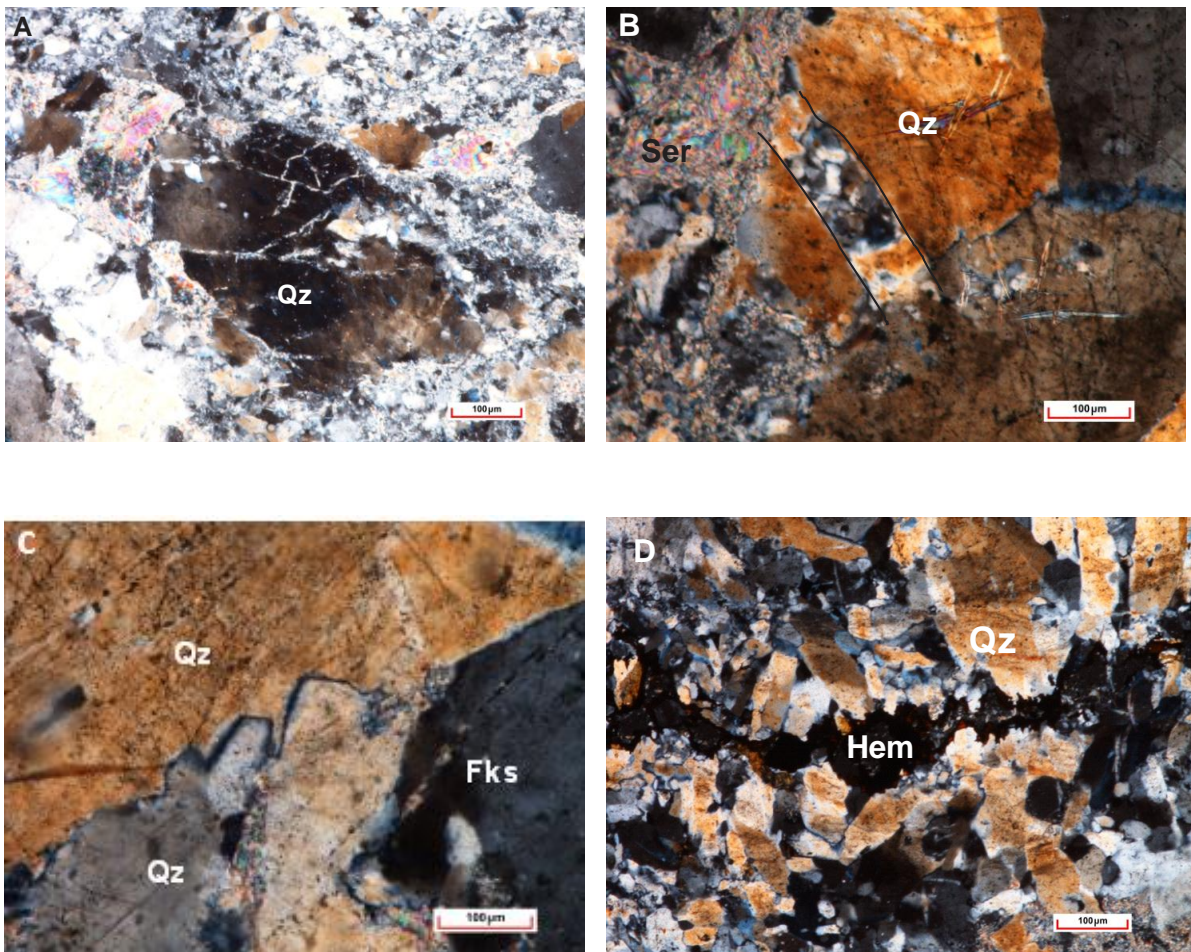
7.3.1.1 Características estructurales y Mecanismos de Deformación. Las evidencias de deformación a escala de grano para esta litología son asociadas a un régimen frágil, frágil-dúctil; las microfracturas son la principal microestructura, a estas se encuentran asociadas sectores donde se aprecia reducción del tamaño de grano. A continuación se describe la petrografía, los procesos y mecanismos de deformación identificados en cada mineral.

Se observan dos tipos de cuarzo; el primero presenta colores de interferencia de primer orden, con tamaño de grano medio a grueso y bordes interlobulados e irregulares con los feldespatos. Las evidencias de deformación están representadas por lamelas de deformación (Figura 35), extinción ondulante (Figura 36A), y microfracturamientos transgranulares sobre-impuestos.

**Figura 35.** Cristal de cuarzo (Qz), en el que se observa lamenas de deformación (1) y fracturas intragranulares (2) en el borde; en las que se presenta inclusiones. Luz polarizada, aumento 20x.



**Figura 36.** A. Microfracturamiento transgranular sobreimpuesto a la extinción ondulante de un cristal de cuarzo (Qz). Luz polarizada, aumento 10x. B. recristalización por rotación de subgranos en cuarzo (Qz), este proceso se desarrolla solo en un sector del cristal de cuarzo generado por bandas de deformación. Luz polarizada, aumento 10x C. Abultamiento (bulging), entre cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada, aumento 10x. D. Vena de cuarzo (Qz) y oxido de hematites (Hem), que ha tenido un crecimiento sintaxial. Luz polarizada y aumento de lente de 5x

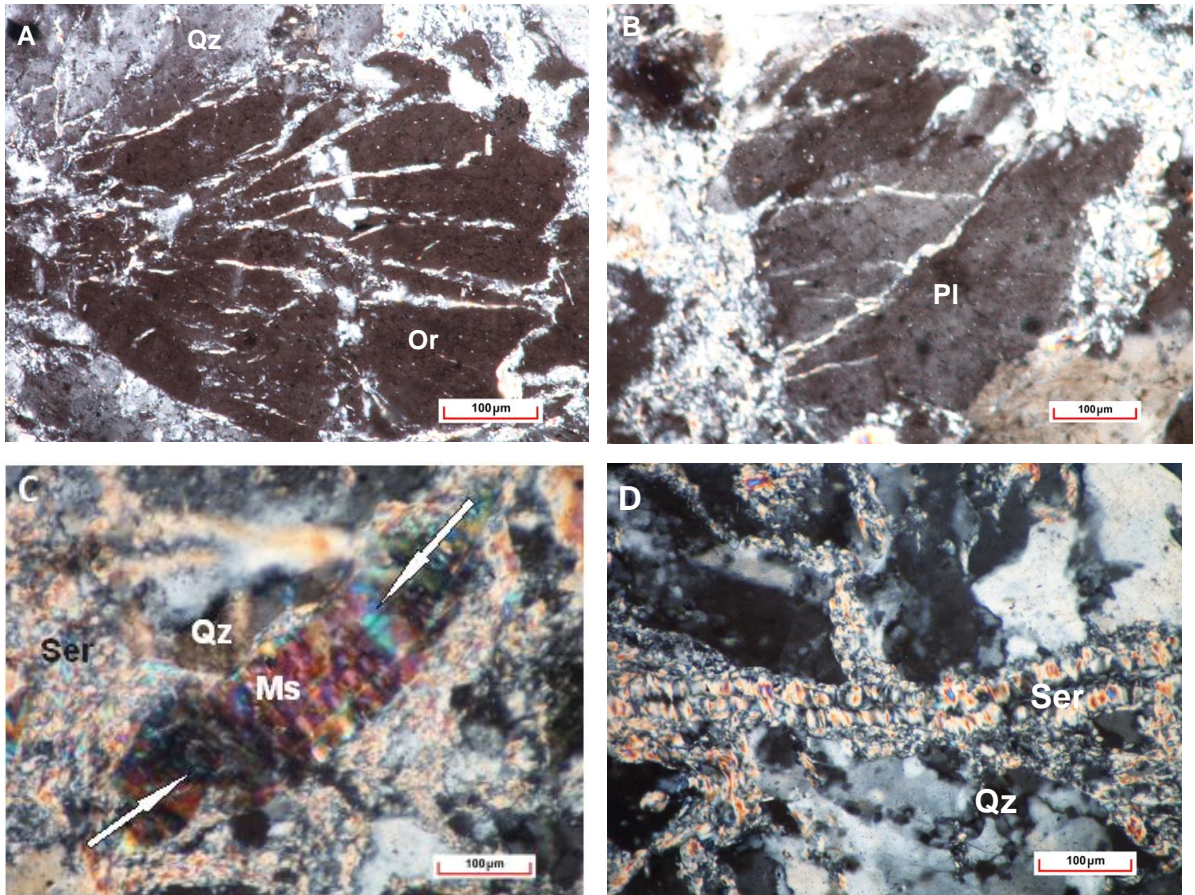


Por otra parte se observarán zonas de recristalización parciales, distinguidas por la distribución no homogénea de tamaños de grano; esta recristalización se generó por rotación de subgranos (Figura 36B) y migración del límite de grano; lo cual genera “*pinning*” y “*window*” (Figura 36C); se puede sugerir que estos dos

mecanismos han actuado de manera conjunta.

El segundo tipo de cuarzo se encuentra en venas tipo sintaxial (Figura 36D) asociado a óxidos, se caracteriza por sus formas ehedrales, hábito hexagonal y la falta de evidencias de deformación. El feldespato (ortoclasa), se encuentra fracturado y asociado al cuarzo, tiene un tamaño de grano es medio a fino, es inequigranular, de forma subhedral y anhedral. Los mecanismos de deformación se relacionan con microestructuras de fracturamiento (cataclasis) y extinción ondulante (Figura 37A). La plagioclasa (oligoclasa) presenta colores de interferencia de primer orden, tiene formas subhedral y anhedral y tamaños de grano medio a grueso; algunos ejemplares presentan macla polisintética, se encuentra en contacto con cuarzo y en algunos sectores a feldespato. Las características de deformación identificadas son los microfracturamientos (Figura 37B). La distribución de la moscovita a, en la sección es aleatoria y generalmente está en contacto con cuarzo o rodeada por sericita; los tamaños de grano son variables; el mecanismo de deformación (doblado de la red cristalina), determina la aparición de bandas *Kink* y extinciones de barrido (Figura 37C). Los óxidos se presentan en agregados granulares muy finos de color rojo intenso limitados a venas, posiblemente asociados a la segunda fase de cuarzo; mientras que los minerales opacos se distribuyen en toda la sección de manera discreta y en algunos sectores asociados a los óxidos.

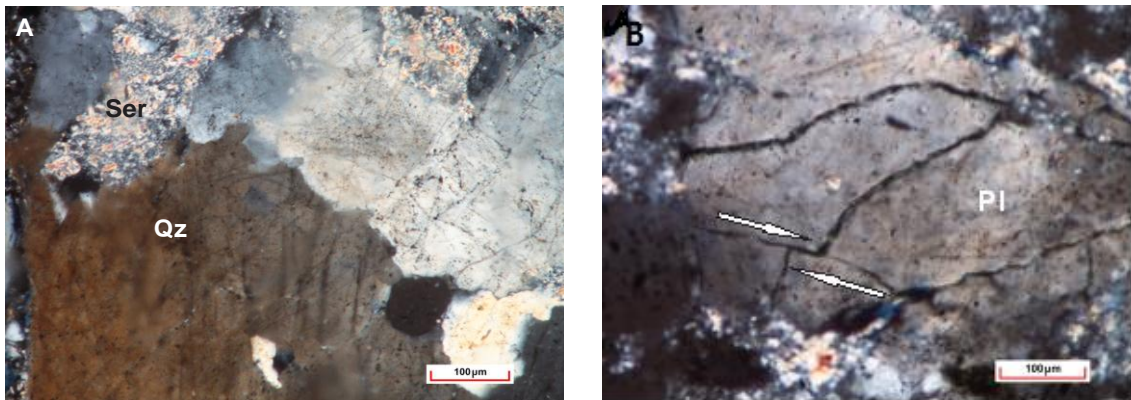
**Figura 37.** Feldespato tipo Ortoclasa (Or) el cual presentan microfracturamiento. B. Cristal de plagioclasa (PI) alterándose en los borde y con fracturamiento. C. Banda *Kink* en Moscovita. D. Sericita escamosa (Ser). Todas las microfotografías tienen un aumento de lente de 10x, a excepción de la foto B que su aumento es de 5x.

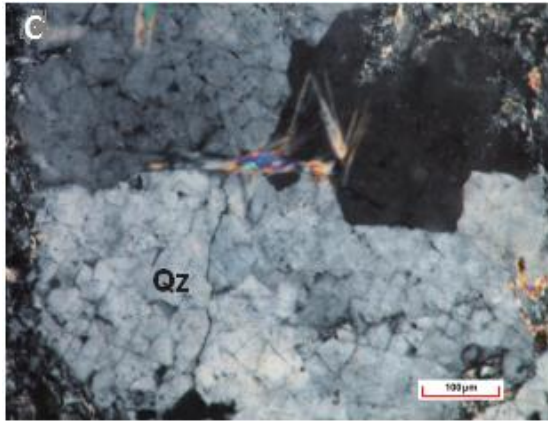


La sección presenta una matriz compuesta por sericita, de la cual se identificaron dos tipos: la primera de alteración de plagioclasa; es incolora en paralelos y con tonalidades amarillentas en cruzados, en agregados microcristalinos de tamaño de grano muy fino y hábito fibroso, la cual bordea algunos cristales de cuarzo y feldespato. La segunda se presenta incolora en paralelos y con tonalidades anómalas en luz polarizada, tamaño de grano fino y dispuesta en agregados cristalinos de hábito escamoso (Figura 37D).

7.3.1.2 Microestructuras. Las microestructuras observadas permitieron determinar las variaciones de la deformación que para el caso de esta roca se relacionan con eventos de deformación frágil y frágil – dúctil, dispuestas heterogéneamente. Dentro de las microestructuras frágiles (Blenkinsop 2000), las fracturas intragranulares (Figura 38A), transgranulares (figura 38B), e intergranulares (Figura 38C), son los principales productos. Las fracturas intragranulares se encuentran en minerales de cuarzo y en menor proporción en feldespato; sobre estas fracturas se observaron precipitación de inclusiones fluidas; las microfrazuras transgranulares afectan a toda la sección, y a estas se encuentran asociadas las fallas extensionales. Mientras que las fracturas intergranulares se encuentran en cristales de cuarzo generadas por fluidos hidrotermales.

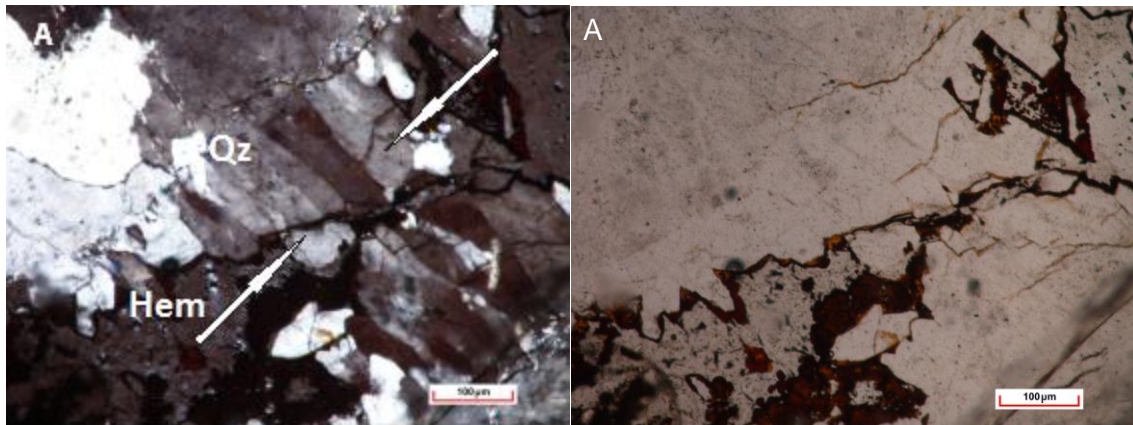
**Figura 38.** A. Microfracturamientos intragranulares en cristales de cuarzo (Qz). B. microfracturamiento transgranular en cristal de plagioclasa (Pl). C. microfracturamiento intergranular en cristales de cuarzo, asociado a presión por inyección de fluidos hidrotermales



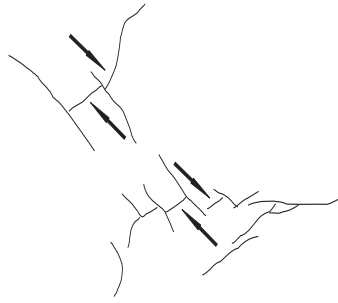


Las maclas mecánicas en cuarzo (Figura 39), originadas por el doblamiento de la red cristalina, es otro indicador de la acción de cizalla simple que ha existido en el sector. Adicionalmente se observaron texturas mortero en cristales de cuarzo, que sugieren recristalización bajo un régimen de esfuerzo dirigido (Figura 40).

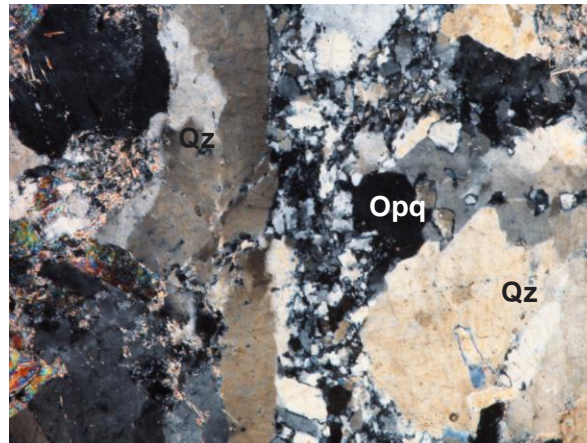
**Figura 39.** Se observan maclas mecánicas en cuarzo, y fracturamientos transgranulares en cristales de cuarzo (Qz). Se muestran las microfotografías en luz polarizada y plana, además de un dibujo esquemático donde se aprecia microflallamiento; el aumento de lente se encuentra a 5x.



A

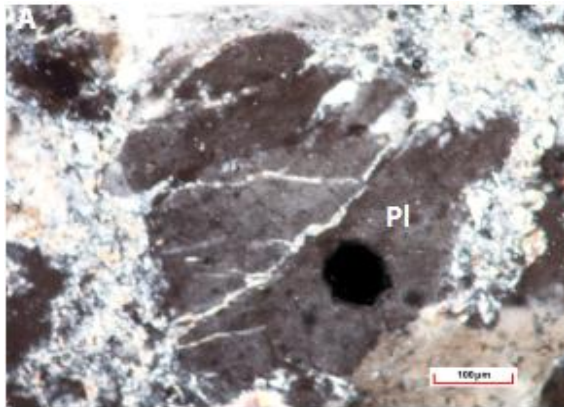


**Figura 40.** Texturas tipo mortero en cristales de cuarzo (Qz); luz polarizada, aumento de lente de 5x,

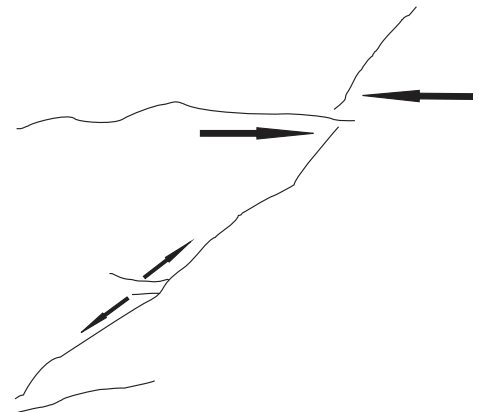


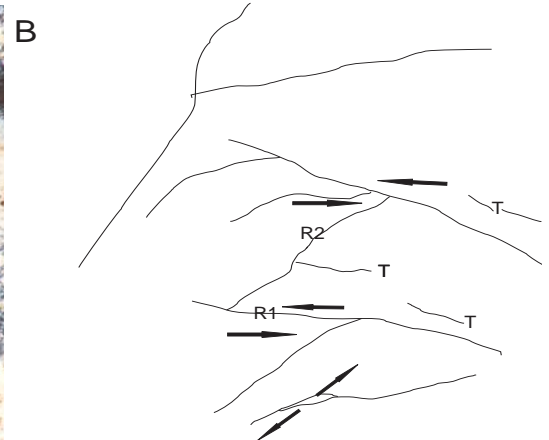
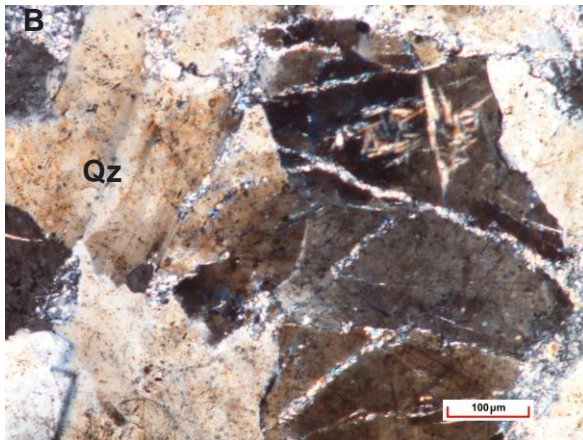
Los indicadores cinemáticos son: las estructuras tipo Riedel (Figura 41), y la microfallas (Figura 42A y 42B), utilizadas para determinar el sentido de la cizalla.

**Figura 41.** A. Fallas extensionales y microfallas en cristal de plagioclasa (Pl). B. estructuras tipo Riedel en las que se observan fracturas R1, R2 y T rellenas por material de la matriz. Aumento de lente de 10x, para las dos fotos.

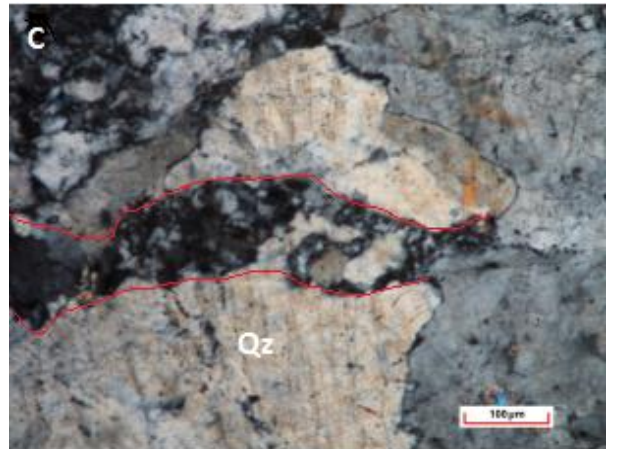
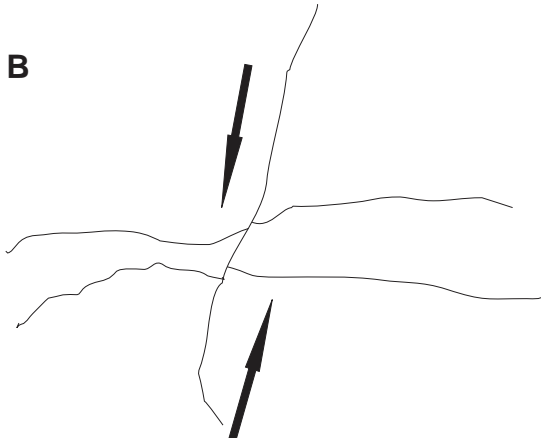
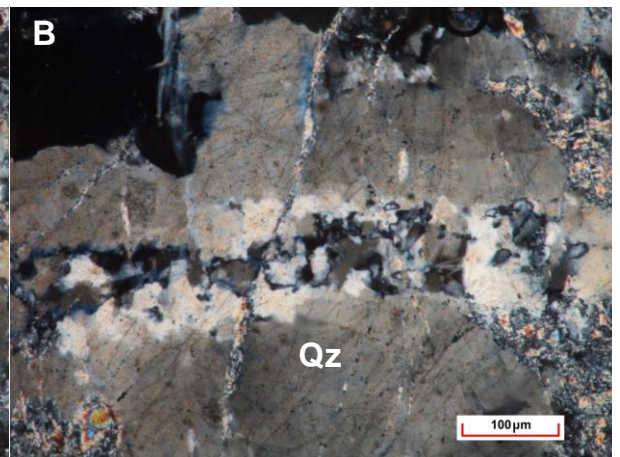
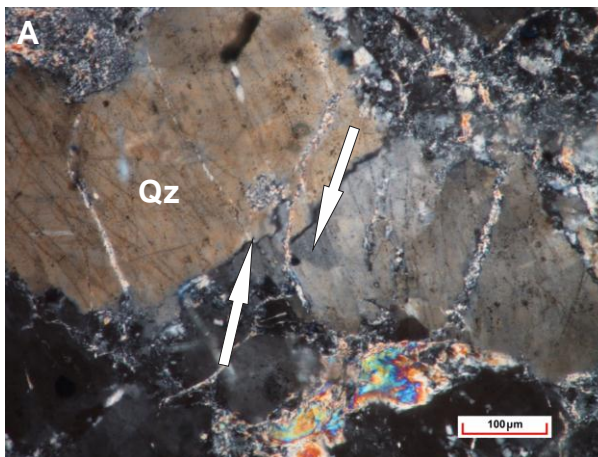


**A**





**Figura 42.** A. Microfallamiento en cristales de cuarzo (Qz). B. Banda de cizalla. C. Rompimiento del cristal acompañado de recristalización en cuarzo. Aumento de lentes a 10x, para las tres fotos.



Otro indicador cinemático son las bandas de cizalla, clasificadas como una

microestructura que se genera mediante la concentración de dislocaciones en algunos sectores específicos de los cristales; para el caso de esta sección se observó en cristales de cuarzo (Figura 42B). Para Passcheir & Trouw, (2005); este proceso ocurre como una etapa intermedia entre la extinción ondulante y la generación de borde de subgrano. Adicionalmente algunos cristales muestran desgarre y cristalización simultánea (Figura 42C).

### **7.3.2 Leucogranito – Monzogranito (Gneis De Bucaramanga)**

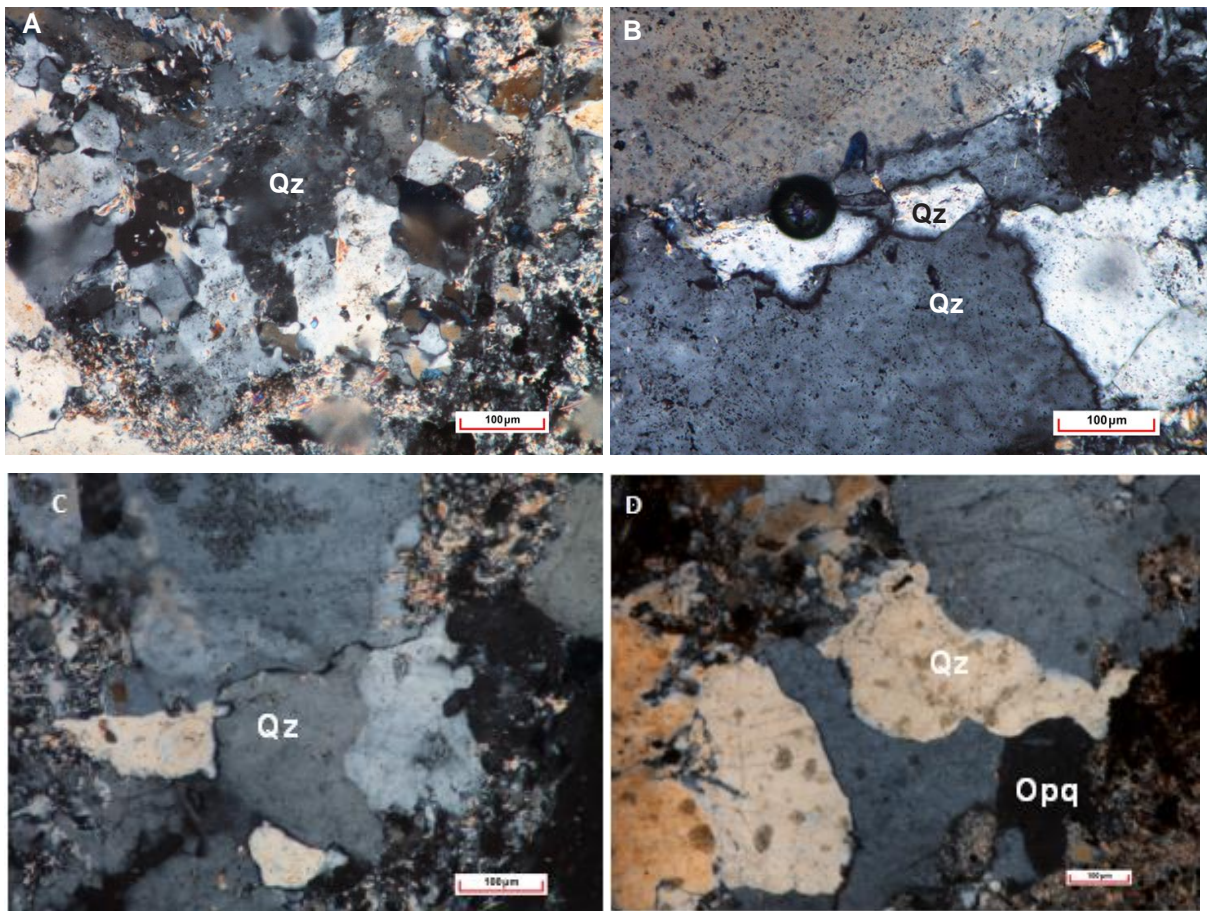
Corresponde a una roca holocristalina, inequigranular, e hipidiomorfa, con cristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y moscovita, rodeados por una matriz de agregados de sericita y clorita. Y. minerales opacos precipitados en fracturas y diseminados aleatoriamente en la sección; el tamaño de grano es variable y con formas subhedrales y anhedrales.

7.3.2.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. De acuerdo a las características petrográficas y a las evidencias de deformación frágil, la sección se puede describir como una muestra afectada por cataclasis en la que se observan fragmentos angulosos de cuarzo mayormente y en menor proporción de feldespato, estos clastos varían de tamaño hasta 2.6 mm de diámetro; en algunas partes de la sección se encuentra recristalización (Figura 43A). A continuación se presentan las características petrográficas y los mecanismos de deformación para cada mineral.

Para el cuarzo se observan dos tipos. El primero son cristales subhedrales inequigranulares, de tamaños de grano grueso, en algunas partes rodeados de sericita, asemejando una textura porfiritica, deformados por fracturas de cizalla. Las evidencias de deformación están definidas por: presencia de granos nuevos (Figura 43B), extinción ondulosa, texturas parcialmente recristalizadas (Figura 43C), recristalización por rotación de los subgranos (Figura 46D), y recristalización por migración de límite de grano. El segundo tipo, se caracteriza por ser cristales

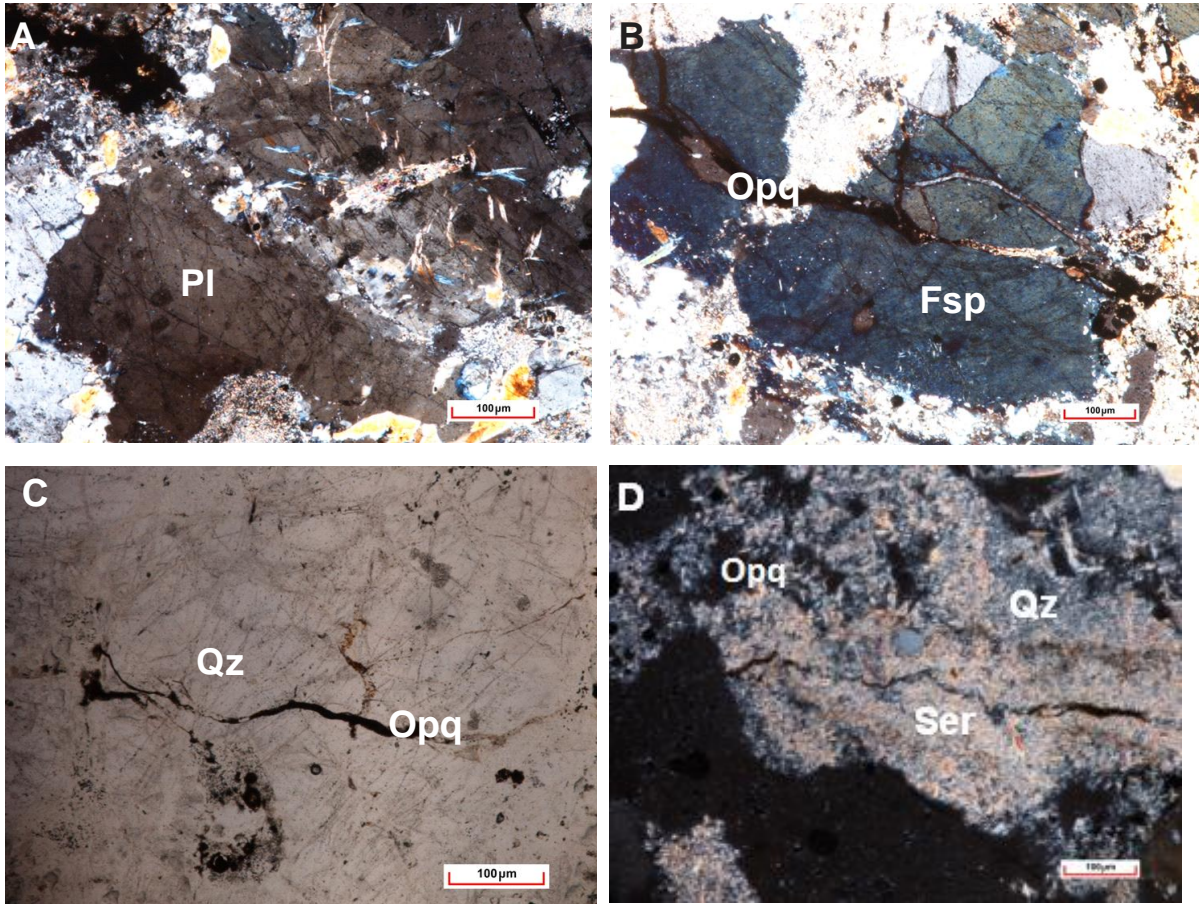
más pequeños microcristalinos, de tamaños de grano muy fino con formas anhedrales, y dispuesto en la matriz junto a la sericita.

**Figura 43.** A. Recristalización de cuarzo (Qz) en el que se envuelve parte de la matriz. B. Generación de nuevos granos de cuarzo por recristalización dinámica. C. Bordes irregulares entre cristales de cuarzo (Qz). D. Recristalización mediante el mecanismos de rotación de subgranos



La plagioclasa presenta colores de interferencia de primer orden, tamaño variable con forma subhedrales a anhedrales en contacto con cuarzo. Las evidencias del grado de deformación al que se ha sometido permiten observar con frecuencia microfracturamientos (Figura 44A), e irregularidad de sus bordes, producto de su alteración retrógrada.

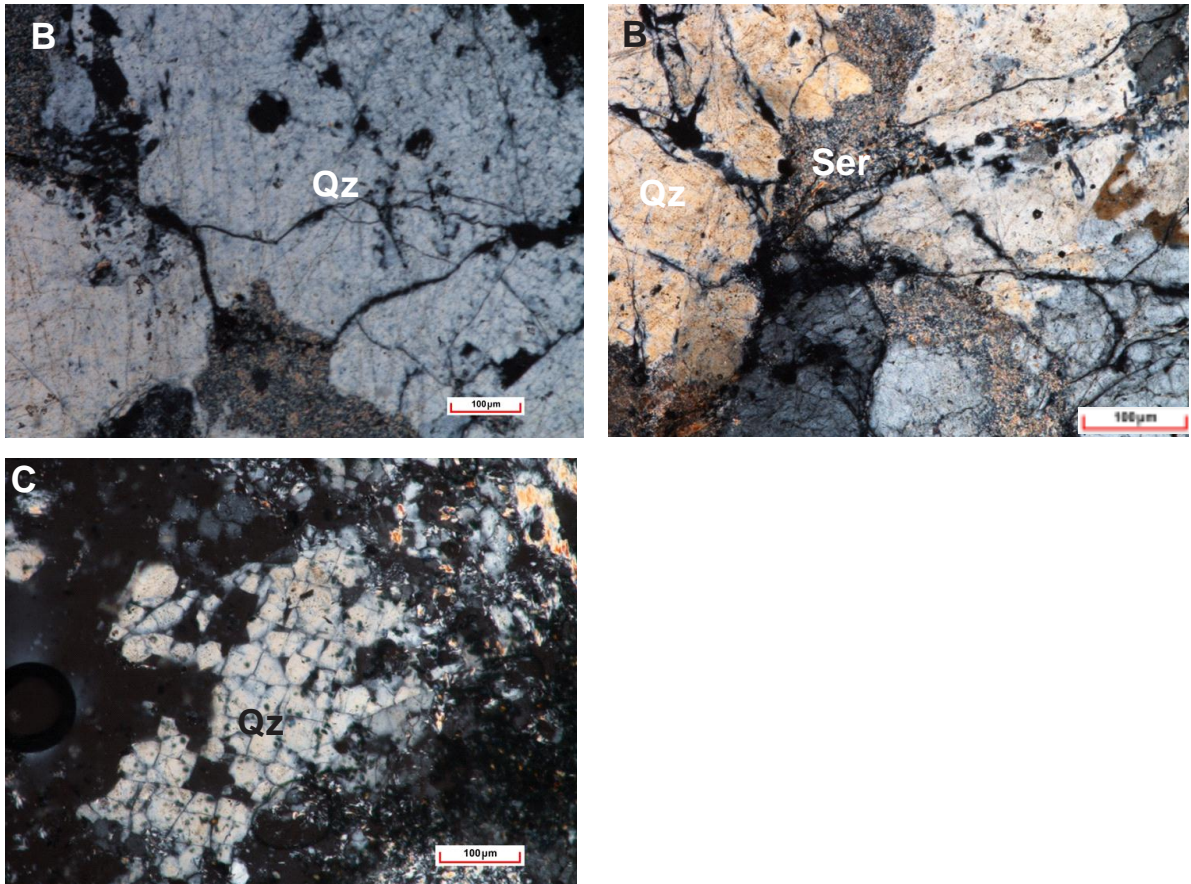
**Figura 44.** A. Cristal de plagioclasa (Pl) con microfracturamiento. B. Cristal de feldespato (Fsp) con fracturamiento transgranular en el que se han depositado minerales opacos. C. fracturas en cuarzo rellenas por minerales opacos. D. matriz de sericita (Ser), cuarzo (Qz) y minerales opacos (opq)



El feldespato (ortoclasa), se encuentra fracturado, alterado a caolinita y en contacto con el cuarzo, tiene un tamaño de grano medio a grueso y sus formas son subhaciales a anhaciales. Las características de deformación identificadas son los microfracturamientos (Figura 44B). Los minerales opacos son cristales amorfos, diseminados en la sección y relleno de fracturas (Figura 44C). La matriz está compuesta por sericita, la cual se dispone en agregados cristalinos de hábito escamoso (Figura 44D).

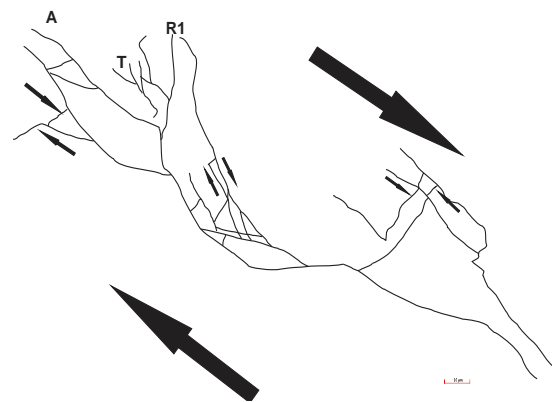
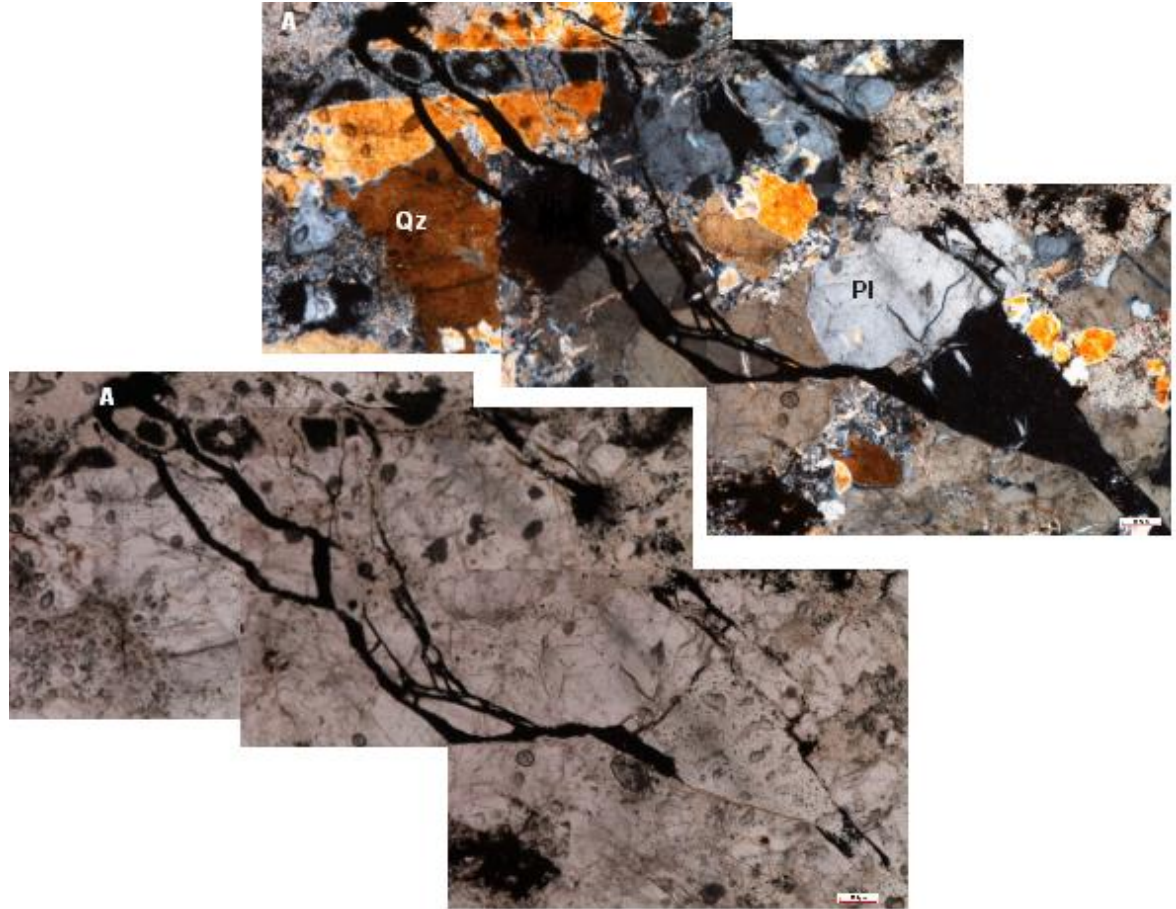
7.3.2.2 Microestructuras. Las microestructuras observadas se originaron bajo condiciones de deformación frágil; se identificaron microfracturamientos intragranular (Figura 45A), transgranular (Figura 45B) y circungranulares (Figura 45C), distribuidas en toda la sección. Las fracturas intragranulares se distaron en cristales de cuarzo y feldespato principalmente; las microfracturas transgranulares afectan al feldespato y el cuarzo generando reducción del tamaño de grano Y las circungranulares entre los límites del cuarzo y feldespato.

**Figura 45.** A. Cristal de cuarzo (Qz) con microfracturamientos intragranular. B. microfracturamiento transgranular que afecta cristales de cuarzo (Qz). C. Microfracturamiento circungranular en cuarzo (Qz).



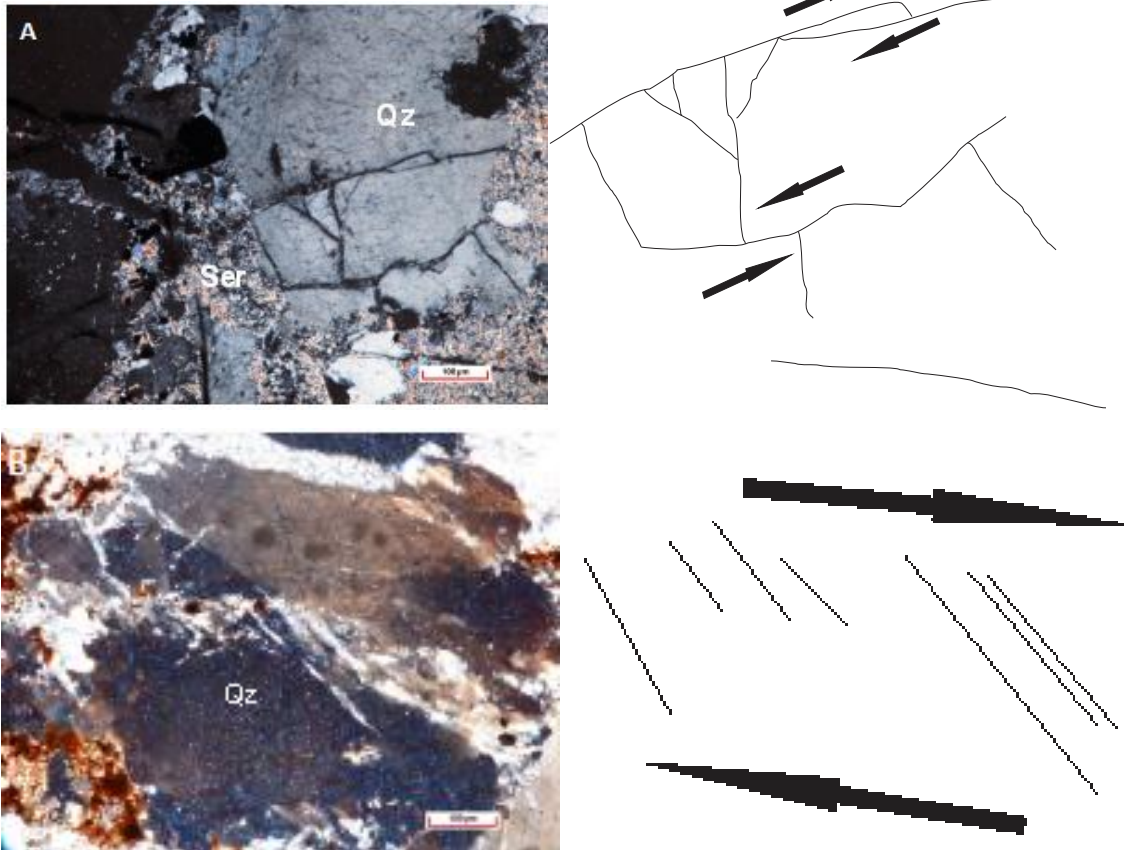
Por otra parte las microestructuras utilizadas para hallar el sentido de movimiento de la cizalla en la sección corresponden con estructuras tipo Riedel (Figura 46), “pull apart” (Figura 47A), y venas en échelos rellenas por sílice (Figura 447B).

**Figura 46.** Estructuras tipo *Riedel*; se observa como las fracturas transgranulares afectan varios tipos de cristales, además se puede ver porfidoclastos de cuarzo en la parte central de la foto



Luz polarizada, aumento 5x

**Figura 47.** A Se puede observar en el centro de la imagen una estructura del tipo pull apart. B. venas en échelos incipientes desarrolladas sobre un cristal de cuarzo. Nícoles cruzados y aumento de 5X en las dos microfotografías



### 7.3.3 Leucogranito- Monzogranito (Gneis De Bucaramanga)

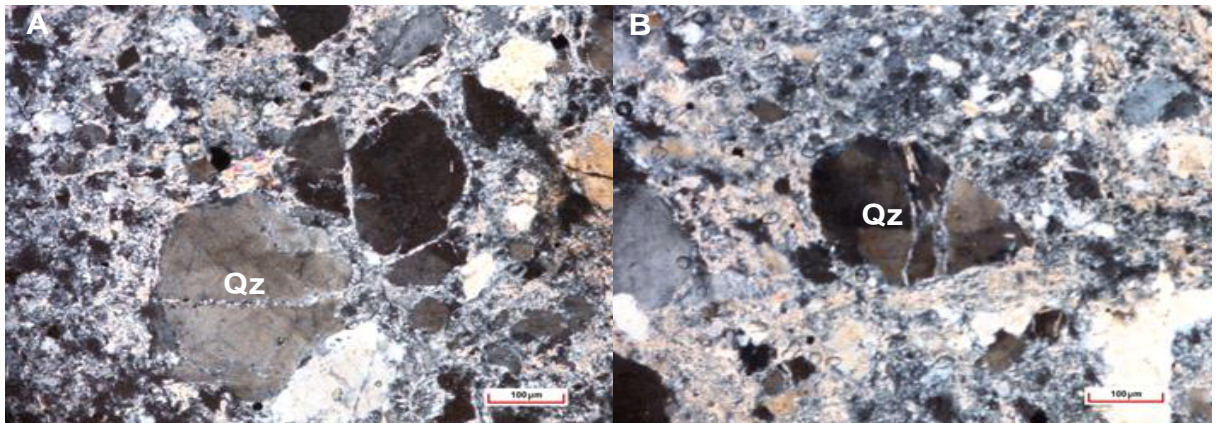
Esta roca presenta una textura holocristalina e inequigranular, los tamaños de grano en general van desde muy gruesos (microbrechas), hasta tamaños de grano fino y sus formas son subhedrales; composicionalmente tiene: cuarzo, feldespato, plagioclasa, sericita, moscovita y minerales opacos.

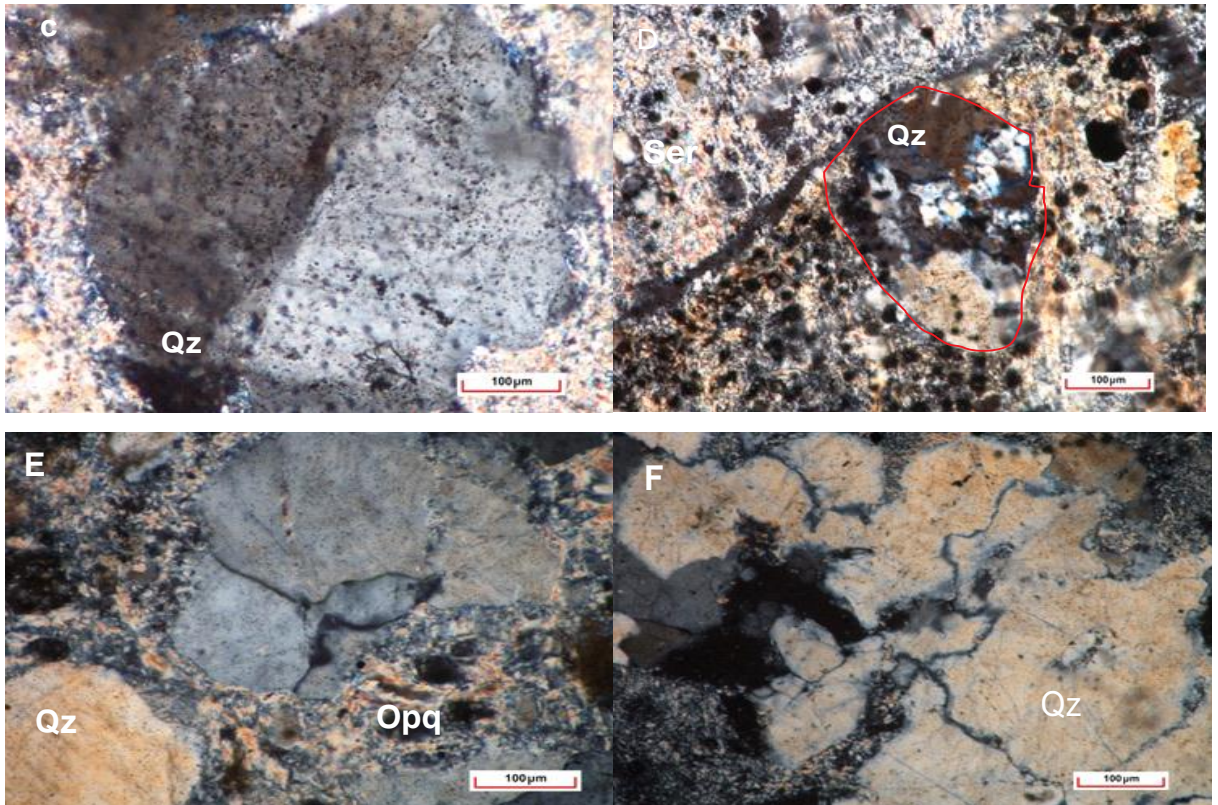
7.3.3.1 Características estructurales y mecanismos de deformación. Para el análisis de la deformación a nivel microscópico se analizaron los cristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa; se destaca que las evidencias de deformación a

escala de grano para esta litología son asociadas a un régimen frágil pues las fracturas son la principal microestructura, a estas se encuentran asociadas brechas en las que ha habido reducción del tamaño de grano por cataclasis. A continuación se describe la petrografía y los mecanismos de deformación identificados en cada mineral.

Se identificaron tres tipos de cuarzo; los primeros son cristales anhedrales e inequigranulares con tamaños de grano grueso. Las evidencias de deformación están representadas por: fracturamiento (Figura 48A), extinciones ondulantes (Figura 48B), doblamiento (Figura 48C) y recristalización por rotación de subgranos (Figuras 48D, 48E y 48F).

**Figura 48.** A y B. Fracturamiento intragranular acompañada de generación de extinción ondulante posterior. C. Doblamiento mecánico de un cristal de cuarzo en el que se puede observar la línea de fractura incipiente. D. Recristalización por rotación de subgranos localizada a un cristal de cuarzo. E y F. Recristalización por migración de límite de grano en cristales de cuarzo

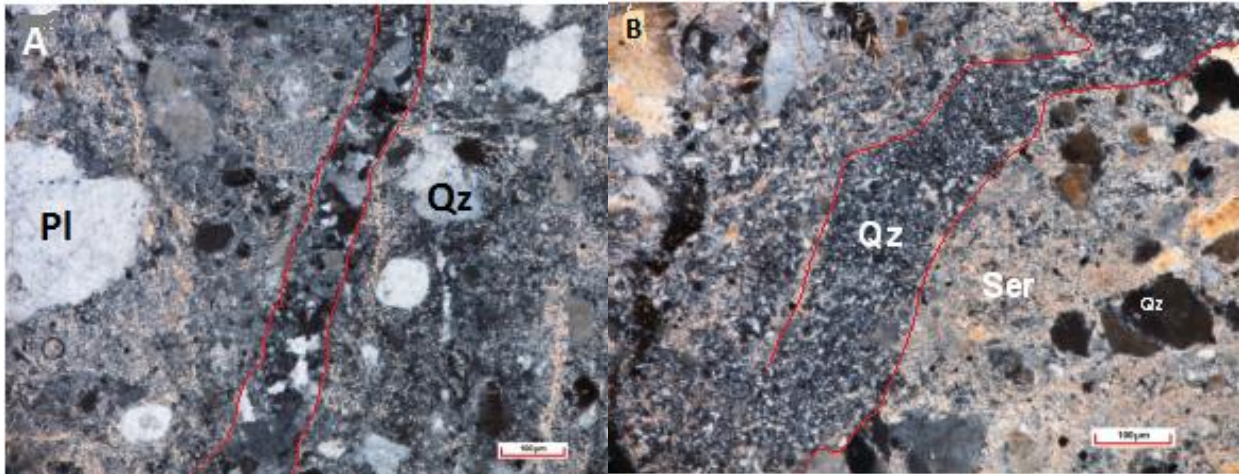




Aumento de 10X a 20x

El segundo tipo se encuentra en venas y se caracteriza por presentar formas casi hexagonales, está en contacto de manera difusa con los minerales opacos (Figura 49A), estas venas tienen sus límites bien definidos, mantienen una frecuencia de espesor y no presentan deformaciones aparentes; mientras que el tercer tipo se identificó en venas de reemplazamiento y es microcristalino (Figura 49B).

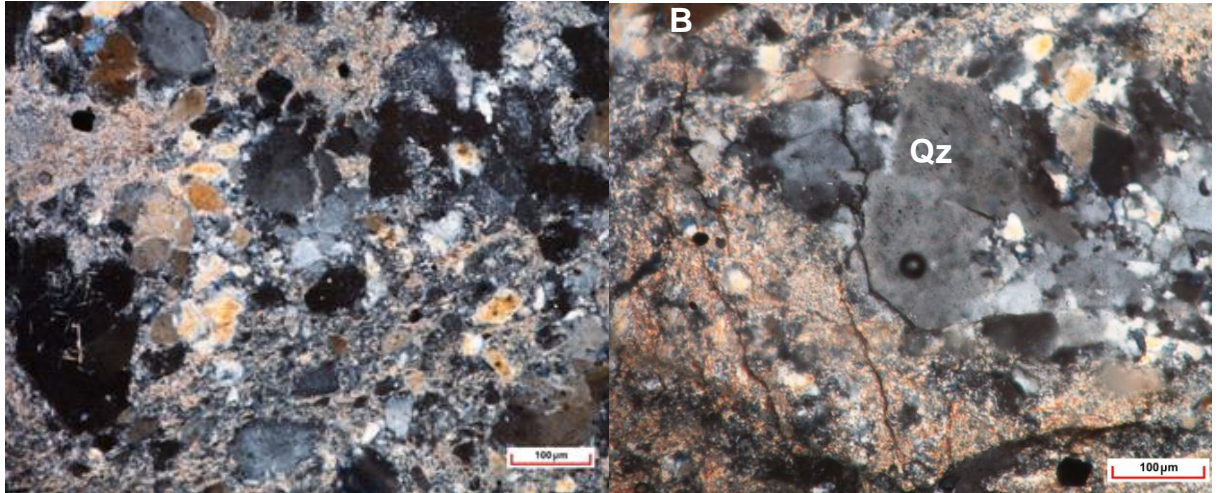
**Figura 49.** A. Vena de cuarzo (Qz). B. Vena de cuarzo (Qz) generada por reemplazamiento



Luz polarizada, aumento 5x

El feldespato tipo ortoclasa es incoloro en paralelos pero se observa manchado; sus colores de interferencia son de primer orden y tiene formas subhedrales a anhedrales. Las evidencias de deformación están relacionadas principalmente con fracturas que han generado reducción del tamaño de grano (cataclasis), y extinción ondulante (mecanismos de recuperación). Por otra parte la plagioclasa se caracteriza por mostrar colores interferencia grises amarillentos, con tamaño de grano medio y forma subhedral;. Los mecanismos de deformación sobre este cristal estan ausentes, sin embargo por interaccion hidrotermal se aprecian bordes de alteración (Figura 49A) dando una apariencia corroída. La moscovita tiene formas subhedrales-anhedrales, con bordes irregulares, tamaños de grano fino, exfoliación en una dirección, y extinción normal. Los minerales opacos tienen formas euhedrales a subhedrales, con tamaños de grano medio, dispersos a los largo de toda la muestra (Figura 50A). Y los óxidos tienen un relieve alto y tonalidades rojizas, se encuentran en la sección de forma dispersa y rellenando fracturas (Figura 50B). La matriz (Figura 50B) está compuesta por sericita, la cual tiene colores anómalos, dispuestos en agregados escamosos de tamaño muy fino.

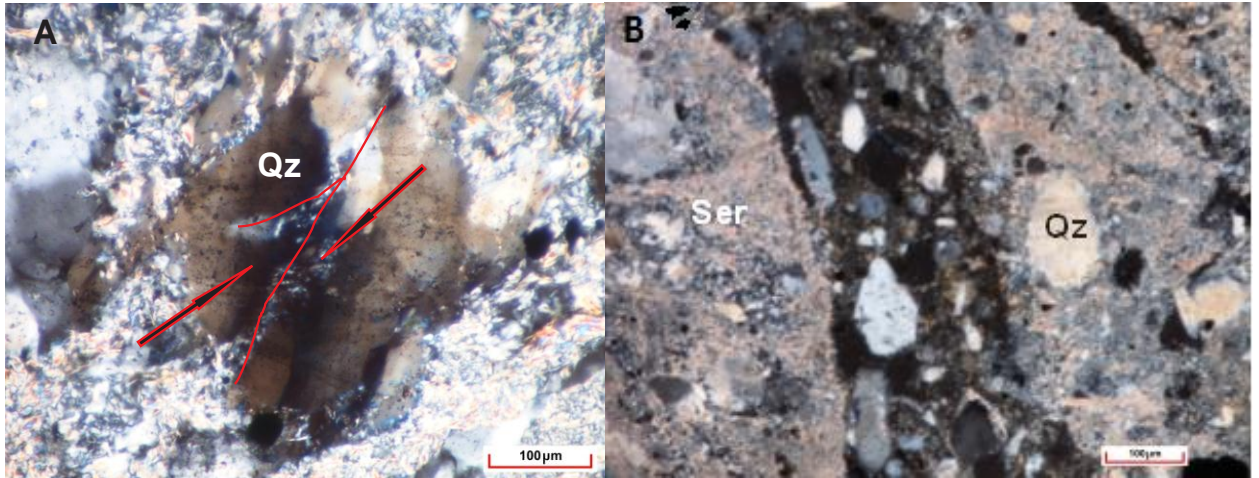
**Figura 50.** A. Minerales opacos (Opq) dispersos en la sección. B. Venillas de óxidos en una matriz de sericita y cuarzo con recristalización por rotación de subgranos



Luz polarizada, aumento 10x

7.3.3.2 Microestructuras. Para la sección se identificó microfracturamientos intragranulares y transgranulares (Figura 51A); los fracturamientos transgranulares afectan parte de la matriz en donde se encuentran rellenas por óxidos. Algunas microfracturas generaron deslizamiento de los grano y reducción del tamaño de grano por cataclasis (Figura 51B), lo que ha generado microbrehcas compuestas por fragmentos de cristales de cuarzo y feldespato, en una matriz arcillosa.

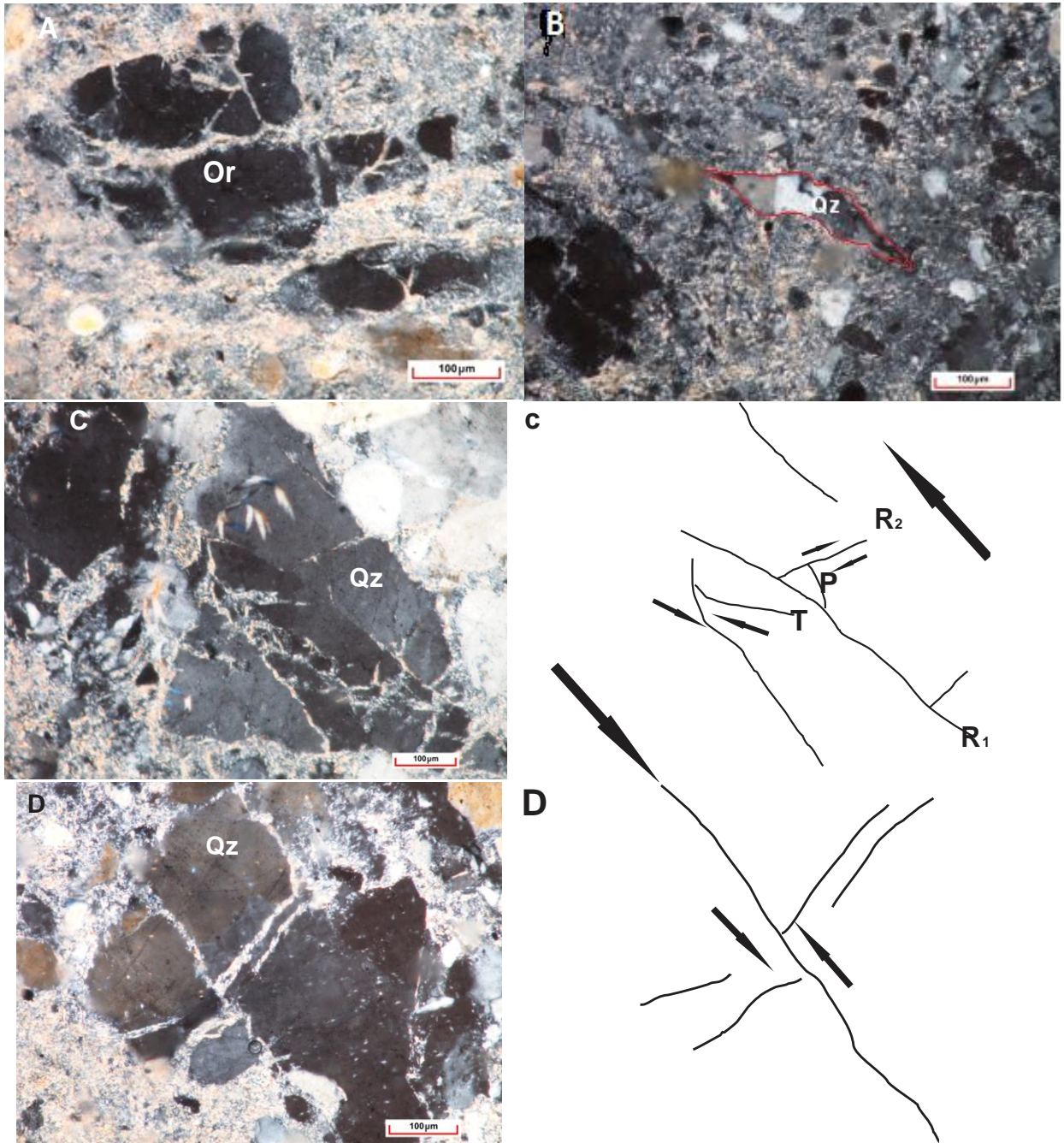
**Figura 51.** A. Microfracturamiento transgranular en cristal de cuarzo (Qz). B. Brecha en la que se observa fragmentos de cristales orientados y con una matriz de arcillas



Aumento 5x

Los microbudines en domino de algunos feldespato (Figura 52A), los objetos tipos sigma (Figura 52B), las estructuras tipo *Riedel* (Figura 52C), y los microfalloamiento (Figura 52D); permiten identificar el sentido de cizalla en la sección.

**Figura 52.** A. Microbudines en feldespatos. B. Agregado de cuarzo alargado simulando un objeto tipo sigma. C. Fracturas intragranulares en cristal de cuarzo; se puede identificar algunas de las fracturas de las estructuras tipo Riedel. D. Microfallamiento evidenciado por el desplazamiento relativo de los fragmentos del grano. Nicoles cruzados, aumento 10X

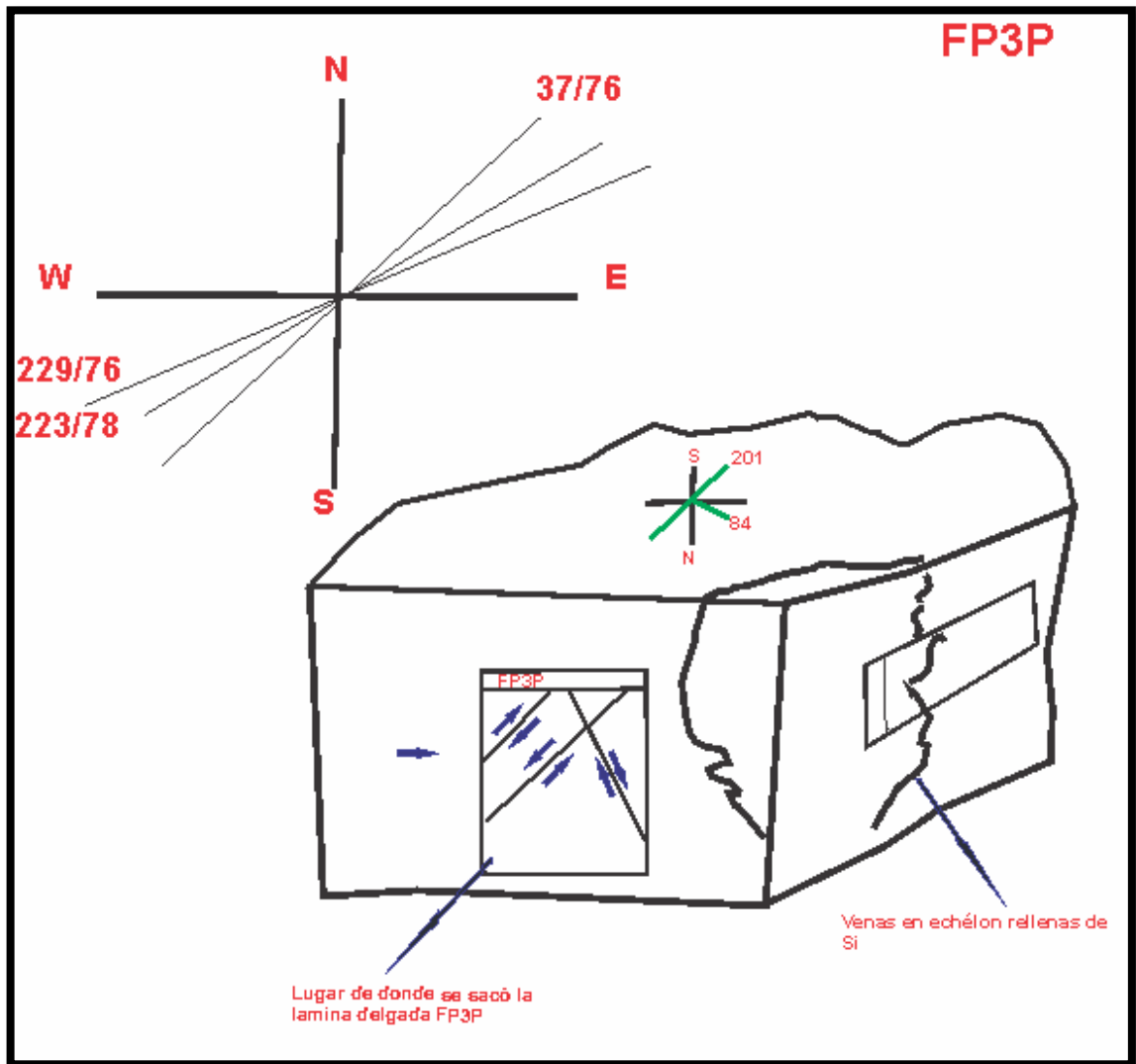


#### **7.4 ANÁLISIS DEL TENSOR DE PALEOESFUERZOS PARA LA FALLA LA PEREZOSA, UTILIZANDO INFORMACIÓN DE LOS INDICADORES CINEMÁTICOS, IDENTIFICADOS EN LAS SECCIONES DELGADAS**

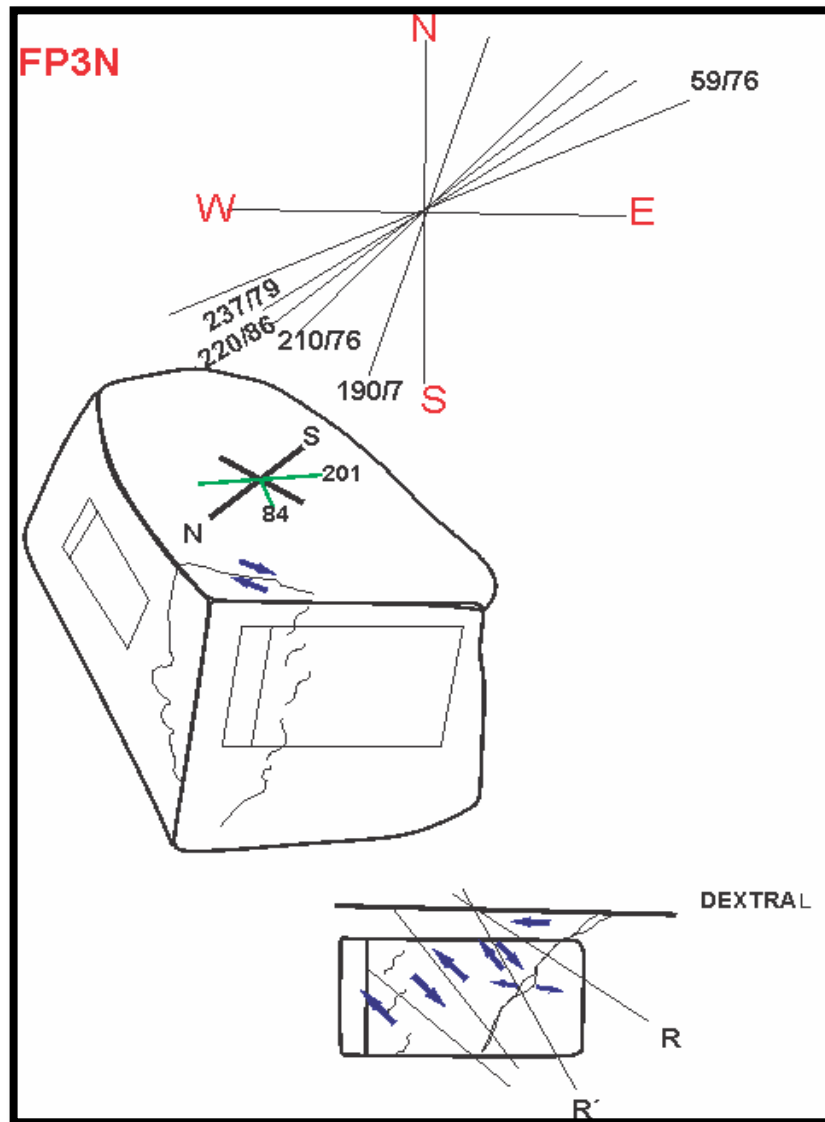
Para identificar los ejes de esfuerzo principales en la falla La Perezosa se utilizaron las microestructuras que pudiesen ser valiosos como indicadores cinemáticos (estructuras Riedel, libros rotados, microbrechas, microfallamientos y fracturas extensionales); a partir de la orientación y sentido de cizalla de cada uno de estos, se obtuvieron una serie de datos estructurales, que se presentan en el **Anexo 6**.

Para hallar la orientación real de los planos se utilizaron microfotografías orientadas sobre las que se dibujó el sentido de movimiento de los indicadores, luego fueron esbozados en modelos a escala de las láminas delgadas y llevados a las muestras de mano para posteriormente reorientarlas como se muestra en las figuras 53, 54, 55 y 56. Una vez obtenida la información, se procesó en el programa Win\_Tensor 4.0.4.

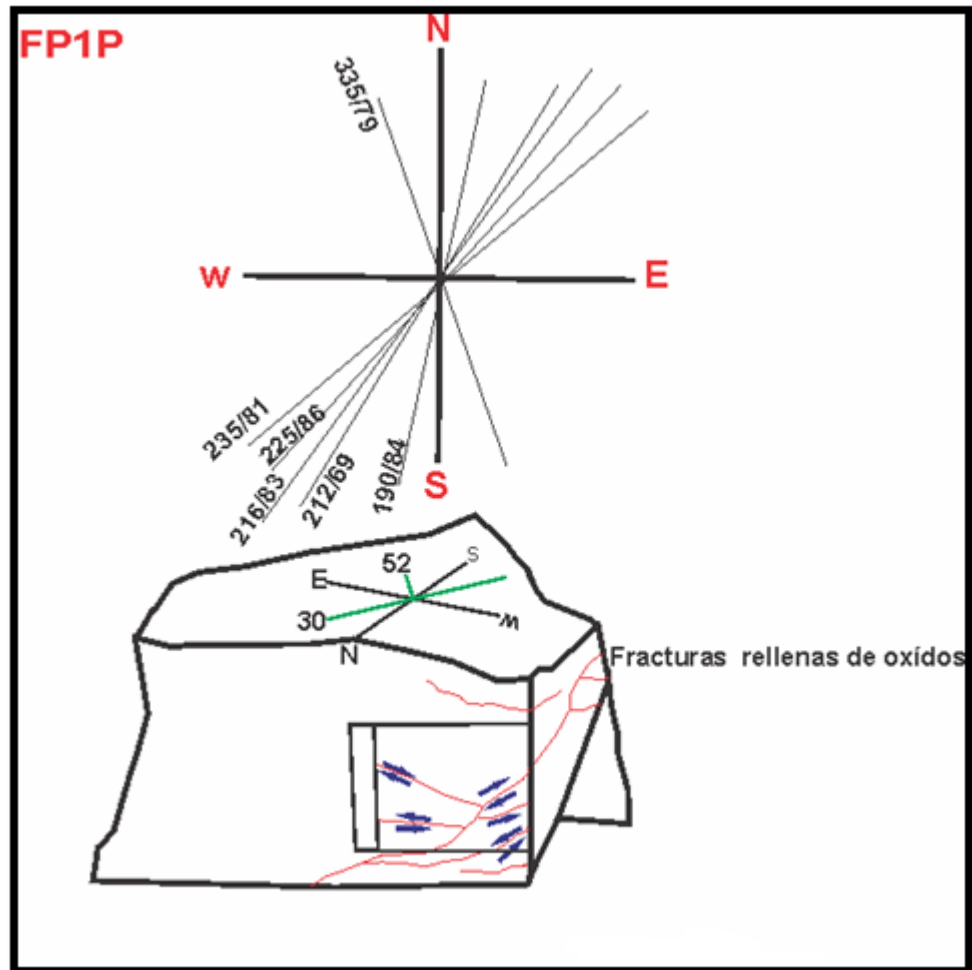
**Figura 53.** Esbozo de la muestra 3 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera paralela al estiramiento mineral



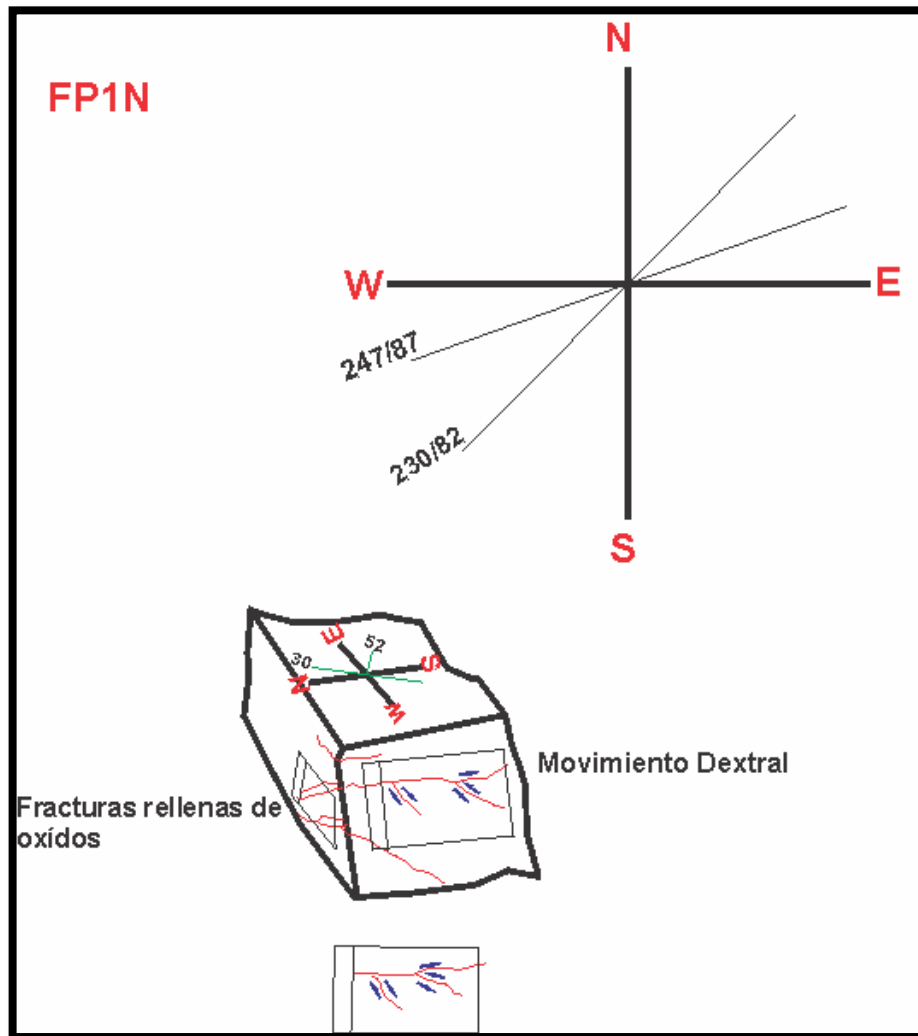
**Figura 54.** Esbozo de la muestra 3 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera normal al estiramiento mineral.



**Figura 55.** Esbozo de la muestra 1 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera paralela al estiramiento mineral

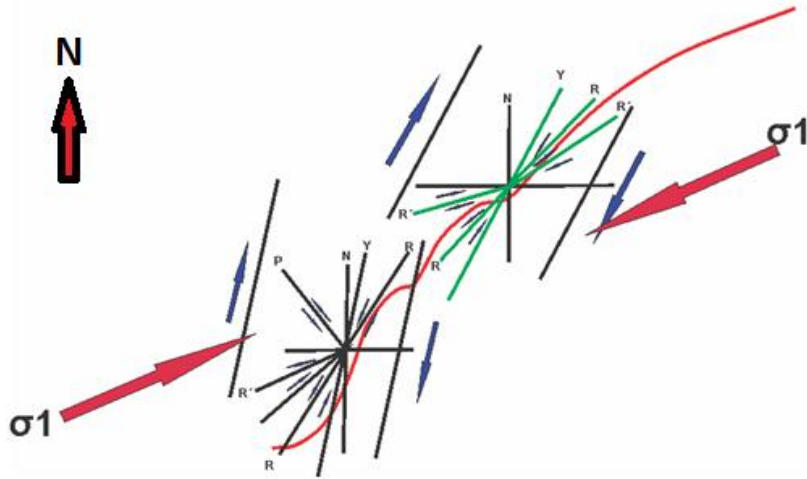


**Figura 56.** Esbozo de la muestra 1 donde se presentan los planos de las estructuras identificadas para el corte realizado de manera normal al estiramiento mineral



Una vez caracterizada la información útil para determinar el tensor de paleoesfuerzos, lo primero que se hizo fue un esquema trazado a mano (Figura 57), en el que se estimó la orientación relativa del eje de deformación principal ( $\sigma_1$ ); para luego compararlo con el que se obtuviese con el programa especializado (Wint\_tensor).

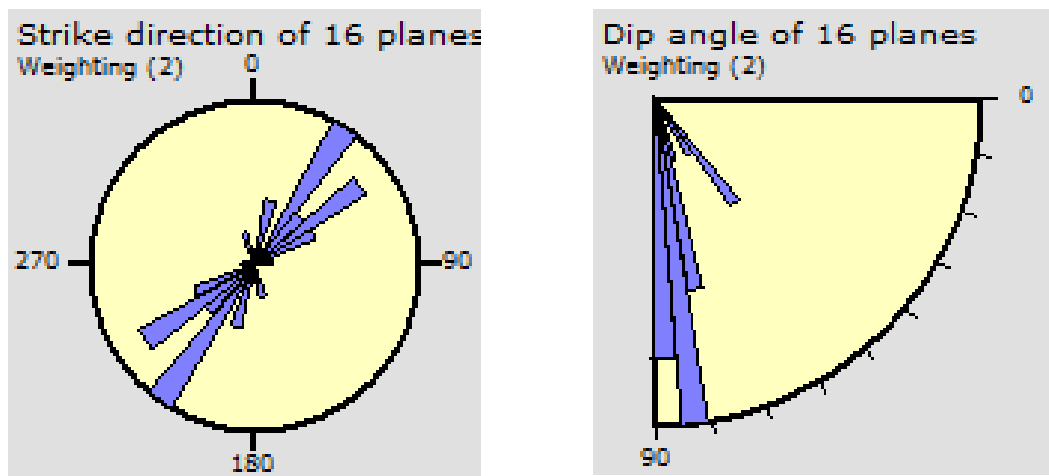
**Figura 57.** Ejes principales de deformación estimados manualmente



#### 7.4.1 Procesamiento de la Información

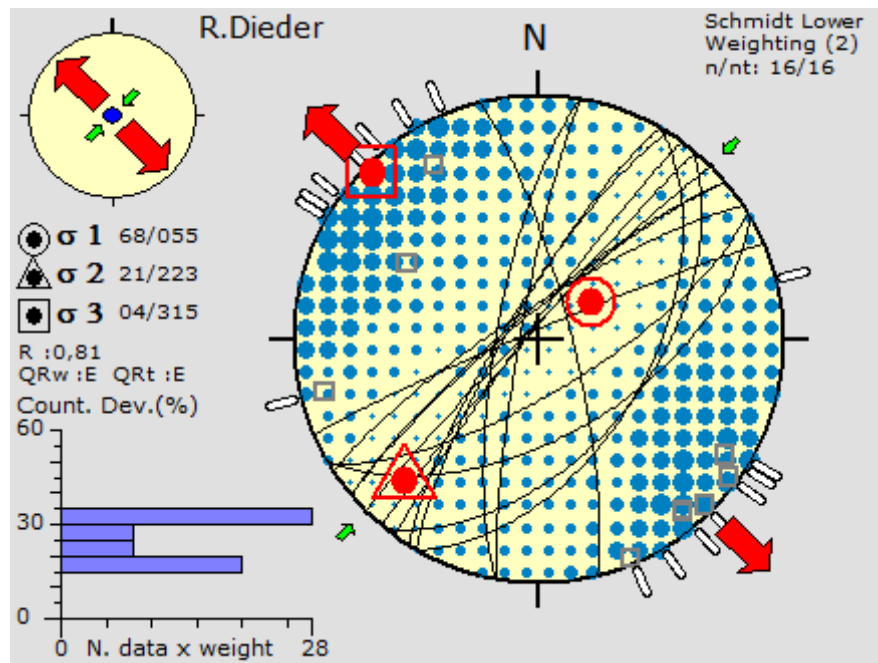
Para lograr ordenar y entender la información (anexo 6), se utilizaron diagramas de rosetas (Figura 58), con lo que se identificó que la distribución predominante de las fracturas tienen un sentido NE-SW y buzamientos sub-verticales en sentido NW (a partir de la orientación de los planos en las muestras); Esta misma tendencia es apreciable en la figura 57.

**Figura 58.** A. Diagrama de rosetas en el que se muestra las orientaciones estadísticamente preferentes. B. Buzamientos promedio de los planos.



7.4.1.1 Cálculo de Tensor de Paleoesfuerzos. El campo de paleoesfuerzos obtenido (Figura 59), muestra que los esfuerzos principales son: eje de compresión ( $\sigma_1$ ) N55°E/68, eje de esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) N37°W/21 y eje de tensión ( $\sigma_3$ ) de N45°W/04.

**Figura 59.** Tensor de paleoesfuerzos en el que se muestra la orientación de los principales ejes de deformación.



La posición de los ejes principales de esfuerzo sugieren que la falla tiene un comportamiento vertical normal.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 EVENTOS DEFORMATIVOS IDENTIFICADOS EN EL GNEIS DE BUCARAMANGA

En las secciones delgadas del gneis de Bucaramanga, se revela a nivel de microscópico una superficie **S<sub>n</sub>** y una superficie **S<sub>n+1</sub>**, más un evento posterior de fusión parcial y por lo menos uno frágil generado después o durante el emplazamiento de los cuerpos ígneos de edad triásica – Jurasica. Cabe anotar que a lo largo de la exploración de campo se identificaron eventos deformativos ductiles en el Gneis de Bucaramanga representados por multiples fases de plegamiento en varias direcciones que no son descritas a detalle en este documento. La foliación **S<sub>n</sub>** fue identificada por la diferenciación composicional (bandeamiento), en el gneis biotítico, la anfibolita y a la orientación preferencial de los minerales micáceos de la milonita. Adicionalmente, en la misma milonita se observó la foliación **S<sub>n+1</sub> (C)**, marcada por dominios P que reorientan la foliación **S<sub>n</sub>** (domino Q), así como porfidoblastos de minerales opacos rotados y con microbudinaje. Esto se puede complementar con el trabajo de campo donde se identificaron dos direcciones de foliación; la primera con un promedio de 240° y la segunda con una dirección aproximada de 330°, en sectores cercanos a la falla La Perezosa.

Mientras que las evidencias de fusión parcial se encontraron en la anfibolita y el gneis biotítico, donde se identificaron leucosomas y mesosomas durante la cartografía y en sección delgada se identificaron leucogranitos originados a partir del gneis. El evento de deformación frágil se identificó en todas las litologías, caracterizado por la presencia de microfracturamiento intragranular y transgranular, que además presentan criterios tipo Riedel, permitiendo visualizar posibles sentidos de cizalla, en su mayoría están rellenas por fluidos producto de la alteración hidrotermal.

## 8.2 CONDICIONES DE DEFORMACIÓN RELACIONADAS CON LA FALLA LA PEREZOSA

Las observaciones en el microscopio indican que el régimen de deformación predominante corresponde a condiciones frágiles y frágiles – dúctiles; en donde la mayoría de las muestras se caracterizan por presentar bandas relacionadas con reducción de tamaño de grano, formando cataclasitas acompañadas de microfracturamientos intragranulares, transgranulares e intergranulares y en algunos casos brechificación tectónica, lo que sugiere acomodación de la deformación por deslizamiento friccional. A esto se suma que en la mayoría de los cristales se presentan procesos y mecanismos de deformación Intracristalina (dislocaciones y delizamientos), que se generaron por un cambio abrupto de las condiciones termodinámicas del sector.

Utilizando el mapa de deformación de Davis and Reynolds (1997), el cual relaciona la aparición de ciertos mecanismos de deformación dependiendo de: las condiciones de temperatura *versus* el esfuerzo diferencial, se permite destacar que para el sector, la concentración de mecanismos de dislocación y distorsión de la red cristalina, puede ser producto del alto régimen de deformación acompañado de un aumento de la temperatura, que favoreció la generación de mecanismos de recuperación (recristalización dinámica BGL y SGR), originando en la mayoría de las secciones una orientación preferente cristalográfica; además de la predominancia de otros mecanismos de deformación como: la cataclasis y el maclado mecánico que se relacionan con el estilo estructural previo o temporal a los eventos de mineralización.

Aunque no es regla general que para una profundidad y temperatura determinada exista un campo en donde solo aparecerá cierto mecanismo de deformación, pues, pueden existir una serie de condiciones internas y externas a la deformación que propician la aparición de un determinado mecanismo, no obstante, a

continuación se realiza una interpretación basada en los trabajos de autores como Passcheir & Trouw (2005); que mediante el análisis de los mecanismos de deformación que se originan en ciertos minerales infieren las temperaturas a las cuales se generó un evento deformativo en particular. Después de conocer las temperaturas y utilizando el gradiente geotérmico de la zona se puede tasar las profundidades a las cuales se produjo la deformación.

De acuerdo con esto, la presencia de fracturamiento intragranular, la extinción ondulosa, la recristalización por migración de borde de grano, las lamelas de deformación y la generación de subgranos en los cristales de cuarzo; sugieren que las condiciones de temperatura durante la deformación se encontraban entre los 250°C y 300°C. Mientras que en los feldespatos, se observó microfallamiento microfracturamientos intragranulares y transgranulares, maclas mecánicas, extinciones ondulantes y en algunos sectores haciendo parte del flujo cataclástico; estas texturas se relacionan a temperaturas de bajo grado metamórfico (por debajo de 400°C).

Con relación a lo anterior Sibson (1983), afirma que las temperaturas donde el régimen de deformación es frágil, son cercanas a los 300°C para zonas de falla en una corteza cuarzofeldespática. Partiendo de esto, se puede plantear que la profundidad de deformación para las muestras recolectadas sobre el trazo de la falla La Perezosa se encontraba alrededor de 1 a 2 kilómetros, asumiendo un gradiente geotérmico de 300° C (Forero, 2010).

### **8.3 RELACIÓN ENTRE LOS TENSORES DEFINIDOS**

En el desarrollo de este trabajo se identificaron dos tensores; el primero utilizando datos recogidos sobre secciones delgadas, y el segundo a partir de información registrada en campo. Al comparar la orientación de los ejes principales de esfuerzo para cada uno de los tensores (tabla 1), se puede definir que el eje de

compresión  $\sigma_1$  se encuentra en el primer cuadrante. Esta posición refleja la cinemática de la falla La Perezosa (ver mapa del anexo), la cual se interpreta como un sistema rumbo deslizante lateral derecho.

Tabla 1. Ejes principales de deformación, de los tensores identificados.

| Tipo de Tensor                   | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| A partir de secciones delgadas   | N55E/68    | N37W/21    | N45W/04    |
| A partir de información de campo | N78E/28    | N25W/59    | N17W/10    |

Es importante resaltar que los tensores definidos corresponden con los que generaron la falla, y no necesariamente con el tensor regional.

#### **8.4 RELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FALLAS ROMERAL-CUCUTILLA Y LA BAJA-ANGOSTURA, CON LA MINERALIZACIÓN DEL PROYECTO ANGOSTURA**

Los sistemas de fallas Romeral- Cucutilla y La Baja-Angostura tienen una tendencia NE, las cuales se consideran de edad Mesozoica, pues se asocian a la generación de cuencas extensionales donde se depositó la secuencia transgresiva marina que aflora al oeste del proyecto (Felder *et al.*, 2000). Sin embargo Sarmiento (2006), menciona que la deformación Andina provocó una inversión tectónica (Cenozoico), esto se pudo evidenciar en el desarrollo del presente trabajo pues algunos indicadores cinemáticos arrojaron resultados asociados a fallamiento inverso en la falla La Perezosa, a pesar que presenta buzamiento subvertical; además los sondeos realizados muestran la misma tendencia (inversa). Sin embargo estos eventos no logran explicar cómo se relaciona la actividad de la fallas con el emplazamiento de los filones, pues si consideramos una inversión tectónica, se negaría la posibilidad de generar espacios para que los fluidos mineralizados puedan emplazarse; por tanto el sector tuvo que pasar de un

ambiente compresivo a un ajuste tensional, lo que generó liberación de presión y precipitación de la mineralización.

El ajuste tectónico se evidencia desde la escala regional, en donde la cinemática lateral derecho de las fallas Romeral-Cucutilla y La Baja-Angostura, generaron una zona de tensión del tipo jogs (Sibson 1990), con un componente de desgarre que se aprecia en la aparición de criterios tipo Riedel a todas las escalas de trabajo. Mientras que desde el estudio microtectónico se define que la cataclasis y el microfracturamiento identificado en las secciones se generó por procesos tensionales lo que acomodó la deformación, generando dilatancia en la roca lo que ayudó a generar espacios donde se acomodaron los fluidos hidrotermales; estos fluidos al encontrarse con un nuevo ambiente (menor presión y descenso de la temperatura), liberaron su energía térmica y mecánica propiciando condiciones para que otros mecanismos de deformación (creep por dislocación, maclado mecánico, entre otros), se originaran. Otra evidencia de las condiciones de deformación frágil se caracteriza por que la brechificación tectónica dispone un arreglo mosaico cementado por una matriz de origen hidrotermal (silicificación y sericitación)

En cuanto a la relación de los eventos de actividad de los sistemas de falla y el emplazamiento de la mineralización, las evidencias microestructurales indican que tienen un grado de temporalidad alto. Y además se espera desde el punto de vista de este trabajo que la mayor concentración de la mineralización se limite a zonas donde haya gran cantidad de fracturamientos, pues habrá mejor y más espacio de acomodación. Por lo que sería importante realizar un estudio de evolución estructural, pues en el presente trabajo no se cuentan con suficientes datos que permitan plantear una relación de eventos precisa.

## CONCLUSIONES

A continuación se presenta una serie de ideas basadas en los resultados e interpretaciones de la mineralogía, los mecanismos de deformación, las microestructuras y revisión de trabajos anteriores.

El uso de criterios macro y microestructurales en la caracterización estructural del sector Angostura abarcó el estudio de estructuras geológicas generadas por la deformación a escala meso y microcristalina, que revelan eventos de deformación frágiles y frágiles-dúctiles. Así mismo, se estableció que los principales mecanismos de deformación identificados se relacionan con cataclasis, distorsión de las redes cristalinas y localmente creep por disolución; acompañados de procesos de recuperación (Recristalización dinámica). Además basados en el análisis petrográfico, se logró definir que las microestructuras más comunes son: bandeamiento composicional, orientación de minerales micáceos, intercrecimientos, recristalizaciones orientadas y localmente texturas de falla.

Los contactos interlobulados apreciados entre cuarzo y biotita en el genis biotítico se generaron como respuesta a los diferentes cambios de las condiciones iniciales de la roca, pudiéndose identificar factores indirectos tales como la temperatura, la presión dirigida y los fluidos hidrotermales.

De acuerdo a las evidencias microestructurales se puede indicar que la inyección de fluidos hidrotermales a través de la zona de falla, es temporal a su actividad y que además la precipitación de estos nuevos fluidos (calientes) generaron la alteración del gradiente geotérmico, proporcionando las condiciones para la generación de nuevos mecanismos de deformación.

La mayor evidencia de la interacción de los sistemas de fallas Romeral-Cucutilla y

La Baja-Angostura, se encuentra en el sector del Proyecto Angostura, en donde se generó un ambiente tensional, marcado por mecanismos de deformación como la cataclasis, el microfracturamiento y evidencias en sección delgada de brechificación en mosaico que fue cementada por asociaciones minerales propias de zonas de alteración hidrotermal.

Se reconoce que la falla La Perezosa conecta los sistemas de fallas La Baja-Angostura y Romeral-Cucutilla formando una estructura tipo Riedel a escala subregional. Adicionalmente se cuenta con evidencias que indican que la reactivación de estos sistemas tienen relación directa con los espacios de acomodación, pues generaron estructuras tipo jogs.

Por otra parte, las condiciones de deformación para la falla La Perezosa indican que los eventos se pudieron originar a temperaturas entre 250 a 350 °C, y a profundidades de 1 a 2 kilómetros, sin embargo no se definió cuál es el papel de la falla en la distribución de las zonas de alteración.

Después de determinar el tensor de paleoesfuerzos para el sector de la falla La Perezosa, se puede inferir que su cinemática es rumbo deslizante lateral derecho con un componente inverso. Asimismo, al comparar los tensores obtenidos con datos a escala mesoscópica, con los obtenidos a partir de las secciones delgadas, se puede observar que hay variaciones entre la posición de los ejes de deformación de cada tensor, pero en general los dos se encuentran en el primer cuadrante y muestran la misma relación de cinemática respecto a la falla.

En campo se logró definir que la falla La Perezosa, es una estructura posterior a la gran mayoría de estructuras que tiene sentido NW-SE, sin embargo no es asunto del autor discernir sobre la edad relativa de cada uno de los estilos estructurales identificados. Otra característica que se resalta es que las venas que se encuentran en dirección NE tienen una composición en general de Si + Qz + FeOx

+ Sulf, mientras que las orientadas en sentido NW-SE contienen Si + FeOx + BIOx. Relación con la evolución hidrotermal.

Es notable la ausencia de múltiples eventos deformativos en el Gneis de Bucaramanga (en sección delgada), que fueron vistos en el trabajo de campo; esto demuestra que en las áreas donde ha existido mayor concentración de la alteración hidrotermal han desaparecido las estructuras primarias.

## **RECOMENDACIONES**

Se sugiere incrementar los estudios de este tipo en muestras de pozos de perforación para conocer a profundidad el estado de deformación y su variación, para determinar con una mayor precisión las características de la zona de falla y de esta manera mejorar los modelos estructurales y de exploración de los minerales preciosos.

## BIBLIOGRAFÍA

Aceros. C., Y Castellanos. A., 1993. Estudio geológico y metalogénico de la mina Barbacoa, municipio de California-Santander. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. UIS. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Barker. A., 1998. Introduction to Metamorphic Textures y Microstructures; second Edition. London; New York; Glasgow [etc.]: Blackie academic and professional, 1994, cop. 1990.

Blenkinsop. T., 2000. Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks; Kluwer Academic Publishers.

Boinet. T., Bourgois. J., Bellon. H., et Toussaint. J. 1985. Age et repartition du magmatism Premesozoique des Andes de Colombie. Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des Sciences. Serie D, Sciences Naturalles 300(II): pp 445-450.

Bueno. 1955. Yacimientos de Uranio y otros metales en la región de La Baja, Municipio de California, Departamento de Santander: Colombia. Bol. Geológico, vol. 111, N9 3, pp. 1-83.

Cediel. F., Y Cáceres. C., 2000. Geological Map of Colombia, Third Edition: Geotec Ltd., Bogotá, digital format with legend y tectonostratigraphic chart.

CLAVIJO. J. *et al.* 1993. Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes. Cuarto Simposio de Geología Regional. Ingeominas. Documento interno, Bucaramanga.

Davis. G., And Reynolds. S., 1996. Structural Geology of Rocks and Regions. Wiley & Sons. New York. pp 495.

Felder. G., Spat. A., And Silva. R., 2000. Angostura Project, A High Sulphidation Gold Silver Deposit located in the Santander Complex of North Easth Colombia. Paper presented t Simposio de Oro, Lima. Perú.

Forero. H., 2010. Paragenesis minerales de las brechas mineralizadas del sector de la mascota (California, Santander).Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. UIS. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Galvis. V., 1998. Una caldera volcánica en el Macizo de Santander, Colombia. Revista Academia Colombiana de Ciencias. Vol,22 (84): pp 355-362.

García. C., Y Ríos. C., 1999. Metamorfismo y metalogénia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe final Proyecto de Investigación 1102-05-083-95 Colciencias-Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, pp 191.

García.C., 2000. Composición química y mineralogía de las biotitas metamórficas del sector central del Macizo de Santander, Colombia. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander, Vol. 22, N° 37, pp.18-27.

Goldsmith. R., Marvin. R.F., Mehnert. H., 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper 750-D, D44eD49.

Hatcher, R.D., 1995. Structural Geology. Prentice Hall, pp. 531.

Horner, J. 2005, Structural geology and tectonics of the Angostura project area. C

Consulentes Technical Report 12x05015\_050523\_final\_report.pdf.

INGEOMINAS. 2006. Mapa Geológico de Colombia, a escala 1:1'500.000. Bogotá.

López. J., Velandia. F., Silva. A., Cano. H., Felder. F., 2013. Geología y estructuras del Proyecto Angostura. Algunas consideraciones genéticas. XIV Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.

Mantilla. F., Valencia. V., Barra. F., Pinto. J., y Colegial. J., 2009. Geocronología U-Pb de los cuerpos Porfíricos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Santander, Colombia). Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. 31(1),pp 31-43.

Mcclay. K., 1987. The mapping of geological structures. John Wiley y Sons edit. New York.

Mendoza. H., Y Jaramillo. L., 1979. Geología y Geoquímica del área de California, Santander. Boletín Geológico Ingeominas, 22, pp 3-52.

París G. Romero. 1994. Fallas activas en Colombia. Boletín Geológico n~ 34. INGEOMINAS, Bogotá.

Passchier. C., And Trouw. R., 2005. Microtectonics: Berlin, Springer-Verlag: pp. 366.

Pérez. S., Y Vargas. J., 1993. Geología y Geoquímica de los Yacimientos Filonianos de Oro en la Mina San Cayetano, Municipio de California (Santander). Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. UIS. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Pinto. E., 1991. Geología y evolución de la Mina la Bodega, California (Santander). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. UIS. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Ragan. D., 1980. Geología estructural: introducción a las técnicas geométricas. Omega, Barcelona, p. 200-207.

Restrepo-Pace. P., 1995. Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data. Ph.D. Thesis, University of Arizona, pp 195.

Royero.J., Y Clavijo J., 2001. Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Informe Ingeominas.

Sarmiento. L., Van. J., And Cloeting. H., 2006. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonics models. Journal of South American Earth Sciences 21: pp 383-411.

Shaw. R., 2000. Gold mineralization in the Northern Andes: Magmatic Metallogeny. XI International Mining Congress, Bogota, Colombia.

Sibson. R., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. Geological Soc. London, Vol. 133(3), pp 191–213.

Sibson. R., 1990. Faulting and fluid flow. En: Fluids in tectonically Active Regimes of the Continental Crust, Nesbitt, B.E (Ed), Short Course, Mineralogical Association of Canada, Vancouver, pp 93-132.

SNOKE. A. et al., 1998. Fault – related rocks. A photographic Atlas. Princeton

University Press. New Jersey.

Streckeisen. A., 1979. Plutonic Rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS (subcommission on the Systematics of Igneous Rocks). *Geotimes*, volume 18, numero 10, pp 26-30.

Taboada. A., Rivera. L., Fuenzalida. A., Cisternas. A., Hervè. P., Bijwaard. H., Olaya. J., and Rivera. C. 2000 Geodynamics of the northern Andes: subductions y intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, vol. 19/5, pp 787-813.

The Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks 2007. Consultado el 14 de junio de 2013. <http://www.bgs.ac.uk/SCMR/>

Vernon. R., 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, New York.

Vernon. R., And Clarke. G., 2008. Principles of metamorphic petrology. Cambridge University Press, New York, pp 435.

Ward. D., Goldsmith. R., Cruz. J., y Restrepo. A., 1973. Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. *Ingeominas, Boletín Geológico* 21 (1-3), pp 1- 132. Bogotá.

Whitney. D., Evans. B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, pp 185–187.

Wokittel. R., 1954. Recursos de Alta, Baja y Vetas. Colombia. Servicio Geológico Nacional, Bogotá. Informe 1030.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. MÉTODOS PARA MEDIR ESTRUCTURAS LINEALES**

Las estructuras lineales incluyen, estrías, líneas de intersección, lineaciones de minerales, ejes de pliegues o líneas de Charnela. Todos se miden de la misma manera, obteniendo el pitch y el plunge. Los datos se llevan luego a una proyección estereográfica para ser interpretados.

#### **Toma y Registro del Plunge (Inclinación) en lineaciones o pliegues**

- Coloque el borde de su libreta de campo a lo largo de la estructura a ser medida, mantenga la libreta vertical.
- Mida el rumbo en dirección de la inmersión.
- Use el clinómetro de la brújula mida el plunge de la estructura lineal mediante la colocación del borde de la brújula a lo largo de la estructura, registre el plunge.

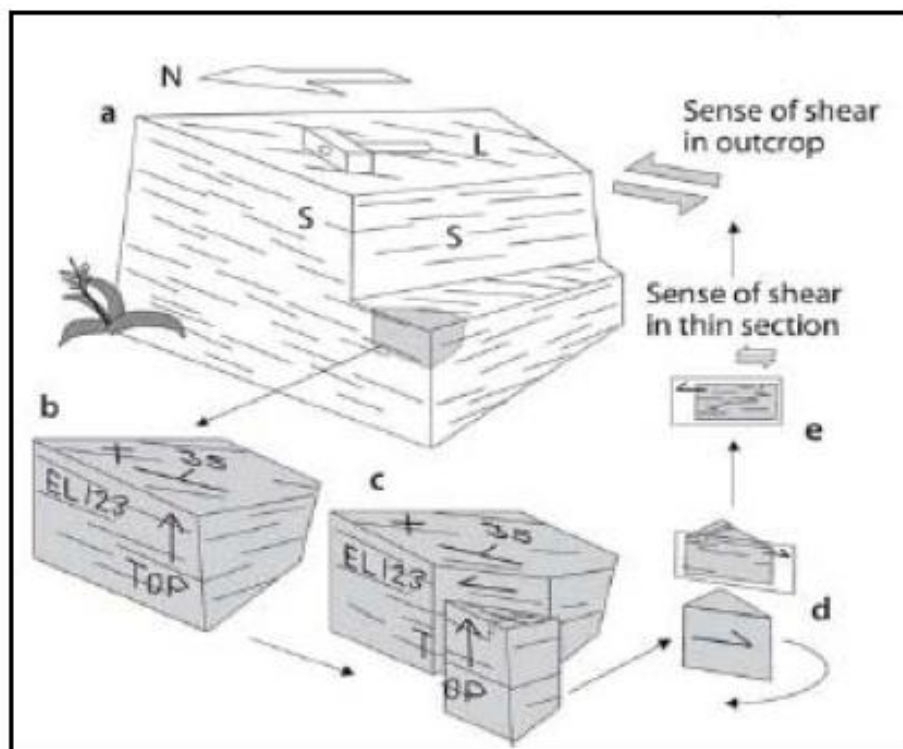
#### **Toma y registro del Pitch (cabeceo) de la lineación**

- Ubique el rumbo del plano, se marca con un lápiz hasta que se intersecten con la estructura lineal a medir.
- Se mide y se registra el rumbo y buzamiento del plano.
- Se mide y se registra el ángulo entre la lineación y la línea de rumbo, utilizando un transportador.

## ANEXO B. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS ORIENTADAS

Para el presente proyecto la recolección de muestras orientadas fue una etapa indispensable; pues fueron necesarias para el análisis Microestructural a continuación: en la figura 60 se muestra la manera como se deben recolectar las muestras.

**Figura 60.** Manera de tomar una muestra orientada.



Tomado de Passcheir & Trouw 2005

- Selección de la muestra a ser recolectada; las piezas limitadas por diaclasas son más fáciles de recoger y menos propensas a romperse al momento de la extracción.
- Mida y registre los elementos estructurales asociados a la muestra y al afloramiento, realizando un croquis que resalte los detalles y la posición de la muestra respecto al afloramiento.

- Seleccione un plano apropiado de la muestra como referencia, puede ser la estratificación, una foliación, una diaclasa o el mismo plano del afloramiento.
- Mida la orientación de esta superficie y con una pluma marque el rumbo y buzamiento de la superficie de referencia, marque el techo de la muestra y el número de muestra; registre esta información en su libreta de campo.
- Recoja la muestra en una bolsa y etiquétela completamente; registre estos datos junto al dibujo realizado en la libreta.

**ANEXO C. DATOS ESTRUCTURALES TOMADOS EN AFLORAMIENTOS  
CERCANOS A LA FALLA LA PEREZOSA**

A continuación se presentan las tablas de los datos de fracturas, vetillas stringres y vetas determinadas en campo y que fueron utilizados para obtener el tensor de paleoesfuerzos del sector de la perezosa.

Sector 1

| Estación    | Coordenada E | Coordenada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones |
|-------------|--------------|--------------|--------|-----------|------|--------------------|---------------|
|             |              |              |        | Direction | Dip  |                    |               |
| WACC-PC-008 | 1130941      | 1308564      | 3190   | 204,0     | 89,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 202,0     | 74,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 300,0     | 83,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 112,0     | 89,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 263,0     | 77,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 183,0     | 80,0 | Fractura           | Clay          |
|             |              |              |        | 265,0     | 80,0 | Fractura           | Clay          |

Continuación del sector 1

| Estación | Coordenada E | Coordenada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones |
|----------|--------------|--------------|--------|-----------|------|--------------------|---------------|
|          |              |              |        | Direction | Dip  |                    |               |
|          |              |              |        | 107,0     | 70,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 257,0     | 40,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 112,0     | 82,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 273,0     | 58,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 117,0     | 48,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 287,0     | 80,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 228,0     | 73,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 113,0     | 88,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 58,0      | 60,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 12,0      | 71,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 254,0     | 53,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 327,0     | 77,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 262,0     | 76,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 122,0     | 88,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 347,0     | 70,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 341,0     | 88,0 | Fractura           | Clay          |
|          |              |              |        | 53,0      | 82,0 | Fractura           | Clay          |

## SECTOR 2

| Estación    | Coordenada E | Coordenada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones     |
|-------------|--------------|--------------|--------|-----------|------|--------------------|-------------------|
|             |              |              |        | Direction | Dip  |                    |                   |
| WACC-PC-006 | 1130984      | 1308521      | 3155   | 191,0     | 72,0 | Fractura           | Sulf              |
|             |              |              |        | 22,0      | 30,0 | Fractura           | FeOx              |
|             |              |              |        | 126,0     | 68,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 197,0     | 76,0 | Fractura           | FeOx              |
|             |              |              |        | 153,0     | 70,0 | Fractura           | FeOx + Sulf       |
|             |              |              |        | 355,0     | 84,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 7,0       | 45,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 8,0       | 48,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 10,0      | 69,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 2,0       | 63,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 335,0     | 84,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 64,0      | 89,0 | Fractura           | Clay              |
|             |              |              |        | 130,0     | 66,0 | Fractura           | FeOx              |
|             |              |              |        | 40,0      | 78,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Jar |
|             |              |              |        | 5,0       | 78,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf       |
|             |              |              |        | 20,0      | 83,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf       |
|             |              |              |        | 197,0     | 76,0 | Vetilla            | FeOx + Si         |
|             |              |              |        | 98,0      | 70,0 | Vetilla            | FeOx              |
|             |              |              |        | 29,0      | 90,0 | Vetilla            | FeOx              |

### Continuación del sector 2

| Estación | Coordenada E | Coordenada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones    |
|----------|--------------|--------------|--------|-----------|------|--------------------|------------------|
|          |              |              |        | Direction | Dip  |                    |                  |
|          |              |              |        | 161,0     | 72,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Si |
|          |              |              |        | 184,0     | 76,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 117,0     | 74,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 27,0      | 83,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Si |
|          |              |              |        | 50,0      | 82,0 | Vetilla            | FeOx             |
|          |              |              |        | 312,0     | 80,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Si |
|          |              |              |        | 52,0      | 88,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Si |
|          |              |              |        | 19,0      | 84,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf + Si |
|          |              |              |        | 57,0      | 86,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 55,0      | 76,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 47,0      | 70,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 210,0     | 56,0 | Vetilla            | FeOx + Sulf      |
|          |              |              |        | 324,0     | 89,0 | Vetilla            | FeOx             |
|          |              |              |        | 148,0     | 74,0 | Vetilla            | FeOx + Si        |
|          |              |              |        | 45,0      | 36,0 | Vetilla            | FeOx             |

|  |  |  |  |       |      |          |           |
|--|--|--|--|-------|------|----------|-----------|
|  |  |  |  | 52,0  | 83,0 | Stringer | Sulf      |
|  |  |  |  | 24,0  | 78,0 | Stringer | FeOx + Si |
|  |  |  |  | 20,0  | 86,0 | Stringer | FeOx      |
|  |  |  |  | 140,0 | 75,0 | Stringer | FeOx      |
|  |  |  |  | 119,0 | 82,0 | Stringer | FeOx      |
|  |  |  |  | 318,0 | 74,0 | Stringer | FeOx      |
|  |  |  |  | 285,0 | 74,0 | Stringer | FeOx      |

Continuación del sector 2

| Estación | Coor-de-nada E | Coor-de-nada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones    |
|----------|----------------|----------------|--------|-----------|------|--------------------|------------------|
|          |                |                |        | Direction | Dip  |                    |                  |
|          |                |                |        | 12,0      | 62,0 | Veta               | FeOx + Sulf + Si |
|          |                |                |        | 20,0      | 83,0 | Veta               | FeOx + Sulf + Si |

### SECTOR 3

| Estación    | Coor-de-nada E | Coor-de-nada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones         |
|-------------|----------------|----------------|--------|-----------|------|--------------------|-----------------------|
|             |                |                |        | Direction | Dip  |                    |                       |
| WACC-PC-007 | 1130981        | 1308391        | 3157   | 347,0     | 66,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 204,0     | 88,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 154,0     | 67,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 165,0     | 43,0 | Fractura           | FeOx                  |
|             |                |                |        | 252,0     | 62,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 70,0      | 28,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 209,0     | 89,0 | Fractura           | Clay                  |
|             |                |                |        | 22,0      | 81,0 | Venilla            | Si + qz + FeOx + Sulf |
|             |                |                |        | 135,0     | 70,0 | Venilla            | Si + qz + FeOx + Sulf |
|             |                |                |        | 17,0      | 87,0 | Venilla            | Si + qz + FeOx + Sulf |
|             |                |                |        | 47,0      | 77,0 | Vetilla            | Si + qz + FeOx + Sulf |
|             |                |                |        | 21,0      | 72,0 | Vetilla            | Si + Sulf + FeOx      |
|             |                |                |        | 25,0      | 83,0 | Vetilla            | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 32,0      | 89,0 | Vetilla            | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 130,0     | 62,0 | Venilla            | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 131,0     | 70,0 | Vetilla            | FeOx + Si             |
|             |                |                |        | 204,0     | 88,0 | Stringer           | FeOx                  |
|             |                |                |        | 358,0     | 88,0 | Stringer           | FeOx                  |
|             |                |                |        | 27,0      | 71,0 | Stringer           | FeOx                  |
|             |                |                |        | 36,0      | 82,0 | Stringer           | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 115,0     | 65,0 | Stringer           | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 110,0     | 68,0 | Stringer           | FeOx + BIOx           |
|             |                |                |        | 27,0      | 70,0 | Stringer           | FeOx                  |
|             |                |                |        | 25,0      | 62,0 | Veta               | Si + qz + FeOx + Sulf |
|             |                |                |        | 36,0      | 83,0 | Veta               | Si + qz + FeOx + Sulf |

## SECTOR 4

| Estación    | Coordenada E | Coordenada N | Altura | Plano     |      | Tipo de estructura | Observaciones    |
|-------------|--------------|--------------|--------|-----------|------|--------------------|------------------|
|             |              |              |        | Direction | Dip  |                    |                  |
| WACC-PC-008 | 1130845      | 1308484      | 3187   | 308,0     | 88,0 | Fractura           | Clay             |
|             |              |              |        | 173,0     | 88,0 | Fractura           | FeOx             |
|             |              |              |        | 85,0      | 55,0 | Fractura           | Clay             |
|             |              |              |        | 316,0     | 84,0 | Vetilla            | BIOx + FeOx      |
|             |              |              |        | 330,0     | 75,0 | Vetilla            | BIOx + FeOx + Si |
|             |              |              |        | 85,0      | 80,0 | Vetilla            | Sulf + Si + FeOx |
|             |              |              |        | 255,0     | 89,0 | Vetilla            | Sulf + Si + FeOx |
|             |              |              |        | 144,0     | 82,0 | Vetilla            | Sulf + Si + FeOx |
|             |              |              |        | 355,0     | 76,0 | Vetilla            | Sulf             |
|             |              |              |        | 123,0     | 83,0 | Vetilla            | Si + FeOx + BIOx |
|             |              |              |        | 268,0     | 40,0 | Stringer           | BIOx + FeOx      |
|             |              |              |        | 310,0     | 53,0 | Stringer           | BIOx + FeOx      |
|             |              |              |        | 277,0     | 67,0 | Stringer           | BIOx + FeOx      |
|             |              |              |        | 232,0     | 88,0 | Stringer           | FeOx             |
|             |              |              |        | 140,0     | 85,0 | Veta               | Si + Sulf + FeOx |
|             |              |              |        | 135,0     | 88,0 | Veta               | Si + Sulf + FeOx |
|             |              |              |        | 320,0     | 77,0 | Veta               | Si + FeOx + BIOx |
|             |              |              |        | 292,0     | 73,0 | Veta               | Si + FeOx + BIOx |
|             |              |              |        | 314,0     | 82,0 | Veta               | Si + Sulf + Jar  |
|             |              |              |        | 78,0      | 72,0 | Falla              | Clay             |

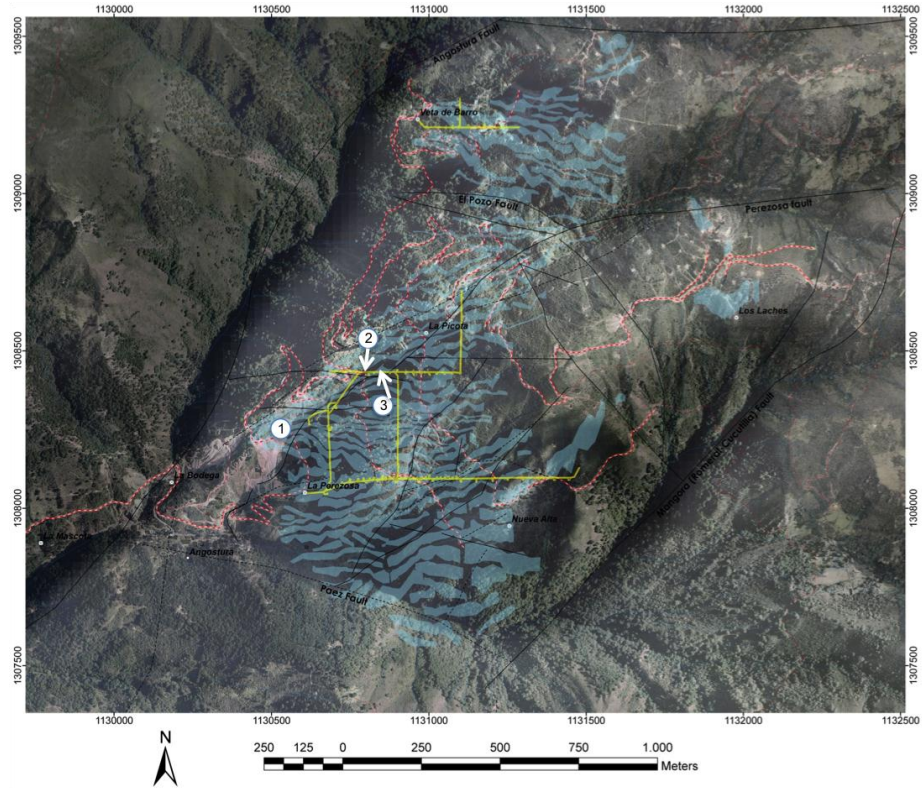
## ANEXO D. ABREVIATURAS DE LOS NOMBRES DE MINERALES.

| <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> | <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> | <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> | <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> | <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> | <i>Abrev</i> | <i>Nombre Mineral</i> |
|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Acm          | acmita                | Aug          | augita                | Cld          | cloritoide            | Dia          | diamante              | Fgd          | ferrogedrita          | Gru          | grunerita             |
| Act          | actinolita            | Awr          | awaruita              | Chn          | condrodita            | Dsp          | diáspora              | Fgl          | ferroglaucofano       | Gp           | yeso                  |
| Adl          | adularia              | Ax           | axinita               | Chr          | cromita               | Dck          | dickita               | Fkrs         | ferrokaersutita       | HI           | halita                |
| Aeg          | aegirina              | Bab          | babingtonita          | Ccl          | crisocola             | Dg           | digenita              | Fny          | ferroniboita          | Hrm          | homotonita            |
| Ak           | akermanita            | Bdy          | badeleyita            | Ctl          | crisotilo             | Di           | diópsido              | Fprg         | ferropargasita        | Hst          | hastinsita            |
| Ab           | albita                | Brt          | barita                | Cin          | cinabrio              | Dpt          | dioplasa              | Frct         | ferrorichterita       | Hsm          | hausmanita            |
| Afs          | alkalis feld          | Brs          | barroisita            | Cam          | clinoanfíbol          | Dol          | dolomita              | Fs           | ferrosilita           | Hyn          | haunye                |
| Aln          | alanita               | Bei          | beidilita             | Clc          | clinocloro            | Drv          | dravita               | Fts          | ferrotshermakita      | Hzi          | heazlewoodita         |
| Alm          | almandino             | Brl          | berilo                | Cen          | clinoestatita         | Dum          | dumortierita          | Fwn          | ferrowinchita         | Hd           | hedenbergita          |
| Als          | aluminosilicato       | Bt           | biotita               | Cfs          | clinoferrosilita      | Eas          | eastonita             | Fi           | fibrolita             | Hem          | hematita              |
| Alu          | alunita               | Bxb          | bisbita               | Chu          | clinohumita           | Ec           | ecandrusita           | Fl           | fluorita              | Hc           | hercinita             |
| Amk          | amakinita             | Bhm          | bohemitita            | Cpt          | clinoptilolita        | Eck          | ekermanita            | Fo           | forsterita            | Hul          | heulandita            |
| Ame          | amesina               | Bn           | bornita               | Cpx          | clinopiroxeno         | Ed           | edenita               | Fos          | fosagita              | Hbn          | hibonita              |
| Amp          | anfíbol               | Brk          | brokita               | Czo          | clinozoicita          | Elb          | elbaita               | Frk          | franklinita           | Hbs          | hibshita              |
| Anl          | analcita              | Brc          | brucita               | Cln          | clintonita            | Eil          | ellenbergita          | Ful          | fulerita              | Hgb          | highbomita            |
| Ant          | anatasa               | Bst          | bustamita             | Coe          | coecita               | Eng          | enargita              | Ghn          | ganita                | Hol          | holandita             |
| And          | andalucita            | Cal          | calcita               | Coh          | cohenita              | En           | enstatita (ort)       | Glx          | galaxita              | Hlm          | holmquistita          |
| Adr          | andradita             | Ccn          | cancrinita            | Crd          | cordierita            | Ep           | epidota               | Gn           | galena                | Hbl          | homblenda             |
| Ang          | anglesita             | Cnl          | caniloita             | Crr          | corrensita            | Eri          | erionita              | Grt          | granate               | Hw           | howieta               |
| Anh          | anidrita              | Cb           | carbonato             | Cm           | corindón              | Esk          | eskolaíta             | Ged          | gedrita               | Hu           | humita                |
| Ank          | ankerita              | Car          | carfolita             | Cv           | covelita              | Ess          | esseneita             | Gh           | gelenita              | Hgr          | hidrogrosularia       |
| Ann          | annita                | Cst          | casiterita            | Crs          | crisobalita           | Eud          | eudialita             | Gk           | geikielita            | Hyp          | hiperstenito          |
| An           | anortita              | Cel          | celadonita            | Crt          | crosita               | Fas          | fasaita               | Gbs          | gibsita               | Ill          | ilita                 |
| Ano          | anortoclasa           | Cit          | celestina             | Cri          | criolita              | Fs           | fayalita              | Gis          | gismondina            | Ilm          | ilmenita              |
| Ath          | antofilita            | Cls          | celsian               | Cbn          | cubanita              | Fsp          | feldespatito          | Glt          | gaucónita             | Ilv          | ilvaita               |
| Atg          | antogorita            | Cer          | cerusita              | Cum          | cumintonita           | Fac          | ferroactinilita       | Gln          | glaucofano            | Jd           | jadeíta               |
| Ap           | apatito               | Cbz          | chacita               | Cpr          | cuprita               | Fath         | ferroantofilita       | Gme          | gmelinita             | Jrs          | jarosita              |
| Apo          | apofilita             | Cct          | calcocita             | Csp          | cuspidina             | Fbrs         | ferrobarroisita       | Gth          | goetita               | Jim          | jimtomsonita          |
| Arg          | aragonita             | Ccp          | calcopirita           | Dph          | dafnita               | Fcar         | ferrocarfolita        | Gdd          | grandidierita         | Jhn          | johansenita           |
| Arf          | arfvedsonita          | Chm          | chamosita             | Dat          | datolita              | Fcel         | ferroceladonita       | Gr           | grafito               | Krs          | kaersutita            |
| Arm          | armalcolita           | Chs          | chestirita            | Dbr          | daubrelita            | Fec          | ferroekermanita       | Gre          | grinalita             | Kls          | kalsilita             |
| Apy          | arsenopirita          | Chl          | clorita               | Dee          | dierita               | Fed          | ferroedenita          | Grs          | grosularia            | Kam          | kamacita              |

| Abrev | Nombre Mineral      | Abrev | Nombre Mineral | Abrev | Nombre Mineral | Abrev | Nombre mineral    | Abrev | Nombre Mineral | Abrev | Nombre Mineral |
|-------|---------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-------------------|-------|----------------|-------|----------------|
| Kln   | caolinita           | Mag   | magnetita      | Or    | ortoclasa      | Rnk   | rankinita         | Stb   | estilbita      | Wht   | whitlockita    |
| Ktp   | katoforita          | Maj   | majorita       | Oen   | ortoenstatita  | Rlg   | realgar           | Stp   | psilomelana    | Wlm   | wilmenita      |
| Kfs   | k feldespató        | Mlc   | malachita      | Opx   | ortopiroxeno   | Rds   | rodocrosita       | Sti   | estichovita    | Wnc   | winchita       |
| Khl   | k holandita         | Mng   | manganocit     | Osm   | osumilita      | Rdn   | rodonita          | Str   | estrontianita  | Wth   | witerita       |
| Kir   | kirshteinita        | Mrc   | marcacita      | Plg   | paligorskita   | Rct   | richterita        | Sud   | sudoita        | Wo    | wollastonita   |
| Krn   | kornepurina         | Mrg   | margarita      | Pg    | paragonito     | Rbk   | riebekita         | Syl   | silvita        | Wur   | wursita        |
| Kos   | kosmoclórita        | Mar   | marialita      | Prg   | pargasita      | Rwd   | ringwodita        | Tae   | taenita        | Wus   | wustita        |
| Kut   | kutnahorita         | Mei   | meionita       | Pct   | pectolita      | Rdr   | roederita         | Tlc   | talco          | Xtm   | xenotima       |
| Ky    | cianita             | Mll   | melilita       | Pn    | pentlandita    | Rsm   | rosmanita         | Trm   | taramita       | Xon   | xonolita       |
| Lm    | laurnita            | Mw    | merwinita      | Per   | periclasa      | Rt    | rutilo            | Tnt   | tenanita       | Yug   | yugawaralita   |
| Lmt   | laumontita          | Mes   | mesolita       | Prv   | perovskita     | Sdg   | sadanagita        | Tnr   | tenorita       | Zeo   | zeolita        |
| Lws   | lawsonita           | Mc    | microclina     | Ptl   | petalita       | Sa    | sandidina         | Tep   | tefroita       | Znw   | zinwaldita     |
| Lzl   | lazulita            | Mlr   | millerita      | PhA   | fase a         | Sap   | saponita          | Tr    | tetraedrita    | Zm    | zircón         |
| Lzr   | lazurita            | Mns   | minesotatita   | Ph    | fengita        | Spr   | safirina          | Thm   | tomsonita      | Zo    | zoicita        |
| Lpd   | lepidolita          | Mog   | moganita       | Php   | filipsita      | Scp   | escapolita        | Thr   | torita         |       |                |
| Lct   | leucita             | Mol   | molibdenita    | Phl   | flogopita      | Sch   | eschelita         | Tly   | tileita        |       |                |
| Lm    | limonita            | Mnz   | monacita       | Pmt   | piemontita     | Srl   | eschorlita        | Ttn   | titanita       |       |                |
| Liq   | liquido             | Mtc   | monticelita    | Pgt   | pigeonita      | Scb   | escreibersita     | Tpz   | topacio        |       |                |
| Lz    | lizardita           | Mnt   | montmorinol    | Pl    | palgioclasa g  | Sep   | sepiolita         | Tur   | turmalina      |       |                |
| Lo    | loengilita          | Mor   | mordenita      | Prh   | prehnita       | Ser   | sericita          | Tr    | tremolita      |       |                |
| Mgh   | magemita            | Mul   | mulita         | Prm   | prismatina     | Srp   | serpentina        | Trd   | tridimita      |       |                |
| Marf  | magnesioarfvedson   | Ms    | muscovita      | Psb   | pseudobrokita  | Sd    | siderita          | Tro   | troilita       |       |                |
| Mcar  | magnesioarfolita    | Ntr   | natrolita      | Pmp   | pumpelita      | Sil   | silimanita        | Ts    | tshermakita    |       |                |
| Mfr   | magnesioferrita     | Nph   | nefelina       | Py    | pirita         | Sme   | esmeclita         | Usp   | ulvospinel     |       |                |
| Mhs   | magnesiohanstinsit  | Nrb   | norbergita     | Pcl   | pirocloro      | Sdl   | sodalita          | Um    | uraninita      |       |                |
| Mhb   | magnesiohornblend   | Nsn   | noseanita      | Prp   | piropo         | Sps   | espesartina       | Uv    | uvarovita      |       |                |
| Mkt   | magnesiokatoforita  | Nyb   | nyboilita      | Pph   | pirofanita     | Sp    | esfalerita        | Vtr   | vaterita       |       |                |
| Mrbk  | magnesioriebekita   | Oi    | olivino        | Prl   | pirofilita     | Spn   | esfena (titanita) | Vrm   | vermiculita    |       |                |
| Msdg  | magnesiosadanagit   | Omp   | omfacita       | Pxf   | piroxferroita  | Spl   | espinel           | Spl   | vesubianita    |       |                |
| Mst   | magnesioestauroilit | Opl   | oapl           | Pxm   | piroxmangita   | Spd   | espodumena        | Wds   | wadsleita      |       |                |
| Mtm   | magnesiotaramita    | Opq   | min opaco      | Po    | pirotita       | Spu   | espurrita         | Wag   | wagnerita      |       |                |
| Mws   | magnesioiwustita    | Orp   | orpimentita    | Qnd   | candililita    | St    | estauroilita      | Wrk   | wairakita      |       |                |
| Mgs   | magnesita           | Oam   | ortoanfibol    | Qz    | cuarzo         | Stv   | estevensita       | Wav   | wavelita       |       |                |

## ANEXO E. MAPA DE UBICACIÓN DE MUESTRAS ORIENTADAS

Figura 61. Mapa de ubicación de muestras para la Falla La Perezosa.



**ANEXO F. DATOS DE LAS ESTRUCTURAS IDENTIFICADAS EN SECCIONES  
DELGADAS**

| Muestra | Plano     |     | Tipo de estructura                | Observaciones  |
|---------|-----------|-----|-----------------------------------|----------------|
|         | Direction | Dip |                                   |                |
| FP3P    | 229       | 76  | Estructura tipo Riedel            | Clay           |
|         | 223       | 78  | Estructura tipo Riedel            | Clay           |
|         | 37        | 76  | Fracturas tensionales             | FeOx           |
| FP3N    | 237       | 79  | Estructura tipo Riedel            | FeOx + Si      |
|         | 220       | 86  | Microbrecha                       | Qz + Fsp + Opq |
|         | 210       | 76  | Venas tensionales                 | Sulf + Si      |
|         | 059       | 72  | Libros rotados                    | Sulf + Si      |
|         | 190       | 76  | Estructura tipo Riedel            | Clay           |
| FP1P    | 335       | 79  | Fracturas tensionales             | Sulf           |
|         | 235       | 81  | Estructura tipo Riedel            | Si + FeOx      |
|         | 216       | 83  | Estructura tipo <i>Pull Apart</i> | Si             |
|         | 212       | 79  | Microbrecha                       | Qz + Fsp + Opq |
|         | 190       | 84  | Estructura tipo Riedel            | FeOx           |
|         | 225       | 86  | Estructura tipo Riedel            | FeOx           |
| FP1N    | 247       | 87  | Microbrecha                       | Qz + Fsp + Opq |
|         | 230       | 82  | Estructura tipo Riedel            | Si + FeOx      |