

**GENESIS DE LAS BRECHAS EN ROCAS SEDIMENTARIAS CRETÁDICAS
AFLORES EN EL SECTOR DE LA QUEBRADA ÓRGANOS (LÍMITE
ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SUCRE Y JESÚS MARÍA, DEPARTAMENTO DE
SANTANDER)**

LADY MARCELA GOMEZ GUALDRON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2011**

**GENESIS DE LAS BRECHAS EN ROCAS SEDIMENTARIAS CRETÁDICAS
AFLORES EN EL SECTOR DE LA QUEBRADA ÓRGANOS (LÍMITE
ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SUCRE Y JESÚS MARÍA, DEPARTAMENTO DE
SANTANDER)**

LADY MARCELA GOMEZ GUALDRON

Trabajo de Grado para optar al Título de Geóloga

DIRECTOR

LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA

Geólogo, Ph.D. en Petrología y Geoquímica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2011**

DEDICATORIA

A mi mamá por su amor, apoyo y sus consejos.

A mi papá por su ayuda y esfuerzo.

A mis hermanos Johanna y Sergio por alegrarme los días.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que todo al profesor Luis Carlos Mantilla por la oportunidad que me dio para desarrollar este proyecto, por toda su paciencia y por todas sus enseñanzas.

A Alex por su interés, por acompañarme y ayudarme durante todo el desarrollo del trabajo.

Al señor Edilberto Ardila y a su familia por toda su colaboración durante las labores de campo.

A Yuly Araque por su disposición y ayuda los análisis de laboratorio y por su amistad.

A mis compañeros Jesús Bernardo y Mónica Mendoza por su ayuda y por compartir conmigo sus ideas y conocimientos para el fortalecimiento del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 FASE 1 PRECAMPO	23
2.2 FASE 2 CAMPO	24
2.3 FASE 3 LABORATORIO.....	24
2.3.1 Análisis de Microscopía Óptica y Electrónica.....	24
2.3.2 Análisis de Difracción de Rayos X.....	28
2.3.3 Análisis de Reflectancia de Vitritina (Ro)	29
2.3.4 Análisis Microtermométricos en Inclusiones Fluidas (IF).....	30
2.3.5 Análisis Geoquímicos de elementos Mayores, Menores y Trazas (MMT)	32
3. GENERALIDADES DEL ÁREA DE TRABAJO	34
3.1 MUNICIPIO DE JESÚS MARÍA	35
3.2 MUNICIPIO DE SUCRE	36
4. ANTECEDENTES.....	38
4.1 PALEOGEOFRAFÍA Y PALEOTECTÓNICA	38
4.2 ESTRATIGRAFIA	46
4.2.1 Formación Cumbre (Kic)	48
4.2.2 Formación Rosablanca (Kir).....	49
4.2.3 Formación Ritoque (Kiri)	49
4.2.4 Formación Paja (Kip).....	50
4.3 ASPECTOS DE LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	51
5. RESULTADOS	52

5.1	INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES SATELITALES Y AÉREA.....	52
5.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS BRECHAS.....	52
5.3	CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE BRECHAS.....	53
5.4	GENERALIDADES SOBRE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR PARA LA DESCRIPCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DE LAS BRECHAS.....	54
5.5	CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE LAS BRECHAS.....	56
5.6	RESUMEN ENTORNO A LA DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE BRECHAS.....	60
5.7	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LAS BRECHAS.....	61
5.7.1	Brechas tipo I.....	62
5.7.2	Brechas tipo II.....	64
5.7.3	Brechas tipo III.....	67
5.8	DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LAS BRECHAS.....	69
5.8.1	Brechas tipo I.....	69
5.8.2	Brechas tipo II.....	70
5.8.3	Brechas tipo III.....	73
5.9	ANÁLISIS DE QUÍMICA MINERAL.....	77
5.9.1	Clasificación de los carbonatos.....	77
5.9.2	Clasificación de la clorita presente en el cemento de la brecha tipo II...80	80
5.10	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	84
5.10.1	Brechas tipo I.....	84
5.10.2	Shale negro.....	87
5.11	MADUREZ TERMAL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS COMPONENTES DE LAS BRECHAS.....	90
5.11.1	Resultados obtenidos.....	90
5.11.2	Interpretación de los resultados.....	93

5.12 ESTUDIO PETROGRÁFICO Y MICROTERMOMÉTRICO EN INCLUSIONES FLUIDAS (IF) EN LOS CEMENTOS DE LAS BRECHAS TIPO I Y TIPO III.....	94
5.12.1 Consideraciones preliminares sobre las inclusiones fluidas	94
5.12.2 Petrografía de las inclusiones fluidas.....	97
5.12.3 Resultados microtermométricos	106
5.13 CONCLUSIONES PRELIMINARES SOBRE LA TIPOLOGÍA DE BRECHAS, A PARTIR DE LA DESCRIPCIÓN DE SUS ATRIBUTOS.....	109
5.14 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	113
5.14.1 Consideraciones preliminares.....	113
5.14.2 Resultados de la fluorescencia de rayos x.....	115
5.15 ANÁLISIS DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE).....	118
6. CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE LAS BRECHAS ESTUDIADAS	121
7. IMPLICACIONES METALOGÉNICAS.....	122
8. CONCLUSIONES	124
9. RECOMENDACIONES.....	126
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. Diagrama ilustrativo de la estructura de la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo.	23
FIGURA 2. Microscopio de luz transmitida usado en la descripción petrográfica. .	25
FIGURA 3. Imagen de los EDAX de la microsonda electrónica de marca CAMECA SX100, utilizada en el presente estudio.	27
FIGURA 4. Aspecto general de todos los componentes de la Microsonda Electrónica CAMECA SX100	28
FIGURA 5. Aspecto general del Microscopio de luz reflejada Axitron ZEISS, utilizado durante el presente estudio.	30
FIGURA 6. Equipo de microtermometría de inclusiones fluidas utilizado durante el presente estudio.	32
FIGURA 7. Localización del área de estudio. Modificado de http://www.thefullwiki.org/Sucre,_Santander y http://en.wikipedia.org/wiki/Jesus_Mar%C3%ADA,_Santander	34
FIGURA 8. Vías principales de acceso a la zona de estudio desde Bucaramanga. Tomado de Google Earth 2010.	37
FIGURA 9. Geología de la zona de estudio y localización de las muestras a lo largo de la quebrada Órganos. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1984).	48
FIGURA 10. Corte geológico de la zona de estudio. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1978).	51
FIGURA 11. Mapa de localización de las brechas y su posición respecto a las estructuras de deformación más importantes del área. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1984).	53
FIGURA 12. Diagrama de clasificación genética de David Cooke (2005).	59

- FIGURA 13. Aspecto de la variedad de brechas tipo I: monomíctica con clastos de lodolita calcárea, angulares, en sectores con textura tipo jigsaw-fit, matriz de pirobitumen y cemento de carbonato, clorita y esfalerita.63
- FIGURA 14. Foto de detalle de la brecha tipo I: cemento-soportada, mostrando la distribución rotada de los clastos monomicticos de lodolita calcárea y la textura en escarpela.64
- FIGURA 15. Brechas Tipo I: cemento-soportadas por calcita, dolomita y clorita. A) Características texturales de las brechas, mostrando los clastos subangulares de lodolita calcárea con distribución jigsaw-fit a rotada, la textura en escarpela y un agregado amorfo de clorita color verde. B) Brecha con abundante cemento de dolomita II y calcita.64
- FIGURA 16. Brechas clasto soportadas tipo II por fragmentos de lodolita calcárea microcristalina con textura jigsaw-fit. A) Agregados granulares de esfalerita en los clastos de lodolita calcárea, asociados a la dolomía II.65
- FIGURA 17. Foto de detalle de las brechas clasto soportadas tipo II, mostrando la textura jigsaw-fit de los clastos. A) Textura en escarpela compuesta por una banda muy fina de dolomita gris (Dol. 1) y por una banda de dolomita blanca (Dol. 2) un poco más gruesa que la anterior. B) el espesor de la banda de dolomita gris (Dol. 1) es mayor que el espesor de la banda de dolomita blanca.66
- FIGURA 18. Fotografía en muestra de mano de las brechas tipo II. A) Pirobitumen cementado por dolomita blanca (II), calcita incolora y un agregado amorfo de clorita de color verde claro. B) Textura cockade con las dos bandas de dolomita. C) Textura cockade formada solo por la dolomita II.....66
- FIGURA 19. Brechas clasto soportadas tipo III. A) clastos de lodolita calcárea microcristalina con textura jigsaw-fit. B) Foto de detalle de la brecha A mostrando la distribución de la matriz de pirobitumen y del cemento. C) Brecha clasto soportada, los lugares con menor cantidad de cemento presentan clastos con distribución jigsaw-fit, mientras que donde hay más cantidad de cemento los clastos de lodolita presentan distribución rotada. También se puede observar el agregado de esfalerita de color amarillo en los clastos de lodolita. D) Agregado

granular de esfaleria color amarillo y brillo submetálico, asociado a la dolomita II.

E) Muestra de mano de la brecha LM18, mostrando la textura cockade y comb de las dolomitas, también se puede observar el color rojizo entre el contacto de la dolomita I con la dolomita II debido probablemente a oxidación de minerales metálicos precipitados en este contacto.68

FIGURA 20. Características petrográficas de la muestra LM2-1C (Brecha tipo I). A) Caliza microcristalina y dolomita I. Nícoles paralelos con aumento de 5x. B) Cristales de dolomita barroca orientados perpendicularmente al contacto con el clasto. Estos cristales recuerdan la textura Comb que presentan los cuarzos hidrotermales. Nícoles cruzados con aumento de 10x.....70

FIGURA 21. Agregado criptocristalino de clorita en el cemento mostrando a) colores de interferencia anómalos en nícoles cruzados con aumento de 5x y b) su color verde pálido en nícoles paralelos con aumento de 5x.....71

FIGURA 22. Características morfológicas del pirobitumen en las brechas tipo II. a) pirobitumen con bordes irregulares, en nícoles paralelo con aumento de 5x, b) calcita con pirobitumen de formas anhedrales y bordes curvos, en nícoles cruzados con aumento de 5x.72

FIGURA 23. Vena de calcita incolora con relieve moderado y textura radial que corta la masa fundamental de la brecha tipo II.72

FIGURA 24. Clorita del cemento de la brecha tipo II, en nícoles cruzados con aumento de 5x, rodeada por calcita y dolomita II.....73

FIGURA 25. Características petrográficas del clasto de lodolita calcárea en la muestra LM2-1C (Brecha tipo I). a) Caliza microcristalina y dolomita I. Nícoles paralelos con aumento de 5x. b) lodolita calcárea resaltando los cristales de cuarzo que se encuentran en los clastos. Nícoles cruzados con aumento de 5x. .74

FIGURA 26. Dolomitas de textura cockade. a) Cristal subhedral de dolomita con dos direcciones de exfoliación y extinción ondulante, en nícoles cruzados con aumento de 5x, b) Contacto oxidado de la dolomita gris y la dolomita blanca, en nícoles cruzados con aumento de 5x.....75

FIGURA 27. Cristales de cuarzo presentes en el cemento. A) cristal de cuarzo presente en la dolomita I, en nicoles cruzados con aumento de 10x. B) cristales de cuarzo presentes en la dolomita II.75

FIGURA 28. Matriz de pirobitumen de las brechas tipo III. a) pirobitumen de formas subhedrales con bordes rectos bien definidos, rodeado por calcita del cemento. En nicoles cruzados con aumento de 5x, b) pirobitumen muy fino mostrando una orientación preferencial con respecto a los granos más grandes, en nicoles paralelos con aumento de 5x.76

FIGURA 29. Masa fundamental de la brecha. a) Calcita del cemento en contacto con clorita amorfa en nicoles cruzados con aumento de 5x, b) Dolomita incolora de aspecto sucio y formas subhedrales en el cemento, junto con calcita y clorita de habito hojoso en el borde derecho del cristal de dolomita.76

FIGURA 30. Mosaico de Fotografías mostrando la variación textural y composicional de las brechas tipo II.77

FIGURA 31. Diagrama Ternario para los carbonatos del clasto de la brecha tipo II.78

FIGURA 32. Diagrama ternario para los carbonatos con textura *cockade* en el cemento de la brecha tipo II.....79

FIGURA 33. Diagrama ternario para los carbonatos del cemento de la brecha tipo II.....80

FIGURA 34. Imágenes del cemento de la sección LM23 perteneciente a la brecha tipo II. a) Imagen G4 de la microsonda mostrando la clorita en contacto con la calcita. b) imagen de la clorita en sección delgada, en nicoles cruzados con aumento de 10x.80

FIGURA 35. Diagrama para la clasificación de cloritas según Hey (1954).81

FIGURA 36. Difractograma de la clorita, reconocida en el cemento de la brecha de la muestra LM3-1 perteneciente a las brechas tipo I.81

FIGURA 37. Características del pirobitumen bajo luz reflejada mostrando el maceral de inertinita. A) inertinita de la variedad micrinita *Mi*. B) inertinita de la variedad fusinita *F* con algunas micrinitas alrededor.91

FIGURA 38. Características de la lodolita calcárea de los clastos de las brechas, bajo luz reflejada, mostrando el maceral de vitrina color gris.	92
FIGURA 39. Clasificación de las inclusiones fluidas según las fases presentes de Sheppard <i>et al.</i> (1985)	95
FIGURA 40. Clasificación de las inclusiones fluidas según su morfología. Tomado de Velasco (2004).	96
FIGURA 41. Distribución de las inclusiones fluidas. Tomado de Velasco (2004). .	97
FIGURA 42. Inclusiones primarias tipo II en la muestra LM5-1. A) inclusiones de formas regulares con grado de relleno de 0.91 y tamaños de 9.7 y 5.2 micras. b) inclusiones fluidas ovoides con factor de relleno de 0.89 y 0.95 de tamaño entre 7 y 8.7 micras. c) inclusiones fluidas ovoides	99
FIGURA 43. Asociación e inclusiones fluidas en la muestra LM2-2 que corresponde a las brechas tipo I. A) Inclusiones tipo I y tipo III, de forma tabular y ovoide respectivamente. B) Inclusiones tipo II de forma irregular, con grado de relleno de 0,75. C) Inclusión tipo VI, de forma irregular. d) Inclusión fluida tipo VI, posiblemente con hidrocarburos.	101
FIGURA 44. Inclusiones fluidas presentes en las dolomitas de la muestra LM18-IF. a) Inclusión fluida primaria tipo II de forma irregular con grado de relleno de 0,86. b) Inclusión fluida primaria de forma regular con grado de relleno de 0,68.	103
FIGURA 45. Asociación de inclusiones fluidas primarias en el cemento de calcita de la muestra LM18-IF. a) inclusión fluida tipo II de forma tabular, con grado de relleno de 0,86. B) inclusión tipo II de forma regular, con grado de relleno de 0,91. C) inclusión fluida tipo III de forma tabular, con grado de relleno de 0,57. D) Inclusión fluida tipo V de forma tabular.	103
FIGURA 46. Asociación de inclusiones fluidas tipo II y tipo III en las calcitas del cemento de la muestra LM2-2, perteneciente a las brechas tipo I.	105
FIGURA 47. Inclusiones Fluidas multifasicas tipo VI con presencia de hidrocarburos en la calcita del cemento de la muestra LM2-2, correspondiente a las brechas tipo I.	105



FIGURA 48. Asociación de inclusiones fluidas tipo II, IV y V en las calcitas del cemento de las brechas tipo III en la muestra LM18-IF. 106

FIGURA 49. Modelo de etapas de formación de las brechas objeto de estudio. .112

FIGURA 50. Aracnigramas normalizados al condrito C1, de la masa fundamental de la brecha (LM2-1); clasto de caliza (LM2-1C); shale (LM10-4). 119

LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. Estándares usados en la microsonda para los carbonatos y límites de detección en ppm.....	26
TABLA 2. Estándares usados en la microsonda para los silicatos y límites de detección en ppm.....	26
TABLA 3. Especificaciones técnicas del difractor de polvo PANalytical modelo X'PERT PRO MPD	29
TABLA 4. Datos obtenidos para la calibración del equipo.	31
TABLA 5. Resultados de la microsonda en el clasto de la brecha tipo II.	77
TABLA 6. Resultados de la microsonda en las dolomitas del cemento de la brecha tipo II.	78
TABLA 7. Composición química de la clorita del cemento de la brecha LM23 perteneciente a las brechas tipo II, representada en óxidos mayores.	83
TABLA 8. Cationes de la clorita del cemento de la brecha, empleados en los geotermómetros.....	83
TABLA 9. Resultados de la geotermometría de la clorita del cemento de la brecha LM23 perteneciente a la brecha tipo II.....	84
TABLA 10. Resultados de la difracción de rayos x del clasto lítico de lodolita calcárea en la muestra LM2-1C perteneciente a las brechas tipo I.	85
TABLA 11. Resultados de la difracción de rayos x en el cemento de la muestra LM3-1, perteneciente a las brechas tipo I.	86
TABLA 12. Resultados de la Difracción de Rayos X en la clorita del cemento de la muestra LM3-1, pertenecientes a las brechas tipo I.	87
TABLA 13. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-1 correspondiente al shale negro.....	87
TABLA 14. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-3 correspondiente al shale negro.....	88

TABLA 15. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-4 correspondiente al shale negro.....	88
TABLA 16. Parámetros estadísticos de los valores de reflectancia en el pirobitumen.	91
TABLA 17. Parámetros estadísticos de los valores de reflectancia en la caliza. ...	92
TABLA 18. Resumen de los datos microtermométricos y las características de las asociaciones de inclusiones fluidas de las muestras mencionadas anteriormente.	107
TABLA 19. Etapas de formación de las brechas.....	110
TABLA 20. Abundancia de los elementos en la corteza terrestre. Tomado de: http://www.webelements.com/periodicity/abundance_crust/	114
TABLA 21. Resultados de la fluorescencia de rayos x de óxidos mayores.	115
TABLA 22. Resultados de la fluorescencia de rayos x de los elementos.	116
TABLA 23. Concentraciones en ppm de Elementos de Tierras Raras	118
TABLA 24. Valores normalizados de las REE con respecto al condrito C1	118
TABLA 25. Valores de fraccionamiento de lo REE y de las anomalías.	119

RESUMEN

TÍTULO: GENESIS DE LAS BRECHAS EN ROCAS SEDIMENTARIAS CRETÁICAS AFLORES EN EL SECTOR DE LA QUEBRADA ÓRGANOS (LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SUCRE Y JESÚS MARÍA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER).*

AUTOR: GÓMEZ GUALDRÓN, Lady Marcela**

PALABRAS CLAVE: sedimentario, pirobitumen, hidrotermal, lodolita calcárea, carbonatos, brechas, fracturamiento.

Las brechas presentan clastos de lodolita calcárea, una matriz compuesta de pirobitumen y un cemento compuesto de carbonatos (dolomita y calcita), clorita y esfalerita.

El estudio de las inclusiones fluidas en los cementos de las brechas, sugieren que al menos tres diferentes pulsos de fluidos debieron estar presentes durante la formación y evolución de éstas. Un primer pulso de migración de fluidos, el cual presenta temperaturas por debajo de los 180°C. Un segundo pulso de migración de fluidos en torno a 240-290°C, el cual evidencia fenómenos de atrapamiento heterogéneo temporalmente tardío (en comparación con el anterior pulso hidrotermal), y un tercer pulso, no estudiado en éste trabajo, pero el cual parece contener una solución acuoso-salina, posiblemente con hidrocarburos?, la cual debió circular exclusivamente por planos de fractura.

El estudio textural, mineralógico, de inclusiones fluidas y de reflectancia de vitrinita en las brechas, permitió establecer que éstas registran las siguientes etapas asociadas a su formación y evolución: a) una primera etapa relacionada con un evento deformativo generador de brechas y acompañado de migración de hidrocarburos, durante el cual los clastos de la roca lodolítica no tuvieron un transporte significativo y debieron haber quedado embebidos en un material de composición asphaltítica (?). b) Una etapa posterior de mayor madurez termal del sistema rocoso en general, que favoreció la destrucción termal de los hidrocarburos y la formación del pirobitumen. c) Una etapa de inyección de un fluido acuoso-salino, posiblemente también simultáneo a otro evento deformativo, generó la fragmentación de la brecha existente (clastos de lodolita calcárea embebidos en pirobitumen). Este segundo evento de brechificación, favoreció el reajuste de los clastos de lodolita calcárea y la precipitación de los cementos calcáreos anteriormente mencionados. Las brechas estudiadas, pueden clasificarse desde el punto de vista de su génesis, como brechas de tipo tectónico-hidrotermal.

*Trabajo de grado, modalidad investigación

**Facultad de ingenierías físico-química. Escuela de Geología. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F.

ABSTRACT

TITLE: GENESIS OF BRECCIAS IN CRETACEOUS SEDIMENTARY ROCKS EXPOSED IN THE SECTOR DE LA QUEBRADA ÓRGANOS (BOUNDARY BETWEEN MUNICIPALITY SUCRE Y JESÚS MARÍA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER).*

AUTOR: GÓMEZ GUALDRÓN, Lady Marcela**

KEY WORDS: sedimentary, pirobitumen, hydrothermal, calcareous mudstone, carbonates, breccias, fracture.

The gaps studied reported as a lithology type mudstone clasts calcareous, matrix consists predominantly of pirobitumen and a cement composed of dolomite and calcite type carbonates. Specifically, these gaps have type phyllosilicates chlorite and sulfides sphalerite type.

The study of fluid inclusions in cements the gaps, suggest that at least three different pulses of fluid must be present during the formation and evolution of these. A first pulse of fluid migration, which has temperatures below 180°C .A second pulse of fluid migration around 240-290 °C, which is evidence of entrapment phenomenon heterogeneous temporarily delayed (compared with the previous hydrothermal pulse), and a third pulse, no studied in this work, but which seems to contain an aqueous-saline solution, possibly with hydrocarbons?, which must operate only by planes of fracture.

The study textural, mineralogical, fluid inclusion and vitrinite reflectance in the gaps under study established that they recorded the following steps associated with their formation and evolution: a) a first stage related to an event of gaps and distortions generated accompanied by migration of hydrocarbons, during which the rock mudstone clasts were not a significant transport (as suggested by the jigsaw-fit texture type) and should have been embedded in a material composition asphaltites (?). b) A later stage of thermal maturity of the system more rock in general, which should favor the thermal destruction of hydrocarbons and the formation of pirobitumen. c) A subsequent step of injecting an aqueous fluid, saline, possibly simultaneously with another event deformed, which led to the fragmentation of the breccia (calcareous mudstone clasts embedded in pirobitumen). This second brecciation event (fragmentation), favored greater pirobitumen partition and the adjustment of calcareous mudstone clasts. Also during this event, had precipitated calcareous cements mentioned above. Within these processes, the gaps studied, can be classified from the viewpoint of its origin and tectonic gaps hydrothermal type.

* Graduation Project, Research Modality.

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F.

INTRODUCCIÓN

El presente documento es el resultado de una tesis de pregrado 'Modalidad Investigación', desarrollada en el marco de los estudios geológicos que ejecuta el grupo de investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica (MINPETGEO); adscrito a la Escuela de Geología de la UIS; en diferentes sectores del departamento de Santander.

La investigación desarrollada en el presente trabajo, se centró principalmente en conocer la génesis de unas estructuras brechificadas, las cuales se presentan en las rocas sedimentarias Cretácicas entre los límites de la Formación Rosablanca y la Formación Paja, aflorantes en el sector de la Quebrada Órganos (FIGURA 9), la cual sirve de límite territorial entre los municipios de Sucre y Jesús María (Provincia de Vélez, Departamento de Santander).

Para establecer la génesis de las brechas antes mencionadas, se realizaron análisis texturales y mineralógicos (mediante microscopía óptica y electrónica) de los diferentes componentes de las brechas (clastos, matriz, cemento), así como análisis geoquímicos y de inclusiones fluidas, entre otros.

El propósito de este estudio, además de conocer la génesis de éstas brechas, es contribuir igualmente a establecer si los procesos involucrados en la formación de éstas estructuras, pudieron tener condiciones favorables para activar posibles procesos de interés metalogénico.

1.OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la génesis de las brechas en rocas sedimentarias localizadas hacia el límite entre las formaciones Cretácicas Rosablanca y Paja, aflorantes en el sector de la quebrada Órganos (límite entre los municipios de Sucre y Jesús María, Departamento de Santander)

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis de la información geológica existente sobre el sector de estudio, en aras de contextualizar geológicamente el problema objeto de investigación.
- Documentar los rasgos texturales asociados a las brechas presentes en el sector de la quebrada Órganos.
- Realizar un estudio Mineralógico y Petrográfico de los diferentes componentes de las brechas (clastos, matriz, cemento), apoyados en análisis microscópicos (óptica y electrónica) y de Difracción de Rayos X (DRX).
- Realizar análisis de Inclusiones fluidas (IF) en los cementos de las brechas, en aras de establecer las características físico-químicas de los paleofluidos asociados a la formación de éstas.
- Realizar un análisis de reflectancia de vitrinita (Ro), en aras de establecer la madurez termal de los componentes orgánicos presentes en las brechas.
- Establecer a la luz de los nuevos datos, las condiciones de formación (génesis) de las brechas objeto de estudio.

2. METODOLOGÍA

Para poder alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, se estructuró una metodología de trabajo (FIGURA 1), la cual consistió en cuatro fases: a) Una fase de precampo, durante la cual se colectó y analizó la información disponible; b) Una fase de campo, para fines de reconocimiento y muestreo de las diferentes litologías objeto de estudio; c) Fase de Laboratorio; d) Fase de interpretación de resultados y elaboración del informe del informe final.

Debido a la importancia en la obtención de información y de nuevos datos, a continuación se describen las fases Precampo, Campo y Laboratorio.



FIGURA 1. Diagrama ilustrativo de la estructura de la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo.

2.1 FASE 1 PRECAMPO

En esta fase se realizó la recopilación de la información de la geología regional y local de la plancha 170. Se estableció la metodología para la recolección de las muestras. Se adquirieron las fotografías aéreas de los vuelos C-2215 las fotos No. 89, 90 y 91 y del vuelo C-2378 las fotos No. 13 y 14 en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi con las cuales se realizó la interpretación de las fallas, pliegues,

lineamientos y posibles tipos de rocas por medio del programa Ilwis 3.6 y Google Earth.

2.2 FASE 2 CAMPO

La labor de campo se desarrolló en el límite entre el municipio de Sucre y Jesús María, en donde se localiza la Quebrada Órganos. Un total de 30 muestras fueron colectadas durante el trabajo de campo. Cada estación realizada, fue documentada siguiendo un protocolo establecido previamente, el cual implica: a) Establecer el código de la estación y la fecha. b) Toma de Coordenadas X, Y, Z (georeferenciación del punto de muestreo), utilizando un GPS marca ETrex Venture HC. c) Localización del punto con respecto a las carreteras, puentes, quebradas entre otros. d) La geometría de la brecha. e) Identificar cuáles y que tamaños presentan los fragmentos. f) Descripción de la litología de las brechas en cuanto a los clastos, matriz, cemento, oquedades y alteración de algunos de los componentes. g) Identificar las estructuras presentes en el área y medición de datos estructurales por medio de una brújula marca Brunton. h) Toma de la muestra utilizando un martillo de geólogo marca Estwing, y designación del código de ésta. i) Toma de fotografías de afloramientos, de muestra de mano y fotografías de detalle.

2.3 FASE 3 LABORATORIO

Durante la fase de laboratorio (FIGURA1), se realizaron los siguientes análisis:

2.3.1 Análisis de Microscopía Óptica y Electrónica

Estos análisis fueron realizados para identificar y caracterizar las fases minerales y los rasgos petrográficos en general, presentes en las muestras estudiadas.

La descripción macroscópica de las muestras se realizó utilizando una lupa marca *Five Elements*.

Durante el estudio de las láminas delgadas, se utilizó un microscopio de luz transmitida marca NIKON ECLIPSE E200 50/POL, con cámara marca *Digital Sight* DS-SM adaptada y una pantalla *Digital Sight* DS-L1, disponible en el laboratorio de microscopía óptica de la Escuela de Geología (FIGURA 2).



FIGURA 2. Microscopio de luz transmitida usado en la descripción petrográfica.

Para el análisis de química mineral se elaboraron secciones delgadas pulidas, luego de esto se marcaron los minerales a analizar encerrándolos con un círculo, la marcación se hace para facilitar la ubicación de los puntos. Luego de esto se cubre la sección con grafito para que los minerales sean posteriormente analizados con los rayos de la microsonda. Para este estudio se empleó un microscopio electrónico marca CAMECA SX100 (FIGURA 3) del departamento de geología de la universidad de California (Sede Santa Bárbara, USA). La sonda está equipada con cinco espectrómetros de longitud de onda dispersiva. El equipo

está automatizado basado en el software EPMA v.8.47 (FIGURA 4) para la sonda. La resolución espacial para el análisis cuantitativo fue del orden de 1 a 3 micras y la resolución espacial para las imágenes de electrones secundarios y retro dispersados fue de aproximadamente 100 a 200 nanómetros (según el voltaje de aceleración, la composición de la corriente del haz y la muestra). Para la calibración del equipo, se utilizaron los estándares abajo:

TABLA 1. Estándares usados en la microsonda para los carbonatos y límites de detección en ppm.

ESTANDARES PARA CARBONATOS	LÍMITES DE DETECCIÓN (ppm)
Stroncianita para Sr $L\alpha$	0,040256
Calcita para Ca $K\alpha$	0,28911
Siderita para Fe $K\alpha$	0,068945
Rodocrosita para Mn $K\alpha$	0,083588
Magnesita para Mg $K\alpha$	0,008208
Witherite para Ba $L\alpha$	0,061123

TABLA 2. Estándares usados en la microsonda para los silicatos y límites de detección en ppm.

ESTANDARES PARA SILICATOS	LÍMITES DE DETECCIÓN (ppm)
Albita para Na $K\alpha$	0,035278
Diopsido para Mg $K\alpha$	0,02254
Ortoclasa para K	0,0224
Cromita para Cr $K\alpha$	0,27565
MnO Sintetico para Mn $K\alpha$	0,101869
Magnetita para Fe $K\alpha$	0,150576
Anortita (Grass Valley) para Al	0,010199
Ortoclasa para Si $K\alpha$	0,047875
Diopsido para Ca $K\alpha$	0,020242
TiO ₂ sintetico para Ti $K\alpha$	0,025333



FIGURA 3. Imagen de los EDAX de la microsonda electrónica de marca CAMECA SX100, utilizada en el presente estudio.



FIGURA 4. Aspecto general de todos los componentes de la Microsonda Electrónica CAMECA SX100

2.3.2 Análisis de Difracción de Rayos X.

Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de Difracción de Rayos X (DRX) de la Escuela de Química de la UIS, con el propósito de identificar las fases minerales presentes en las muestras.

El equipo utilizado para tal fin fue un difractómetro de polvo marca PANalytical modelo X'PERT PRO MPD. Las especificaciones técnicas del equipo se muestran en la TABLA 3. Para el análisis cualitativo se realizó una comparación del perfil observado en las muestras con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide*, -100mesh, 99%. *Corundum*, α -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

Las muestras analizadas mediante DRX, se prepararon de la siguiente manera: a) se seleccionaron las muestras más representativas para ser analizadas. b) se les realizó una descripción petrográfica para identificar los posibles minerales presentes. c) Se trituraron las muestras en la trituradora de mandíbula marca RETSCH tipo BB200 SCHWERMETALLFREI, ubicada en el laboratorio de Trituración, Molienda y Tamizado de la Escuela de Geología.

TABLA 3. Especificaciones técnicas del difractómetro de polvo PANalytical modelo X'PERT PRO MPD

Voltaje	45(kV)
Corriente	40(mA)
Rendijas Soller	0.04 rad (Incidencia y Difracción)
Rendijas Fijas	1/4 y 1/8 (Incidencia) y 1/4 (Difracción)
Muestreo	0.013° 2theta
Rango de Medición	4-70° 2theta
Radiación	CuK α 1
Filtro	Ni
Detector	de estado sólido referencia PIXcel con 255 canales activos
Tipo de barrido	Continuo

2.3.3 Análisis de Reflectancia de Vitrinita (Ro)

Los análisis de reflectancia de vitrinita se realizaron para determinar la madurez termal de los componentes orgánicos presentes en las muestras. Para esto se empleó un Microscopio de luz reflejada marca Axitron ZEISS con objetivo de 50x (FIGURA 5), que se encuentra en el laboratorio Gots de la UIS (Sede de Guatiguará, Piedecuesta). Estos análisis fueron realizados a los clastos de pirobitumen y a los clastos de lodolita calcáreas de las brechas. Para llevar a cabo este estudio se debió separar los clastos de pirobitumen y de caliza del resto del material brechificado, cada uno de los materiales fueron triturados en la en la trituradora de mandíbula marca RETSCH tipo BB200 SCHWERMETALLFREI y en el mortero de Agatha RM 100 RETSCH, para posteriormente tamizarlos en malla 20. El producto final es una pastilla de aproximadamente 1 centímetro de espesor que fue pulida. Luego de esto se le agrega aceite inmersor 518n marca Zeiss en la superficie pulida para ser luego ser observada en el microscopio.



FIGURA 5. Aspecto general del Microscopio de luz reflejada Axitron ZEISS, utilizado durante el presente estudio.

2.3.4 Análisis Microtermométricos en Inclusiones Fluidas (IF)

La microtermometría de inclusiones fluidas se realizó con el fin de conocer la temperatura y composición de los paleofluidos que participaron en la formación de las brechas. Para esto se empleó un microscopio óptico marca NIKON elipse 50i, con una platina calentadora-crioscópica THMS 600 marca LINKAM adaptada, que se encuentra en el laboratorio de geología de la UIS (Sede de Guatiguará, Piedecuesta), el equipo fue calibrado con inclusiones fluidas sintéticas de propiedades físicoquímicas conocidas como lo son el agua pura y el CO₂ (TABLA

4). Para la calibración de la temperatura eutéctica se usó la inclusión sintética de CO_2 , y para la calibración de la temperatura de fusión y la temperatura de homogenización se usó la inclusión sintética de H_2O . Las inclusiones fueron enfriadas hasta -180°C y calentadas hasta 400°C en forma gradual para conocer sus respectivas temperaturas de primera fusión (T_e), temperatura de fusión final del hielo (T_f), temperatura de fusión del sólido para las inclusiones sólidas (T_s) y la temperatura de homogenización (T_h).

Se elaboraron secciones delgadas doblemente pulidas del material de cemento de las brechas que en este caso es calcita y dolomita. Posterior a esto se realizó la petrografía de inclusiones fluidas para identificar la asociación de inclusiones fluidas presentes en los carbonatos, sus relaciones morfológicas, la relación de sus fases y las relaciones temporales. Las asociaciones de inclusiones fluidas fueron calentadas y enfriadas gradualmente para obtener cada una de las temperaturas mencionadas anteriormente.

TABLA 4. Datos obtenidos para la calibración del equipo.

	T° teorica	T° obtenida	Correccion
T° Eutectica de CO_2	-56,57	-56,4	-0,17
T° Fusion H_2O	0,01	0,1	-0,09
T° Homogenización H_2O	373,95	371,8	2,15

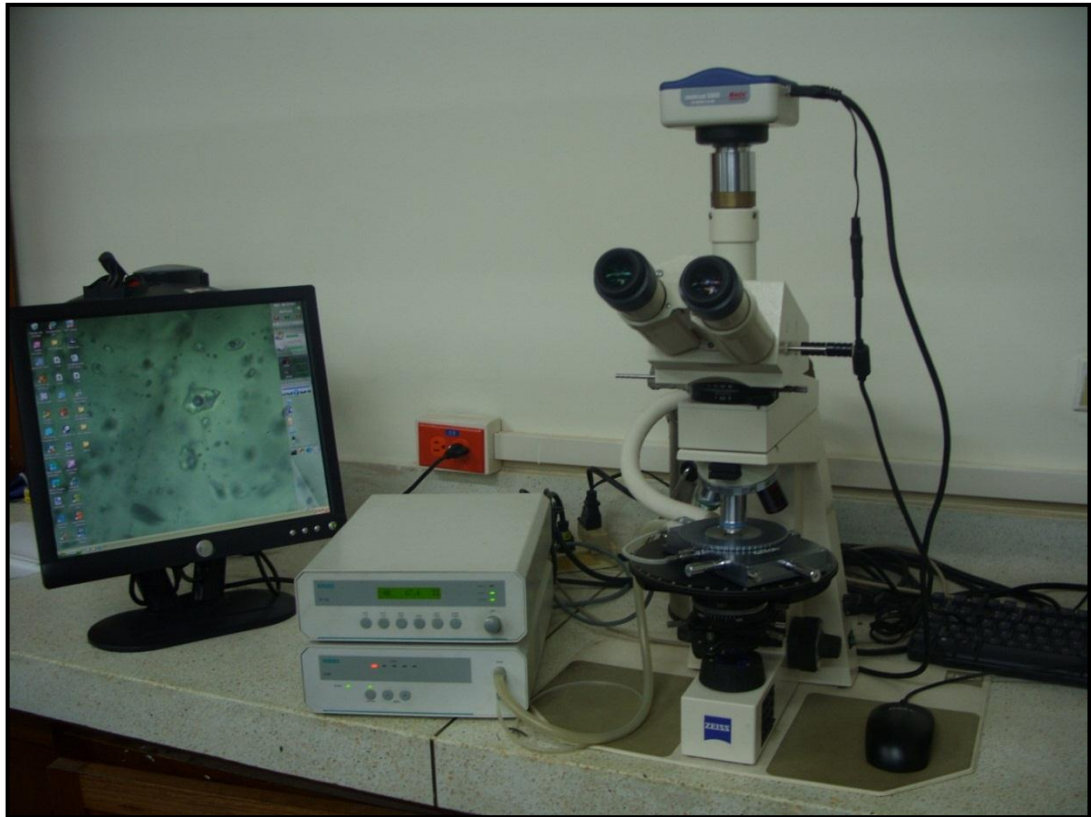


FIGURA 6. Equipo de microtermometría de inclusiones fluidas utilizado durante el presente estudio.

2.3.5 Análisis Geoquímicos de elementos Mayores, Menores y Trazas (MMT)

Estos análisis se llevaron a cabo en *ALS Laboratory Group* en Funza Cundinamarca, con el propósito de determinar cualitativa y cuantitativamente los elementos mayores menores y trazas. Estos análisis se realizaron a seis muestras las cuales pasaron por un proceso de trituración fina hasta una granulometría de 2 milímetros, posteriormente se parte y pulveriza la muestra hasta alcanzar una granulometría de 75 micras. Para el análisis de las muestras se realizaron tres procedimientos que fueron: a) lixiviación con agua regia (mezcla de ácido nítrico y clorhídrico), el resultado de esta lixiviación se analizó mediante un espectrómetro de masas con fuente de plasma acoplado (ICP-MS). Esta técnica fue usada para

analizar los elementos traza, b) digestión ácida de H_2SO_4 -HF para el óxido ferroso y c) la fusión de la muestra en borato de litio se realizó para los elementos mayores y los elementos de tierras raras. Para el caso de los elementos mayores el material fundido fue posteriormente analizado por fluorescencia de rayos X (XRF) y para las REE se usó un espectrómetro de masas con fuente de plasma acoplado (ICP-MS).

3. GENERALIDADES DEL ÁREA DE TRABAJO

El área de estudio (FIGURA 7 y FIGURA 9) abarca aproximadamente un polígono de unos 54000Km², localizado a lo largo de la Quebrada Órganos, la cual es límite territorial entre los municipios de Jesús María y Sucre (Cordillera Oriental de Colombia).

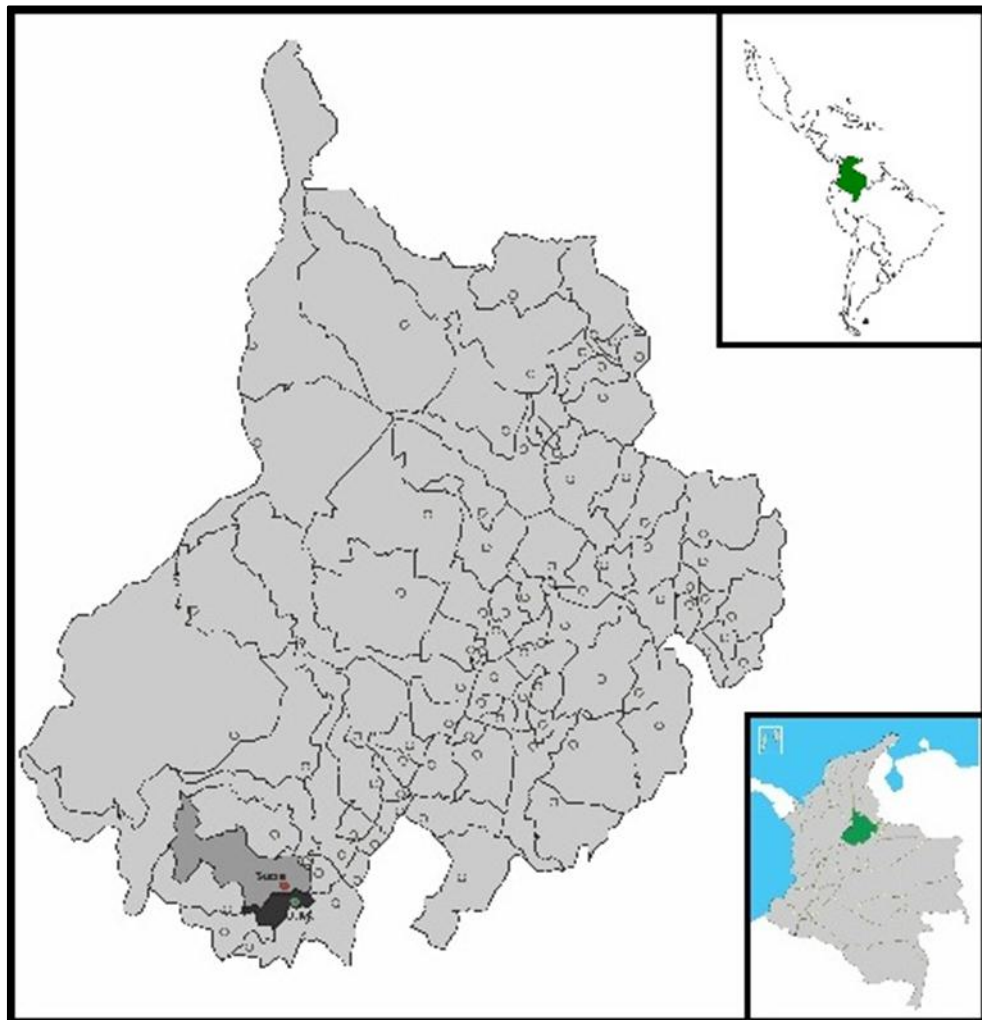


FIGURA 7. Localización del área de estudio. Modificado de
http://www.thefullwiki.org/Sucre,_Santander de
http://en.wikipedia.org/wiki/Jesus_Mar%C3%ADA,_Santander y

3.1 MUNICIPIO DE JESÚS MARÍA

El municipio de Jesús María según la información disponible en su sitio web (www.jesusmaria-santander.gov.co), se encuentra ubicado hacia el suroccidente del departamento de Santander en la provincia de Vélez, a 262 km de Bucaramanga (FIGURA 8). Limita territorialmente por el norte con el municipio de Sucre, por el Oriente con los municipios Guavatá y Puente Nacional, al Occidente con los municipios Florián y la Belleza y al Sur con el municipio de Albania. Tiene una extensión total de 72.47 Km². La altitud de la cabecera municipal está a 1850 m.s.n.m. y su temperatura media es 17.7°C.

Los principales ríos que conforman la red hidrográfica de la zona de Jesús María son el Suárez y el Minero, los cuales pertenecen a la Gran Cuenca del Magdalena. La mayor parte del territorio incluida la quebrada Órganos drena hacia la subcuenca de la quebrada Cuchinero y el río Valle, los cuales drenan en sentido suroriente y nororiente respectivamente en donde se unen para conformar el río Cuchinero afluente directo del río Suárez; el territorio restante drena en dirección occidente-oriente a través de las quebradas Agua Fría y Agua Blanca hacia la quebrada la Venta y el río Pradera afluentes del río Minero.

En el extremo noroccidental del municipio de Jesús María, hacia las partes más altas entre los 2.000 a 2.600 m.s.n.m., el paisaje de montaña en clima frío y húmedo, comprende un relieve que varía de moderadamente ondulado, hasta muy quebrado con pendientes entre 12 y 75%. Allí se encuentran subpaisajes de lomas, filos y vigas, subpaisajes de lomas bajas, lomas cársticas y subpaisajes de vallecito. En el paisaje de montaña de clima medio húmedo, se encuentran subpaisajes de lomas altas y bajas, de lomas altas y medias, subpaisajes de filas y vigas y unidades de conos coluvio-aluviales.

3.2 MUNICIPIO DE SUCRE

El municipio de Sucre según la información disponible en su sitio web (www.sucresantander.gov.co), se encuentra ubicado al sur del Departamento de Santander, en la provincia de Vélez a 280 Km de Bucaramanga y 320 Km de Bogotá, se comunica también con los municipios Barbosa, Jesús María, Puente Nacional, Bolívar, Guavatá, La Belleza, La Pradera y Florián (FIGURA 8). La Cabecera municipal se encuentra localizada geográficamente a 5°55' latitud norte y 73°49' de longitud al oeste con respecto al meridiano de Greenwich. El municipio limita territorialmente de acuerdo con la división política administrativa del Departamento por el Norte con los municipios del Peñón y Bolívar, por el Occidente con Bolívar, por el sur con La Belleza y Jesús María y al Oriente con el municipio de Guavatá. Tiene una extensión total de 606,95 Km² y la temperatura media es 19° C.

La red hidrográfica del municipio drena hacia dos importantes vertientes del departamento, en primer lugar la parte centro y occidente del municipio drena hacia la Cuenca del Río Minero, y la parte oriental hacia el Río Suárez.

El Municipio de Sucre cuenta con cuatro formaciones vegetales distribuidas en un amplio rango altitudinal desde los 150 a 3.000 m.s.n.m. aproximadamente que son

- La Selva Inferior la cual se extiende desde 150 hasta 1.200 m.s.n.m, fisiográficamente ocupa las áreas de valle y cuchillas con pendientes fuertes, su temperatura oscila entre 22 °C y 28 °C, son áreas de alta humedad debido a la presencia de los Ríos Minero y Cuchinero (Cuenca del Río Suárez), con una gran cantidad de afluentes que se escurren entre los valles y dan origen a precipitaciones casi permanentes.
- La Selva Subandina se extiende desde 1.200 hasta 2.000 m.s.n.m aproximadamente, la temperatura media anual a la cual se desarrolla esta formación oscila entre 16 a 22°C, con precipitaciones promedio anual de 2.750 mm.
- La Selva Andina va desde 2.000 hasta 2.600 m.s.n.m, la temperatura media anual a la cual se desarrolla esta formación es de 14°C a 16°C, la precipitación es de 2.250 a 2.500 mm promedio anual. Fisiográficamente la

vegetación de ésta área se desarrolla sobre paisajes con abundantes dolinas, escarpes verticales y superficies estructurales, estos cuerpos de roca albergan los mayores acuíferos por su estructura y porosidad, su fisiografía consta principalmente de colinas y en las partes altas presenta grandes escarpes y resaltos de paredes verticales. d) El Bosque Altoandino se extiende desde 2.600 a 3.000 m.s.n.m, la temperatura media anual a la cual se desarrolla esta formación es de 6 a 14 °C y los valores de precipitación varían entre 2.250 mm. Se desarrollan sobre paisajes kársticos y con abundantes dolinas.

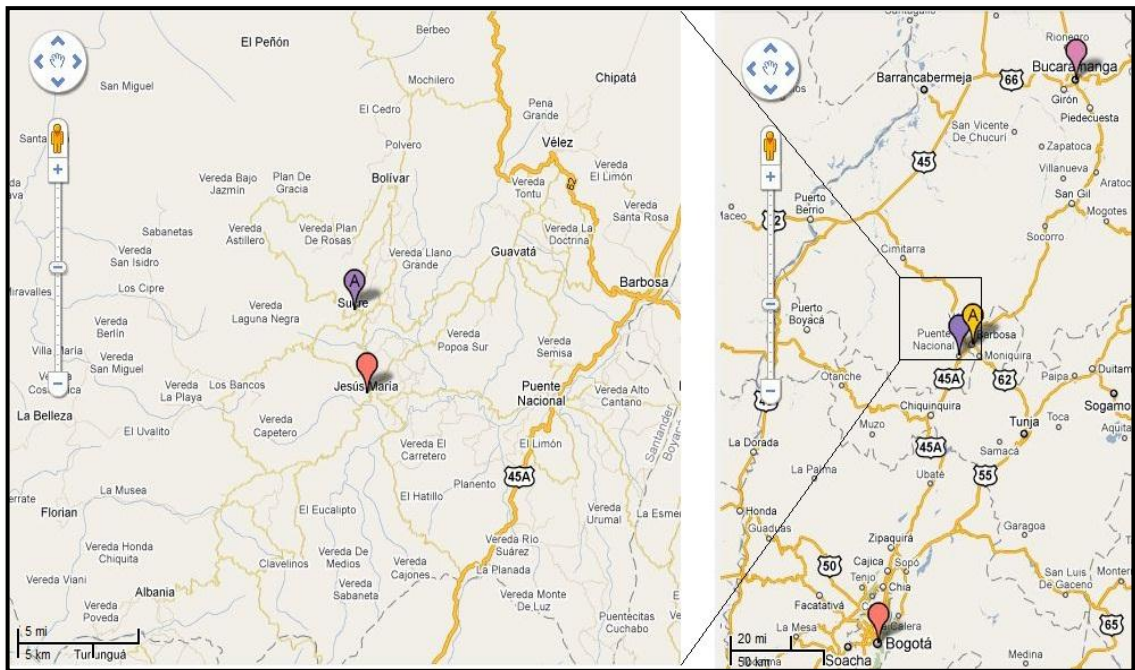


FIGURA 8. Vías principales de acceso a la zona de estudio desde Bucaramanga. Tomado de Google Earth 2010.

4. ANTECEDENTES

Con el propósito de contextualizar la geología del área de estudio, a continuación se resumen aquellos aspectos geológicos relacionados con la geología regional y local, tanto en sus rasgos paleogeográficos y paleotectónicos, así como de sus aspectos estratigráficos y estructurales, realizados en el marco de estudios geológicos anteriores.

4.1 PALEOGEOFRAFÍA Y PALEOTECTÓNICA

Los andes septentrionales constituyen actualmente un pequeño bloque en cuña, colisionado por las placas Nazca, Caribe y Suramericana. Estas grandes placas convergen oblicuamente hacia este bloque y buscan subducir por debajo de él (Toussaint, 1999). A continuación se presentará un resumen de la evolución geológica de Colombia elaborada por Toussaint (1993) y Villamil (1999), enfocada principalmente en el oriente colombiano. En la evolución se mencionará como bloque autóctono lo que conocemos como los llanos orientales y el escudo de Guyana, el bloque chibcha corresponde a lo que en la actualidad conocemos como la Cordillera Oriental, los Terrenos Tahami y Calima pertenecen a la Cordillera Central y el Terreno Cuna sería lo que se conoce como la Cordillera Occidental Colombiana.

En el Cámbrico tuvo lugar la orogenia caledoniana, metamorfoseando el Grupo Quetame, la formación Silgara, la serie de Perijá y la Cristalina. En el terreno Chibcha y produjo magmatismo postectónico en el Macizo de Santander, Floresta y Quetame, mientras que el cámbrico en el Bloque Autóctono solo se reconoce en algunos lugares del Meta, esto se debió probablemente a que el terreno Chibcha se encontraba ubicado más cerca del núcleo de la orogenia caledoniana y el Bloque Autóctono estaba más alejado. Desde el Ordovícico inferior hasta el medio el mar transgredió en el Bloque Autóctono y el Terreno Chibcha. Después del

evento caledoniano tanto el Bloque Autóctono como el Terreno Chibcha fueron erodados y en el Devónico el mar trasgredió nuevamente el terreno chibcha desde el norte depositando los sedimentos epicontinentales de las Areniscas de Gutiérrez, mientras que en el bloque autóctono hay ausencia de sedimentación hasta el cretácico debido probablemente a que este haya estado en una posición elevada desde el Silúrico hasta el Jurásico. Esta sedimentación se termina en el Devónico superior, seguida por la orogenia acadiana que tuvo un impacto muy leve en el Terreno Chibcha formando plegamientos muy abiertos, mientras que en el Terreno Tahami se producen unidades tectonometamórficas como el complejo de Puqui. Esto indica posiblemente que el Terreno Chibcha se encontraba en una posición de antepaís mientras que el Tahami estaba en el núcleo de la orogenia. Al final del Carbonífero inferior el mar transgredió nuevamente el Terreno Chibcha y fue retirado por la orogenia Hercínica que se dio en este periodo.

Entre el Pérmico tardío y el Jurásico tardío el Terreno Chibcha se une al Bloque Autóctono por medio de los movimientos de rumbo dextrales de la megafalla Guaicaramo formando así lo que se conoce como el Oriente Colombiano.

Con el principio de la disgregación de Pangea al final del Jurásico, el Oriente Colombiano fue sometido a un gran evento distensivo, generando una red de fallas normales (Bucaramanga, Suarez, Salinas entre otras) que facilitaron los movimientos verticales de los bloques y formaron cuencas relativamente cerradas. Este fallamiento permitió la ascensión de magmas variados produciendo cadenas de volcanes alineados y flujos de lava que se interstratificaban con los sedimentos. La variación de magmas alcalinos y calcoalcalinos que se encuentran en la Cordillera Oriental hace pensar no solamente en un ambiente de Rift continental generado por la distensión sino en un ambiente de zona de subducción ubicada a cierta distancia al occidente colombiano; hasta principios del Cretácico la depositación en algunos lugares era de tipo continental fluvio-lacustre pero en otras como la cuenca de Bogotá y el Valle Medio del Magdalena la sedimentación

ya era marina (Formación Rosablanca) y en el Hauteriviano la sedimentación se volvió más profunda con la depositación de la Formación Paja. La transgresión marina se extendió hacia la parte media del Valle del Cesar durante el Barremiano, en el Aptiano el macizo de Santander que había estado en una posición sobre el nivel del mar fue sumergido, el mar también llegó hasta el Tolima, Huila y Putumayo. En el Albiano la totalidad del Oriente Andino estaba cubierto por el mar epicontinental e invadió la zona occidental de los Llanos Orientales. El mar se profundizó más y se depositaron las formaciones La Luna, Churuvita, San Rafael y Conejo. Aparecieron niveles de fosfatos indicando un clima tropical cálido con aporte débil de sedimentos y niveles de evaporitas en Zipaquira, la parte superior del Grupo Villeta y en la Formación Chipaque. El mar Cretácico alcanzó la mayor superficie de inundación durante el Santoniano y los sedimentos que se depositaron desde el Jurásico hasta el Santoniano no presentan ninguna discordancia. Según Fabre (1984), el proceso de distensión produjo un adelgazamiento de la corteza y en el Magdalena medio de la litosfera, esto favoreció el flujo de calor implicando un gradiente geotérmico de 40°C/Km. La transgresión marina desde el Albiano parece estar relacionada con una elevación general del nivel del mar en el mundo, producida por la formación de una súper pluma y varios puntos calientes en el Océano Pacífico. Durante el Campaniano el mar se retiró de los Llanos Orientales y en el Maastrichtiano de la cuenca de Bogotá, pero en el Valle Medio Continuo una sedimentación marina con la Formación Umir, seguida por depósitos lagunares deltaicos de la Formación Lisama del Paleoceno.

Desde el Maastrichtiano tardío y durante el Paleoceno los sedimentos de tipo molásico que se depositaron en gran parte de los Llanos, las cuencas de Boyacá y de Bogotá y en el Valle del Río Magdalena son de ambiente continental, estos sedimentos fueron aportados por la parte noroccidental del cratón amazónico y la cordillera central (Tahami-Calima). Sin embargo en el Bloque Andino los depósitos marinos están prácticamente limitados a la Serranía de Perijá, las llanuras del

caribe y la región occidental de la Cordillera Central, la Cuenca de Maracaibo en Venezuela quedó todavía cubierta por el mar produciéndose, desde allí, pequeñas transgresiones y regresiones locales que afectaron la región septentrional de los Llanos Orientales y la parte oriental del Macizo del Santander.

Esta rápida regresión puede estar relacionada con el enfriamiento de la litosfera del Océano Pacífico después de la superpluma. El Terreno Calima fue amalgamado al Tahami durante el Cretácico, grandes fallas como la de Palestina y Romeral recortan el terreno compuesto (Tahami y Calima). Esto parece estar relacionado con el movimiento dextral del Domino Caribe con relación al noroeste de Suramérica. El Terreno Tahami no se encontraba al occidente del oriente colombiano durante el principio del Mesozoico sino que se encontraba más al sur y fue traído por medio de los movimientos dextrales de la megafalla de Otu-pericos. Anderson, Schmidt (1983) y Dercourt (1990), postulan que al occidente y noroccidente se encontraban los bloques Maya y Chortis que ahora pertenecen a Centroamérica. La acreción del Terreno Gorgona y la del Terreno Cuna al Bloque Andino tuvieron lugar respectivamente a principios y a mediados del Mioceno siendo estas colisiones en gran parte responsables de la orogenia Andina y están marcadas por un magmatismo básico y ultrabásico. Esta colisión culminó durante el Plioceno.

En el departamento de Boyacá un volcanismo Mio-Plioceno de composición andesítico a riolítico se desarrolló localmente con derrames de lavas y erupciones piroclásticas, este volcanismo parece relacionarse con la subducción continental de la placa Suramericana por debajo de los Andes Colombianos. Las numerosas fuentes termales de la región de Paipa están relacionadas con este volcanismo y algunos autores emitieron la hipótesis según la cual la movilización de fluidos hidrotermales que habría permitido la génesis de las esmeraldas de Muzo está conectada con este evento magmático.

La tectogénesis Mio-Pliocena se debe probablemente a un cambio drástico en los movimientos relativos de las Placas Nazca, Caribe y Suramericana las cuales convergen hacia los Andes Colombianos. Así, en la tectogénesis Andina no solo se incluye la mayor parte de los plegamientos y fallamientos en la Cordillera Oriental, en el borde Llanero y en las cuencas de los Ríos Magdalena y Cauca, sino que también las estructuras colisionales entre el Terreno Cuna y el Bloque Andino, la formación del cinturón plegado sur-caribe, el cabalgamiento y levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta y de la Serranía de Perijá, el cambio en el sentido de los movimientos a lo largo del sistema Cauca - Romeral y de los grandes desplazamientos de rumbo de las megafallas de Oca y Santa Marta-Bucaramanga entre otros importantes fenómenos regionales hacen parte de ella.

Para Villamil (1999), el eje central de depositación sobre la cuenca generada durante el Cretácico descrita anteriormente, fue migrando hacia el este debido al levantamiento progresivo de la Cordillera Central, los cambios en el espacio de acomodación, fueron causados por el levantamiento tectónico, el llenado de las cuencas y los cambios en el nivel del mar. En el Oligoceno este eje de depositación fue dividido en dos por la inversión tectónica del depocentro que trajo como consecuencia el levantamiento de la Cordillera Oriental Colombiana.

El levantamiento de la Cordillera Central del Campaniano al Mastrichtiano, está representado al oeste por los sedimentos clásticos de grano grueso de la Formación El cobre y La Tabla.

En el Campaniano el eje de depositación estaba localizado al oeste del Valle del Magdalena. Al final del Campaniano la cuenca depocentral fue influenciada por fuertes corrientes marinas de surgencia que alcanzaron su punto máximo en el Santoniano causando la depositación de chert blanco de aguas someras que se llamó Formación Plaeners.

El levantamiento continuo de la cordillera central determinó la configuración de la cuenca epicontinental Mastrichtiana y desplazó la posición del eje central de depositación del Campaniano que se encontraba al oeste Valle del Magdalena hacia el piedemonte oeste de la Cordillera Oriental. El eje central de depositación continuó desplazándose a lo largo del Mastrichtiano, moviéndose gradualmente hacia el centro de la Cordillera Oriental y se extendió hacia el norte hasta el Lago Maracaibo, donde permaneció hasta antes del paleoceno. El levantamiento de la Cordillera Central marca la iniciación de la orogenia Andina en el Cretácico superior.

Del Paleoceno al Eoceno temprano seguido del límite del levantamiento Cretácico Terciario hubo un periodo de relajación que generó espacio de acomodación y permitió la depositación de unidades aluviales de grano grueso sobre la inconformidad.

El espacio de acomodación en el noroeste de Suramérica decreció dramáticamente durante el Eoceno medio. Esta disminución en el espacio de acomodación fue causada por el climax del evento Andino pre-orogénico. Este evento orogénico aceleró el levantamiento de la Cordillera Central extendiéndola hacia el norte a través del Valle Inferior del Magdalena y uniéndola a la Sierra Nevada de Santa Marta.

El eje central de depositación en el Eoceno superior está localizado aproximadamente a lo largo de la posición del piedemonte este de la Cordillera Oriental. La estratigrafía del Valle Superior del Magdalena de esta época comprende sedimentos molásicos derivados de la Cordillera Central adyacente al valle.

En el Oligoceno una larga región de la Cordillera Central colapso, este colapso está localizado en el Valle Inferior del Magdalena. Además de esto se inició la inversión tectónica de la cuenca Cretácica en los flancos de la Cordillera Oriental. Este levantamiento incipiente causó que el eje central de depositación se dividiera en dos ejes principales. En el Oligoceno temprano una subsidencia tectónica permite la transgresión marina en la cuenca de los Llanos, en el Piedemonte Llanero y en el Valle Inferior del Magdalena.

El levantamiento inicial de la Cordillera Oriental y el renovado e intensificado levantamiento de la Cordillera Central ocurrió a mediados del Oligoceno. El nacimiento del sistema de drenaje del Orinoco tiene su eje central de depositación a lo largo de la base del flanco este de la Cordillera Oriental y el nacimiento del sistema de drenaje del Magdalena fluye al noroeste entre la creciente Cordillera Oriental y la Cordillera Central.

En el Mioceno el rápido levantamiento de las cordilleras favoreció la erosión y depositación de molasa en la base de los flancos de las Cordilleras Oriental y Central. El acortamiento estructural de la Cordillera Oriental estuvo ligado al componente sinistral de la falla de Santa Marta-Bucaramanga y al movimiento hacia el este de la Cordillera Central. La componente vertical de la falla de Bucaramanga-Santa Marta combinada con la componente vertical de la falla Murrucucu (Cimitarra) en el margen norte de la Cordillera Central causó la caída del basamento de la Cordillera Central en la parte este del Valle Inferior del Magdalena.

La falla de Romeral según Villamil separa la corteza continental al este de las rocas de afinidad oceánica al oeste y noroeste, sin embargo para Toussaint este límite está marcado por la falla de Otu-Pericos. La falla de Santa Marta-Bucaramanga fue en el Oligoceno una falla normal con desplazamiento vertical hacia el suroeste y en el Mioceno cambió de dirección de movimiento a una falla

de rumbo sinistral transfiriendo este movimiento a la cuenca Cretácica, invirtiéndola y levantándola. La falla Murrucucu (Cimitarra), en el Oligoceno y mitad del Mioceno tubo desplazamiento normal hacia el noroeste y junto con la falla de Bucaramanga permitió el colapso de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena. La falla de Guaicaramo del Jurásico al Cenomaniano fue para Villamil una falla normal con desplazamiento vertical al oeste por extensión, del Cenomaniano al Cretácico superior fue inactiva, en el Paleoceno temprano fue el límite de inversión, del Paleoceno al Oligoceno inactiva por subsidencia y del Mioceno al Pleistoceno tuvo una fuerte inversión. Las Fallas Cambao, Bituima y Pata se encontraban al occidente del Rift continental que se generó durante la distensión, tuvieron deslizamiento vertical hacia el oriente desde el Jurásico y comenzaron su inversión desde el Maastrichtiano superior hasta el Mioceno con tiempos de subsidencia. La Falla de Mulatos y otras fallas casi verticales, separan el flanco este de la Cordillera Central del Valle Medio del Magdalena.

Dataciones de sericitas en venas hidrotermales de la Formación Paja al sur del departamento de Santander hechas por Mantilla *et al.*, (2004) con edades de formación de aproximadamente 54 m.a. que las ubican al inicio del Eoceno, podrían ser producto de la tectónica compresional originada por la colisión entre la placa suramericana, caribe y nazca que precedió a la orogenia andina, estas dataciones podrían correlacionarse con el evento hidrotermal que se tratara en el presente estudio debido a la cercanía de lugar donde se encontraron las brechas con el lugar donde se presentan las venas hidrotermales datadas.

4.2 ESTRATIGRAFIA

El área de estudio se localiza en la Cordillera Oriental Colombiana, la cual está definida por las fallas Guaicaramo al oriente de la cordillera y la falla Otú-Pericos al occidente de esta (Toussaint, 1995). Según el trabajo de Sánchez (2001), en esta área afloran rocas metamórficas en el Macizo de Santander y Floresta agrupadas en la formación Neis de Bucaramanga, Ortoneis de Pamplona, Formación Silgará, Filitas de Chuscales, Filitas de Otengá, Filitas Cordieríticas de Busbanzá, Secuencia de Chitagá, Secuencia de Cucutilla, Floresta metamorfoseada, las Metasedimentitas de la Virgen, y la Serie de Perijá.

En el sector del Macizo de Quetame se agrupan en el Grupo y en el borde oriental de la cordillera central se encuentra el Neis de San Lucas, los Esquistos de San Lucas, el Neis de Puerto Berrío, las Milonitas de El Vapor, Neises y Anfibolitas de Tierradentro, Complejo Icarcó, Neises Biotíticos del Davis, Metamorfitas de la Plata, los Metasedimentos de la Cristalina, las Rocas sedimentarias de Santa Teresa, la Formación Anabá y la Formación Amoyá y la Formación El Hígado

En el cinturón de la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentran las Granulitas de los Mangos, localmente como Neis de Dibulla.

En Toussaint (1995), el volcanismo del Triásico-Jurásico está representado en la Formación Bocas, Jordan, el Grupo Payande, Formación Morrocoyal, Guatapuri, La Quinta, Corual. El plutonismo de este periodo está caracterizado por el batolito de Aracatac, el batolito de Atanques, los Batolitos Central, Bolívar, Pueblo Bello, Ojeda y Patillal. En la parte meridional de la Cordillera Oriental se encuentra el pórfido monzonítico de Dolores y el Stock de la Plata y en el Cenozoico en la parte noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta aflora el Batolito de Santa Marta.

Las rocas sedimentarias según Toussaint (1996), de edad Cretácica han sido agrupadas en la península de la guajira, dentro de la Formación Kesima, la Formación Palanz, la Formación Moina, la Formación Yuruma, el Grupo Cogollo, Formación Guaralamai. Desde el Valle Medio del río Magdalena hasta Villa de Leiva se encuentran las formaciones Arcabuco, Los Santos, Cumbre, Rosablanca, Formación Ritoque, Paja, Tablazo, Simiti, Formación Salto, Formación Churuvita, San Rafael, Conejo, Formación Umir, Formación Lisama. Hacia la zona de la Sierra Nevada del Cocuy encontramos la Formación Ritoque, Lutitas de Macanal, la Formación Río Negro, las Areniscas de Las Juntas, la Formación Apon, Formación Colon y Mito Juan. En la cuenca del río Catatumbo se encuentran los sedimentos de las Formaciones Aguardiente, Tibu-Mercedez y Capacho. En la cuenca de Bogotá tenemos el Grupo Caqueza, el Grupo Villeta, Formación Chipaque, Simijaca, La Frontera, el Grupo Guadalupe y Formación Guaduas. En el Valle Alto del Río Magdalena la sedimentación comenzó en el aptiano con la Formación Yavi, Caballos, seguida de la Formación Hondita, la Formación Lomagorda, Grupo Olini, Lidita Superior y Lidita Inferior y la Formación La Tabla. La Formación la Luna, es la formación más característica de este periodo ya que están presentes en casi toda la región de la cordillera oriental colombiana.

En la geología regional del área de trabajo (Plancha 170), se presentan en el área de Santander-Arcabuco rocas sedimentarias de edad jurásica definidas por la Formación Arcabuco y rocas sedimentarias del cretácico inferior representadas por las Formaciones Cumbre, Rosablanca, Ritoque, Paja, Tablazo y Simiti. En el área de Chiquinquirá se encuentran las Areniscas de Chiquinquirá del cretácico inferior y las Formaciones Simijaca, la Frontera y Conejo del cretácico superior. En el Valle Medio del Magdalena se encuentra el Grupo Guaguaqui del cretácico inferior, el Grupo Olini, la Formación Córdoba del cretácico superior y reposando discordantemente sobre estas rocas está la Formación San Juan de Río Seco del Oligoceno.

Por su importancia con el presente estudio, a continuación se relacionará la información disponible en la bibliografía, sobre las rocas sedimentarias de las Formaciones Cumbre, Rosabalanca, Ritoque y Paja (FIGURA 9).

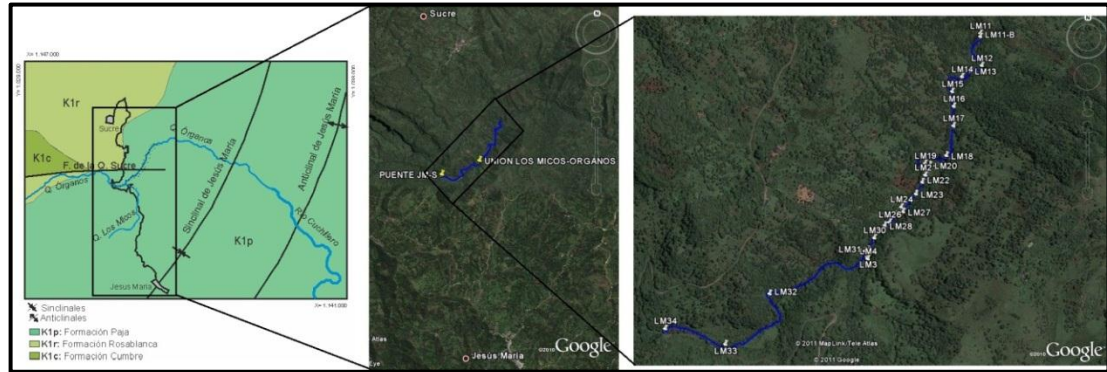


FIGURA 9. Geología de la zona de estudio y localización de las muestras a lo largo de la quebrada Órganos. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1984).

4.2.1 Formación Cumbre (K1c)

Aflora en forma lenticular, constituyendo el flanco oriental del Anticlinal de Portones y el núcleo del Anticlinal de Sabanagrande. En esta región, la unidad se presenta en contacto discordante con la Formación Arcabuco, y consiste de areniscas cuarzosas, grises claras a carmelitas con intercalaciones de lutitas negras, piritosas y frecuentes niveles fosilíferos. Renzoni (1967), le infiere una edad Valanginiano, sin dar bases para esta datación, Burgl, (1969) reporta el hallazgo de una Berriasella en el Anticlinal de Bolívar, considerada de edad Berrasiano. Por sus características litológicas, su aspecto lenticular, y por el hecho de estar aparentemente apoyado sobre las areniscas de Arcabuco (Etayo, 1968) considera este nivel como representativo de sedimentos de plataforma (Ulloa y Rodríguez, 1978).

4.2.2 Formación Rosablanca (Kir)

La unidad aflora en el área estudiada en una superficie aproximada de 500 Km², y consiste de una sucesión de calizas negras de grano fino, fosilíferas en estratos que varían de 0.10 a 1.50 m de espesor, con intercalaciones de arcillolitas en su mayoría calcáreas. En el área de Sabanagrande, esta unidad se encontró reposando concordantemente a la Formación Cumbre y discordantemente al Arcabuco. La edad de la Formación Rosablanca ha sido considerada por Burgl (1954), como Valanginiano con base en la fauna colectada en la región del río Cane (Plancha 171). Tal asignación ha sido discutida por Etayo (1968), quien la dató tentativamente del Valanginiano superior y sugirió también que podría representar una zona no precisada del Hauteriviano inferior. Julivert *et al.* (1968), considera que la unidad es oblicua respecto a las líneas isócronas y que su edad sería Berriasiano hacia el norte, Hauteriviano hacia la región de la Mesa de los Santos y San Gil y Valanginiano en Villa de Leiva. Esta formación se depositó en un ambiente marino y cronológicamente se correlaciona con la Formación Lutitas de Macanal, definida en el área del Cuadrángulo K-12, Guateque (Ulloa y Rodríguez, 1978).

4.2.3 Formación Ritoque (Kiri)

En la sección de la carretera Moniquirá- Arcabuco, consta de una sucesión de limolitas grises, con tonalidades amarillentas, rojizas por meteorización, micáceas, con intercalaciones de arcillolitas calcáreas; su espesor aproximado es de 125 metros. En esta localidad, la unidad se encontró suprayaciendo concordantemente

a la Formación Rosablanca, mientras que en las áreas de Sucre-Albania y en el flanco occidental del Anticlinal de Portones, la Formación Ritoque no se observó encontrándose la Formación Paja en contacto concordante con la Formación Rosablanca. La edad de la Formación Ritoque ha sido considerada por Etayo (1968), como Hauteriviano inferior y depositada en un ambiente marino. La edad de las formaciones Rosablanca y Ritoque ha sido recientemente asignada al Berriasiano superior Valanginiano por Widmann. La unidad puede correlacionarse con la parte inferior del Tibú-Mercedes y Areniscas de Las Juntas (Ulloa y Rodríguez, 1978).

4.2.4 Formación Paja (Kip)

La Formación Paja aflora en el flanco occidental del Anticlinal de Tinjacá – Oiba, donde se presenta en contacto concordante con la Formación Ritoque; en el flanco oriental del Anticlinal de la Pradera y en el flanco occidental del Anticlinal de Portones, áreas en las cuales se observó concordante con la Formación Rosablanca. Consta en su base de lutitas y limolitas grises oscuras a negras, ferruginosas con delgadas intercalaciones de areniscas arcillosas; su parte media la compone una sucesión de lutitas grises, con intercalaciones de areniscas, arcillolitas calcáreas y calizas, con concreciones limolíticas, piritosas, hasta de 10 cm de diámetro y niveles de yeso, y la parte superior está formada por lutitas grises clara a oscuras, micáceas, interestratificadas con areniscas arcillosas, de grano fino, en estratos hasta de 5 m de espesor. Para esta unidad se le ha estimado un espesor de 740 m basado en los cortes geológicos. Un estudio detallado de esta unidad ha sido realizado por Etayo (1968) en el área de Villa de Leiva – Sáchica, quien le asigna una edad que abarca desde el Hauteriviano al Aptiano superior; y considera su depósito en un ambiente marino de aguas poco profundas y circulación restringida. Su correlación puede establecerse con la parte

inferior a media del Tibú–Mercedes, Tibabosa, Arenisca de Las Juntas y parte inferior del Fόμεque (Ulloa y Rodríguez, 1978).

4.3 ASPECTOS DE LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Dentro del área de estudio encontramos dos grandes estructuras de una extensión aproximada de 40 kilómetros que corresponden al Sinclinal y Anticlinal de Jesús María (FIGURA 9 y 10). Estos pliegues son simétricos y sus ejes están orientados en dirección N30°E, los núcleos de estos pliegues están conformados al norte por las lutitas de la Formación Paja y al sur por las rocas de la Formación Tablazo y Simití. Al nororiente de estas estructuras se presentan dos estructuras simétricas de poca extensión que corresponden al Sinclinal y Anticlinal de Vélez.

Se presenta también en la zona de estudio una Falla normal llamada la Falla de la quebrada Sucre con rumbo Este-Oeste aproximadamente (Ulloa y Rodríguez, 1978).

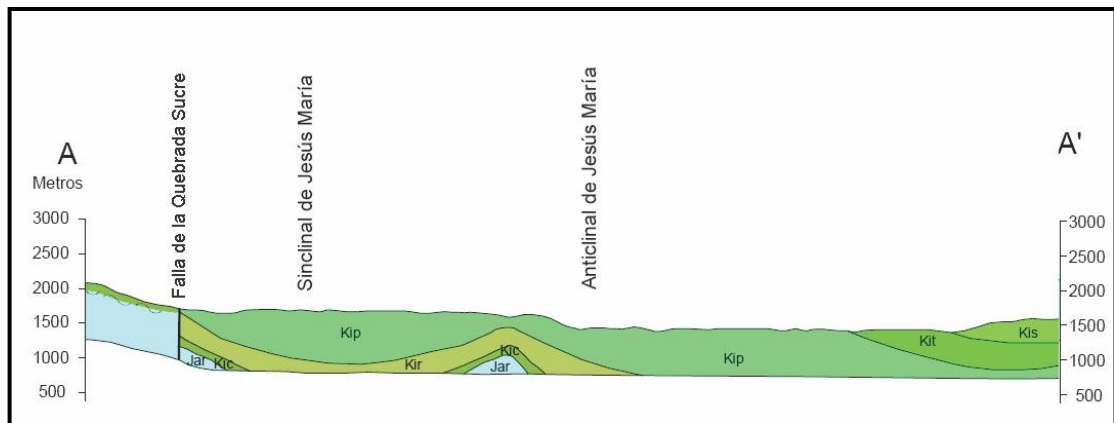


FIGURA 10. Corte geológico de la zona de estudio. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1978).

5. RESULTADOS

5.1 INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES SATELITALES Y AÉREAS

Aguas arriba de la quebrada Órganos desde el puente que comunica a Sucre con Jesús María las rocas presentan tonos claros y oscuros, y el patrón de drenaje es subparalelo. Las estructuras presentan pendientes escalonadas, con superficies irregulares en las pendientes y dos estructuras en forma de arcos con mayor desarrollo de vegetación en la contrapendiente y menor vegetación en la pendiente. Seis kilómetros hacia el noroccidente de Sucre se presenta una depresión semicircular que se debe probablemente a una dolina.

Aguas debajo de la quebrada Órganos desde el puente las rocas presentan tonos claros y el patrón de drenaje es principalmente trezado (*Trellis*) con algunas características del drenaje subdendrítico. Se presentan estructuras en forma de cuchilla poco. Estos patrones de drenaje reflejan el control estructural en la zona, laderas altas y pendientes suaves.

5.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS BRECHAS

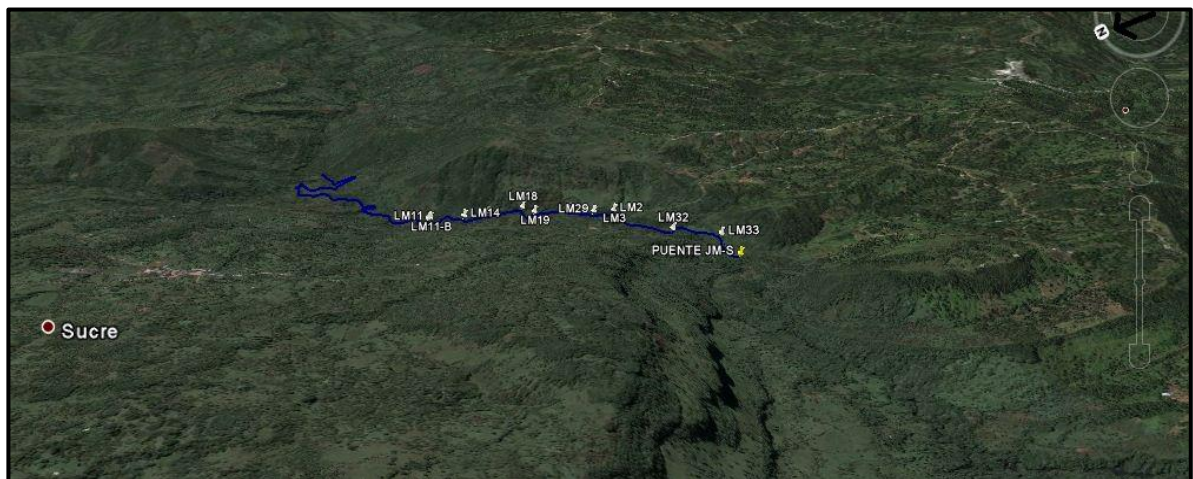


FIGURA 11. Figura de localización de las brechas y su posición respecto a las estructuras de deformación más importantes del área. Modificado de Ulloa y Rodríguez (1984).

5.3 CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE BRECHAS

Una brecha es un cuerpo rocoso constituido por fragmentos de diferentes formas, tamaños y composición, por una matriz y en ocasiones puede presentar cemento como relleno de espacios vacíos. Las brechas pueden presentarse en diversos ambientes geológicos como sedimentarios, volcánicos, tectónicos, magmáticos e hidrotermales. Las brechas se pueden clasificar de acuerdo a la geometría, al tamaño de grano, a la composición, a la organización interna y a la alteración que presentes sus componentes. Después de hacer la clasificación anterior se puede proceder a realizar la clasificación genética de la brecha para conocer el ambiente y proceso geológico que actuó en su formación (Cooke, 2005).

Las brechas se componen de clastos, matriz, cemento y oquedades. Los clastos son fragmentos de rocas que pueden variar desde redondeadas hasta angulares, los tamaños pueden variar desde milímetros hasta más de cuatro metros de diámetro. La matriz es el material fino que se presenta entre los fragmentos y puede ser polvo de roca cuando los fragmentos son triturados, pueden ser fragmentos de cristales, fragmentos líticos o fragmentos de venas. Los fragmentos y la matriz pueden estar unidos por un cemento de origen hidrotermal el cual puede tener diferentes composiciones de acuerdo al origen del fluido, o pueden haber espacios abiertos que se generaron durante el proceso de brechificación. También se pueden presentar en algunos casos alteraciones en los componentes de las brechas que llegan a modificar la composición inicial de los materiales generados en el proceso (Cooke, 2005).

5.4 GENERALIDADES SOBRE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR PARA LA DESCRIPCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DE LAS BRECHAS

Los pasos que se pueden seguir para describir las brechas según Cooke (2005), son la geometría de la brecha, es decir que forma está presentando el cuerpo brechificado respecto a la roca encajante. Las formas más comunes son en chimenea, cono, dique, vena, capa, tabular e irregular. También respecto al contacto con su encajante el cual puede ser gradacional, fallado, irregular, planar, concordante o discordante.

En cuanto al tamaño de los fragmentos las brechas se pueden clasificar como megabrechas para tamaños mayores a cuatro metros de diámetro, mesobrechas para tamaños entre dos milímetros y cuatro metros de diámetro y microbrechas para tamaños menores a dos milímetros de diámetro. Para la matriz la clasificación del tamaño de grano es lodo, limo, arena, guijas y guijarros.

Según la composición de los clastos podemos decir si son monolitológicos si presentan la misma composición o polimicticos si los clastos no son del mismo tipo de roca. De acuerdo a la morfología de estos podemos decir si son angulares, subangulares, subredondeados, redondeados o tabulares.

La composición de la matriz puede ser polvo de roca especialmente en los casos donde hay gran influencia tectónica, fragmentos de cristales, fragmentos líticos o fragmentos de venas.

La composición del cemento es muy variada de acuerdo al ambiente y al proceso geológico formador de la brecha. También se deben tener en cuenta la cantidad o porcentaje de espacios vacíos.

En cuanto a la organización interna podemos decir de acuerdo a la abundancia de los clastos, de la matriz o del cemento, si la brecha es clasto soportada, matriz soportada o cemento soportada. También podemos hablar sobre la distribución de los clastos si es en forma de rompecabezas, rotada, caótica, masiva gradada o no gradada y si es estratificada o no.

La textura de la matriz puede ser bandeada, laminada o masiva. Para las texturas del cemento existen varias clasificaciones de acuerdo a si la textura es primaria, si es una textura de recristalización o si es una textura de reemplazamiento.

Las alteraciones que presenta el clasto la matriz o el cemento también deben ser descritas con los parámetros anteriormente mencionados.

Para fines de estandarizar la metodología que será utilizada en la descripción de las brechas objeto del presente estudio, a continuación se presentará el orden de descripción de los atributos, siguiendo la recomendación de Cook (2005), tal como se mencionó anteriormente. Una vez hecha la descripción de los atributos de las brechas, se procederá con su clasificación desde el punto de vista genético.

Entre los atributos que contribuyen a la descripción macroscópica y microscópica de las brechas, destacan los siguientes:

- I. **GEOMETRIA DEL CUERPO DE BRECHA:** en este tipo de atributo, merece la pena reconocer tanto la morfología del cuerpo brechificado, como sus relaciones de contacto, así:
 - Pipe, Cono, Dique, Vena, Capa, Irregular, Tabular, etc.
 - Relaciones de Contacto: neto, gradacional, fallado, irregular, planar, concordante, discordante

- II. **TAMAÑO DE GRANO DE LA BRECHA** (<2mm Microbrecha; >2mm Mesobrecha; >4m Megabrecha)

- III. **COMPONENTES**
 - A. **CLASTOS**
 - Monomícticos o Polimícticos
 - Composición (líticos, venas, brecha, lapilli, mineralizados, etc.)

- Morfología (angular, subangular, subredondeado, redondeado, tabular, etc.)

B. MATRIX

- Harina de roca, fragmentos de cristales, fragmentos líticos, fragmentos de vena
- Textura: bandeada, laminada, masiva
- Tamaño de grano: arcilla, limo, arena,

C. CEMENTO

- Textura: Cockade, masiva, drusa, etc.
- Mineralogía de mena y de ganga, tamaño de grano

D. ESPACIOS ABIERTOS

IV. ORGANIZACIÓN INTERNA

- Abundancia de clastos, clasto-, matriz-, cemento-soportada
- Distribución de los clastos: jigsaw-fit; rotada, caótica, Masiva o gradacional
- Estratificada o sin estratificación

V. ALTERACIÓN

- Clastos, Matriz, Cemento
- Paragénesis de la alteración

5.5 CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE LAS BRECHAS

En la Bibliografía, se presentan diferentes clasificaciones genéticas de brechas, tales como aquellas propuestas por Sillitoe (1985); Corbett y Leach (1998); y otras clasificaciones resumidas en los trabajos de Sillitoe (2010), entre otras. Estas serán relacionadas a continuación.

A. Clasificación Genética de brechas, según Sillitoe (1985)

Esta clasificación agrupa genéticamente las brechas como Magmático Hidrotermales, Hidromagmáticas, Magmáticas, intrusivas y tectónicas.

B. Clasificación Genética de brechas, según Corbett y Leach (1998)

Esta clasificación comprende las brechas Magmático Hidrotermales, Freatomagmáticas, Freáticas, Dilatacionales, Magmático Hidrotermales de Inyección, de colapso Hidrotermal y de Disolución.

C. Clasificación del ambiente de formación de brechas, según Cooke (2005)

Para Cooke (2005) las brechas se pueden clasificar según el ambiente en el que han sido formadas y el evento que predominó en su formación. Según esto tenemos cuatro tipos básicos de brechas los cuales son: las brechas volcánicas, las brechas magmáticas, las brechas tectónicas y las brechas hidrotermales. Puede ocurrir también que en la formación de una brecha haya participado más de un evento lo cual nos daría variaciones en los tipos básicos mencionados arriba que son las brechas freatomagmáticas, las brechas freáticas, las brechas magmático hidrotermales, las venas, el stockwork e intrusiones controladas estructuralmente (FIGURA 12).

A continuación se describirán algunas de las características de los tipos de brechas mencionados anteriormente.

Las brechas magmático hidrotermales están asociadas a intrusivos, batolitos o stocks intrusivos estériles. Estos cuerpos se emplazan a profundidades entre 1 y 3,6 kilómetros. Se presentan como cuerpos cilíndricos de sección circular u ovoide, la dimensión horizontal oscila entre 50 y 300 metros y la dimensión vertical puede variar entre 725 y 860 metros; el contacto entre la roca encajante y la brecha es abrupto con una zona de fracturas verticales densamente espaciadas; en algunos casos se ha observado que estos cuerpos terminan hacia arriba en forma de cúpula lo cual indica que estos cuerpos no alcanzaron la superficie. La base es plana; los fragmentos pueden ser desde angulosos a sub-redondeados; el

grado de brechificación decrece hacia el centro y hacia abajo del cuerpo. (Sillitoe, 1985)

Las brechas freatomagmáticas se forman debido a la interacción del magma y el agua externa. El contacto entre el magma ascendente y las aguas subterráneas, transforman el agua en vapor y producen una fragmentación explosiva de la roca caja. Puede ocurrir una mezcla de clastos y un alto grado de trituración. Presenta una geometría en forma de cono. Horizontalmente esta estructura puede alcanzar más de 1500 metros y verticalmente es mayor a los 2500 metros. Sus clastos son sub-redondeados a redondeados, es matriz soportada por harina de roca con o sin cemento hidrotermal. Los clastos normalmente tienen alteración hidrotermal. La presencia de lapilli, indican la participación de agua en la formación de la brecha. Cerca de la base de la diatrema pueden presentarse clastos juveniles resecos lo cual indica la participación del magma. Hacia la superficie de la estructura se pueden presentar fragmentos de sedimentos superficiales de grano fino y madera la posición superficial de la diatrema, sin embargo los fragmentos de la pared de roca pueden ser transportados verticalmente y grandes bloques cerca de la superficie pueden encontrarse en la diatrema 100 metros más debajo de su posición original. Estos tipos de brechas involucran directamente al magma. La morfología superficial de este tipo de estructuras es en forma de maars o anillos de tobas volcánicas (Howard, 2007).

Las brechas freáticas se desarrollan a menos de 1000m de profundidad y se asocian a estructuras volcánicas. Estos cuerpos de brechas van desde vetas y vetillas hasta grandes chimeneas, masas tabulares y cuerpos irregulares ramificados que frecuentemente se ensanchan o se abren hacia arriba. La extensión vertical de estos cuerpos es desde 200 a 500 metros. Presentan poco desplazamiento ascendente de fragmentos y gran cantidad de espacios abiertos. Se presentan varias etapas de alteración, mineralización y brechificación. La alteración dominante es la silicificación y la alteración argílica avanzada. Estas

brechas se dan por el aumento de la presión hidrostática debajo de una barrera de baja permeabilidad. La brechificación puede aumentarse por intrusión, fallamiento o deslizamiento lo cual genera descompresión y transforma el agua en vapor para producir una explosión hidrotermal (Sillitoe, 1985).

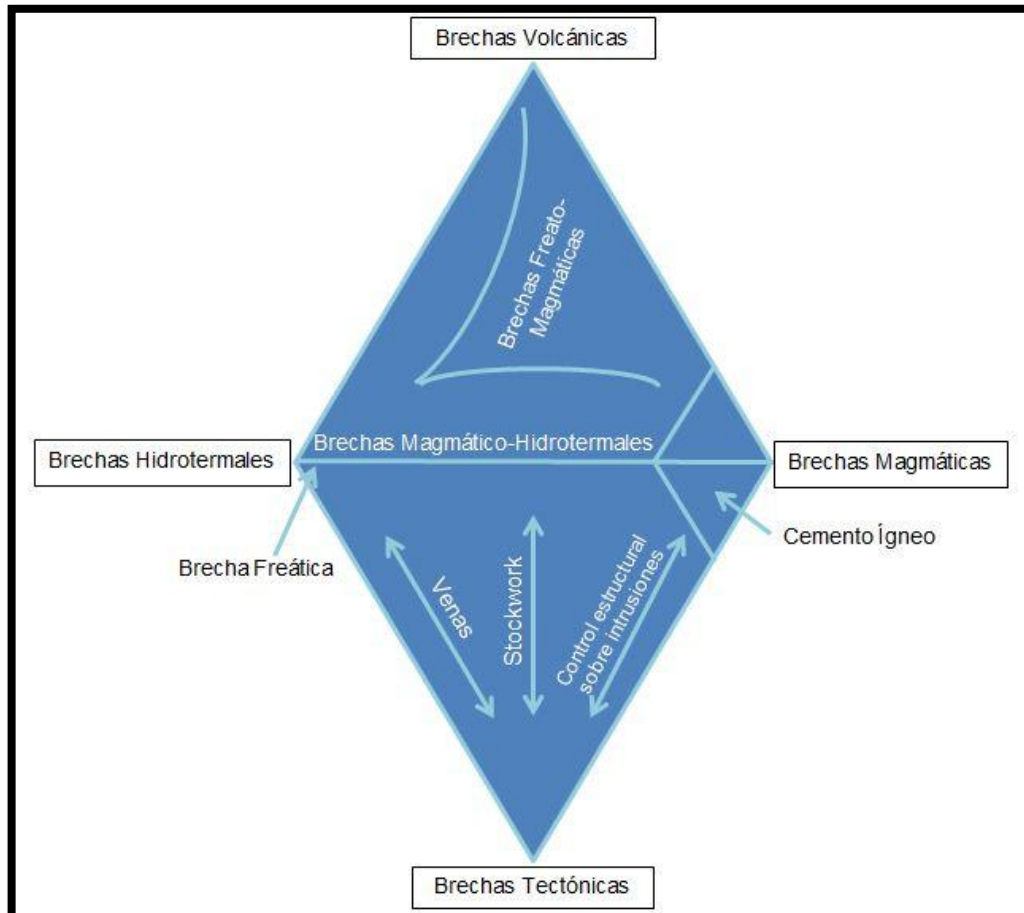


FIGURA 12. Diagrama de clasificación genética de David Cooke (2005).

Las brechas magmáticas, según Sillitoe (1985), son cuerpos formados exclusivamente por fragmentos juveniles sub-redondeados a redondeados, la matriz es de material vítrico triturado y líticos. Generalmente son clasto soportadas. Estos cuerpos son llamados también diatremas volcánicas porque

ocurren dentro de las chimeneas volcánicas y diatremas magmáticas, están asociadas a la cámara de magma fuente; su origen se debe a la liberación de energía durante la cristalización o descompresión del magma hidratado emplazado cerca de la superficie.

Las brechas de intrusión son producidas por la inyección de magmas en rocas preexistentes que le producen fracturamiento mecánico y la incorpora al magma intrusivo. Estas brechas presentan fragmentos angulares de roca caja que pueden ser metamórficos, intrusiones tempranas o cristalización temprana de la intrusión, dentro de una matriz cristalina de origen ígneo. (Howard, 2007)

Las brechas tectónicas se dan por fracturamiento durante el movimiento de varios tipos de fallas. Las mineralizaciones se pueden presentar como relleno de fracturas generadas en fallas. El diámetro puede ser mayor a 50 metros. Los clastos son angulares a sub-redondeados de la roca encajante y la matriz es harina de roca. Está asociado a depósitos de oro orogénico (Howard, 2007).

Las brechas hidrotermales se dan por fracturamiento hidrotermal cuando la presión del fluido hidrotermal supera la presión litostática y la resistencia tensional de las rocas. También pueden estar asociadas a colapso gravitacional por la alteración de las rocas de la base de soporte Cooke (2008).

5.6 RESUMEN ENTORNO A LA DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE BRECHAS

Para la descripción de las brechas objeto de estudio se siguieron los pasos descritos anteriormente los cuales estaban basados en lo propuesto por David Cooke (2005). Para la descripción de las texturas del cemento de carbonato se empleó la clasificación de las texturas de los cuarzos en venas epitermales de Dong (1995) y la clasificación de los clastos se basó en Folk (1974) y Dana (1947).

En la descripción petrográfica de los minerales identificados en las brechas se empleó la tercera edición del Manual de Mineralogía de Dana (1988), la Mineralogía Óptica de Kerr (1965) y el Atlas de Asociaciones Minerales en lamina Delgada de Melgarejo (2003)

5.7 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LAS BRECHAS

Las rocas sedimentarias estudiadas en el presente trabajo pertenecen a las formaciones Rosablanca y Paja, aflorantes a lo largo de la quebrada Órganos donde se encontraron paquetes de lodolitas calcáreas color gris claro a oscuro, con orientación aproximada N20°E/43°SE, paquetes de shale negro con laminación interna y orientación aproximada N45°E/40°SE, bloques irregulares de biomicritas empaquetadas, de 40cm de diámetro de color gris claro y cuerpos brechificados los cuales son objeto principal del presente estudio, encontrados tanto en la quebrada Órganos como en un drenaje afluente a Órganos llamado quebrada Los micos. A continuación se relaciona la descripción de estos cuerpos de brechas.

Tres grupos distintos de brechas fueron reconocidos en la quebrada órganos, apoyados en sus diferentes atributos (tales como los descritos en el apartado 5.2 Consideraciones preliminares sobre descripción y clasificación de brechas). Estos son: 1) Tipo I: brechas monomicticas compuestas por clastos líticos de lodolita calcárea (textura tipo jigsaw-fit a rotada), con matriz de pirobitumen (tamaños que varían desde arena media hasta arena gruesa), cemento soportadas por carbonato, clorita y esfalerita. 2) Tipo II: Brechas monomicticas compuestas por fragmentos líticos de lodolita calcárea (textura jigsaw-fit), menor cantidad de matriz de pirobitumen (tamaños muy finos desde lodo hasta arena media) que las Tipo I, cemento de carbonato, clorita y esfalerita y clasto soportadas. 3) Tipo III: brechas monomicticas constituidas por fragmentos líticos de lodolita calcárea (Textura Jigsaw-fit), mayor cantidad de matriz de pirobitumen que las Tipo II (tamaños

variados desde arena muy fina hasta guijas), cemento de carbonato, clorita y esfalerita y clasto soportadas.

A continuación, se describen en detalle cada uno de estos tipos de brechas, apoyados en análisis macro y microscópicos.

5.7.1 Brechas tipo I

Son cuerpos brechificados desde 0,5 hasta 1,5 metros de diámetro, de formas irregulares con relaciones de contacto también irregulares, los tamaños de los fragmentos varían entre 1 y 15 centímetros de diámetro, sus clastos son monomicticos de composición lítica de lodolita calcárea microcristalina color gris claro, de morfologías angulares a subangulares, la matriz está compuesta por granos de pirobitumen color negro de morfologías angulares, muy bien seleccionados con tamaños que varían desde arena media hasta arena gruesa (0,25mm-1mm de diámetro). El cemento presenta textura *cockade* y *comb* y se compone de dos tipos de dolomita (I y II), calcita, clorita y esfalerita, la dolomita I presenta cristales alargados dispuestos perpendicularmente al contacto con el clasto y un color gris amarillento, la dolomita II es blanca con terminaciones euhedrales y estas dos bandas forman junto con los clastos la textura *cockade*, antes mencionada pero la disposición de los cristales de las dos bandas de dolomita recuerda la textura *comb* de los cuarzos hidrotermales descritos por Dong (1995). La clorita se presenta como un agregado masivo de color verde, la calcita en cristales incoloros y la esfalerita en agregados granulares de color amarillo y brillo submetálico, aunque en este tipo de brechas se encuentra en muy baja cantidad. Estas brechas se clasifican como cemento soportadas y la distribución de sus clastos es de tipo jigsaw-fit a rotada.



FIGURA 13. Aspecto de la variedad de brechas tipo I: monomítica con clastos de lodolita calcárea, angulares, en sectores con textura tipo jigsaw-fit, matriz de pirobitumen y cemento de carbonato, clorita y esfalerita.



FIGURA 14. Foto de detalle de la brecha tipo I: cemento-soportada, mostrando la distribución rotada de los clastos monomicticos de lodolita calcárea y la textura en escarapela.

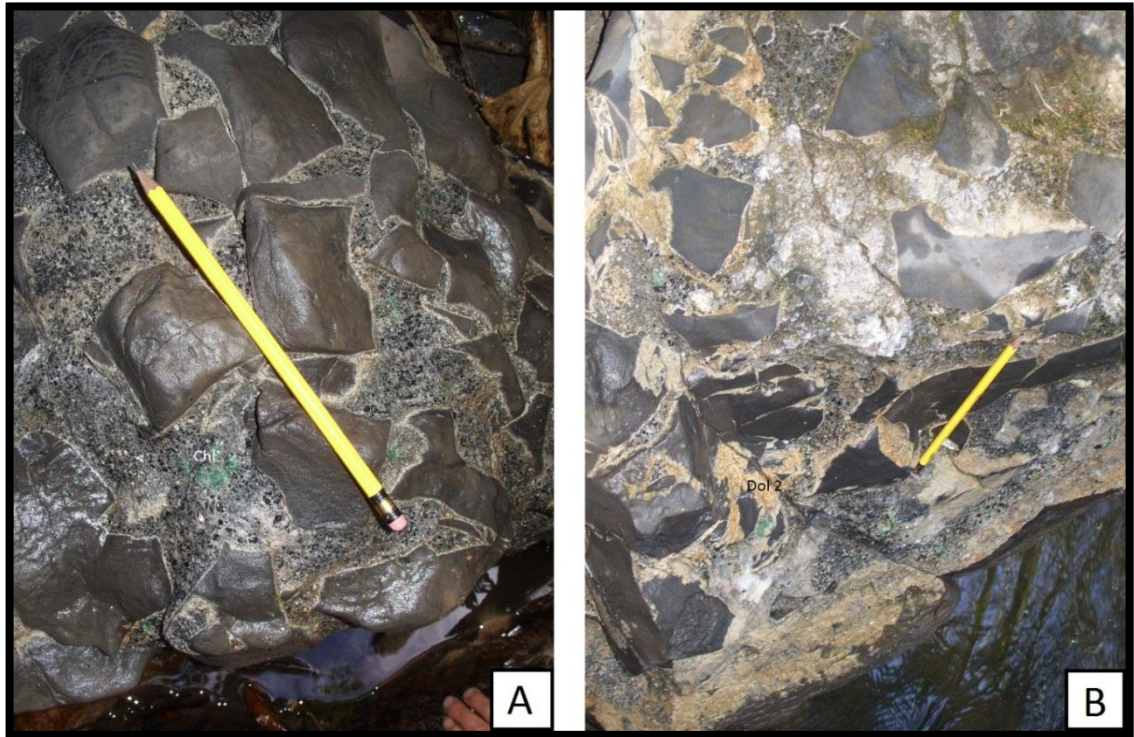


FIGURA 15. Brechas Tipo I: cemento-soportadas por calcita, dolomita y clorita. A) Características texturales de las brechas, mostrando los clastos subangulares de lodolita calcárea con distribución jigsaw-fit a rotada, la textura en escarapela y un agregado amorfo de clorita color verde. B) Brecha con abundante cemento de dolomita II y calcita.

5.7.2 Brechas tipo II

Son cuerpos brechificados irregulares monomicticos, con clastos de lodolita calcárea microcristalina color gris claro a negro, de morfologías angulares con tamaños que varían desde 0,5 hasta 20 centímetros de diámetro con textura jigsaw-fit. La matriz está compuesta por granos de pirobitumen color negro con

tamaños que varían desde lodo hasta arena media (0,05mm-0,25mm de diámetro). El cemento está conformado al igual que en las tipo I por calcita, dolomita I, dolomita II, clorita y esfalerita y se presentan también las texturas *cockade* y *comb*. La cloritas en estas brechas se presentan de dos maneras, una como un agregado masivo de color verde claro y la otra como cristales de hábito hojoso color verde oscuro. Estas brechas se clasifican como clasto soportadas debido a la abundancia de sus clastos. El espesor de las bandas de dolomita es variable para cada muestra.

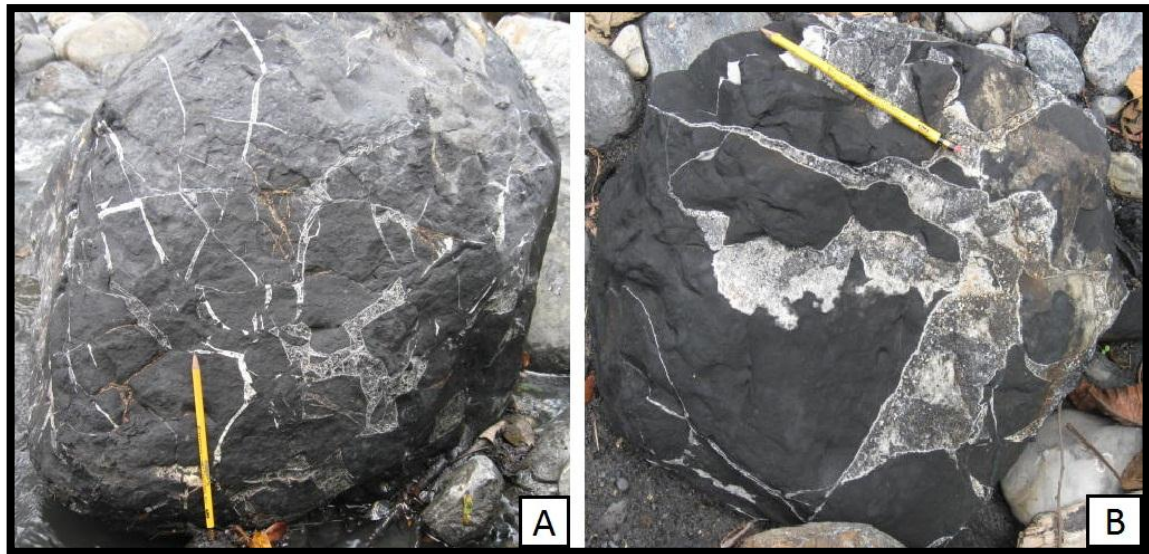


FIGURA 16. Brechas clasto soportadas tipo II por fragmentos de lodolita calcárea microcristalina con textura jigsaw-fit. A) Agregados granulares de esfalerita en los clastos de lodolita calcárea, asociados a la dolomía II.

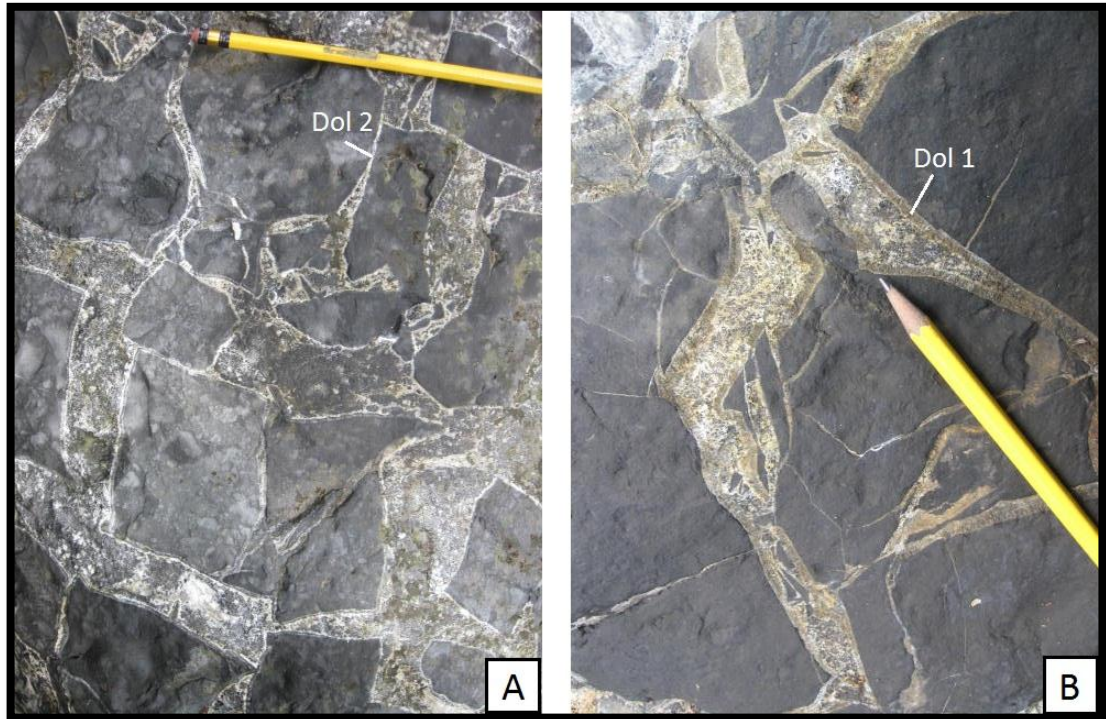


FIGURA 17. Foto de detalle de las brechas clasto soportadas tipo II, mostrando la textura jigsaw-fit de los clastos. A) Textura en escarapela compuesta por una banda muy fina de dolomita gris (Dol. 1) y por una banda de dolomita blanca (Dol. 2) un poco más gruesa que la anterior. B) el espesor de la banda de dolomita gris (Dol. 1) es mayor que el espesor de la banda de dolomita blanca.

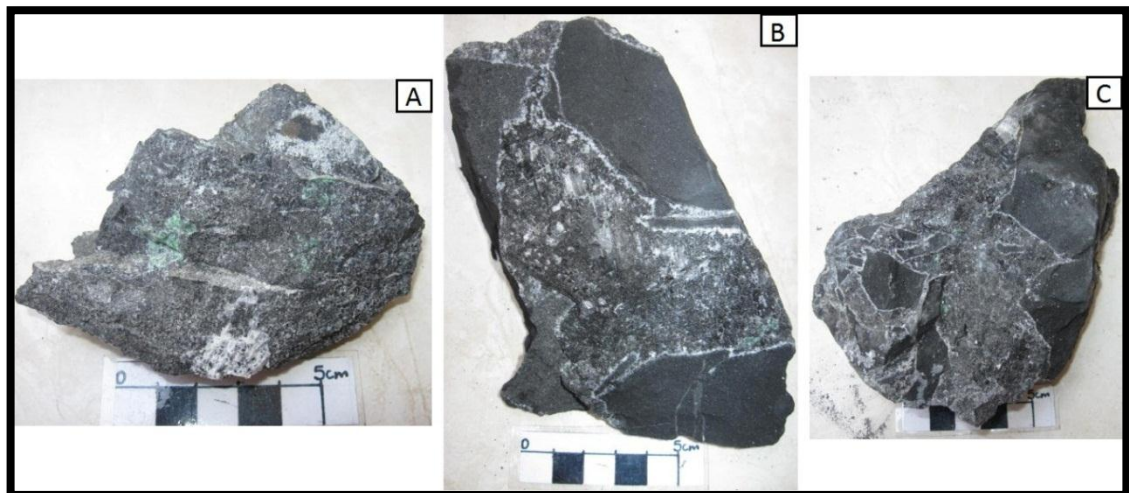


FIGURA 18. Fotografía en muestra de mano de las brechas tipo II. A) Pirobitumen cementado por dolomita blanca (II), calcita incolora y un agregado amorfo de

clorita de color verde claro. B) Textura cockade con las dos bandas de dolomita.
C) Textura cockade formada solo por la dolomita II.

5.7.3 Brechas tipo III

Cuerpos brechificados irregulares compuestos por clastos monomicticos de lodolita calcárea microcristalina, de morfologías subangulares, color gris claro y tamaños que varían desde 2 hasta 15 centímetros de diámetro con textura tipo jigsaw-fit. La matriz es de pirobitumen color negro de tamaños entre arena muy fina y guijas (0,06mm-16mm de diámetro). En el cemento se presentan las texturas cockade y comb en las dolomitas I y II descritas anteriormente, también se presenta calcita incolora de brillo vítreo, clorita hojosa y en agregado masivo y esfalerita. En la muestra LM18 se encontró que el contacto entre la banda de dolomita I y la banda de dolomita II presenta una fuerte oxidación dándole un color rojizo al contacto. Las texturas del cemento parecen estar mejor desarrolladas en este tipo de brechas.

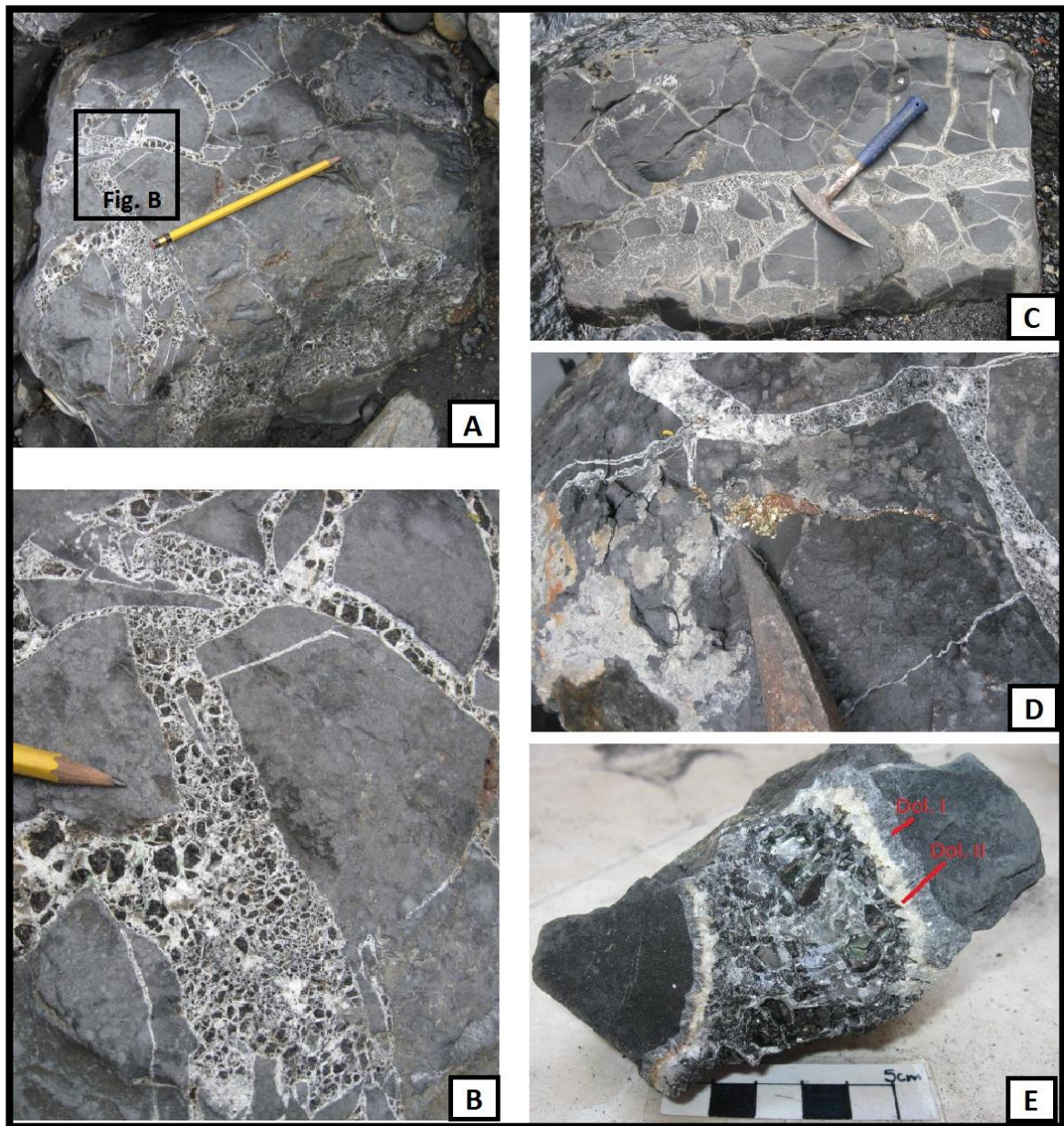


FIGURA 19. Brechas clasto soportadas tipo III. A) clastos de lodolita calcárea microcristalina con textura jigsaw-fit. B) Foto de detalle de la brecha A mostrando la distribución de la matriz de pirobitumen y del cemento. C) Brecha clasto soportada, los lugares con menor cantidad de cemento presentan clastos con distribución jigsaw-fit, mientras que donde hay más cantidad de cemento los clastos de lodolita presentan distribución rotada. También se puede observar el agregado de esfalerita de color amarillo en los clastos de lodolita. D) Agregado granular de esfalerita color amarillo y brillo submetálico, asociado a la dolomita II. E) Muestra de mano de la brecha LM18, mostrando la textura cockade y comb de las dolomitas, también se puede observar el color rojizo entre el contacto de la

dolomita I con la dolomita II debido probablemente a oxidación de minerales metálicos precipitados en este contacto.

5.8 DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LAS BRECHAS

Para realizar la descripción microscópica de las brechas se elaboraron siete secciones delgadas, de la muestra LM2-1C que pertenece a las brechas tipo I, LM19, LM23 y LM30 que corresponden a las brechas tipo II y las LM18-1, LM18-2 y LM26 que hacen parte de las brechas tipo III.

5.8.1 Brechas tipo I

CLASTOS DE LODOLITA CALCÁREA

Calcita: cristales anhedrales, incoloros con aspecto sucio, birrefringencia alta, relieve medio y maclas poco visibles.

Cuarzo: cristales anhedrales, incoloros de relieve bajo. Parece estar reemplazando en algunos lugares a la calcita.

Dolomita I: cristales anhedrales, incoloros con aspecto sucio, de relieve medio a bajo, birrefringencia alta.

Opacos: forma anedral a subhedral, presenta oxidación en los bordes, estos minerales opacos se encuentran en los intersticios entre los cristales de calcita.

CEMENTO

Dolomita I: cristales incoloros con aspecto sucio, de formas alargadas anhedrales, relieve bajo y birrefringencia alta. Presenta dos direcciones de exfoliación no muy buenas.

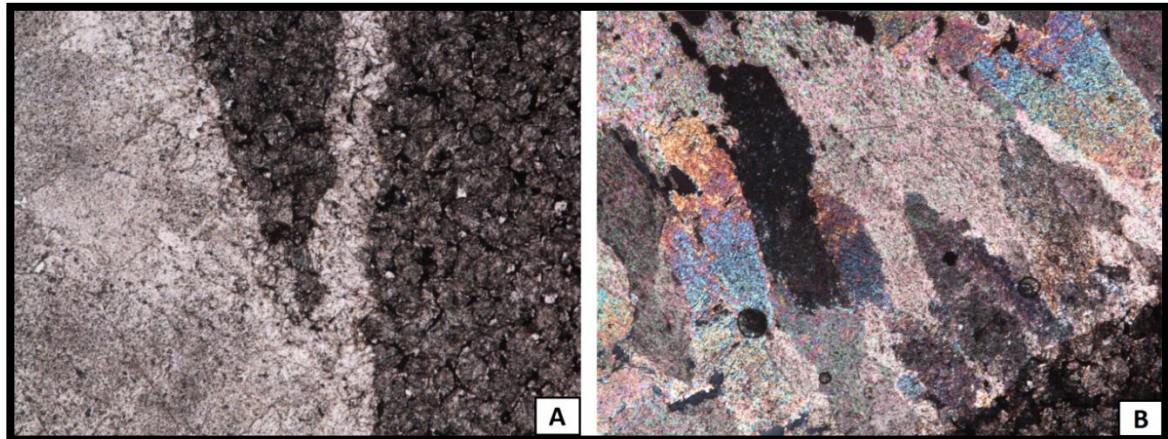


FIGURA 20. Características petrográficas de la muestra LM2-1C (Brecha tipo I). A) Caliza microcristalina y dolomita I. Nicoles paralelos con aumento de 5x. B) Cristales de dolomita barroca orientados perpendicularmente al contacto con el clasto. Estos cristales recuerdan la textura Comb que presentan los cuarzos hidrotermales. Nicoles cruzados con aumento de 10x.

5.8.2 Brechas tipo II

CLASTOS DE LODOLITA CALCÁREA

Calcita: incolora con aspecto muy sucio, de forma anhedral, no presenta maclas, la exfoliación es muy débil, el relieve moderado, birrefringencia fuerte, los cristales presentan bordes redondeados.

Dolomita: cristales incoloros, anhedrales, con relieve bajo, birrefringencia alta, la exfoliación no es muy visible y no muestra maclas. Estos cristales se desarrollan hacia los bordes de algunos cristales de calcita.

Minerales opacos: se presentan como cristales subhedrales y en los intersticios de los cristales de calcita y dolomita.

MATRIZ DE PIROBITUMEN

Granos redondeados, color negro. En este tipo de brechas el pirobitumen presenta granos más finos y es también más abundante que en las muestras anteriores. En algunos casos es pirobitumen es rodeado por la calcita y en otros es el pirobitumen quien rodea a la calcita.

CEMENTO

Calcita: cristales anhedrales e incoloros limpios, con dos direcciones de exfoliación, el relieve es variante de bajo a medio, presenta maclas en dos direcciones y birrefringencia alta.

Clorita: se presenta en forma de agregado criptocristalino con bordes irregulares, color verde pálido, con pleocroísmo muy débil, relieve bajo, más bajo que el de la calcita, sus colores de interferencia son anómalos en tonos azul violáceos, también gris claro y amarillo muy claro de primer orden.

Dolomita II: cristales incoloros con aspecto sucio, subhedrales con terminaciones eubhedrales, con extinción ondulante, con dos direcciones de exfoliación, relieve variante de bajo a medio, las maclas no son visibles, birrefringencia alta.

Mineral opaco: se presenta en cristales aislados, de forma subhedral, algunos cristales presentan bordes oxidados. Se encuentran entre los cristales de la dolomita I y el clasto.

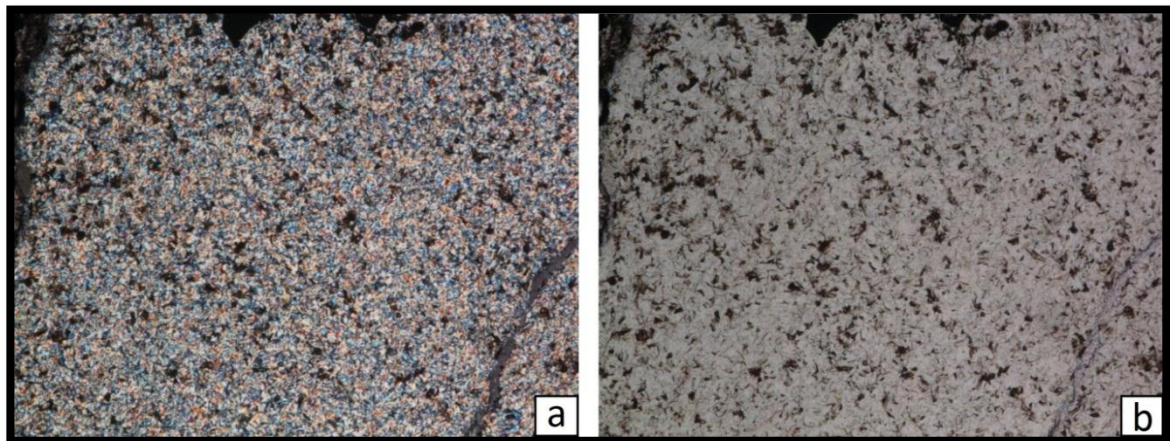


FIGURA 21. Agregado criptocristalino de clorita en el cemento mostrando a) colores de interferencia anómalos en nicols cruzados con aumento de 5x y b) su color verde pálido en nicols paralelos con aumento de 5x.

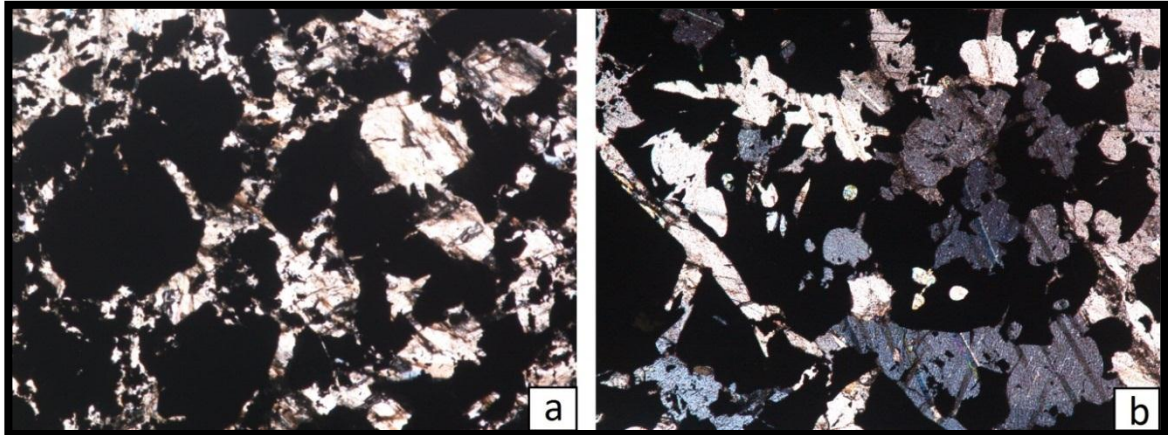


FIGURA 22. Características morfológicas del pirobitumen en las brechas tipo II. a) pirobitumen con bordes irregulares, en nicoles paralelo con aumento de 5x, b) calcita con pirobitumen de formas anhedrales y bordes curvos, en nicoles cruzados con aumento de 5x.

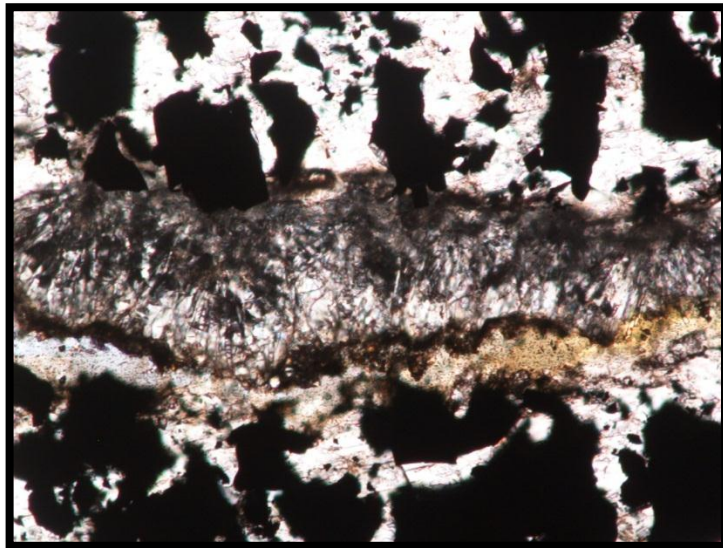


FIGURA 23. Vena de calcita incolora con relieve moderado y textura radial que corta la masa fundamental de la brecha tipo II.

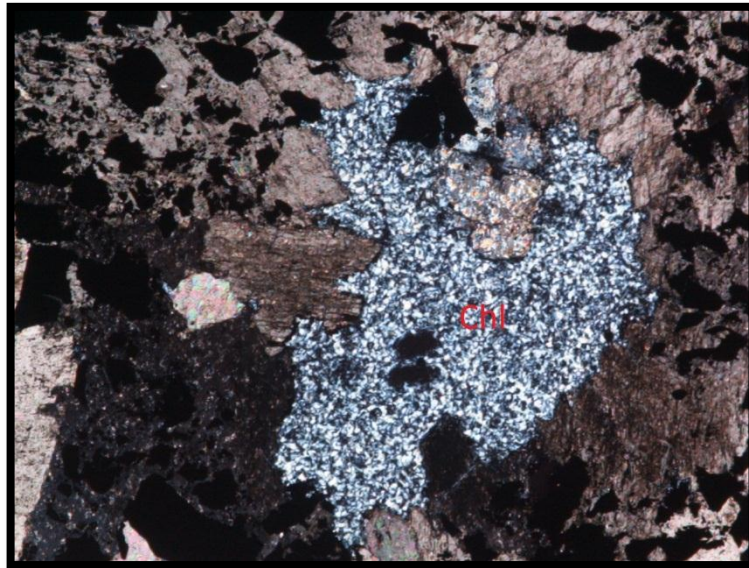


FIGURA 24. Clorita del cemento de la brecha tipo II, en nicules cruzados con aumento de 5x, rodeada por calcita y dolomita II.

5.8.3 Brechas tipo III

CLASTOS DE LODOLITA CALCÁREA

Calcita: cristales incoloros, de forma anhedral, con aspecto sucio, relieve moderado, birrefringencia alta, en algunos granos se puede apreciar dos direcciones de exfoliación, no presenta maclas.

Cuarzo: cristales anhedrales a subhedrales, incoloros, relieve bajo, con colores de interferencia gris claro.

Minerales Opacos: forma subhedral, presenta oxidación en los bordes, estos minerales opacos se encuentran en los intersticios entre los cristales de calcita.

MATRIZ DE PIROBITUMEN

Granos anhedrales a subhedrales, de color negro, con bordes curvos. Se encuentran cortados y rodeados por calcita y clorita. Los granos más finos de pirobitumen se encuentran orientados.

CEMENTO

Calcita: cristales incoloros limpios, de forma anhedral, relieve variante de bajo a medio, dos direcciones de exfoliación, maclas en dos direcciones y birrefringencia fuerte. Cuando la calcita está en contacto con la clorita presenta un relieve un poco más fuerte y la misma forma de agregado criptocristalino de la clorita.

Clorita: agregado criptocristalino, color verde claro con pleocroísmo leve, relieve medio a bajo, presenta colores de interferencia anómalos, se encuentra cortando y bordeando el pirobitumen y en contacto también con la calcita.

Dolomita I: cristales alargados, de forma anhedral a subhedral, con bordes curvos, incoloros pero con aspecto un poco sucio, el relieve es variante al girar la platina de bajo a medio, presenta dos direcciones de exfoliación que son más visibles hacia los bordes del cristal, extinción a 45° y otros cristales presentan extinción ondulante, no presenta maclas y su birrefringencia es alta. Entre los bordes de algunos cristales de dolomita se encuentra cuarzo anhedral.

Dolomita II: cristales anhedrales a subhedrales, incoloros con aspecto un poco sucio, extinción ondulante, relieve variante de bajo a medio, presenta dos direcciones de exfoliación, birrefringencia alta, algunos cristales muestran maclas delgadas en una dirección y algunos de sus cristales presentan terminaciones euhedrales.

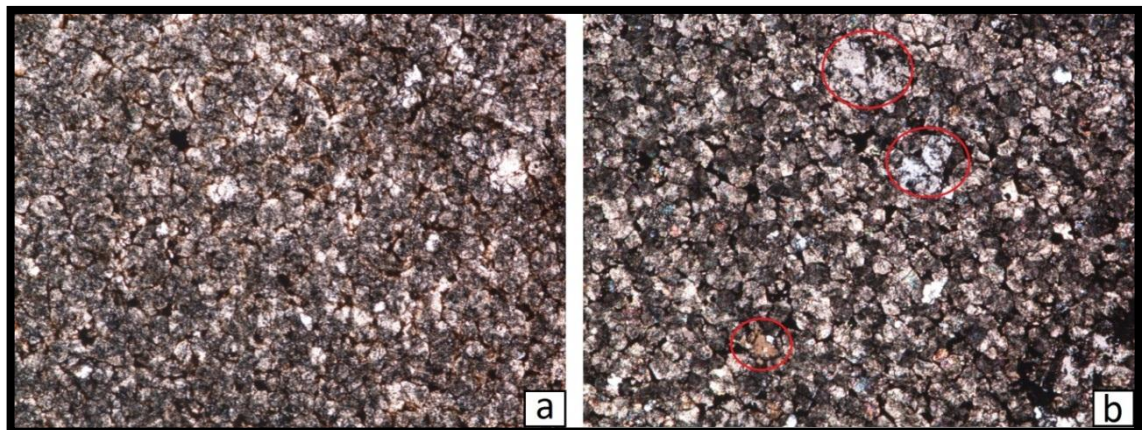


FIGURA 25. Características petrográficas del clasto de lodolita calcárea en la muestra LM2-1C (Brecha tipo I). a) Caliza microcristalina y dolomita I. Nicoles paralelos con aumento de 5x. b) lodolita calcárea resaltando los cristales de cuarzo que se encuentran en los clastos. Nicoles cruzados con aumento de 5x.

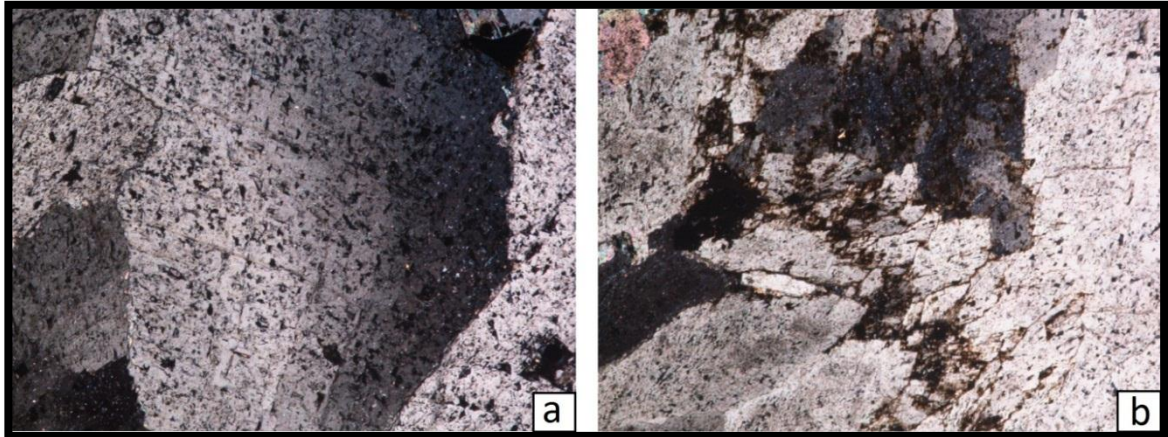


FIGURA 26. Dolomitas de textura cockade. a) Cristal subhedral de dolomita con dos direcciones de exfoliación y extinción ondulante, en nicoles cruzados con aumento de 5x, b) Contacto oxidado de la dolomita gris y la dolomita blanca, en nicoles cruzados con aumento de 5x.

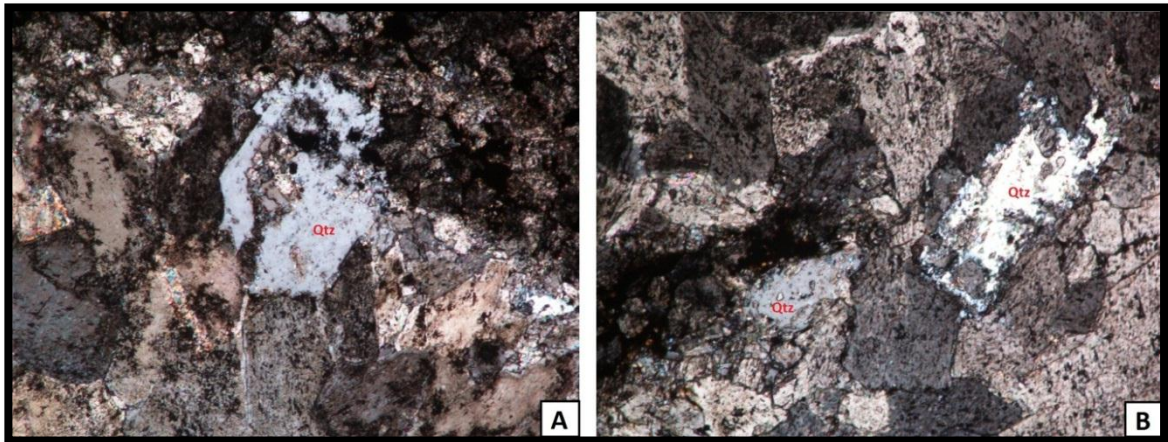


FIGURA 27. Cristales de cuarzo presentes en el cemento. A) cristal de cuarzo presente en la dolomita I, en nicoles cruzados con aumento de 10x. B) cristales de cuarzo presentes en la dolomita II.

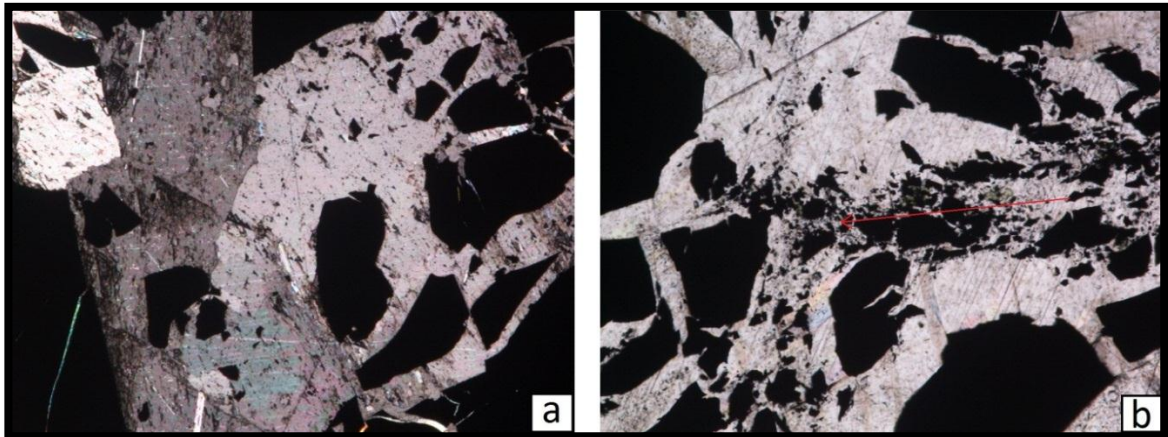


FIGURA 28. Matriz de pirobitumen de las brechas tipo III. a) pirobitumen de formas subhedrales con bordes rectos bien definidos, rodeado por calcita del cemento. En nicols cruzados con aumento de 5x, b) pirobitumen muy fino mostrando una orientación preferencial con respecto a los granos más grandes, en nicols paralelos con aumento de 5x.

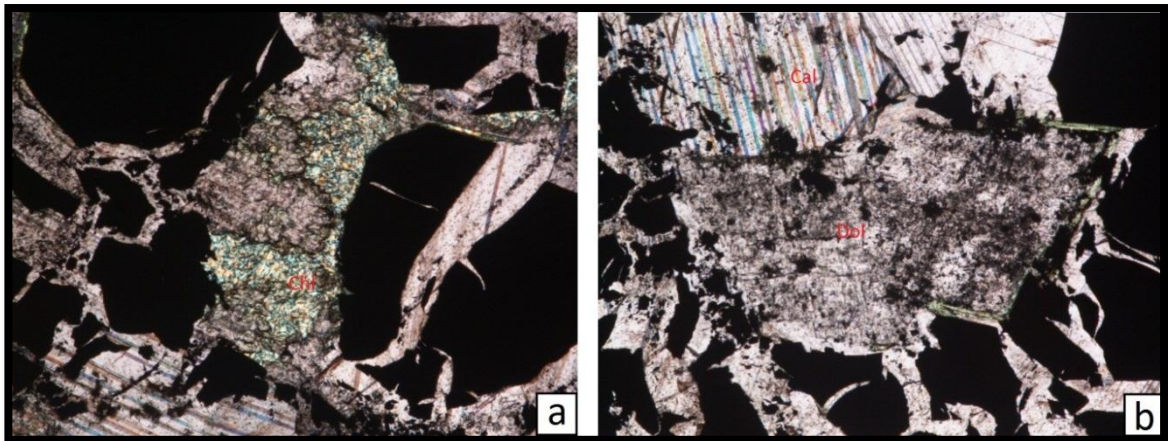


FIGURA 29. Masa fundamental de la brecha. a) Calcita del cemento en contacto con clorita amorfa en nicols cruzados con aumento de 5x, b) Dolomita incolora de aspecto sucio y formas subhedrales en el cemento, junto con calcita y clorita de habito hojoso en el borde derecho del cristal de dolomita.

5.9 ANÁLISIS DE QUÍMICA MINERAL

La muestra analizada con la microsonda electrónica fue la muestra LM23 correspondiente a las brechas tipo II, a la cual se le realizó un barrido transversal obteniendo resultados de química mineral del clasto de lodolita calcárea y de la dolomita, calcita y clorita del cemento.

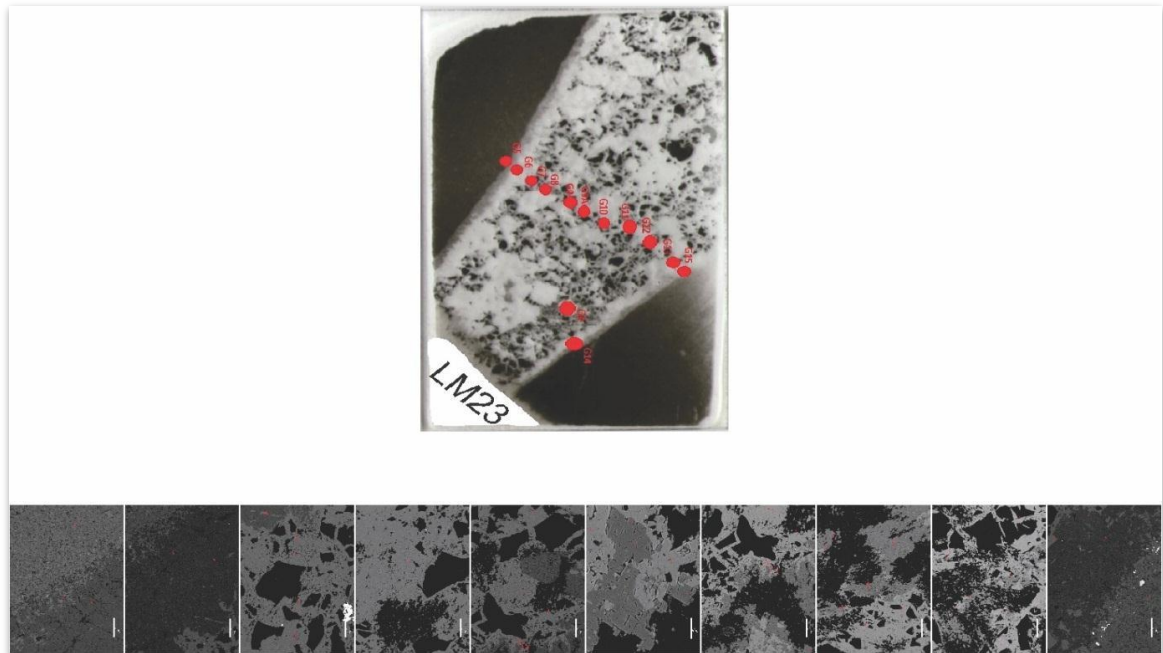


FIGURA 30. Mosaico de Fotografías mostrando la variación textural y composicional de las brechas tipo II.

5.9.1 Clasificación de los carbonatos

Los resultados de los análisis en los clastos de caliza de la brecha se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 5. Resultados de la microsonda en el clasto de la brecha tipo II.

PUNTO	LÍNEA	FeO	MnO	MgO	CaO	SrO	BaO	CO ₂	O	TOTAL
LM-23 G5(C)	187	0,064957	0,002584	0,457571	53,752	0,039144	-0,01176	43,8454	0	98,1499
LM-23 G5(C)	189	0,01623	0,034882	0,325714	57,1823	0,282193	-0,01047	42,988	0	100,819
LM-23 G14(C)	244	0,018601	0,029794	0,380876	55,7064	0,146104	-0,00939	43,364	0	99,6364

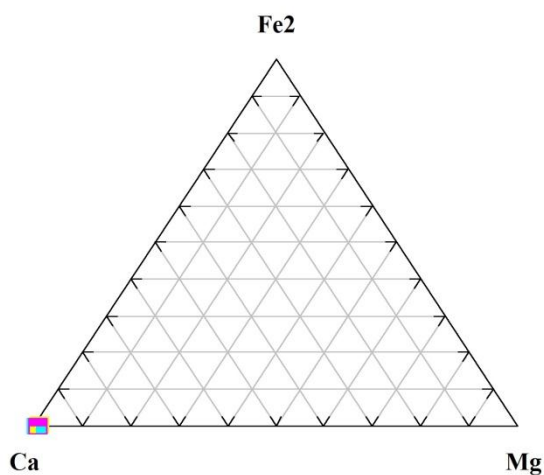


FIGURA 31. Diagrama Ternario para la clasificación de los carbonatos del clasto de la brecha tipo II.

Con los datos anteriores podemos ver que el clasto está compuesto en su mayoría por calcita debido a su alto contenido CaO y su bajo contenido en MgO.

Los análisis realizados en los carbonatos de textura cockade muestran que se componen de dolomita debido a que su contenido de magnesio y calcio son casi iguales.

TABLA 6. Resultados de la microsonda en las dolomitas del cemento de la brecha tipo II.

PUNTO	LÍNEA	FeO	MnO	MgO	CaO	SrO	BaO	CO ₂	O	TOTAL
LM-23 G5(C)	188	0,577035	0,078829	21,7048	29,9518	0,052266	-0,01265	47,0477	4E-06	99,3997
LM-23 G6(C)	190	0,004654	0,036192	21,0761	30,2465	0,037499	-0,00751	47,267	4E-06	98,6604
LM-23 G7(C)	193	0,006991	0,045305	19,1245	29,4513	0,029478	0,006658	47,7604	0	96,4247
LM-23 G14(C)	245	0,212184	0,132109	22,1543	29,931	0,020855	0,00838	47,0988	0	99,5577
LM-23 G14(C)	246	-0,00584	0,02334	21,0804	30,7511	0,046697	0,011627	47,1271	8E-06	99,0344
LM-23 G14(C)	247	0,105133	0,07527	22,095	29,9023	0,071512	0,007106	47,1488	0	99,4052
LM-23 G14(C)	248	1,06644	0,079051	20,6146	29,4392	0,023665	0,006444	47,1726	0	98,402
LM-23 G14(C)	249	0,292034	0,045415	21,1908	29,3757	0,037139	-0,02323	47,3915	0	98,3094

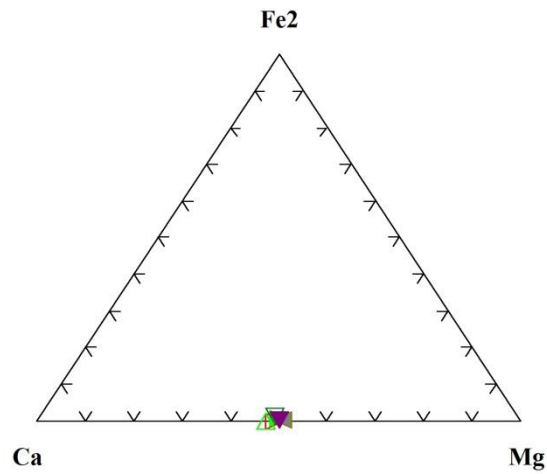


FIGURA 32. Diagrama ternario para los carbonatos con textura *cockade* en el cemento de la brecha tipo II.

En el cemento de la brecha se encontraron dolomitas con textura *cockade* y también cristales aislados de esta.

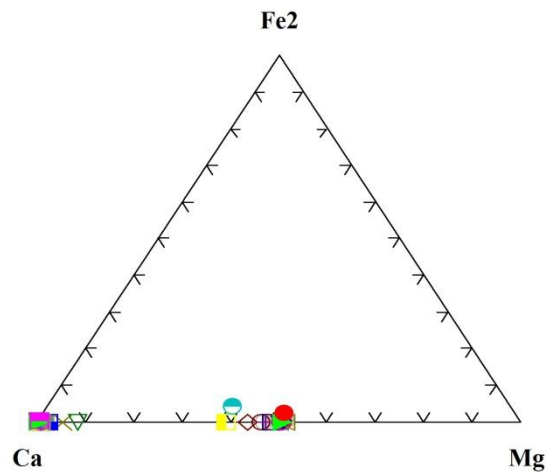


FIGURA 33. Diagrama ternario para la clasificación de los carbonatos del cemento de la brecha tipo II.

5.9.2 Clasificación de la clorita presente en el cemento de la brecha tipo II.

Según la difracción de rayos X vemos que la única fase presente es la clorita por lo que podemos descartar estratificados en la clorita (FIGURA 38).

En la clorita del cemento los componentes principales son el oxígeno, aluminio, sílice y magnesio. Los datos obtenidos de la clorita fueron introducidos al programa Minpet el cual la clasificó como un clinocloro (FIGURA 36).

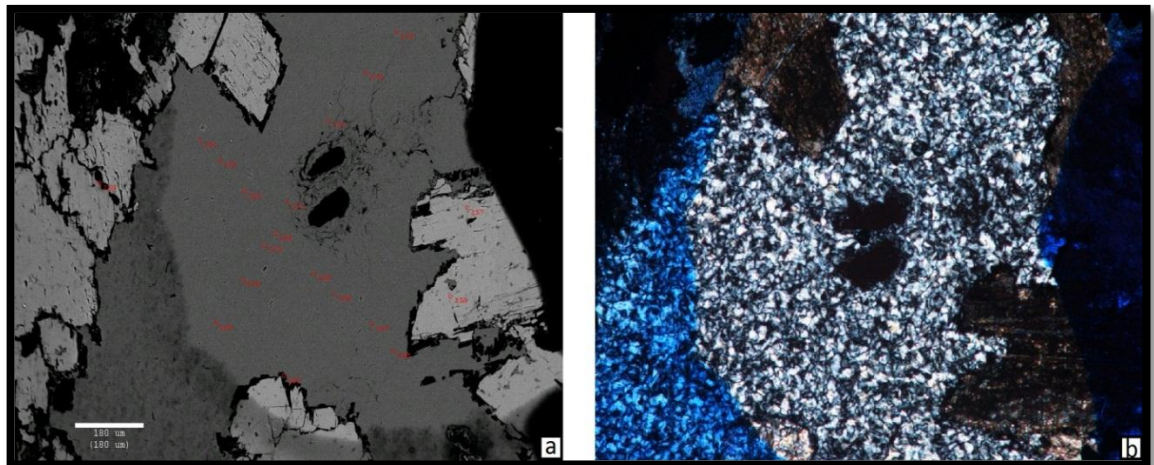


FIGURA 34. Imágenes del cemento de la sección LM23 perteneciente a la brecha tipo II. a) Imagen G4 de la microsonda mostrando la clorita en contacto con la calcita. b) imagen de la clorita en sección delgada, en nicoles cruzados con aumento de 10x.

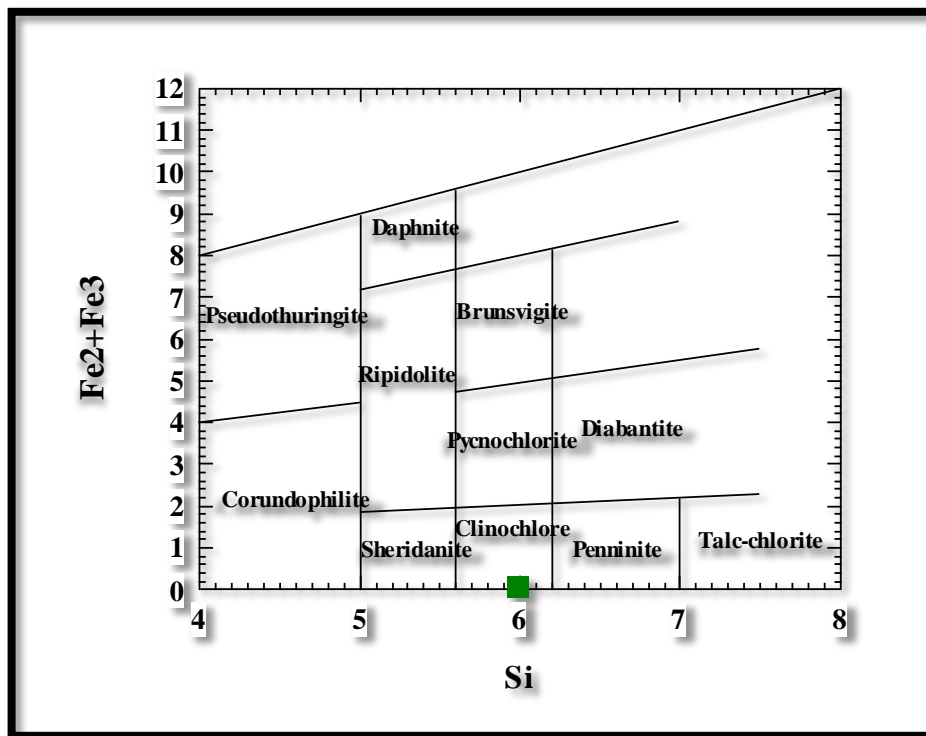


FIGURA 35. Diagrama para la clasificación de cloritas según Hey (1954).

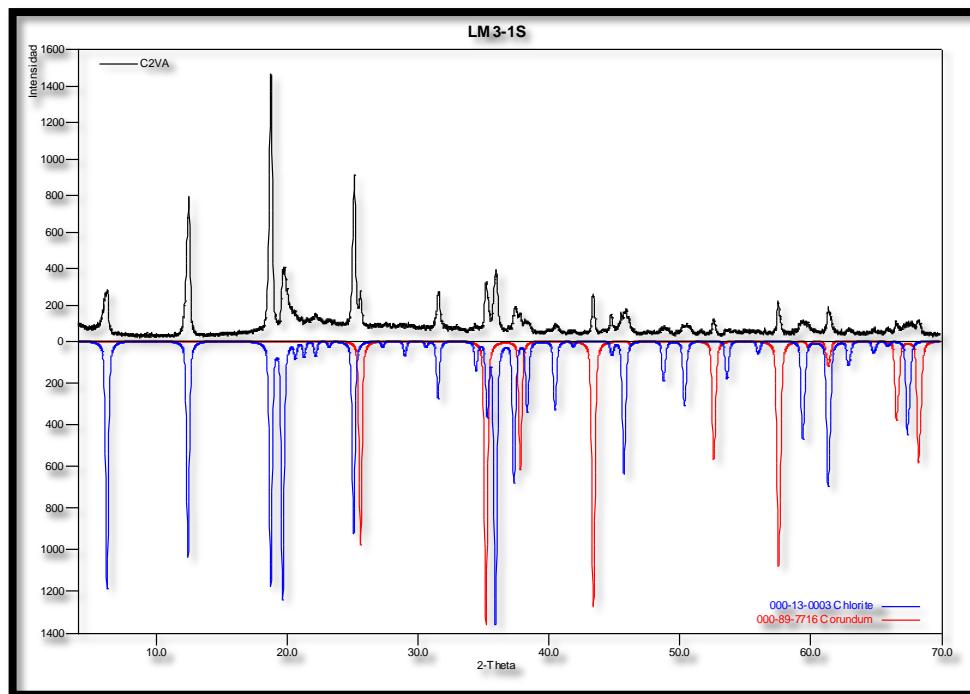


FIGURA 36. Difractograma de la clorita, reconocida en el cemento de la brecha de la muestra LM3-1 perteneciente a las brechas tipo I.

5.9.2.1 Geotermometría de Cloritas

La estructura de los filosilicatos está conformada por capas tetraédricas y octaédricas, éstos se clasifican por la forma como estas capas se apilan. En las cloritas la distancia a la que se repiten las capas es de 14Å, la unidad estructural incluye cuatro capas una octaédrica de brucita, y otra octaédrica de gibbsita o brucita entre dos tetraédricas. Estas estructuras están unidas por cationes alcalinos de Na y K mediante enlaces débiles. La fórmula química del clinocloro es $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$.

La clorita la podemos encontrar en una gran variedad de rocas y ambientes geológicos existe una gran variedad composicional de cloritas que presentan las condiciones físico químicas bajo las cuales fueron formadas (De Caritat *et al.*, 1993). La variación composicional de la clorita depende de la composición total de la roca, las condiciones físico químicas que prevalecieron durante el tiempo de formación como la temperatura, la presión, el pH, y la actividad de los cationes metálicos y de SO_2 , O_2 y CO_2 disueltos en el fluido (Inoue, 2009). Las condiciones de presión y temperatura a las que se desarrolla este mineral es entre 150°C y 450°C. Los cambios químicos más significativos con el aumento de la temperatura son el aumento en el contenido de Al^{IV} y el descenso en los contenidos de Si^{IV} y X_{Fe} (Esteban *et al.*, 2007). Se han desarrollado una serie de geotermómetros basados en la composición química de las cloritas en el campo geotérmico de Salton See en California. Los cuales fueron utilizados en el presente trabajo para determinar la temperatura de formación del clinocloro.

Por medio de la química mineral de la clorita y aplicando los geotermómetros de Cathelineau y Nieva (1985), Kranidiotis y MacLean (1987) y Cathelineau (1988), se pudo obtener la temperatura de formación de la clorita, pero debido al bajo contenido de hierro en la clorita y al alto contenido de magnesio estas temperaturas no son valores confiables.

TABLA 7. Composición química de la clorita del cemento de la brecha LM23 perteneciente a las brechas tipo II, representada en óxidos mayores.

CLORITAS DEL CEMENTO DE LA BRECHA				
LÍNEA	263	266	269	270
SiO ₂ (Wt%)	32,86	32,66	32,95	33,06
TiO ₂ (Wt%)	0,00	0,00	0,01	0,00
Al ₂ O ₃ (Wt%)	35,47	35,16	35,38	35,93
Cr ₂ O ₃ (Wt%)	0,11	0,26	0,18	0,15
FeO (Wt%)	0,22	0,15	0,25	0,22
MnO (Wt%)	0,00	0,04	0,01	0,02
MgO (Wt%)	13,65	13,28	13,49	13,55
CaO (Wt%)	0,07	0,11	0,08	0,10
Na ₂ O (Wt%)	0,00	0,00	0,01	0,00
K ₂ O (Wt%)	0,02	0,04	0,04	0,01
TOTAL	82,399	81,694	82,373	83,053

Los cationes utilizados para la fórmula de la temperatura de la clorita se obtuvieron del programa Mimpet.

TABLA 8. Cationes de la clorita del cemento de la brecha, empleados en los geotermómetros.

Si	3,082	3,090	3,091	3,076
Al _{IV}	0,918	0,910	0,909	0,924
Al _{VI}	3,005	3,013	3,007	3,020
Ti	0,000	0,000	0,001	0,000
Cr	0,008	0,020	0,013	0,011
Fe ²⁺	0,002	0,001	0,002	0,002
Mn	0,000	0,003	0,001	0,001
Mg	1,908	1,872	1,886	1,880
Ca	0,007	0,011	0,008	0,010
Na	0,001	0,002	0,003	0,000
K	0,005	0,009	0,009	0,003
Fe/(Fe+Mg)	0,0008	0,0006	0,0009	0,0008

TABLA 9. Resultados de la geotermometría de la clorita del cemento de la brecha LM23 perteneciente a la brecha tipo II.

MUESTRA	LINEA	TIPO DE CLORITA	T (°C) Cath. y Nivea	T (°C) Kranidiotis	T (°C) Cathelineau
LM23-G4	263	Clinocloro	213,40	212,77	233,80
	266		211,60	210,96	231,08
	269		211,43	210,81	230,81
	270		214,55	213,91	235,53

5.10 DIFRACCION DE RAYOS X

Los análisis de difracción de rayos X fueron aplicados a 7 muestras tomadas aguas arriba de la quebrada Órganos desde el puente que comunica a Jesús María con Sucre y cerca de la desembocadura de la quebrada Los Micos en la quebrada Órganos y en el margen derecho e izquierdo de la quebrada Órganos en este mismo punto. Las muestras analizadas fueron la LM2-1C, LM3-1, la clorita del cemento de la muestra LM3-1, y las muestras LM10-1, LM10-3 y LM10-4 (FIGURA 9 Y 10).

5.10.1 Brechas tipo I

5.10.1.1 Muestra LM2-1C

Esta muestra fue recolectada en la quebrada los Micos cinco metros aguas arriba de la desembocadura en la quebrada Órganos y corresponde a los clastos de lodolita calcárea de las brechas de la estación LM2.

TABLA 10. Resultados de la difracción de rayos x del clasto lítico de lodolita calcárea en la muestra LM2-1C perteneciente a las brechas tipo I.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	CaCO_3	Calcita	67.1 % (D.E = 0.4)
	Si O_2	Cuarzo	8.7 % (D.E = 0.2)
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita	4.8 % (D.E = 0.1)
	Fe_2O_3	Hematita	N.C
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	3.2 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Mg,Fe,Al})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Clinocloro	7.9 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Mg}_6\text{Fe}_2(\text{OH})_{16} (\text{CO}_3) (\text{H}_2\text{O})_4)_{.25}$	Sjoegrenita	0.6 % (D.E = 0.1)
	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	Pirocroita	1.3 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino			93.6 %
Amorfos y otros			6.4 %

Los resultados de la difracción para esta muestra revelan ocho fases minerales, de las cuales la calcita compone más del 50%. Presenta las mismas fases minerales que la masa fundamental en la muestra anterior con excepción del pirobitumen, la caolinita y sjoegrenita.

La sjoegrenita pertenece al grupo de la manasita, cristaliza en el sistema hexagonal, presenta colores blanco, amarillo y marrón, brillo vítreo. Se presenta de forma tabular, escamas laminares o en formas fibrosas. Es un dimorfo con el mineral piroaurita, está asociado a la dolomita, piroaurita, calcita, fosterita, brucita, ludwigite y serpentina. Se presenta en venas hidrotermales de baja temperatura en un cuerpo mineralizado metamorfoseado de hierro y magnesio en Langban, Suecia (www.galleries.com/minerals).

5.10.1.2 Muestra LM3-1

Esta muestra corresponde solamente a la masa fundamental (carbonatos, clorita, esfalerita, pirobitumen) de la brecha recolectada en la estación LM3 (FIGURA 9 Y 10).

TABLA 11. Resultados de la difracción de rayos x en el cemento de la muestra LM3-1, perteneciente a las brechas tipo I.

FASE		NOMBRE	PORCENTAJE
CRISTALINOS	CaCO_3	Calcita	42.1 % (D.E = 0.3)
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita	1.2 % (D.E = 0.1)
	Si O_2	Cuarzo	1.1 % (D.E = 0.1)
	Fe_2O_3	Hematita	N.C
	$\text{Mg}_2 \text{Al}_3 (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	Clorita	---
	$\text{Zn}_{0.586} \text{Fe}_{0.414} \text{S}$	Esfalerita	0.4 % (D.E = 0.1)
	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	Pirocroita	0.3 % (D.E = 0.1)
	$\text{K Al}_2 \text{Si}_3 \text{Al O}_{10} (\text{OH})_2$	Muscovita	2.6 % (D.E = 0.2)
TOTAL CRISTALINOS			47.7 %
AMORFOS Y OTROS			52.3 %

En la tabla anterior se observa que el principal constituyente de la masa fundamental de la muestra es el pirobitumen (material amorfo) y la calcita. También se encontró la fase mineral pirocroita, la cual no se alcanzó a identificar en muestra de mano y en sección delgada, la esfalerita fue descrita en muestra de mano pero en sección delgada fue reportada como minerales opacos junto con la hematita.

La pirocroita pertenece al grupo de la brucita, es un mineral opaco de brillo perlado que cristaliza en el sistema trigonal, de forma tabular principalmente, también romboédrico y rara vez prismático. Se encuentra generalmente en yacimientos de manganeso, asociado con rodocrosita (Taylor, 1983).

5.10.1.3 Muestra LM3-1S

Esta muestra es un fragmento de clorita que se extrajo del cemento de la brecha LM3-1 que pertenece a las brechas tipo I, a la cual se le colocó este código para diferenciarla de la muestra LM3-1.

Esta muestra no fue cuantificada ya que no se tiene sus datos cristalográficos reportados en la base de datos para su respectiva cuantificación. Sin embargo, al identificarse una sola fase en la muestra LM3-1S, se puede estimar que está presente en un 100%.

TABLA 12. Resultados de la Difracción de Rayos X en la clorita del cemento de la muestra LM3-1, pertenecientes a las brechas tipo I.

FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
$Mg_2 Al_3 (Si_3Al) O_{10} (OH)_8$	Clorita	---

5.10.2 Shale negro

Estas muestras corresponden a los paquetes de lodolitas negras que se encontraron a lo largo de la quebrada Órganos y la quebrada Los Micos.

TABLA 13. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-1 correspondiente al shale negro.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	$Si O_2$	Cuarzo	76.3 % (D.E = 0.2)
	TiO_2	Anatasa	N.C
	$(K_{0.82} Na_{0.18})(Fe_{0.03})$	Moscovita	16.4 % (D.E = 0.2)
	$(Mg_{2.96} Fe_{1.55} Fe_{.136} Al_{1.275})$	Clinocloro	1.6 % (D.E = 0.1)
	$CaSO_4 (H_2O)_2$	Yeso	1.0 % (D.E = 0.1)
	Fe_2O_3	Hematita	0.2 % (D.E = 0.1)
	$(Mg, Al)_5 (Si, Al)_8 O_{20} (OH)_2$	Palygorskita	0.7 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino			96.2 %
Amorfos y otros			3.8 %

TABLA 14. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-3 correspondiente al shale negro.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	Si O_2	Cuarzo	72.3 % (D.E = 0.2)
	$\text{K Al}_2 \text{ Si}_3 \text{ Al O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	16.5 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro	1.1 % (D.E = 0.1)
	$\text{Mg}_5 (\text{Si}_4 \text{ O}_{10})_2 (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_8$	Palygorskita	4.7 % (D.E = 0.1)
	Fe_2O_3	Hematita	0.3 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino			94.9 %
Amorfos			5.1 %

TABLA 15. Resultados de la difracción de rayos x en la muestra LM10-4 correspondiente al shale negro.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	Si O_2	Cuarzo	76.4 % (D.E = 0.3)
	TiO_2	Anatasa	N.C
	$(\text{K}_{0.82} \text{ Na}_{0.18})(\text{Fe}_{0.03} \text{ Al}_{1.97})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}$	Moscovita	14.2 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro	1.7 % (D.E = 0.1)
	$\text{CaSO}_4 (\text{H}_2\text{O})_2$	Yeso	0.9 % (D.E = 0.1)
	Fe_2O_3	Hematita	0.6 % (D.E = 0.1)
	$\text{Mg}_5 (\text{Si}_4 \text{ O}_{10})_2 (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_8$	Palygorskita	3.0 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino			96.8 %
Amorfos y otros			3.2 %

En los resultados de la difracción de rayos x realizados a tres muestras del shale se puede observar que el mineral predominante es el cuarzo, el cual comprende más del 70% de la roca y la moscovita que representa más del 10% de la muestra.

También se encontraron minerales poco frecuentes como la palygorskita y la anatasa.

La anatasa pertenece al grupo del rutilo, cristaliza en el sistema tetragonal, su morfología es dipiramidal y tabular, está asociada con rutilo, brookita, calcita, hematites y cuarzo. En las rocas ígneas se presenta como un mineral accesorio como producto de la descomposición de la perovskita de carbonatitas en condiciones lateríticas, como producto hidrotermal tardío en rocas plutónicas básicas alcalinas, en venas hidrotermales de origen metamórfico. En las rocas sedimentarias se presenta como mineral autógeno o por metamorfismo hidrotermal de bajo grado de éstas (Melgarejo, 2003).

La palygorskita también conocida como atapulgita pertenece al grupo de la sepiolita, cristaliza en el sistema monoclinico y ortorrómbico, su hábito es fibroso o asbestiforme. En ambientes sedimentarios la palygorskita se precipita bajo condiciones alcalinas, con aluminio y silicio generado por disolución de silicatos, en ambientes con alta concentración de magnesio en presencia de dolomita (Melgarejo, 2003).

5.11 MADUREZ TERMAL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS COMPONENTES DE LAS BRECHAS

Los carbones están constituidos por macerales que son los equivalentes a los minerales en las rocas ígneas metamórficas y sedimentarias clásticas y su estudio se efectúa por microscopía de luz reflejada. Hay tres grupos de macerales que son la vitrinita, la inertinita y la liptinita. La vitrinita posee mediana reflectividad, tonalidad grisácea y bajo relieve, están formados por restos de material leñoso y corteza, y se subdivide en colinita y telinita. La inertinita es blanquecina muy reflectante y de relieve positivo, está compuesta por tejidos leñosos de plantas superiores, restos de hongos y materia orgánica fina con alto contenido de carbono, existen cinco tipos de macerales en el grupo de la inertinita que son la fusinita, semifusinita, esclerotinita, micrinita y macrinita. La liptinita es gris oscura, con baja reflectividad y alto relieve, está compuesta por restos de esporas, cutícula, resinas y algas, y se divide en esporitina, cutinina, resinita y alginita (Spalletti, 2005).

La Reflectancia de Vitrinita (R_o), es un parámetro que permite obtener un valor estimativo de la madurez de la materia orgánica. Consiste en hacer incidir un rayo de luz brillante sobre una partícula de vitrinita y determinar el porcentaje de luz reflejado. Entre mayor sea el grado de madurez térmica mayor será el porcentaje de reflectancia ($\%R_o$).

5.11.1 Resultados obtenidos

Estos análisis se realizaron a dos muestras: a los clastos de pirobitumen y a los clastos de lodolita calcárea presentes en las brechas.

Los resultados de estos análisis en el pirobitumen muestran macerales de colores muy brillantes y muy blancos, algunos de estos macerales presentan fracturas debido al pulido, otros presentan superficies sucias, pero en general son granos limpios de color blanco muy brillante, que corresponderían al grupo de la inertinita, de la variedad fusinita y micrinita (FIGURA 37). Los valores de reflectancia medidos en la inertinita van desde 3,17% y 3,3%.

TABLA 16. Parámetros estadísticos de los valores de reflectancia en el pirobitumen.

Desviación Estandar	0,030618153
Promedio	3,232666667
Mediana	3,23
Moda	3,24

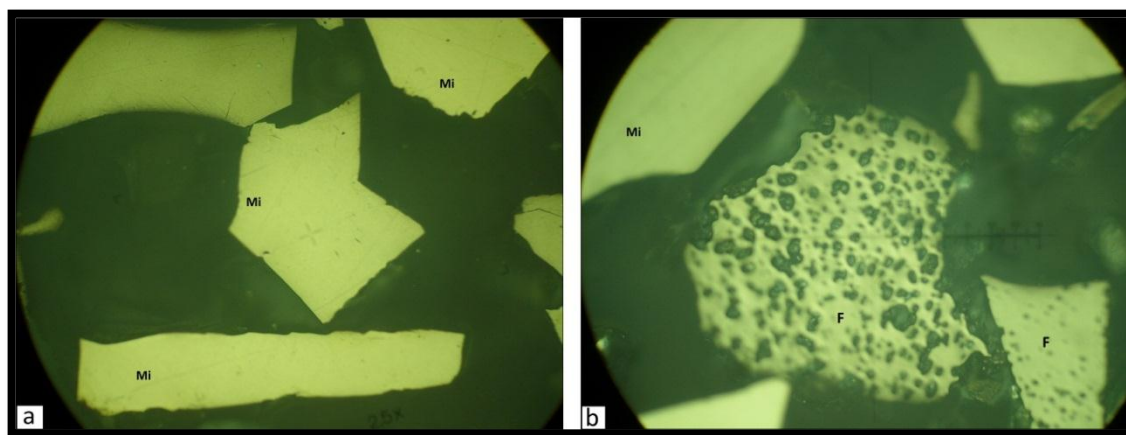


FIGURA 37. Características del pirobitumen bajo luz reflejada mostrando el maceral de inertinita. A) inertinita de la variedad micrinita *Mi*. B) inertinita de la variedad fusinita *F* con algunas micrinitas alrededor.

Los resultados de la muestra de lodolita calcárea que compone los clastos de las brechas, presentan relictos de la roca original, exhibe maceral vitrinita muy diseminada, fragmentada y en poca cantidad, presenta un color gris y parece estar

embebida en una masa oscura de minerales y óxidos (FIGURA 38). Los valores de reflectancia de vitrinita obtenidos van desde 0,37% y 0,46%.

TABLA 17. Parámetros estadísticos de los valores de reflectancia en la caliza.

Desviación Estandar	0,029987371
Promedio	0,415833333
Moda	0,44
Mediana	0,415

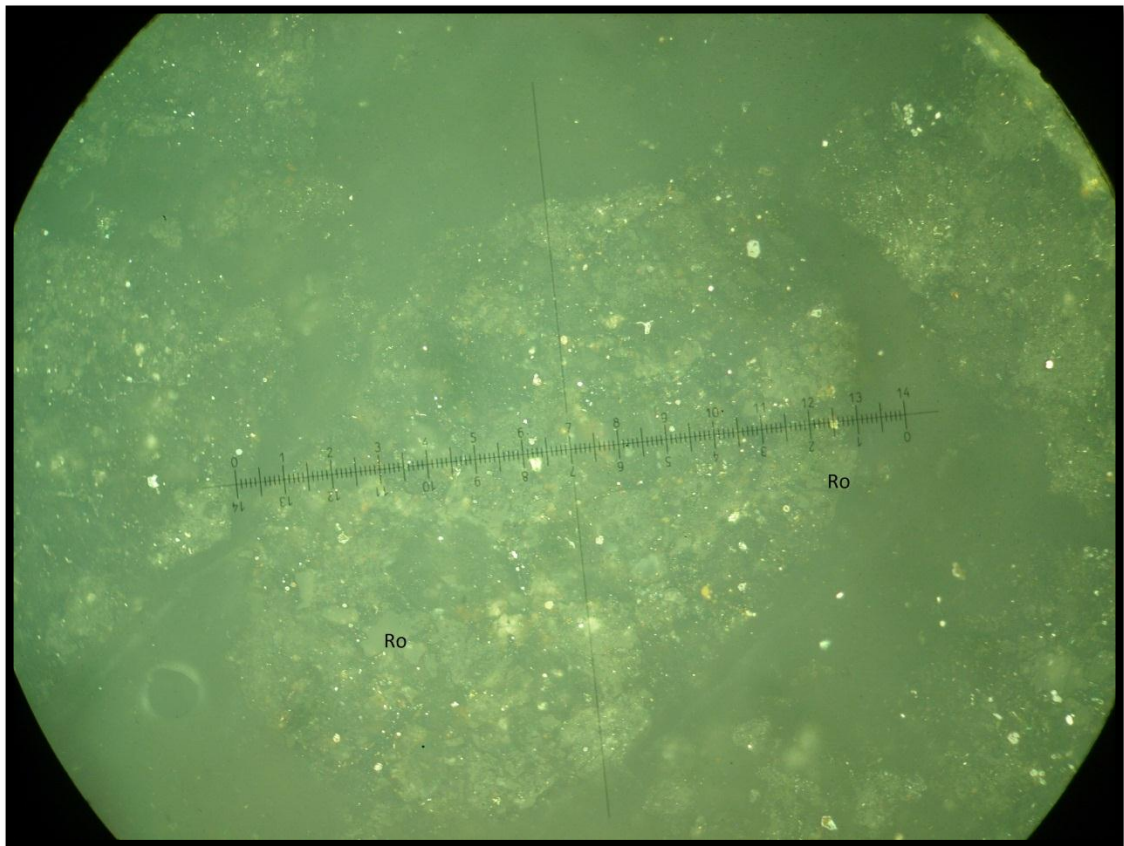


FIGURA 38. Características de la lodolita calcárea de los clastos de las brechas, bajo luz reflejada, mostrando el maceral de vitrina color gris.

5.11.2 Interpretación de los resultados

Aunque los diagramas que relacionan la temperatura con la reflectancia de vitrinita de Maraven (1991), están establecidos solo para la vitrinita, en el presente trabajo fueron emplearemos también para la reflectancia de inertinita con el propósito de obtener una idea sobre la madurez termal del pirobitumen. Debido a que en la reflectancia de los macerales del pirobitumen se obtuvieron valores alrededor de 3,23% se puede pensar que la roca generadora de ésta materia orgánica fue calentada más de 225°C llegando casi hasta los 250°C y sufrió un enterramiento mayor a 4 kilómetros de profundidad, con lo cual podemos decir que estas rocas se encontraban en metagénesis, en la ventana de generación de gas seco.

Según los resultados obtenidos de la reflectancia de vitrinita en la caliza (0,42%) podemos inferir que ésta es todavía una roca inmadura que alcanza una temperatura máxima de aproximadamente 50°C y un enterramiento entre 1 y 2 kilómetros de profundidad (Maraven, 1991), llegando casi al límite entre la diagénesis y la catagénesis.

5.12 ESTUDIO PETROGRÁFICO Y MICROTERMOMÉTRICO EN INCLUSIONES FLUIDAS (IF) EN LOS CEMENTOS DE LAS BRECHAS TIPO I Y TIPO III

Este estudio petrográfico y microtermométrico se centró fundamentalmente en determinar si los fluidos atrapados en los cementos estaban en estado homogéneo o heterogéneo y las posibles temperaturas de atrapamiento. La determinación del sistema químico de esos paleofluidos, no fue un elemento central del presente estudio.

5.12.1 Consideraciones preliminares sobre las inclusiones fluidas

La mayoría de los minerales se forman en un medio acuoso, por lo que partes mínimas de estos líquidos pueden quedar atrapados en su interior durante las etapas de crecimiento del cristal. Es normal y frecuente que esto ocurra, sabiendo lo imperfecta y defectuosa que resulta la mecánica de crecimiento de los cristales, una vez conseguida la nucleación (Velasco, 2004). Las inclusiones fluidas ocupan cavidades microscópicas que quedan dentro de minerales depositados a partir de una solución hidrotermal y pueden estar compuestas de fases líquidas, sólidas y gaseosas. Las inclusiones fluidas permiten obtener datos del sistema hidrotermal en el que se formó el mineral como la temperatura, la presión, la composición general del fluido y la densidad del fluido.

Las inclusiones fluidas se pueden clasificar según las fases presentes, la morfología y la relación temporal entre las asociaciones de inclusiones fluidas. Para la clasificación de las fases presentes se utilizó la clasificación de Sheppard *et al.* (1985), el cual propone seis tipos de inclusiones que son: las inclusiones tipo I que están compuestas solo por la fase líquida, las inclusiones tipo II presentan dos fases una líquida y otra de vapor pero la fase líquida representa más del 50% del volumen de la inclusión. Las inclusiones tipo III presentan también dos fases

liquidadas pero la fase vapor ocupa más del 50% del volumen de la inclusión. Las inclusiones tipo IV presentan una sola fase de vapor. Las inclusiones tipo V contienen las fases líquida, vapor y sólida. Las inclusiones tipo VI presentan más de una fase líquida de diferente composición y una fase vapor.

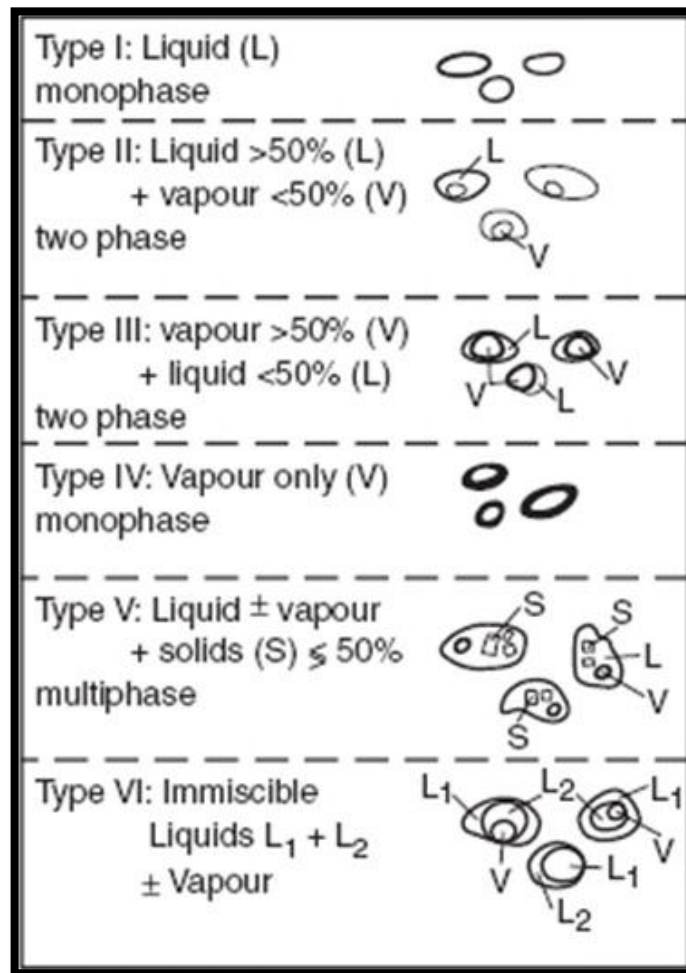


FIGURA 39. Clasificación de las inclusiones fluidas según las fases presentes de Sheppard *et al.* (1985)

Según su morfología podemos clasificar las inclusiones como irregulares que suelen encontrarse en las superficies de exfoliación y en las microfisuras que cruzan que cruzan los cristales. Cuando los bordes de la inclusión muestran

superficies planas relacionadas a la estructura del cristal o son paralelas a las caras cristalinas o direcciones de exfoliación se habla de inclusiones regulares. Las formas esferoidales con bordes redondeados se llamas ovoides y en algunos casos pueden presentar extremos en forma de ganchos. La última clasificación morfológica corresponde a las formas tabulares de carácter elongado y con extremos más o menos redondeados, pueden encontrarse en los minerales de hábito prismático y puede considerarse como una variante extrema de las inclusiones ovoides (Velasco, 2004).

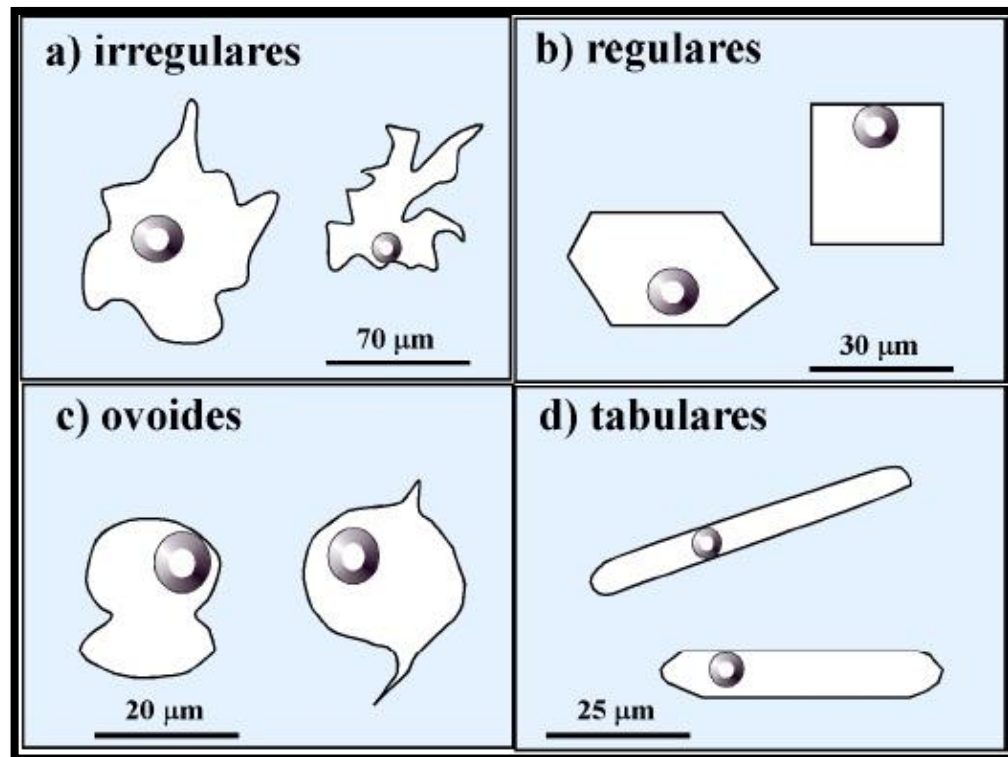


FIGURA 40. Clasificación de las inclusiones fluidas según su morfología. Tomado de Velasco (2004).

El último criterio para la clasificación de las inclusiones fluidas es el criterio genético, este es un criterio de temporalidad de la formación de las inclusiones y del tiempo de formación del mineral huésped. Las inclusiones fluidas primarias son

las que se forman durante el crecimiento del cristal, nos dan información acerca de la solución hidrotermal que formó el mineral, estas inclusiones son paralelas a las caras de crecimiento, se encuentran también en pequeños grupos con distribución al azar en las tres direcciones espaciales, también como inclusiones aisladas separadas entre sí y con tamaños relativamente grandes. Las inclusiones fluidas secundarias se dan durante eventos posteriores a la formación del cristal hospedador por medio de microfisuras rellenas por fluidos posteriores. Las inclusiones secundarias son de menor tamaño que las primarias, se encuentran orientadas y cortando los bordes del cristal o las superficies de exfoliación. También existe otro grupo de inclusiones que son las pseudosecundarias son un caso especial de las secundarias ya que se forman en microfisuras durante el crecimiento del cristal y se encuentran alineadas pero no cortan los bordes del cristal.

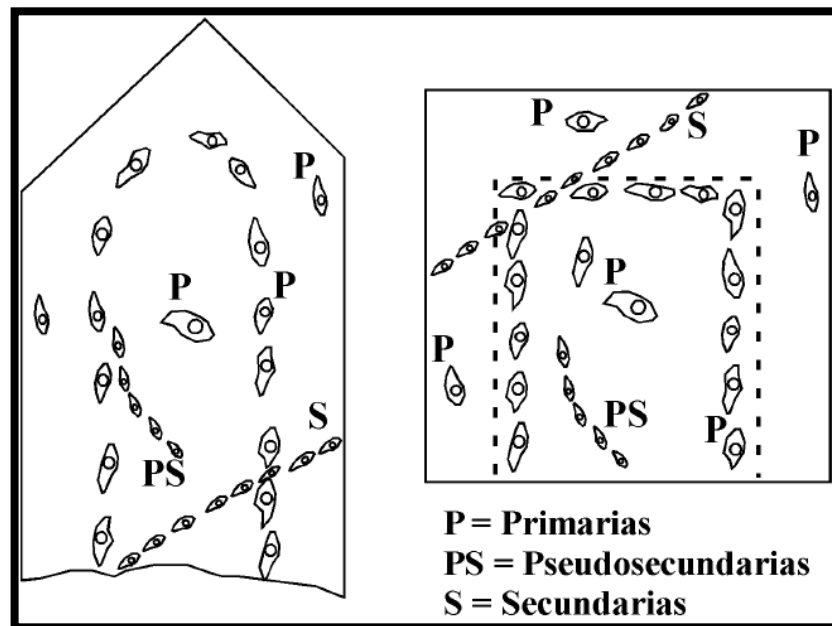


FIGURA 41. Distribución de las inclusiones fluidas. Tomado de Velasco (2004).

5.12.2 Petrografía de las inclusiones fluidas

5.12.2.1 Vena de carbonato

MUESTRA LM5-1

Esta muestra pertenece a una vena de carbonato en la lodolita calcárea encontrada en la quebrada Órganos, aguas arriba desde el puente que comunica el municipio de Jesús María con Sucre.



Esta vena está compuesta por calcita de tamaños variados, los cristales pequeños tienen formas anhedrales y bordes curvos, mientras que los cristales grandes presentan formas subhedrales.

La asociación de inclusiones fluidas primarias que predominan en la sección son las inclusiones bifásicas tipo II ricas en líquido con un factor de relleno entre 0.89 y 0.95 y de formas regulares, ovoides e irregulares.

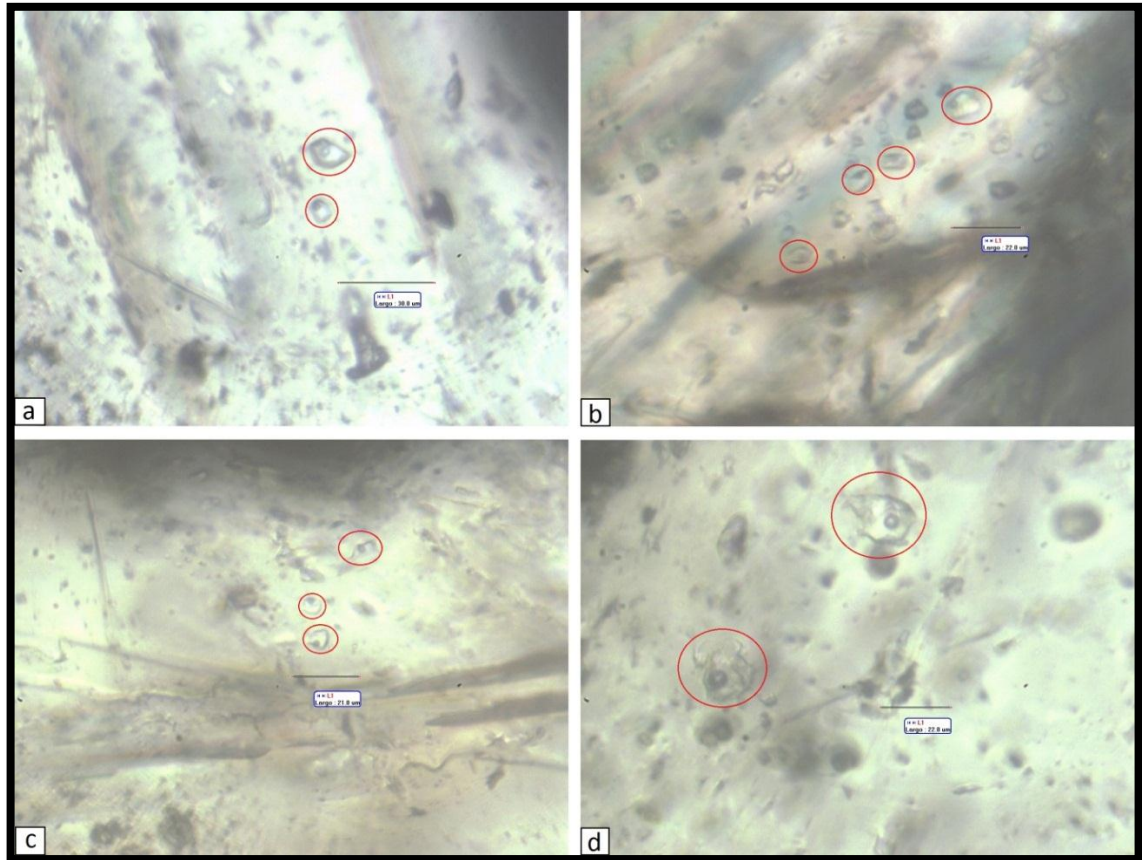
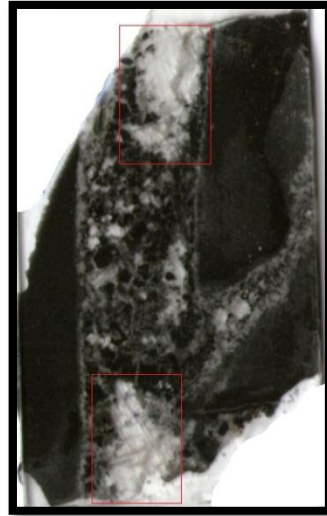


FIGURA 42. Inclusiones primarias tipo II en la muestra LM5-1. A) inclusiones de formas regulares con grado de relleno de 0.91 y tamaños de 9.7 y 5.2 micras. b) inclusiones fluidas ovoides con factor de relleno de 0.89 y 0.95 de tamaño entre 7 y 8.7 micras. c) inclusiones fluidas ovoides

5.12.2.2 Brechas tipo I

MUESTRA LM2-2

Esta muestra corresponde a una brecha tomada en la quebrada Los Micos, que es afluente a la quebrada Órganos.



Las asociaciones de inclusiones fluidas medidas en esta muestra están hospedadas en dos grandes cristales de calcita que hacen parte del cemento de la brecha. Las inclusiones fluidas primarias tomadas en esta muestra son tipo I, II, III, V y VI. Las inclusiones tipo I son generalmente tabulares y algunas regulares, en las tipo II encontramos todas las formas descritas anteriormente (FIGURA 41), éstas presentan grados de relleno entre 0,75 y 0,95. Las inclusiones tipo III tienen formas ovoides, con un factor de relleno entre 0,59 y 0,62. La tipo V presenta forma tabular y la tipo VI es de forma irregular.

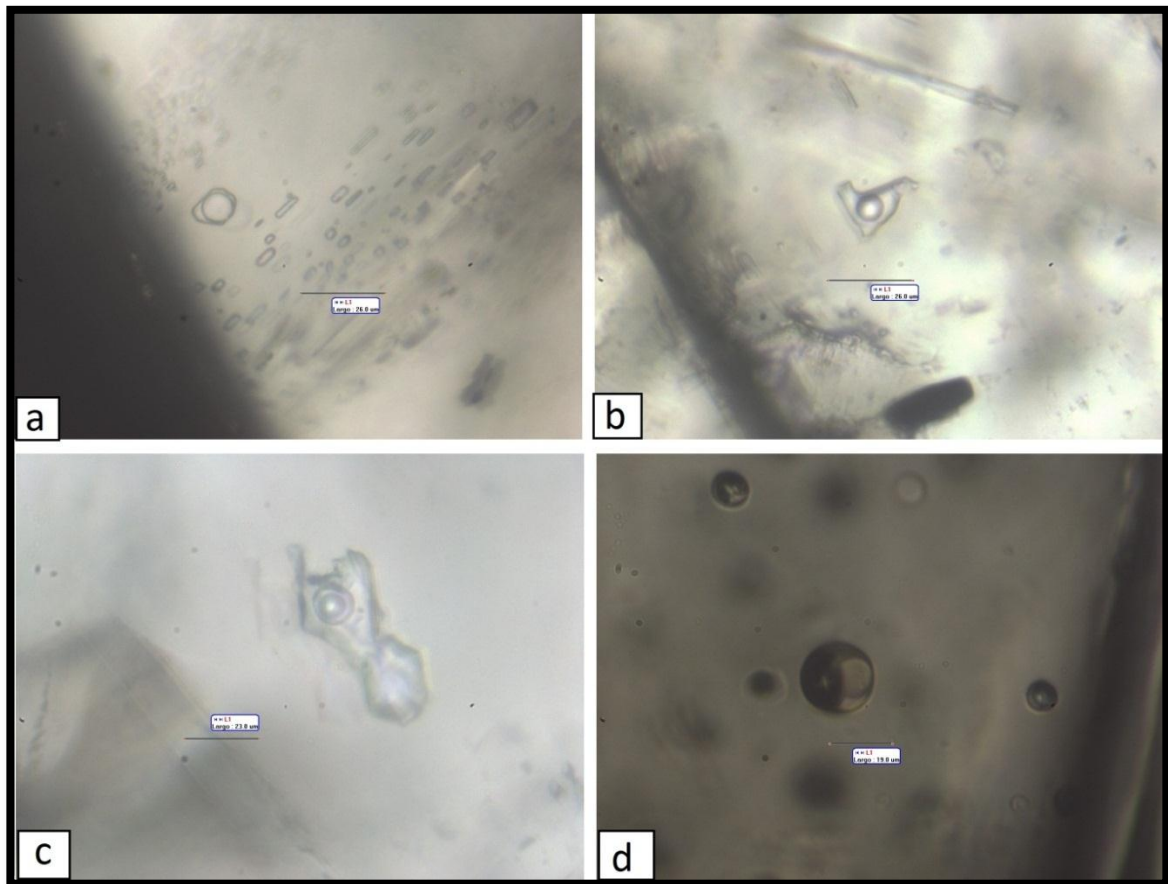
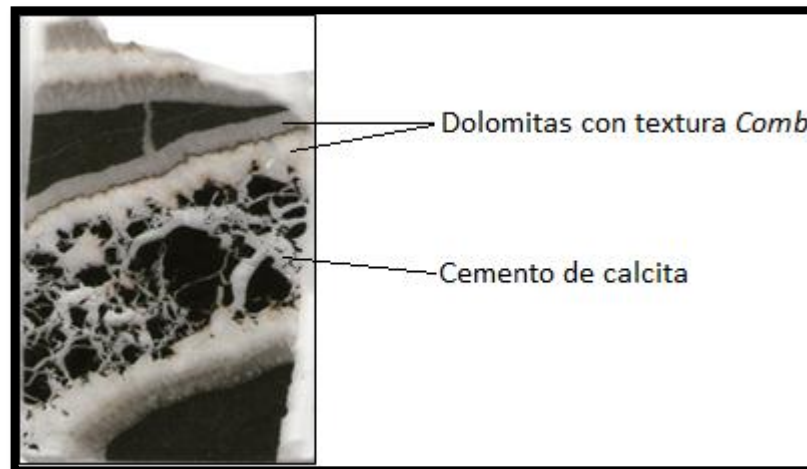


FIGURA 43. Asociación e inclusiones fluidas en el cemento de la muestra LM2-2 que corresponde a las brechas tipo I. A) Inclusiones tipo I y tipo III, de forma tabular y ovoide respectivamente. B) Inclusiones tipo II de forma irregular, con grado de relleno de 0,75. C) Inclusión tipo VI, de forma irregular. d) Inclusión fluida tipo VI, posiblemente con hidrocarburos.

5.12.2.3 Brechas tipo III

MUESTRA LM18-IF

Esta muestra corresponde a una brecha recogida en la quebrada Órganos.



En esta brecha se estudiaron las asociaciones de inclusiones fluidas hospedadas en las dolomitas de textura *comb* y en las calcitas del cemento. Las inclusiones fluidas presentes en las dolomitas son principalmente tipo II, de formas regulares e irregulares y con un factor de relleno entre 0,68 y 0,95. La asociación de inclusiones fluidas hospedadas en el cemento de calcita que se estudiaron fueron las inclusiones tipo II, III y tipo V. Las inclusiones tipo II son de forma regular y tabular, con grado de relleno entre 0,86 y 0,91. La inclusión tipo III presenta forma tabular y grado de relleno de 0,57. Las inclusiones tipo V son de forma regular y tabular.

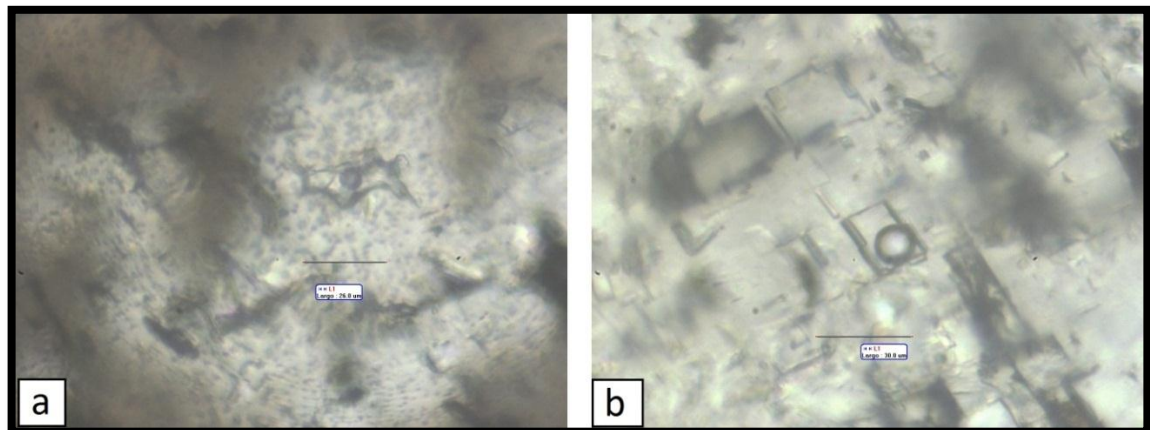


FIGURA 44. Inclusiones fluidas presentes en las dolomitas de la muestra LM18-IF. a) Inclusión fluida primaria tipo II de forma irregular con grado de relleno de 0,86. b) Inclusión fluida primaria de forma regular con grado de relleno de 0,68.

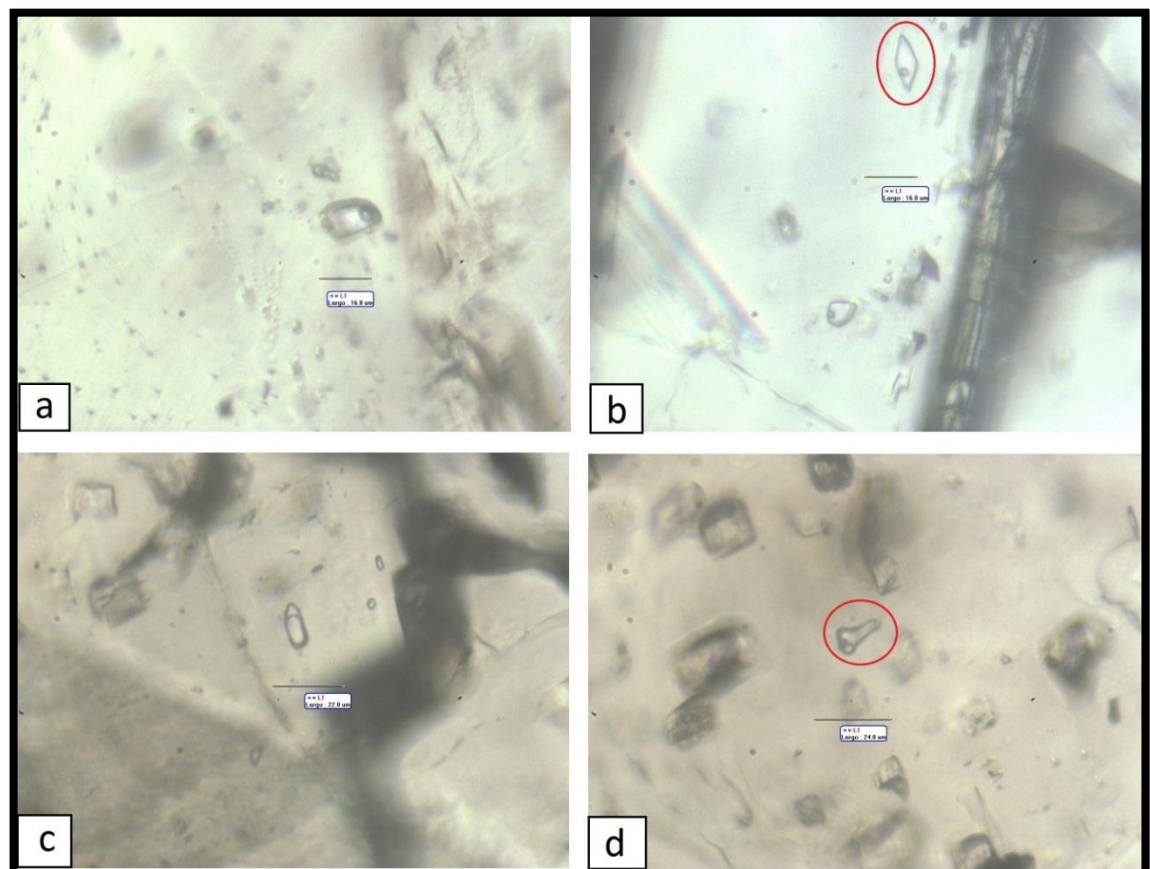


FIGURA 45. Asociación de inclusiones fluidas primarias en el cemento de calcita de la muestra LM18-IF. a) inclusión fluida tipo II de forma tabular, con grado de relleno de 0,86. B) inclusión tipo II de forma regular, con grado de relleno de 0,91.

C) inclusión fluida tipo III de forma tabular, con grado de relleno de 0,57. D) Inclusión fluida tipo V de forma tabular.

Según las asociaciones de inclusiones fluidas estudiadas en las tres muestras podemos observar que en las dolomitas del cemento de las brechas existe predominio de las inclusiones fluidas bifásicas ricas en líquido (Tipo II), mientras que en las calcitas del cemento encontramos todas las variedades de inclusiones fluidas mencionadas anteriormente (FIGURA 46, 47 y 48). También se encontraron en el cemento de calcita inclusiones de formas ovoides, multifásicas compuestas por más de una fase líquida y una fase de vapor, las cuales podrían sugerir la presencia de hidrocarburos en el fluido al momento del atrapamiento. Las inclusiones multifásicas tipo V se presentan en las calcitas y en la dolomita 2 (blanca) principalmente con morfologías regulares y tabulares. Algunas de las inclusiones bifásicas tipo II presentes en la calcita y en la dolomita sufrieron decrepitación debido a que la presión interna de la inclusión superó la presión externa de confinamiento, produciendo un escape de la solución (Velasco, 2004).

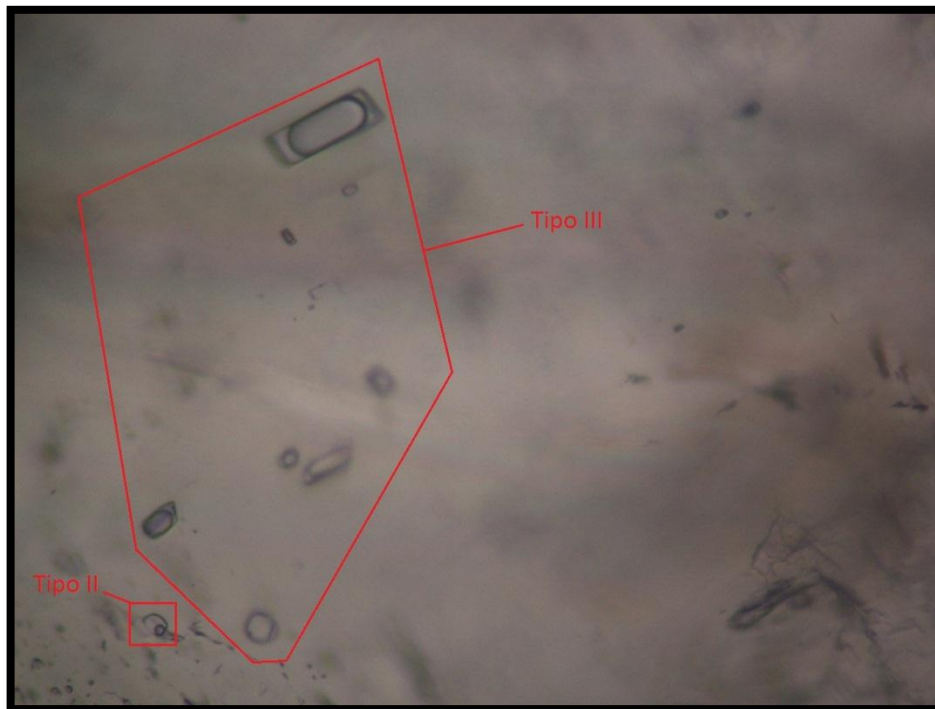


FIGURA 46. Asociación de inclusiones fluidas tipo II y tipo III en las calcitas del cemento de la muestra LM2-2, perteneciente a las brechas tipo I.

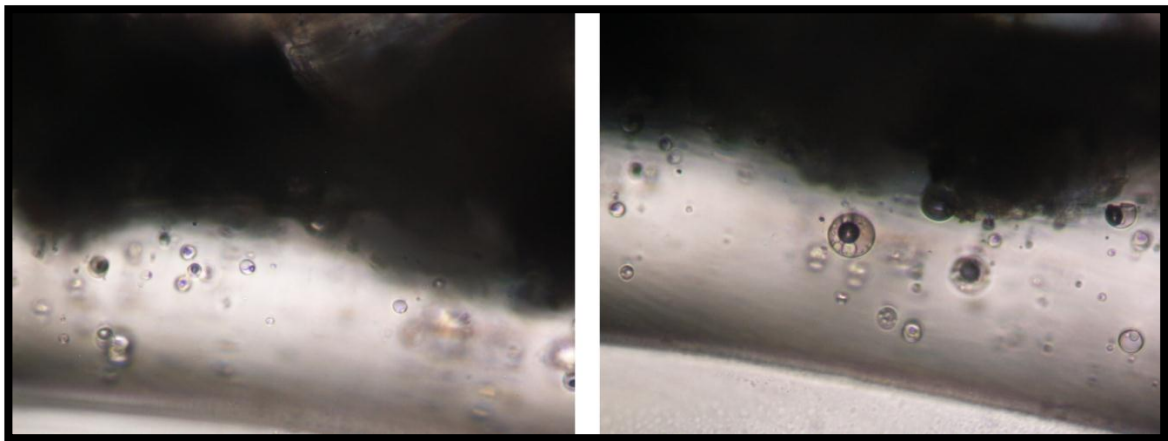


FIGURA 47. Inclusiones Fluidas multifasicas tipo VI con presencia de hidrocarburos en el cemento de la muestra LM2-2, correspondiente a las brechas tipo I.

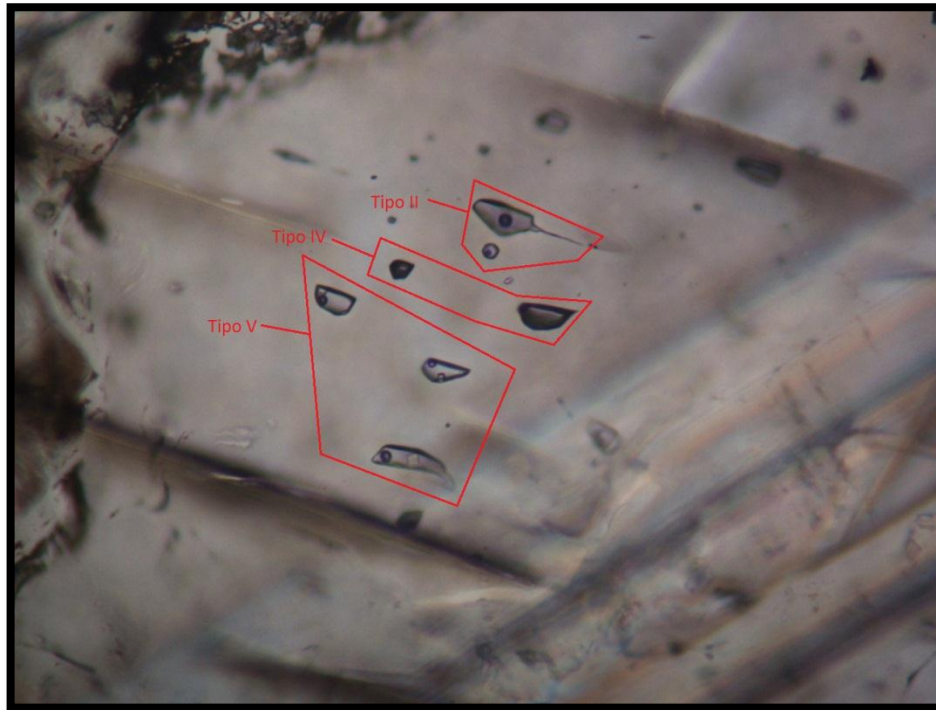


FIGURA 48. Asociación de inclusiones fluidas tipo II, IV y V en las calcitas del cemento de las brechas tipo III en la muestra LM18-IF.

5.12.3 Resultados microtermométricos

Las temperaturas medidas en el laboratorio aportan una información muy importante en el estudio de las inclusiones fluidas, una vez la inclusión ha alcanzado la temperatura de -180°C se comienza a calentar y se observa en que momento empiezan a fundir los cristales de hielo para así obtener la temperatura eutéctica o de primera fusión (T_e) con la cual se puede conocer la composición del fluido o de los fluidos presentes en la inclusión, una vez empieza a fundir el hielo, la inclusión se sigue calentando y observando hasta ver la fusión del último cristal de hielo que quede en la inclusión que es llamada la temperatura de fusión final del hielo (T_f) la cual nos ayuda a conocer la salinidad del sistema y por último

observamos el comportamiento de las fases presentes en la inclusión una vez superada la temperatura de fusión hasta que desaparezca la fase vapor o la fase líquida en la inclusión para el caso de las inclusiones bifásicas la cual se conoce como la temperatura de homogenización (T_h) que nos indica la temperatura que tenían los fluidos en el momento en que la inclusión fue atrapada.

TABLA 18. Resumen de los datos microtermométricos y las características de las asociaciones de inclusiones fluidas de las muestras mencionadas anteriormente.

MUESTRA	MINERAL HOSPEDADOR	TIPO	FASES	T_h (°C)	T_d (°C)	HOMOGENIZA	FACTOR DE RELLENO
LM5-1 VENA	Calcita	II	L+V	149,48		L+V → L	0,91
		II	L+V	142,49		L+V → L	0,89
		II	L+V	142,09		L+V → L	0,95
		II	L+V	146,51		L+V → L	0,90
		II	L+V	142,6		L+V → L	0,93
BRECHA TIPO I LM2-2	Calcita	I	L	?		L	
		II	L+V	254,43		L+V → L	0,89
		II	L+V	271,22		L+V → L	0,86
		II	L+V	?	191,04	-	0,75
		II	L+V	248,89		L+V → L	0,86
		II	L+V	165,89		L+V → V	0,95
		III	L+V	272,54		L+V → V	0,62
		III	L+V	?	317,3	L+V → V	0,59
BRECHA TIPO III LM18-IF	Dolomita	II	L+V	150,8		L+V → L	0,86
		II	L+V	383,6		L+V → L	0,68
		II	L+V	119,2		L+V → L	0,95
		II	L+V	111,8		L+V → L	0,90
		II	L+V	115,08		L+V+ → L	0,93
		II	L+V	176,35		L+V+ → V	0,80
	Calcita	II	L+V	153,82		L+V → L	0,91
		II	L+V	180,78		L+V → L	0,86
		III	L+V	?	306,74	L+V+ → V	0,57
		V	L+S+V	117,59		L+S+V → L	
		V	L+S+V	124,9		L+S+V → L	
		V	L+S+V	113,25		L+S+V → L	
		V	L+S+V	127,35		L+S+V → L	

T_h : Temperatura de Homogenización

T_d : Temperatura de Decrepitación



De la tabla anterior se puede observar que las inclusiones fluidas del cemento de la brecha tipo I presentan valores más altos en las temperaturas de homogenización, que las inclusiones fluidas de las brechas tipo III.

5.13 CONCLUSIONES PRELIMINARES SOBRE LA TIPOLOGÍA DE BRECHAS, A PARTIR DE LA DESCRIPCIÓN DE SUS ATRIBUTOS.

La variación de los tamaños del pirobitumen entre las brechas tipo II y las tipo I y III se deben probablemente a que el pirobitumen que se encuentra en las tipo I y III se habría enfriado y solidificado antes de que precipitara la calcita, mientras que el pirobitumen de las tipo II no se había enfriado totalmente sino que tenía un aspecto más viscoso en el momento en que la calcita precipitara.

Los agregados granulares de esfalerita en el cemento están casi siempre asociados al cemento de dolomita II principalmente y a la dolomita I en menor cantidad. Por esto se podría pensar que el fluido del cual se precipito la dolomita II contenía mayor cantidad de sulfuros que el fluido que formo la dolomita gris.

En la difracción de rayos x se encontraron fases minerales que no fueron apreciadas durante las descripciones macro y microscópicas tal como la sjoegrenita, la pirocroita la anatasa y la palygorskita que son características de ambientes hidrotermales y de las rocas sedimentarias.

Las brechas estudiadas se formaron durante una serie de etapas tales como: una etapa de evolución diagenética, una etapa de evolución hidrotermal, una etapa de flujo de fluidos y una etapa de alteración supergénica.

TABLA 19. Etapas de formación de las brechas.

COMPONENTES	ETAPA DE EVOLUCION DIAGENETICA	ETAPA DE EVOLUCION HIDROTHERMAL I (PRINCIPAL)	ETAPA DE FLUJO DE FLUIDOS (II)	ETAPA DE ALTERACION SUPERGENICA
Clastos	_____			
Pirobitumen	-----			
Dolomita I		_____		
Dolomita II		_____		
Esfalerita		_____		
Clorita		¿ _____ ?		
Calcita		-----		
Quarzo				
Hematita				_____
Pirocroita				_____

En términos general, las brechas analizadas debieron haberse formado así:

1. Un evento de fracturamiento de las rocas, seguramente generado durante una etapa compresiva de las rocas sedimentarias Cretácicas, tal como lo sugiere la presencia de estos cuerpos brechas, confinados de manera casi paralela a los planos de estratificación (deformación posiblemente tipo decollement). El reconocimiento de varios sectores en los cuerpos de brechas con textura jigsaw-fit, y dado el aspecto angular de los clastos, implica que el transporte de los clastos no fue significativo durante esa etapa de deformación.
2. Una percolación de hidrocarburos (posiblemente pesados), los cuales debieron haber invadido los espacios entre los clastos o brechas tipo jigsaw-fit, generados durante el fracturamiento casi coetáneamente con el evento de brechamiento. Este evento de inyección de los paleo-hidrocarburos está hoy representado en el pirobitumen. Una evolución termal posterior del sistema rocoso en general, posiblemente facilitó la transformación de los hidrocarburos

pesados en pirobitumen, tal como lo sugieren los valores de reflectancia de vitrinita en torno a 3,2% (muy por encima del límite de estabilidad del *oil*). Esto debió tener lugar seguramente con posterioridad a la depositación de los sedimentos cretácicos, y seguramente su evolución termal estuvo condicionada por los procesos de diagénesis y diagénesis profunda. Aspectos que coinciden con procesos reportados para finales del cretácico en muchas cuencas sedimentarias del sistema Andino Colombiano. Posiblemente este evento de brechificación y migración de hidrocarburos, se generó en un sistema cerrado.

3. Muy posterior al evento antes mencionado (posiblemente durante el eoceno, tal como ha sido reportado por Mantilla (2004), para la región de Guavatá-Bolívar localizada a 11 kilómetros aproximadamente de la zona de estudio), se inyectó un fluido rico en carbonatos, los cuales generaron la precipitación inicialmente de dolomita y posteriormente de calcita (las temperaturas de las IF en estos cementos, apunta a un fluido con temperaturas máximas de 240-290°C). La inyección de este fluido, causó la brechificación del pirobitumen y por consiguiente el crecimiento del sistema brechificado. Sistema abierto para la percolación de fluidos.
4. Eventos posteriores de menor temperatura, son reconocidos mediante el estudio de IF, en donde se identificaron paleofluidos en torno a 140°C. Posiblemente, con la percolación de estos fluidos, se incorporaron hidrocarburos?. Esto implica una migración alóctona de estos fluidos con hidrocarburos muy recientes, procedente desde zonas en las cuales la madurez termal de las rocas sedimentarias era menor a la madurez termal que en ese momento tenían las litologías del sector objeto de estudio.

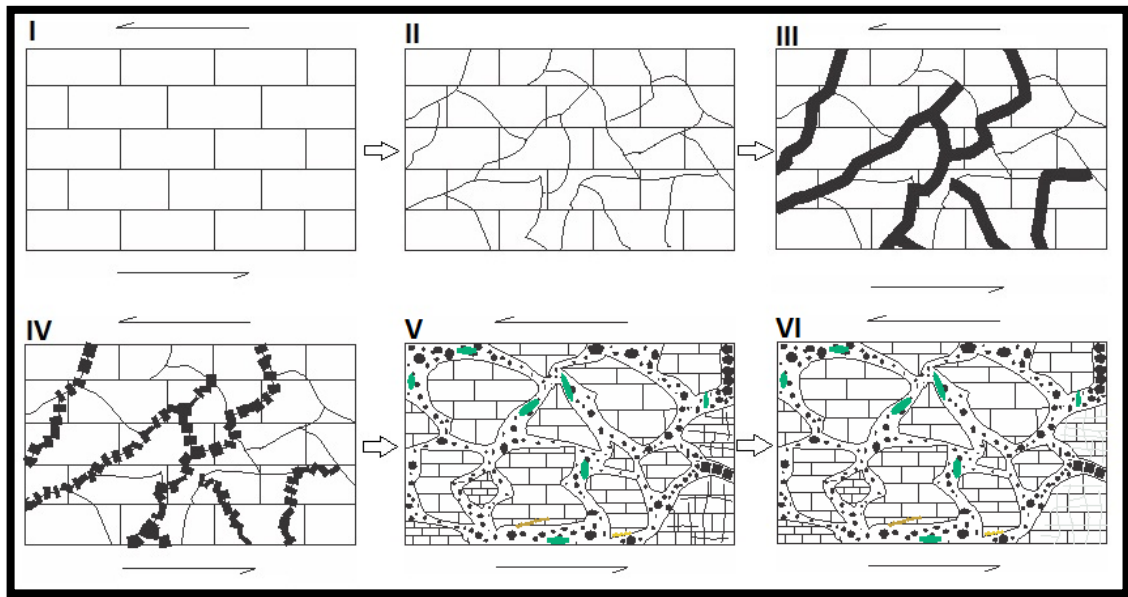


FIGURA 49. Modelo de etapas de formación de las brechas objeto de estudio.

5.14 ANÁLISIS DE FLUORECENCIA DE RAYOS X

Estos análisis de fluorescencia fueron aplicados al shale negro, a los clastos de lodolita calcárea, a la masa fundamental (matriz-cemento) de la muestra LM2 y a la masa fundamental de la muestra LM4-1, las cuales pertenecen a las brechas tipo I

En la tabla 21 y 22 se presentan los resultados de los análisis químicos obtenidos en las muestras LM2-1C, LM2-1, LM4-1, LM10-1 y LM10-4, colectadas a lo largo de la quebrada Órganos.

5.14.1 Consideraciones preliminares

Con el propósito de reconocer posibles concentraciones anómalas de los elementos analizados en las muestras del sector objeto de estudio, se tendrá presente la composición media de cada uno de los elementos en la corteza terrestre, es decir, se tendrá como referencia el Clarck.

En este sentido, en la tabla 20, se relaciona la concentración de los elementos de la corteza terrestre, y posteriormente se analizará cuáles de ellos pueden considerarse con concentraciones por encima del valor normal (sin llegar esto a decir que hayan alcanzado concentraciones económicas).

TABLA 20. Abundancia de los elementos en la corteza terrestre. Tomado de:
http://www.webelements.com/periodicity/abundance_crust/.

ELEMENTO	ppm	ppb	ELEMENTO	ppm	ppb
H	1500	1500000	Rb	60	60000
He	0,0055	5.5	Sr	360	360000
Li	17	17000	Y	29	29000
Be	1,9	1900	Zr	130	130000
B	8,7	8700	Nb	17	17000
Na	23000	23000000	Mo	1,1	1100
Mg	29000	29000000	Ag	0,08	80
Al	82000	82000000	Cd	0,15	150
P	1000	1000000	In	0,16	160
S	420	420000	Sn	2,2	2200
K	15000	15000000	Sb	0,2	200
Ca	50000	50000000	Te	0,001	1.0
Sc	26	26000	Cs	1,9	1900
Ti	6600	6600000	Ba	340	340000
V	190	190000	Hf	3,3	3300
Cr	140	140000	Ta	1,7	1700
Mn	1100	1100000	W	1,1	1100
Fe	63000	63000000	Re	0,0026	2.6
Co	30	30000	Au	0,0031	3.1
Ni	90	90000	Hg	0,067	67
Cu	68	68000	Tl	0,53	530
Zn	79	79000	Pb	10	10000
Ga	19	19000	Bi	0,025	25
Ge	1,4	1400	La	34	34000
As	2,1	2100	Ce	60	60000
Se	0,05	50	Th	6	6000

5.14.2 Resultados de la fluorescencia de rayos x

TABLA 21. Resultados de la fluorescencia de rayos x de óxidos mayores.

SAMPLE	LM2-1C	LM10-1	LM2-1	LM10-4	LM4-1
Al ₂ O ₃ %	2,99	6,91	0,37	9,36	1,76
BaO %	0,002	0,033	0,017	0,04	0,006
CaO %	45,2	0,19	45,7	0,49	48,8
Cr ₂ O ₃ %	0,006	0,015	0,003	0,016	0,002
Fe ₂ O ₃ %	1,06	1,09	0,06	4,65	0,03
K ₂ O %	0,128	1,01	0,037	1,315	0,016
MgO %	2,23	0,32	1,52	0,48	1,02
MnO %	0,047	0,003	0,033	0,004	0,029
Na ₂ O %	0,046	0,186	0,017	0,267	0,039
P ₂ O ₅ %	0,09	0,153	0,014	0,351	0,005
SiO ₂ %	8,62	81,5	0,84	69,2	1,95
SrO %	0,122	0,002	0,123	0,004	0,133
TiO ₂ %	0,11	0,28	0,02	0,32	0,01
FeO %	0,3	0,4	0,12	0,85	0,1
LOI %	38,5	9,07	50,9	13,25	45,9

TABLA 22. Resultados de la fluorescencia de rayos x de los elementos.

SAMPLE	LM2-1C	LM2-1	LM4-1	LM10-1	LM10-4
Ag ppm	0,33	0,06	0,03	0,54	0,91
Al %	0,29	0,15	0,3	0,29	0,49
As ppm	13	3	<2	19,6	124,5
Au ppm	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
B ppm	<10	<10	<10	<10	<10
Ba ppm	30	160	90	30	40
Be ppm	0,19	<0.05	<0.05	0,17	0,51
Bi ppm	0,04	<0.01	<0.01	0,14	0,21
Ca %	>25.0	>25.0	>25.0	0,16	0,38
Cd ppm	1,96	14,65	6,47	0,22	6,78
Ce ppm	10,5	6,14	6,68	5,6	7,53
Co ppm	2,3	0,7	0,8	3,1	13,8
Cr ppm	11	1	<1	7	10
Cs ppm	0,25	0,57	0,28	1,48	1,93
Cu ppm	20,1	11,9	6,9	24,1	183
Fe %	0,7	0,11	0,06	0,69	3,24
Ga ppm	0,59	0,43	0,53	0,91	1,17
Ge ppm	<0.05	<0.05	<0.05	0,07	0,2
Hf ppm	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0,02
Hg ppm	0,02	0,02	0,01	0,05	0,08
In ppm	0,009	<0.005	<0.005	0,011	0,034
K %	0,02	0,03	0,01	0,09	0,12
La ppm	6,7	2,5	2,1	3,2	4,5
Li ppm	4,8	0,7	3,3	1,3	2,6
Mg %	0,9	0,93	0,31	0,03	0,05

Mn ppm	366	281	228	17	30
Mo ppm	17,65	1,2	1,54	94	158
Na %	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Nb ppm	0,13	0,11	0,1	<0.05	0,05
Ni ppm	31,1	24,5	12,3	62	263
P ppm	440	60	20	640	1530
Pb ppm	11,4	3,5	1,8	13,8	28
Rb ppm	1,7	3,4	1,1	9,3	12,6
Re ppm	0,008	0,042	0,064	0,088	0,137
S %	0,09	0,06	0,04	0,63	3,44
Sb ppm	13	1,63	0,56	7,31	17,3
Sc ppm	2,5	0,4	0,4	2,4	3,3
Se ppm	4,3	1,8	0,7	16,5	43,7
Sn ppm	<0.2	<0.2	<0.2	0,5	0,6
Sr ppm	1275	1235	1300	11,8	18,5
Ta ppm	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Te ppm	0,04	0,01	0,02	0,09	0,25
Th ppm	1,5	<0.2	<0.2	3,6	5,6
Ti %	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Tl ppm	0,69	0,12	0,06	0,53	0,55
U ppm	0,62	0,14	0,28	3,09	8,33
V ppm	136	756	509	103	210
W ppm	0,11	<0.05	<0.05	0,35	0,44
Y ppm	8,46	6,76	9,2	5,06	13,9
Zn ppm	49	125	94	9	306
Zr ppm	0,6	<0.5	<0.5	0,7	0,8

De la tabla 21 se observa que el principal constituyente de las brechas es el CaO, y para el shale el principal constituyente es el SiO₂.

El selenio y telurio presentan una alta concentración tanto en las brechas como en el shale. El antimonio y el molibdeno presentan altas anomalías en el clasto de lodolita calcárea y en el shale, por lo que podríamos pensar que el ambiente en el cual se depositaron estas unidades tenía altas concentraciones de estos elementos. El renio se encuentra bastante concentrado en la masa fundamental (matriz-cemento) de las brechas y en el shale (TABLA 22).

5.15 ANÁLISIS DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE)

Estos análisis fueron aplicados al shale negro (LM10-4), al clasto (LM2-1C) y a la masa fundamental (LM2-1) de la brechas tipo I. Los valores obtenidos de las concentraciones de los REE permiten identificar que la muestra LM10-4 correspondiente al Shale Negro es el material con mayor contenido de tierras raras ligeras y pesadas a excepción del lantano y el europio los cuales se presentan en mayor contenido en la caliza (TABLA 23).

TABLA 23. Concentraciones en ppm de Elementos de Tierras Raras

MUESTRA	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Brecha LM2-1	1,6	5,5	0,85	4,9	1,22	0,6	1,03	0,21	0,76	0,22	0,3	0,13	0,2	0,07	5,7
Shale LM10-4	6,7	12,2	1,53	7,6	2,07	0,29	1,77	0,31	1,97	0,46	1,22	0,24	1,37	0,22	14,5
Clasto LM2-1C	7,4	11,1	1,34	6	1,36	0,99	1,36	0,27	1,24	0,34	0,74	0,18	0,63	0,14	8,9

5.15.1 Elementos de tierras raras normalizados respecto al condrito C1.

Los valores obtenidos de las tierras raras fueron normalizados con respecto al condrito C1 de Evensen *et al.*, (1978), para elaborar los arcnigramas y posteriormente calcular el fraccionamiento de las mismas. La anomalía de europio se calculó por medio de la ecuación $Eu_N/\sqrt{(Sm_N)*(Gd_N)}$ y para la anomalía de cerio se usó la ecuación $Ce_N/\sqrt{(La_N)*(Pr_N)}$, según lo propuesto por Rollinson, (1996).

TABLA 24. Valores normalizados de las REE con respecto al condrito C1

	La N	Ce N	Pr N	Nd N	Sm N	Eu N	Gd N	Tb N	Dy N	Ho N	Er N	Tm N	Yb N	Lu N
LM2-1 Brecha	6,54	8,62	8,82	10,34	7,92	10,34	5,04	5,61	2,99	3,88	1,81	5,08	1,21	2,76
LM10-4 Shale	27,39	19,13	15,88	16,04	13,44	5,00	8,66	8,28	7,75	8,11	7,35	9,37	8,30	8,66
LM2-1C Clasto	30,25	17,40	13,90	12,66	8,83	17,06	6,66	7,21	4,88	6,00	4,46	7,03	3,82	5,51

TABLA 25. Valores de fraccionamiento de lo REE y de las anomalías.

	(La/Yb)N	(La/Sm)N	Gd/Yb)N	EuN/v[(SmN)*(GdN)]	CeN/v[(LaN)*(PrN)]
LM2-1 Brecha	5,40	0,83	4,16	1,64	1,14
LM10-4 Shale	3,30	2,04	1,04	0,46	0,92
LM2-1C Caliza	7,93	3,43	1,74	2,23	0,85

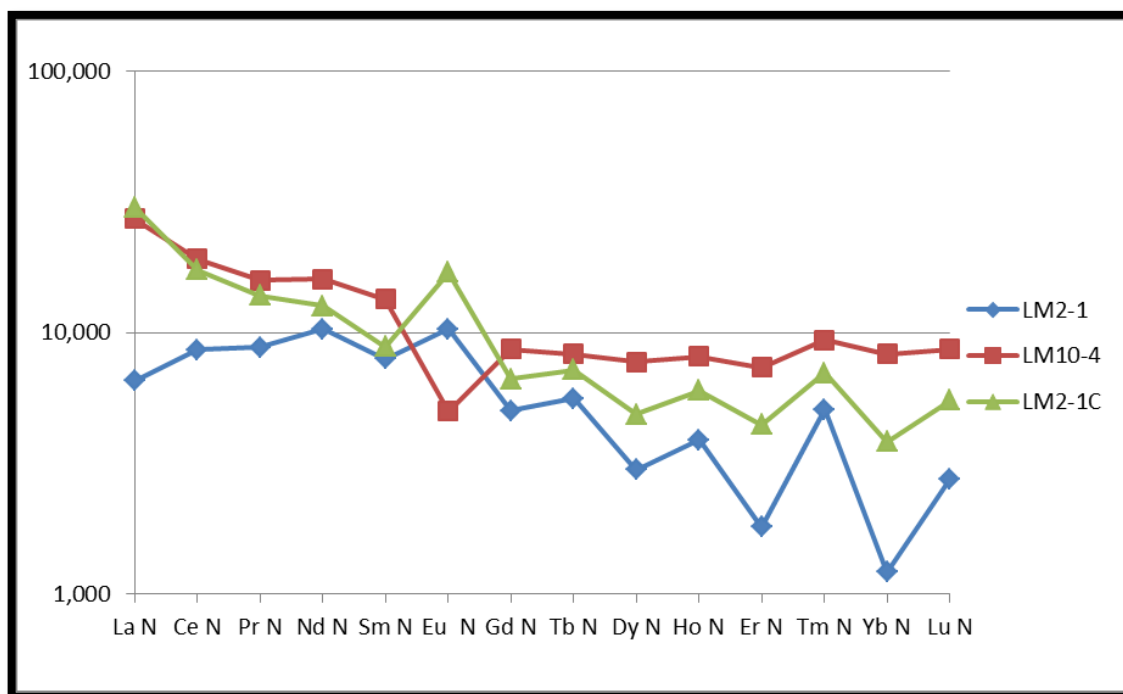


FIGURA 50. Aracnigramas normalizados al condrito C1, de la masa fundamental de la brecha (LM2-1); clasto de caliza (LM2-1C); shale (LM10-4).

El fraccionamiento de las tierras raras pesadas HREE, es mayor en los clastos de caliza $\{(La/Yb)_N=7,93\}$, menor en la masa fundamental de la brecha $\{(La/Yb)_N=5,40\}$ y aun menor en el Shale $\{(La/Yb)_N=3,30\}$. El fraccionamiento de las tierras raras ligeras LREE es mayor en la caliza $\{(La/Sm)_N=3,43\}$, menor en el shale $\{(La/Sm)_N=2,04\}$ y aun menor en la masa fundamental de la brecha $\{(La/Sm)_N=0,83\}$. El shale negro y el clasto muestran un enriquecimiento en las tierras raras ligeras y un empobrecimiento en las tierras raras pesadas además de esto el shale presenta anomalía negativa en europio y en cerio, mientras que el clasto solo presenta negativas en cerio.

El patrón de las REE del Shale, refleja el carácter marino de esos paleosedimentos, tal como lo indica su anomalía negativa en europio y cerio, así como el mayor contenido de LREE en comparación con las HREE (TABLA 24). Sin embargo, los clastos de las brechas, aunque mantienen el mismo patrón de las tierras raras del shale (mayor LREE en comparación con las HREE), se diferencia de éstas, por presentar una anomalía positiva en europio. Esto, se interpreta, como el efecto de los fluidos percolantes durante el evento de brechificación (Rollinson, 1993). El patrón de las REE de la masa fundamental de las brechas (precipitado químico derivado del fluido hidrotermal percolante), mantiene el mismo patrón de las REE de los clastos (anomalía positiva en europio) (FIGURA 50), con la diferencia que las LREE y las HREE, son muy parecidas en sus contenidos, tal como lo indica el factor de fraccionamiento de las REE (LREE=0,83 y HEE=5,40, (TABLA 25).

6. CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE LAS BRECHAS ESTUDIADAS

Las brechas estudiadas durante el desarrollo del presente trabajo se presentan en ambientes sedimentarios, formadas durante la generación y evolución de la cuenca depocentral cretácica. Esta cuenca depocentral comenzó su inversión tectónica a finales del cretácico como consecuencia de la orogenia andina lo cual produjo grandes fallamientos en las rocas ya depositadas, generando zonas de fractura y espacios abiertos para que fluidos posteriores circularan por estos.

Por todo lo anterior y debido a la ausencia de cualquier tipo de material ígneo en los componentes de las brechas se puede decir que estos cuerpos estudiados son de tipo Tectónico-Hidrotermal según la clasificación de Cooke (2005) y de tipo epitermal por las bajas temperaturas de las inclusiones fluidas.

7. IMPLICACIONES METALOGÉNICAS

Con el propósito de considerar la importancia del proceso tectónico-hidrotermal reconocido en el área de estudio, en el contexto de los procesos mineralizantes que suelen presentarse en el ambiente de las cuencas sedimentarias, a continuación se relacionan aquellos depósitos minerales que generalmente acompañan la evolución de estas cuencas. Posteriormente, se intentará establecer algunas posibles similitudes entre los datos obtenidos en el marco de la presente investigación y los procesos metalogénicos a describir.

Desde hace muchos años, se ha considerado que las cuencas sedimentarias son de gran importancia en la búsqueda de hidrocarburos, carbones, etc. Una evolución termal en una cuenca sedimentaria por encima de los 210-250°C, se considera que culmina en la destrucción de los hidrocarburos, favorecida por procesos de termoreducción química de sulfatos (paralelos a los procesos de destrucción termal de los componentes orgánicos). Sin embargo, otros procesos empiezan a tener lugar también durante la madurez de la materia orgánica, su destrucción termal y en etapas posteriores. Entre estos procesos, vale la pena resaltar los procesos hidrotermales relacionados con la formación de depósitos tipo Mississippi Valley, el cual será resumido a continuación.

Los depósitos tipo Mississippi Valley, son depósitos epigenéticos, los cuales se forman en ambientes de plataforma continental estable (cuencas de tipo Foreland), hospedados en series carbonatadas que varían en espesores con mineralizaciones epigenéticas de sulfuros de plomo y zinc como la galena y la esfalerita, acompañados en bandas diseminadas de sulfuros de hierro y carbonatos. Las inclusiones fluidas muestran temperaturas del paleofluido entre 80°C y 200°C, con salinidades de entre 22 y 26% porcentaje en peso de NaCl y CaCl₂ esencialmente. La composición isotópica del oxígeno y del carbono de las rocas encajantes están ligeramente empobrecidas con respecto a las rocas

regionales, lo cual nos indicaría que recrystalizaron en presencia del fluido y las composiciones isotópicas del oxígeno y el deuterio de las aguas contenidas en las inclusiones fluidas son similares a las de las cuencas sedimentarias. Las principales rocas asociadas a estos depósitos son las dolomitas y los minerales presentes son la galena, esfalerita, calcopirita, pirita, marcasita. Las alteraciones que se presentan son dolomitizaciones, desarrollo de shale residual, alteraciones de clorita-illita a muscovita (Thacker, 1997).

Las brechas que hemos estudiado durante el desarrollo del presente trabajo, contiene muchas características similares a las encontradas en los depósitos tipo Mississippi Valley como lo es el ambiente tectónico, la mineralización de carbonatos y las características de las inclusiones fluidas. Por lo cual se podría pensar que estas rocas podrían estar relacionadas con un depósito de este tipo. Sin embargo, se requieren mayores estudios para poder establecer el papel real de los procesos tectónicos hidrotermales reconocidos y descritos en el marco del presente estudio, con eventuales procesos metalogénicos en el área de trabajo.

8. CONCLUSIONES

Estas rocas sedimentarias cretácicas marinas en las cuales se encuentran las brechas estudiadas fueron depositadas en la cuenca depocentral generada a finales del jurásico, esta cuenca comenzó su evolución tectónica y termal a finales del cretácico con el inicio de la orogenia andina, generando fracturamiento y maduración de estas rocas.

Se determinaron tres tipos de brechas definidas respecto sus atributos la cuales son: Tipo I: brechas monomicticas cemento soportadas con clastos de lodolita calcárea (textura tipo jigsaw-fit a rotada), matriz de pirobitumen (tamaños que varían desde arena media hasta arena gruesa) y cemento de dolomita, calcita, clorita y esfalerita. Tipo II: Brechas monomicticas clasto soportadas por fragmentos de lodolita calcárea (textura jigsaw-fit), matriz muy fina de pirobitumen (tamaños muy finos desde lodo hasta arena media) y cemento de dolomita, calcita, clorita y esfalerita. Tipo III: brechas monomicticas clasto soportadas por lodolita calcárea (Textura Jigsaw-fit), matriz de pirobitumen (tamaños variados desde arena muy fina hasta guijas) y cemento de dolomita, calcita, clorita y esfalerita.

Las rocas hospedadoras de las brechas presentan concentraciones anómalas en antimonio y molibdeno debido a que el ambiente en el cual se depositaron estas unidades presentaba altas concentraciones de estos elementos.

Las brechas tectónico hidrotermales estudiadas en el presente trabajo sufrieron dos eventos brechificadores, el primero de ellos involucra a la lodolita calcárea y fue producto del fracturamiento de estas rocas por la evolución tectónica de la cuenca, esto se evidencia en la textura jigsaw-fit que predomina en los clastos de las brechas y que permitió la percolación de hidrocarburos probablemente pesados y la madurez termal de todo el sistema rocoso, posteriormente estos hidrocarburos se fueron enfriando y solidificando en estas fracturas pero

continuaron afectados por el evento deformativo de la cuenca, reduciendo el tamaño del pirobitumen (hidrocarburo solidificado), el cual se convirtió en la matriz de las brechas. El segundo evento brechificador es generado por el pulso hidrotermal en el cual precipitaron inicialmente las dolomitas, la esfalerita, la clorita y luego calcita. Causando la brechificación del pirobitumen y por consiguiente el crecimiento del sistema brechificado.

Las inclusiones fluidas tipo VI con hidrocarburos? que se encuentran en las asociaciones de inclusiones fluidas de las brechas tipo I, son de tipo secundario y posiblemente fueron formadas durante la etapa de flujo de fluidos y este pulso hidrotermal debió circular exclusivamente por planos de fractura generados por la porosidad secundaria.

El ambiente en el que se desarrollaron estas brechas podría llegar a tener una gran importancia en la búsqueda y exploración de depósitos tipo Mississippi Valley.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio abarcando un área más grande que la quebrada de Órganos con el propósito que encontrar otros tipos de manifestaciones hidrotermales y relacionarlas con las brechas estudiadas.

Realizar análisis geoquímicos de isótopos de oxígeno e hidrógeno, para así poder determinar la procedencia de los paleofluidos.

Establecer la edad de los fluidos para así poder ubicar su ocurrencia con relación a la evolución geológica de Colombia, así como sus relaciones con los fluidos hidrotermales reportados por Mantilla (2003), en los municipios de Vélez, Bolívar y Guavatá.

Identificar las posibles rocas generadoras del pirobitumen para entender así su relación espacial y temporal con las brechas del sector de la quebrada Órganos.

Con los resultados de las dataciones, isótopos y los presentados en este trabajo establecer las implicaciones metalogénicas con relación a los depósitos tipo Mississippi Valley.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, T y Schmidt, V. (1983). The Evolution of Middle America and the Gulf of Mexico - Caribbean Sea during Mesozoic Time. Geological Society of America, Bulletin 94, pp 941-966.

Burgl, H. (1954). El Cretáceo inferior en los alrededores de Villa de Leiva. Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional, Boletín Geológico, Vol. VII, pp 85-118.

Cathelineau, M. (1988). Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature. Clays and Clay Minerals, Vol. 23, pp. 471-485.

Cathelineau, M., Nivea, D. (1985). A Chlorite Solid Solution Geothermometer. The Los Azufres (Mexico) Geothermal System. Contributions to Mineralogy and Petrology, 91, pp. 235-244.

Cooke, D. (2005). Breccias in Epithermal and Porphyry Deposits. The Society of Economic Geologists, Video conferencia, Lectura A, 51 minutos.

Davies, A., Cooke, D., Gemmell, B. (2008). Hydrothermal Breccias and Veins at the Kelian Gold Mine, Kalimantan, Indonesia: Genesis of a Large Epithermal Gold Deposit. Economic Geology, Vol. 103, pp 717-757.

Davies, A., Cooke, D., Gemmell, B., Simpson, K. (2008). Diatreme Breccias at the Kelian Gold Mine, Kalimantan, Indonesia: Precursors to Epithermal Gold Mineralization. Economic Geology, Vol. 103, pp 689-716.

De Caritat, P., Hutcheon, I., and Walshe, J.L. (1993). Chlorite Geothermometry: A Review. Clays and Clays Minerals, Vol. 41, pp. 219-239.

Dercourt, J. (1990). Programme Tethys, Paleogeodynamic maps of the Caribbean. Geological Society of America, Bulletin 6, pp 915-919.

Dong G., Morrison G., Jaireth S. (1995). Quartz Textures in Epithermal Veins, Queensland-Classification Origin, and Implication. Economic Geology. Vol. 90, pp 1841-1856.

Esteba, J., Cuevas, J., Tubia, J. M. (2007). Validez e Interpretación de los Datos Geotermométricos de los Esquistos Cloríticos con Circon en las Peridotitas de Ronda (Cordilleras Béticas). Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, Apartado 644, Bilbao, 80p.

Etayo, F. (1968). El sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. Revista de Geología Colombiana, N° 5, pp. 5-74.

Evensen, N. M., Hamilton, P. J., O'Nions, R. K. (1978). Rare Earth Abundances in Chondritic Meteorites. Geochimica et Cosmochimica Acta. Elsevier, Vol. 42, pp. 1199-1212.

Fabre, A. (1984). La subsidencia de la cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario. Geología Norandina. Ingeominas.

Folk, R., L. (1974). Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company. Austin, Texas, pp 159-182.

Hey, M. (1954). A New Revision of Chlorites. Mineralogical Magazine, Vol. 30, pp. 277-292

Howard, N., Frod, A., Brookes, D. (2007). Genetic Classification of Breccias. Poster Congreso Geológico Internacional. Vancouver.

Inoue, A., Meunier, A., Patrier-Mas, P., Rigault, C., Beaufort, D., Vieillard, P. (2009). Application of Chemical Geothermometry to Low-Temperature Trioctahedral Chlorites. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 57, No. 3, pp. 371-382.

Julivert, M. (1968). *Lexique Stratigraphique International*, Vol. 5, 577p.

Kranidiotis, P., MacLean, W. H. (1987). Systematics of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, Vol. 82, pp. 1898-1911.

Lee, M., J., Wilkinson, J., J. (2002). Cementation, Hydrothermal Alteration, and Zn-Pb Mineralization of Carbonate Breccias in the Irish Midlands: Textural Evidence from the Cooleen Zone, Near Silvermines, County Tipperary. *Economic Geology*, Vol. 97, pp 653-662.

Mantilla, L., Cordani, G., Onoe, T. (2004). Geocronología ^{40}Ar - ^{39}Ar de Venas Hidrotermales en Rocas Sedimentarias de la Formación Paja (Cretácico Inferior) al sur del Dpto. de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología UIS*, Vol. 26, No. 43, pp 103-114.

Mantilla, L., Cruz, L., Colegial, J. (2003). Introducción a la Geología del Sector Vélez-Bolívar-Guavata (Departamento de Santander, Colombia) y su Importancia para la Exploración de Depósitos Hidrotermales. *Boletín de Geología UIS*, Vol. 25, No. 40, pp 39-57.

Mantilla, L., Tassinari, C., Mancini, H. (2006). Estudio de isótopos de C, O, Sr y de Elementos de Tierras Raras (REE) en Rocas Sedimentarias Cretácicas de la

Cordillera Oriental (Dpto. de Santander, Colombia): Implicaciones Paleohidrogeológicas. Boletín de Geología UIS, Vol. 28, No. 1, pp 61-79.

Maraven. (1991). Curso de Geología de Producción para Ingenieros. Geología de Producción, Centro de Formación y Adiestramiento de Petróleos de Venezuela y sus Filiales, 278 p.

Renzoni, G. (1967). Geología del Cuadrángulo J-12, Tunja, Informe 1546. Boletín Geológico, Vol. 24 pp 1-48

Rollinson, H. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK Limited. 352 p.

Rossello, E. (2001). Sistemas Tectónicos Transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. Asociación Geológica Argentina. Publicación especial No. 5, pp. 19-43.

Sanchez, M., M. (2001). Distribución, Facies y Edad de las Rocas Metamórficas en Colombia. Ingeominas, 59 p.

Sillitoe, R. (1985). Ore-Related Breccias in Volcanoplutonic Arcs. Economic Geology, Vol. 80, pp. 1467-1514.

Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. Economic Geology, Vol. 105, pp. 3-41.

Taylor, G. R. (1983). Manganese Oxide Mineralogy in an Exhalative Environment from the Solomon Islands. Mineralium Deposita, Springer-Verlag, 18, pp. 113-125.

Thacker, J., Anderson, K. (1977). The Geologic Setting of the Southeast Missouri Lead District – Regional geologic History, Structure and Stratigraphy. *Economic Geology*, Vol. 72, pp. 339-348.

Toussaint, J. (1993-1999). *Evolución Geológica de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

Ulloa, M., Rodríguez, E. (1984). *Geología de la Plancha 170 Vélez*. Mapa Geológico. Ingeominas.

Ulloa, M., Rodríguez, E. (1978). *Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar Plancha 170 Vélez*. Ingeominas. 20 p.

Velasco, F. (2004). *Introducción al Estudio de las Inclusiones Fluidas*. XXIII Curso Latinoamericano de Metalogenia. Mendoza, Argentina. 98 p.

Villamill, T. (1999). Campanian-Miocene Tectonostratigraphy, Depocenter Evolution and Basin Development of Colombia and Western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153, pp 239-275.

PAGINAS WEB

- Sucre. Sitio oficial de Sucre en Santander, Colombia. Consultado el 15 de enero del 2011, <http://sucre-santander.gov.co/index.shtml>
- Jesús María. Sitio oficial de Jesús María en Santander, Colombia. Consultado el 15 de enero del 2011, <http://www.jesusmaria-santander.gov.co/index.shtml>
- Abundance in Earth's Crust.: Periodicity. Consultado el 13 de agosto del 2011, http://www.webelements.com/periodicity/abundance_crust/

- Escobar, P. Geomorfología Valle Glaciar PNNN, Colombia. Consultado el 19 de marzo del 2010, <http://www.galeon.com/geologiayastronomia/geo20.pdf>
- Sjogrenite Mineral Data. Consultado el 8 de Junio del 2011, <http://webmineral.com/data/Sjogrenite.shtml>
- The Mineral Sjogrenite. Consultado el 9 de Junio del 2011, <http://www.galleries.com/minerals/carbonat/sjogreni/sjogreni.htm>

PROGRAMAS UTILIZADOS

- R. Richard L., Minpet (Mineralogical and petrological data processing system), Version 2.02 (1988-1995).