

**Caracterización petrográfica y metalográfica de las mineralizaciones presentes
en la Mina Gavia S.A.S, vereda Quiebralomo, en el municipio de
Riosucio-Caldas**

Cristian David Castellanos Gómez

Trabajo de grado para optar al título de geólogo

Director:

**Diego German Loaiza García
Geólogo, Candidato a M.Sc.**

Codirector:

**Julián David De Bedout Ordoñez
Geólogo, M.Eng.**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2022**

Dedicatoria

*“Me gusta pensar en todas esas personas que me enseñaron cosas que nunca había imaginado
antes”*

Charles Bukowski

A mis padres y mi hermano que estuvieron en todos y cada uno de los momentos.

*A el profesor German Loaiza y a su pasión por la geología que fueron pilares del éxito de este
logro.*

*A mis amigos, colegas y compañeros de vida Ariza, Nicolas, Rafael, Julián, Jhon, Paula,
Alejandro, Diego y Santiago.*

Finalmente al arte, a todas sus formas de expresarse y manifestarse en la vida.

Cristian Castellanos

Agradecimientos

Agradezco profundamente la colaboración y dirección que me brindo el profesor German Loaiza, puesto sin sus recomendaciones, acompañamiento, ayuda, hospitalidad y amistad no hubiese sido posible el desarrollo de este trabajo, todo el conocimiento que me brindo logro que pudiera mejorar mis habilidades petrográficas y que aprendiera e hiciera remembranza de toda la información asociada a depósitos epitermales. También al profesor Julián De Bedout por sus orientaciones y por aceptar el reto de ser codirector de este proyecto de grado, además al profesor Humberto Mendoza por su enseñanza y primer acercamiento a los depósitos minerales en su catedra de yacimientos minerales. A Santiago Henao colega y amigo de la universidad De Caldas el cual me presento la iniciativa para trabajar con la Mina Gavia S.A.S, agradecimientos a Don Pablo y el personal de la Mina Gavia S.A.S por la oportunidad, todo el acompañamiento, ayuda y hospitalidad brindada. A mis amigos y colegas Ariza, Nicolas, Rafael, Jhon, Julián, Paula, Diego, por todos los momentos compartidos, de ayuda y de amor que nos ha brindado la geología y la vida. A todo el personal de la Universidad Industrial de Santander que de una u otra manera fueron partícipes en mi aprendizaje, especialmente a todo el personal docente y administrativo de la escuela de geología, al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander y al profesional analista Carlos Alberto Villarreal Jaimes por su colaboración en la adquisición de imágenes de electrones retrodispersados (BSE) y espectros EDS. Agradezco a la Universidad de Caldas por brindarme el espacio y uso del laboratorio de microscopia. Mi total gratitud a la universidad Industrial de Santander que me brindo años excepcionales y me permitió conocer personas extraordinarias y únicas.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2. Localización.....	16
3. Antecedentes	18
4. Marco teórico.....	22
4.1 Microscopia de minerales mena (Metalografía)	22
4.2 Microscopia electrónica de barrido- Scanning Electron Microscope (SEM).....	27
4.3 Depósitos epitermales.....	27
5. Marco geológico.....	29
5.1 Marco geológico regional.....	29
5.1.1 Formación Barroso.....	31
5.1.2 Formación Amagá.....	32
5.1.3 Rocas Hipoabisales Porfiríticas	34
5.1.4 Depósitos Cuaternarios.....	35
5.2 Geología local	36
6. Geología estructural	42
7. Metodología	48
7.1 Fase bibliográfica: Búsqueda, selección, organización, y análisis de la información bibliográfica.....	50
7.2 Fase campo: Reconocimiento zona, cartografía superficial y recolección de muestras .50	
7.2.1 Primera campaña de campo	50
7.2.2 Segunda campaña de campo	53
7.3 Fase laboratorio: Selección muestras y Elaboración de secciones delgadas pulidas.	56
7.4 Fase analítica: Análisis de muestras	56
7.5 Fase resultados: Fase de resultados y elaboración del informe final	56
8. Análisis Petrográfico-Metalográfico	57
8.1 Análisis petrográfico	57
8.2 Petrografía de menas (Metalografía).....	75

8.3	Química mineral.....	92
8.3.1	Dacita. Sección MNG-CC-006	93
8.3.2	Dacita. Sección MNG-CC-007	95
8.4	Asociaciones minerales	98
8.5	Tipo de Vetillas	100
8.5.1	Clasificación según la mineralización-microscópica	100
8.5.2	Clasificación estructural-microscópica	104
8.5.3	Clasificación macroscópica	105
8.6	Alteración hidrotermal.....	106
8.6.1	Alteración fílica (Sericítica).....	108
8.6.2	Alteración Argílica Intermedia	110
8.6.3	Alteración Argílica avanzada.....	113
8.6.4	Silicificación.....	114
8.6.5	Cloritas esferulíticas	115
9.	Discusión	116
10.	Conclusiones.....	132
11.	Recomendaciones	133
	Referencias Bibliográficas	134

Lista de tablas**Pág.**

Tabla 1. Linderos de la zona del título minero; Primer punto del polígono: PA-1.....	17
Tabla 2. Resumen puntos de control con diferentes litologías identificadas.....	39
Tabla 3. Resumen estructuras tectónicas presentes en la zona, con su orientación pertinente, las estructuras que controlan y las posibles fallas correlacionables	47
Tabla 4. Asociaciones minerales presentes en las secciones delgadas pulidas analizadas.....	99

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización geográfica de La Mina Gavia S.A.S. con respecto a la cabecera municipal de Riosucio y la vereda Quiebralomo.....	16
Figura 2. Sección transversal esquemática del microscopio de minerales mena; Mostrando sus principales componentes.....	23
Figura 3. Microscopio CARL ZIESS modelo PRIMOTECH del laboratorio de Metalografía de la Universidad de Caldas	24
Figura 4. Equipamiento de trabajo, señalando las herramientas básicas que lo conforman y las partes principales del microscopio	25
Figura 5. Ejemplo de minerales al microscopio de luz reflejada. Principales sulfuros y metales nativos.....	26
Figura 6. Configuración de los principales sistemas de fallas para los Andes Colombianos, nótese los sistemas de fallas Romeral y del Borde Llanero para las cordilleras central y occidental	30
Figura 7. Geología regional. Mostrando los rasgos geológicos principales la zona que comprende los municipios de Riosucio, Supia y la vereda Quiebralomo	36
Figura 8. Mapa geológico de la zona estudiada para la Mina Gavia, en la cual se identifican algunas estructuras geológicas y los contactos inferidos de las litologías presentes	38
Figura 9. Mapa geológico-estructural del oeste colombiano, mostrando la distribución de las fallas asociadas al sistema de fallas de Romeral	43
Figura 10. Plano de falla, asociada a la definida Falla 1, de rumbo con cinemática dextral; zona de “El Santo”.....	45
Figura 11. Falla de rumbo con escalonamiento, la cual fue confirmada por relaciones de campo, fue asociada a la definida Falla 2	46
Figura 12. Metodología propuesta mediante 5 fases las cuales abarcan las actividades desarrolladas.....	49
Figura 13. Planta de beneficio, sitio principal y de encuentro en La mina Gavia	51
Figura 14. Reconocimiento primeros niveles de la mina Gavia S.A.S	52
Figura 15. Extracción de muestras desarrollada en la zona llamada “El Santo” en la Mina Gavia	53
Figura 16. Rocas aflorantes con variaciones entre dacita-andesita dentro de la zona de la Mina Gavia.....	54
Figura 17. Visualización para reconocimiento de algunas estructuras tectónicas regionales	55
Figura 18. Visualización para el reconocimiento de cambios litológicos, basándose en cambios de pendiente y bibliografía geológica de la zona	55
Figura 19. Cristales de plagioclasa presentando obliteración producto de la alteración hidrotermal fílica.....	58
Figura 20. Fenocristales de hornblenda en la matriz felsítica, presentando texturas en sus cristales	59

Figura 21. Fenocristales de feldespatos potásicos con características altamente obliteradas por la alteración hidrotermal fílica.....	61
Figura 22. Cristales de cuarzo drusiforme y cuarzo embahiado típico de rocas volcánicas	63
Figura 23. Cristales de cuarzo, variedades cristobalita y tridimita presentes en algunas vetillas tipo E.....	64
Figura 24. Asociaciones minerales de baritina, andalucita, alunita y pirofilita producto de la alteración hidrotermal argílica avanzada	65
Figura 25. Vetilla de carbonato, presentando buena exfoliación y los minerales asociados a la vetilla tipo E.....	66
Figura 26. Asociación mineralógica en vetilla de carbonatos tipo E, con maclamiento de carbonatos	67
Figura 27. Minerales accesorios en las secciones delgadas pulidas, presentándose como inclusiones y agregados	69
Figura 28. Cristales de biotita con muy alto porcentaje de obliteración y en común reemplazamiento a anatasa	70
Figura 29. Cristales de pirofilita y alunita producto de la alteración hidrotermal argílica avanzada en las secciones delgadas pulidas.....	71
Figura 30. Cristales de pirofilita y alunita producto de la alteración hidrotermal argílica avanzada en las secciones delgadas pulidas.....	73
Figura 31. Clasificación polimodal de rocas piroclásticas basadas en proporción de bloques /bombas, lapilli y ceniza	74
Figura 32. Texturas y hábitos de la pirita en las muestras de secciones delgadas pulidas analizadas.....	76
Figura 33. Cristales de pirita y sulfuros asociados a la misma pirita que presenta características particulares.....	78
Figura 34. Cristales pirita, melnikovita, marcasita, la asociación presente entre ellos y la manera en que se presentan.....	79
Figura 35. Cristales de sulfuros más abundantes y la manera en que están relacionados entre sí....	80
Figura 36. Cristales de esfalerita y galena, mostrando texturas entre ambos sulfuros, a su vez también entre esfalerita y calcopirita.....	82
Figura 37. Variedades de esfalerita según sus reflexiones internas, notoria presencia de variedad marmatita	83
Figura 38. Cristales de sulfuros que presentan menor porcentaje en las secciones delgadas pulidas.....	85
Figura 39. Cristal de tetraedrita con buen hábito y desarrollo de texturas con sulfuros	86
Figura 40. Cristales de minerales óxidos y texturas que desarrollan con respecto a ciertos sulfuros	87
Figura 41. Minerales metalográficos accesorios, tipo sulfosales, polibasita, miargirita y matildita	89
Figura 42. Cristal de estefanita en relación con pirita en vetilla de carbonato tipo E.....	90
Figura 43. Cristales minerales nativos presentes; oro, oro tipo electrum y plata	91
Figura 44. Cristal de oro incluido en galena rellenando fractura de cristal de pirita	92

Figura 45. Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).....	94
Figura 46. Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).....	95
Figura 47. Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).....	96
Figura 48. Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).....	97
Figura 49. Asociaciones mineralógicas las cuales están presentes en las vetillas de carbonato tipo E	101
Figura 50. Vetilla compuesta netamente por presencia de carbonato y pirita, clasificada como tipo E.....	102
Figura 51. Vetillas de carbonato clasificadas como de tipo E según Gustafson & Hunt (1975)	103
Figura 52. Mosaico de microfotografías, exhibiendo vetilla de carbonato antitaxial tipo E, mostrando la asociación y orientación mineral	104
Figura 53. Vetillas de escala macroscópica tipo D, presentando halo y sin presencia de halo mineralógico de alteración fílica	106
Figura 54. Esquema general de las alteraciones hidrotermales en los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración).....	107
Figura 55. Muestra de mano conteniendo una vetilla mineralizada tipo D, plagioclasas alterando a sericita y microfotografías de la sección delgada pulida confirmando la alteración fílica	109
Figura 56. Asociación mineral de sericita, sílice y carbonato que marca la alteración argílica intermedia en una matriz felsítica	110
Figura 57. Muestra de mano con presencia de abundante caolín, pirita, sericita y carbonato....	111
Figura 58. Vetilla macroscópica tipo D, presentando alteración, en transición de alteración argílica intermedia a avanzada	112
Figura 59. Asociación mineral de pirofilita, alunita y fenocristal de andalucita con inclusiones de sulfuros, esfalerita y pirita en la matriz felsítica	113
Figura 60. Silica de alrededor 3 cm la cual se ha formado en la vetilla debió al proceso de hidrólisis.....	114
Figura 61. Cristales de cloritas esferulíticas y alunita; los cuales son representativos en la alteración argílica avanzada y que marcan la misma	115
Figura 62. Paragénesis mineral para mineralogía observada en la Mina Gavia	125
Figura 63. Distribución del Magmatismo Miocénico sobre los Andes Colombianos	129
Figura 64. Posible modelo del yacimiento en la Mina Gavia, siendo clasificado como deposito epitermal de baja a media sulfuración	131

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Catálogo de rocas en muestra de mano.

Apéndice B. Catálogo microscopia, descripción petrográfica y metalográfica.

RESUMEN

TITULO: Caracterización petrográfica y metalográfica de las mineralizaciones presentes en la Mina Gavia S.A.S, vereda Quiebralomo, en el municipio de Riosucio-Caldas*

AUTORES: Cristian David Castellanos Gómez**

PALABRAS CLAVES: Depósitos epitermales, petrografía, metalografía, Mina Gavia.

DESCRIPCION: En los Andes Colombianos sobre la cordillera central se encuentran diversidad de ocurrencias de depósitos minerales epitermales relacionados a rocas ígneas y metamórficas que la conforman en su mayoría. En la vereda Quiebralomo, departamento de Caldas se encuentra la Mina Gavia, en la cual se ha extraído principalmente oro desde tiempos coloniales. Rocas volcánicas (dacitas-andesitas) y piroclásticas (tobas dacíticas-andesíticas) conforman el depósito perteneciente a la Formación Combia de edad Mioceno, en la cuales se observa una mineralización en forma de vetillas siendo estas el enfoque del presente estudio. Para ello se realizó la clasificación de aspectos geológicos y mineralógicos que fue comprobada por medio de relaciones de campo, donde se logró denotar estructuras geológicas (fallas) que podrían estar orientando y estructurando dichas mineralizaciones. A su vez se realizó un análisis de microscopia de luz transmitida donde se identificaron texturas, asociaciones, ocurrencias mineralógicas de minerales mena y petrográficos, clasificación de las vetillas además de la paragénesis mineral que fue determinada por medio de microscopia de luz reflejada (metalografía), luz transmitida (petrografía), microscopia electrónica de barrido (SEM) y microanálisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS). Se identifico un alto porcentaje (alrededor del 50%) de sulfuros principalmente pirita, cuya presencia tiene gran relación con la ocurrencia del oro, así como posibles relaciones químicas del oro con el arsénico. A partir de los resultados se definieron los tipos de alteraciones hidrotermales las cuales fueron sericítica, argílica intermedia y avanzada, además se propuso un posible modelo para el depósito, considerándolo de tipo epitermal de baja a media sulfuración.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Diego German Loaiza García, geólogo. Codirector: Julián David De Bedout Ordoñez, geólogo, master en ingeniería.

ABSTRACT

TITLE: Petrographic and metallographic characterization of the mineralizations present in the Gavia S.A.S Mine, Quiebralomo village, municipality of Riosucio-Caldas*

AUTHORS: Cristian David Castellanos Gómez**

KEYWORDS: Epithermal deposits, petrography, metallography, Gavia Mine.

DESCRIPTION: : On the central mountain range of the Colombian Andes, there is a diversity of occurrences of epithermal mineral deposits related to igneous and metamorphic rocks that form most of it. In the village of Quiebralomo, department of Caldas, the Gavia Mine is located, a place where gold has mainly been extracted since colonial times. Volcanic rocks (dacitic-andesites) and pyroclastic rocks (dacitic-andesitic tuffs) make up the deposit belonging to the Combia Formation of Miocene age, in which mineralization in the form of veinlets is observed; these are the focus of this study. For this, the classification of geological and mineralogical aspects was carried out and verified by means of field relationships, where it was possible to denote geological structures (faults) that could be orienting and structuring said mineralizations. At the same time, a transmitted light microscopy analysis was carried out where textures, associations, mineralogical occurrences of ore and petrographic minerals, classification of the veinlets in addition to the mineral paragenesis that was determined by means of reflected light microscopy (metallography), were identified. transmitted light (petrography), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray energy dispersive spectrometry (EDS) microanalysis. A high percentage (around 50%) of sulfides, mainly pyrite, was identified, whose presence is closely related to the occurrence of gold, as well as possible chemical relationships of gold with arsenic. Based on the results, the types of hydrothermal alterations were defined, which were sericitic, intermediate and advanced argillic, and a possible model for the deposit was also proposed, considering it to be epithermal with low to medium sulfidation.

*Bachelor thesis

**Faculty of Physico-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Diego German Loaiza García, geologist. Codirector: Julián David De Bedout Ordoñez, geologist, master in engineering.

Introducción

Los Andes colombianos presentan un gran potencial geológico, siendo enfático el potencial de depósitos hidrotermales sobre las cordilleras Central y Occidental, con ciertas manifestaciones importantes sobre la Oriental. La Cordillera Central está compuesta principalmente de rocas ígneo-metamórficas que afloran en ciertas zonas del departamento de Caldas, como en el área limítrofe con el departamento de Risaralda, en la cual se encuentra la vereda Quiebralomo perteneciente al municipio de Riosucio, en donde está ubicada La Mina Gavia. En la región se han desarrollado diversos estudios asociados al potencial mineralógico, lo que a su vez ha presentado un reto relacionado a la exploración mineral, debido a sus características geológicas. Antecedentes mineros se remontarían a épocas coloniales y estudios formales desde Grosse (1926) reportando ciertos cuerpos intrusivos hipoabisales de edad paleógeno-neógeno, posteriormente Calle & González (1982) desarrollarían campañas de cartografía las cuales indicarían que dichos cuerpos hacían referencia a la Formación Combia, de edad Miocénica. Sánchez (1993) enfocaría sus recursos en tratar de definir el tipo de depósito y hacer una descripción mineral de los depósitos de Gavia y Gasparillo, hacia las últimas décadas Largo (2000) y Patiño & Lotero (2017) centraron sus objetivos en generar más información relacionada al depósito, realizando acciones cartográficas, descripciones mineralógicas, definiendo alteraciones hidrotermales, eventos mineralizantes además de clasificar el depósito. Trabajos realizados y compilados del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2018) desarrollarían información relevante acerca del modelo del depósito además del posible modelo metalogenético, a su vez La Minera Gavia (2019) generaría descripciones y relaciones paragenéticas con las estructuras geológicas dentro de la Mina Gavia.

El propósito del presente trabajo es reducir la incertidumbre geológica del depósito en la Mina Gavia, caracterizando las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales de las rocas, mediante una descripción petrográfica-metalográfica, microscopia electrónica de barrido-microanálisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDS) (en algunas muestras puntuales), relaciones de campo y correlaciones bibliográficas. La ausencia de información geológica ha visto afectada la extracción mineral en la Mina Gavia; por lo que determinar las paragénesis y asociaciones minerales serían de gran importancia para mejorar dicha actividad, además de ayudar considerablemente a futuras acciones extractivas en la mina, sin dejar a un lado que el aporte geológico es de suma importancia para toda la zona; puesto que es una comunidad que depende en gran medida de la actividad minera.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis petrográfico y metalográfico para caracterizar las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales de las rocas ubicadas en la vereda Quebralomo en el municipio de Riosucio, Caldas.

1.2 Objetivos Específicos

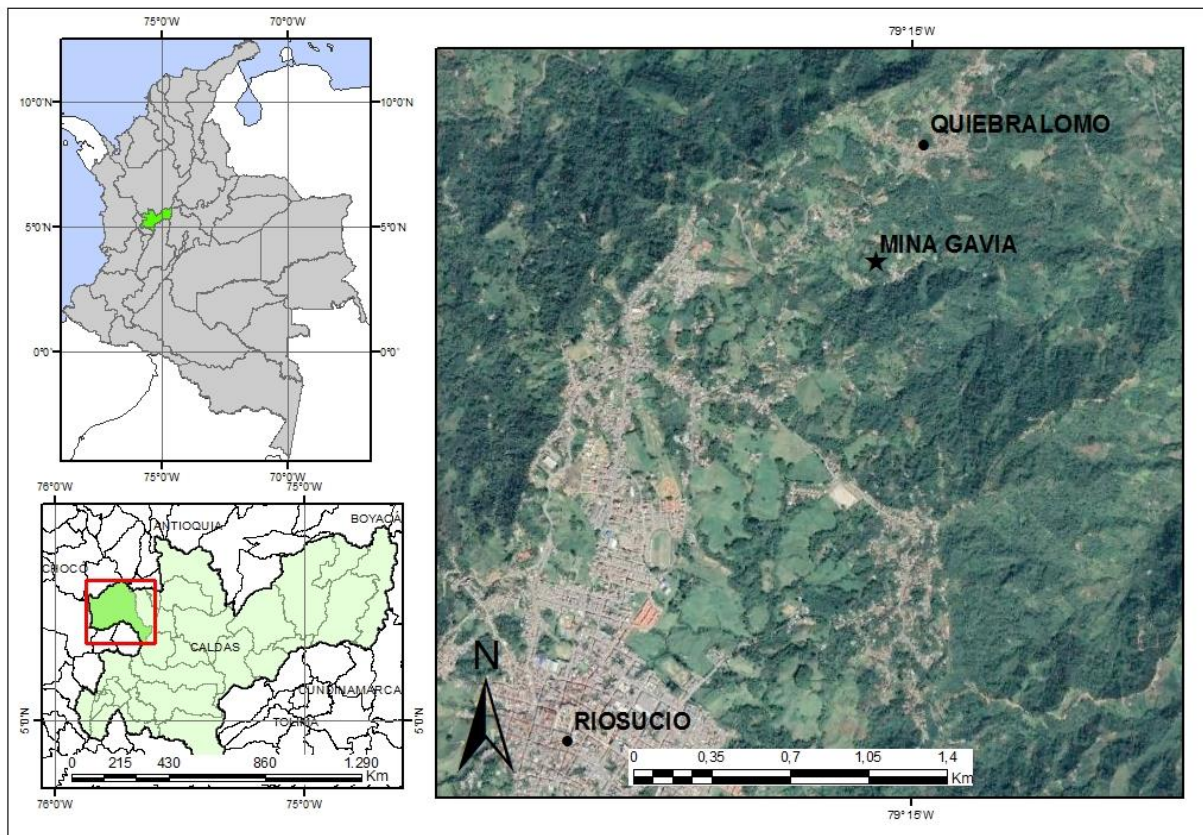
- Realizar una cartografía geológica en la Mina Gavia a escala 1:10.000 a fin de reconocer la zona en rasgos geológicos.
- Realizar una descripción petrográfica-metalográfica, con el fin de determinar las asociaciones minerales de interés económico en la zona de estudio.
- Determinar las alteraciones hidrotermales en la zona de estudio, a partir de análisis macro y microscópicos de las muestras recolectadas en la fase de campo.
- Proporcionar nueva información del depósito estudiado, que puedan ayudar en los procesos de beneficio de oro en La Mina Gavia.

2. Localización

La Mina Gavia S.A.S se encuentra ubicada en la vereda Quiebralomo en el municipio de Riosucio, en el occidente del departamento de Caldas y en límites entre Risaralda y Antioquia. Las coordenadas de la mina son 1°09'4.323,0 Norte y 1°15'3.187,0 Este, una altura de 1.550 m.s.n.m, (Tabla 1.). Según el título minero de solicitud OEA-14481 de legalización minera tradicional, cuenta con un área de alrededor 50 hectáreas.

Figura 1.

Localización geográfica de La Mina Gavia S.A.S. con respecto a la cabecera municipal de Riosucio y la vereda Quiebralomo.



Nota. Tomado y modificado de Google Earth.

Tabla 1.

Linderos de la zona del título minero; Primer punto del polígono: PA-1.

	NORTE	ESTE	RUMBO	DISTANCIA(m)
PA-1	1'094.323	1'153.187	N 0 grados 0 minutos 0,0 segundos E	0
1-2	1'094.323	1'153.187	S 39 grados 17 minutos 32,31 segundos E	1429
2-3	1'093.217	1'154.092	S 89 grados 44 minutos 41,79 segundos W	899
3-4	1'093.213	1'153.193	N 0 grados 18 minutos 34,93 segundos W	1110
4-5	1'094.323	1'153.187	N 89 grados 40 minutos 52,82 segundos E	899
5-1	1'094.328	1'154.086	S 89 grados 40 minutos 52,82 segundos W	899

3. Antecedentes

Múltiples estudios se han desarrollado enfatizando en los procesos de formación de la cordillera central y el sector oriental de la Cordillera Occidental, asociados a la generación de diferentes ocurrencias minerales, entre los cuales se encuentra un gran compendio orientado hacia la zona “centro occidental” colombiana en los departamentos de Caldas, Risaralda y Antioquia.

Los antecedentes geológico-mineros en la zona se remontan a épocas coloniales, debido a su riqueza mineral, reportes de dichas épocas son únicamente informes verbales de la población: “Del cerro de Quiebralomo se había venido sacando oro desde 1522 en criaderos y capas donde está el oro y suele sacarse por hoyos o socavones”, desde el 18 de abril de 1825 comenzaría una serie de contrataciones enfocadas en el sector minero (Guarin, 1971; Sanchez, 1993).

Grosse (1926) reporta algunos cuerpos intrusivos hipoabisales, denominándolos andesitas intrusivas Terciarias, posteriormente Radelly & Pagnaco (1962) describen la geología de Marmato realizando algunas consideraciones económicas del yacimiento, considerando que la mineralización está relacionada con rocas de tipo subvolcánico y que ésta se efectuó en el interior de las vetas. Posteriormente, Calle & González (1982) registran en la cartografía de la plancha 186 de Riosucio rocas hipoabisales porfiríticas, aflorantes en la Formación Amagá acompañadas de estratos aglomerados y brechas en afloramientos de la Formación Combia; dentro de estos cuerpos identifican dos facies, una de composición andesítica y otra dacítica.

Con respecto a la geología económica se reportan mineralizaciones filonianas, como lo son los depósitos de Marmato y Echandía presentes en pórfidos dacíticos-andesíticos. Según Botero & Zuluaga (1980) en Calle & González (1982) los minerales metálicos en el interior de las vetas principales se presentan en venas e hilillos (pirita y esfalerita) o diseminados en la roca brechada. Existen otras mineralizaciones filonianas según Calle & González (1982) asociadas a cuerpos de pórfidos andesíticos, dacíticos, o en contactos con rocas metamórficas. En zonas aledañas a los municipios de Guática y Riosucio, se encuentra la antigua mina La Palma; la mineralización es de tipo epitermal, y consta de estibina, oro y pirita en poca cantidad. También se encuentra la mina Florencia ubicada en Riosucio donde la mineralización consiste en venas de sulfuros de plomo y zinc, irregularmente espaciadas y rellenas con marmatita, galena y pirita. La mineralización es de tipo mesotermal, la roca encajante es un pórfido andesítico (Guarin, 1971, Calle & González, 1982).

Echeverri & Ospina (1989) comentan que cuerpos porfídicos están relacionados genéticamente con las mineralizaciones auríferas de la región del denominado proyecto: “Zonas aledañas a Marmato” de Rodríguez (1986) en la zona hallaron cuatro cuerpos de esta naturaleza con diferencias en tamaño y composición, estos pueden ser divididos en andesitas y dacitas por su contenido en fenocristales de cuarzo. Sanchez (1993) describe ciertos cuerpos porfídicos hipoabisales; diferenciándolos en dos grupos composicionales; el primer grupo son cuerpos andesíticos los cuales presentan fenocristales de plagioclasa (con reemplazamientos por carbonatos) y anfíboles (alternándose a carbonatos y clorita), la diseminación de sulfuros es frecuente, el segundo grupo son cuerpos dacíticos; presentando diseminación de pirita.

En los yacimientos de Gavia y Gasparillo; Sanchez (1993) identifica los minerales mena predominantes, siendo sulfosales de plata tales como tenantita, polibasita, y miargirita, además de la paragénesis mineral: galena, pirita, esfalerita, bournonita, arsenopirita, tenantita, calcopirita, polibasita y miargirita, respectivamente en orden de formación y abundancia. También halló trazas de oro (electrum) aislado, bordeando y dentro de la pirita; el yacimiento de Gavia está hospedado en un depósito de ignimbritas de bloques y cenizas de composición andesítica. Constituye un yacimiento hidrotermal-epitermal vetiforme de tipo adularia- sericita (Heald, 1987; Sanchez, 1993). Según Largo (2000) en los sectores de Gavia y Vendecabezas se identifica la presencia de cuerpos hipoabisales dacíticos-andesíticos (los cuales son la roca encajante de la mineralización) y brechas hidrotermales, además de basaltos asociados a la Formación Combia. Clasifica los eventos mineralizantes como posteriores a dichos cuerpos hipoabisales y de edad Terciaria, además de la relación entre los fluidos hidrotermales y Las fallas; las cuales sirvieron como vía de migración para los fluidos, inclusive reconoce zonas de alteración hidrotermal. El depósito fue clasificado como origen epitermal tipo adularia de ambiente somero.

En la mina La Sombra en el sector de Gavia, Patiño & Lotero (2017) identifican litologías de cuerpos intrusivos hipoabisales con textura porfirítica de composición andesita, con variaciones a dacita, cuerpos intruidos por brechas hidrotermales heterolitologicas de fragmentos angulares de composición porfirítica, basaltos y fragmentos volcánicos correlacionados con la Formación Barroso, presentando alteraciones hidrotermales argílica avanzada e intermedia como manifestación significativa en el área. La mineralización se encuentra de manera diseminada y en forma de vetillas con estructuras en stockwork, sinuosas y ramificadas. Definen el depósito de tipo epitermal de baja sulfuración, de acuerdo con la asociación mineralógica Pirita–Marcasita.

Actualmente documentos por SGC (2018) en el cual definen a las rocas encajantes del depósito como tobas andesíticas, dacíticas y pórfidos pertenecientes a la Formación Combia, además definen el modelo genético de Riosucio; consistiendo en el desarrollo de un sistema hidrotermal sobre una amplia zona de cizalla con predominio de brechas hidrotermales desarrolladas en el interior de la misma formación, también plantean eventos mineralizantes y un modelo de depósito. Sumado a ello informes de Minera Gavia (2019) en el sector de Gavia definen diversos targets mineralógicos en la zona, proponen posibles paragénesis minerales las cuales se asocian a estructuras geológicas de interés económico; tales como zonas de falla, descripción-caracterización de las diferentes vetillas con su paragénesis mineral, adicionalmente realizan relaciones de corte entre estructuras con un análisis de orden cronológico de las mismas.

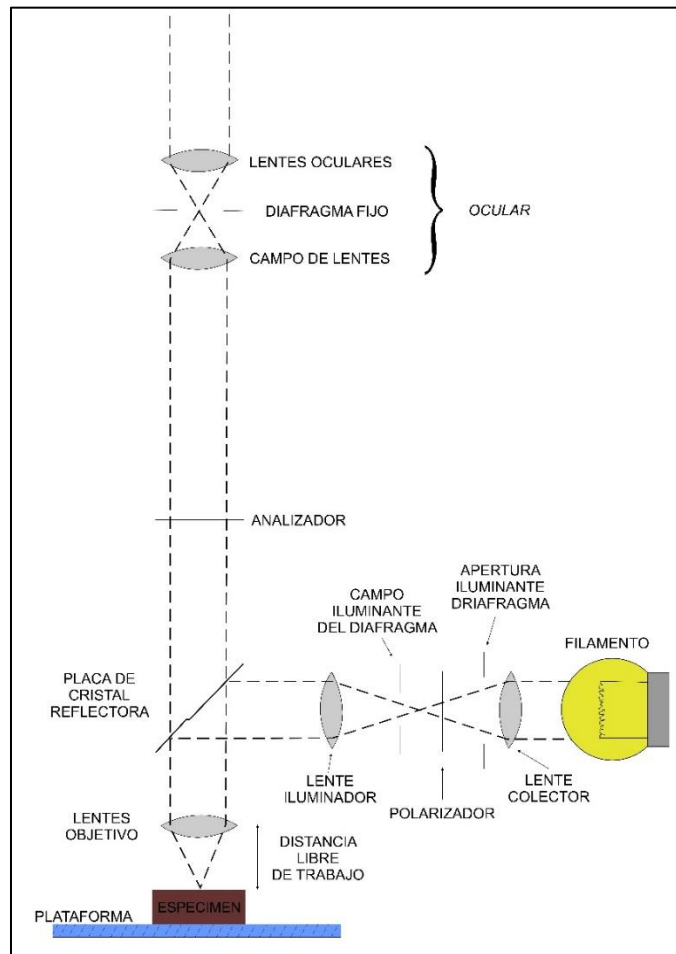
4. Marco teórico

4.1 Microscopía de minerales mena (Metalografía)

El microscopio de minerales mena o microscopio de luz reflejada es similar en construcción al microscopio petrográfico convencional (microscopio de luz transmitida), el cual consiste en el mismo sistema de lentes, polarizador, analizador y varios diafragmas para restringir el campo de iluminación. Sin embargo, la principal diferencia es que la trayectoria de la luz atraviesa verticalmente hacia abajo sobre el espécimen mineral, en lugar de transmitirse hacia arriba desde una fuente debajo de la platina del microscopio. En el microscopio de minerales mena, la fuente de luz está montada en una columna horizontal y la luz se refleja hacia abajo mediante una placa de vidrio o prisma incidiendo sobre la muestra, siendo reflejada parte de ella hacia el objetivo (Lufkin, 2012) (**Figura 2.**).

Figura 2.

Sección transversal esquemática del microscopio de minerales mena; Mostrando sus principales componentes.



Nota. Tomado y modificado de: (Craig & Vaughan, 1994).

Las secciones delgadas pulidas se analizaron en un microscopio CARL ZEISS modelo PRIMOTECH con platina giratoria en el laboratorio de Metalografía de la Universidad de Caldas (**Figura 3.**), el cual está equipado con una cámara HAYEAR modelo 3307 con su respectivo software para la adquisición de imágenes el cual se usa mediante un computador portátil enlazado a la cámara, dicha cámara está acoplada en la parte superior del microscopio, como se puede apreciar en la **Figura 3.** y **Figura 4.**

Figura 3.

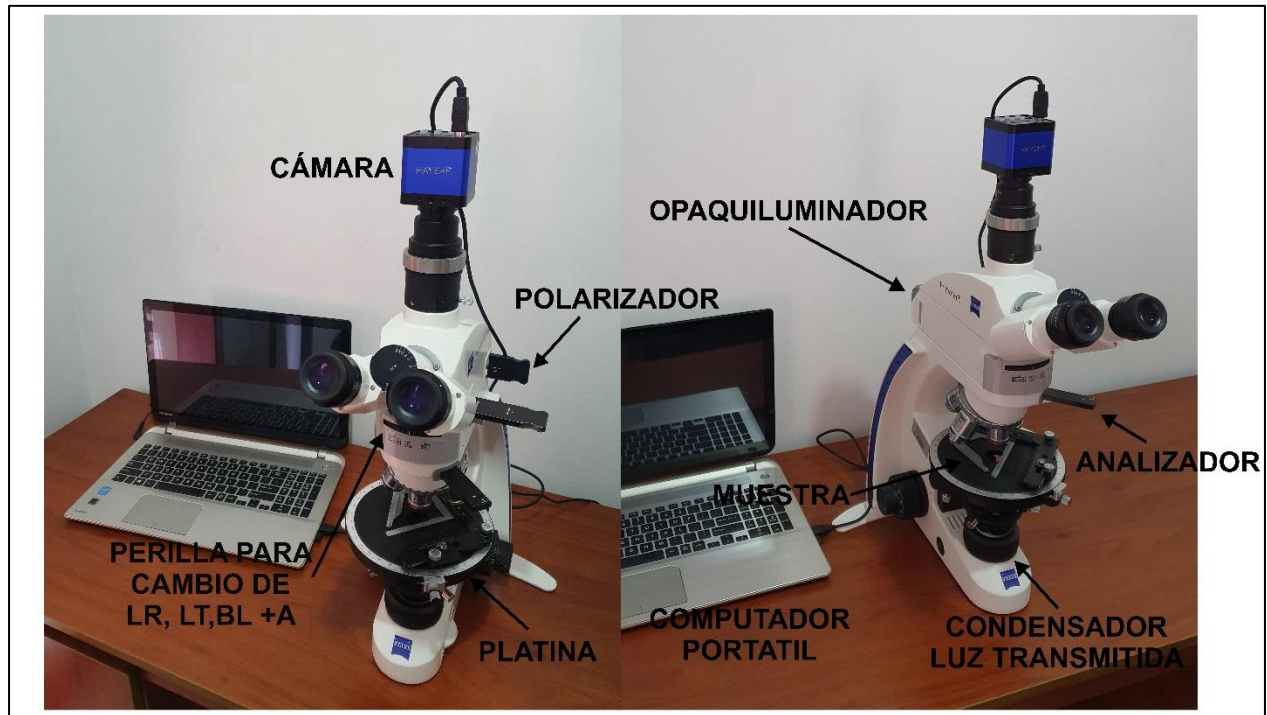
Microscopio CARL ZIESS modelo PRIMOTECH del laboratorio de Metalografía de la Universidad de Caldas.



Nota. Fotografía del autor.

Figura 4.

Equipamiento de trabajo, señalando las herramientas básicas que lo conforman y las partes principales del microscopio.

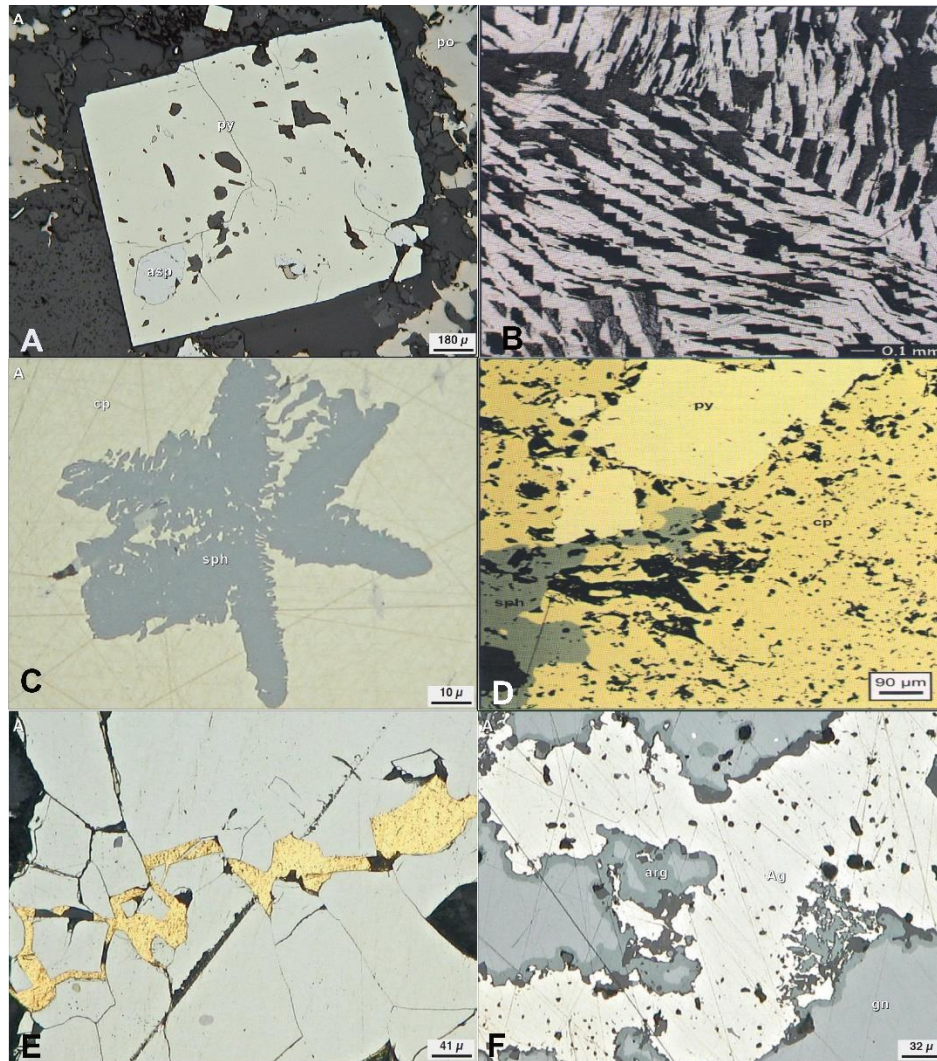


Nota. Microscopio CARL ZIESS modelo PRIMOTECH (LR: Luz reflejada, LT: Luz transmitida, BL + A: Lente de Bertrand más analizador). Fotografía del autor.

Básicamente se tienen dos métodos de identificación mineralógica en luz reflejada, de tipo cualitativo y cuantitativo, se abordó el tipo cualitativo. Las propiedades ópticas que se pueden identificar son similares a las de microscopía de luz transmitida. En nícoles paralelos (luz plana polarizada) las propiedades son las siguientes: Color o color de reflexión, reflectancia (“Brillo”), birreflectancia y pleocroísmo de reflexión, zonación, dureza relativa (“Relieve”), forma individual del cristal (hábito), pits triangulares. Nícoles cruzados: Anisotropía (“colores de interferencia”), reflexiones internas, maclas y rayas de pulimento (Lufkin, 2012; Pracejus, 2015).

Figura 5.

Ejemplo de minerales al microscopio de luz reflejada. Principales sulfuros y metales nativos.



Nota. A) Pirita (blanco crema) en carbonato (gris oscuro) con pequeñas inclusiones de arsenopirita (blanco puro), pirrotina (pardo crema), nícoles paralelos. (B) Galena deformada mostrando su característica de pits triangulares, nícoles paralelos. (C) Esfalerita esquelética en exsolución (gris) en calcopirita (amarillo), nícoles paralelos. (D) Calcopirita masiva (amarillo) reemplazando a cristales de pirita (amarillo crema) y creciendo mutuamente con esfalerita (gris), nícoles paralelos. (E) Oro (amarillo) grietas de relleno en pirita (crema), nícoles paralelos. (F) Plata anhedral (blanco) en galena (gris luminoso) delgada argentita en borde de reacción (gris verdoso), nícoles paralelos. Tomado y modificado de: Marshall *et al.* (1989); Pracejus (2015).

4.2 Microscopía electrónica de barrido- Scanning Electron Microscope (SEM)

Las secciones delgadas pulidas fueron analizadas en el microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG ambiental (ESEM) utilizando la sonda EDAX serie SDD Apollo X y la técnica de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS); Este equipo forma parte de laboratorio microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Cada sección fue recubierta con carbono (grafito) en un metalizador/evaporador de carbón QUORUM Q150R ES con bomba rotaria. Se selecciona este material debido a que es el más adecuado a diferencia del oro el cual puede interferir en la identificación de este en las muestras a analizar.

4.3 Depósitos epitermales

Los depósitos epitermales se caracterizan por estar localizados muy cerca de la superficie y constituyen la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales (Camprubí & Albinson, 2006). El primero en definir el término epitermal fue Lindgren (1933) basándose en la mineralogía, características texturales y a partir de reconstrucciones geológicas; sugirió además que estos depósitos eran de tipo metalíferos formados a partir de fluidos acuosos influenciados por emanaciones de cuerpos ígneos a temperaturas “bajas” (<200°C) y a una presión moderada; de igual forma, estudios posteriores han aportado conocimiento a los sistemas epitermales donde autores proponen rangos diferentes de temperatura para la formación de dichos depósitos (Buddington, 1935; Panteleyev, 1988). Sin embargo, actualmente se considera que la mayoría de depósitos de este tipo se forman a temperaturas entre <150 y ~300°C (Camprubí & Albinson, 2006).

Tradicionalmente se han conocido dos diferentes tipos de depósitos epitermales: ácidos (conocidos como *enargita-oro*, *alunita-caolinita*, *ácido-sulfato*) y alcalinos (*adularia-sericita*), (Sillitoe, 1977); sin embargo, son llamados comúnmente con los términos de alta sulfuración (*high-sulfidation epithermal deposit*) y baja sulfuración (*low-sulfidation epithermal deposit*); basándose en el estado de oxidación - reducción del azufre en los fluidos del sistema y por la mineralogía característica. Los depósitos de alta sulfuración se originan a partir de fluidos oxidados y ácidos (el azufre se encuentra en estado de oxidación +4 o +6 en forma de SO_4 y SO_2) principalmente en fuentes termales ácidas cerca a volcanes; mientras los depósitos de baja sulfuración se originan a partir de fluidos reducidos con un pH neutro en donde el azufre se presenta en estado de oxidación -2 tal como se hallan en sistemas geotérmicos distales a la fuente de calor principal (Hedenquist, 1987).

Recientemente se ha introducido el término sulfuración intermedia (Hedenquist *et al.*, 2000; Sillitoe & Hedenquist, 2003); estos depósitos se caracterizan por ser estructuralmente similares a los de baja sulfuración ya que hace parte del grupo de depósitos alcalinos definido por Sillitoe (1977), sin embargo, los fluidos mineralizantes tienen una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración (Sillitoe & Hedenquist, 2003).

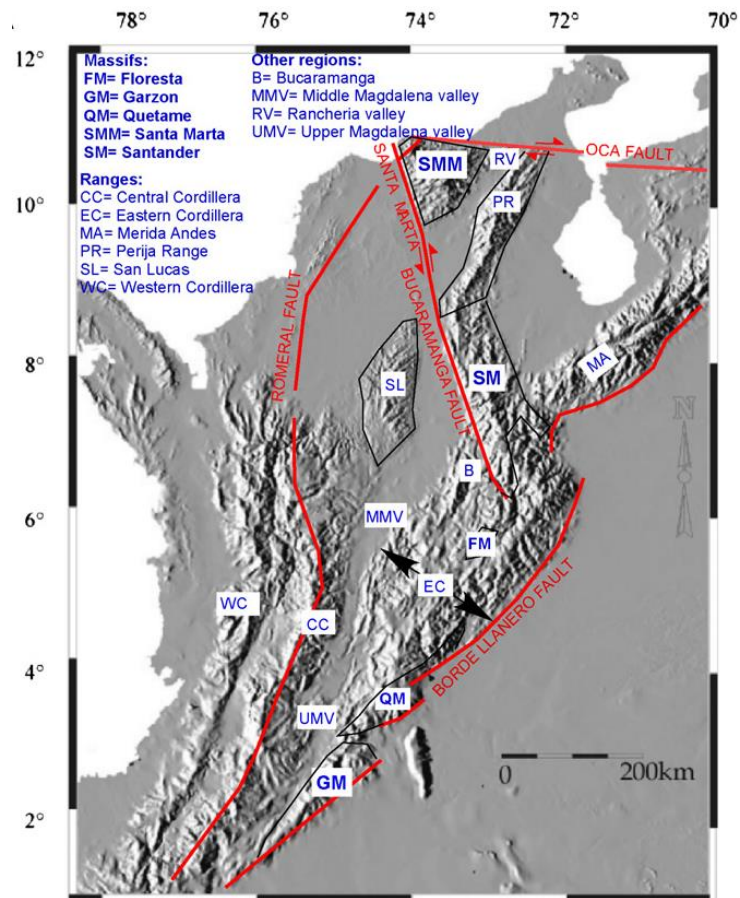
5. Marco geológico

5.1 Marco geológico regional

La Cordillera Central, consta de variedades litológicas, el núcleo su núcleo está conformado por neises, anfibolitas precámbricas y metasedimentos posiblemente del Paleozoico temprano (?). Estas rocas han sufrido deformación, compresión en varios períodos orogénicos y acreción hacia el Escudo Guayanés. A su vez posee remanentes de formaciones marinas jurásicas y cretáceas que se encuentran extendidas en la zona cordillerana septentrional (Álvarez, 1983). Hacia el flanco occidental, en el trazo de la Cordillera Central, afloran secuencias cretáceas toleíticas con intercalaciones sedimentarias, dichas secuencias tienen una relación genética y estructural estrecha con las rocas de la Cordillera Occidental (Álvarez, 1983). El cinturón cordillerano central está delimitado por el sistema de fallas Romeral hacia el occidente (entre la cordillera central y occidental) y el sistema de fallas del valle del Magdalena (entre la cordillera central y oriental) (Bayona *et al.*, 1988; Taboada *et al.*, 1988).

Figura 6.

Configuración de los principales sistemas de fallas para los Andes Colombianos, nótese los sistemas de fallas Romeral y del Borde Llanero.



Nota. Tomado de: Bayona *et al.* (2010).

En relación con estudios geofísicos, el espesor cortical que representa la Cordillera Central es aproximadamente de 35 km al igual que la magnitud de sus estructuras, siguiendo una dirección general Norte-Sur (Case *et al.*, 1971; Meissner *et al.*, 1977; Ocola *et al.*, 1977).

A continuación, se describen las unidades aflorantes a nivel regional:

5.1.1 Formación Barroso

Con el nombre de Formación Barroso se designa a la secuencia volcánica de ambiente submarino profundo a somero que aflora al oeste del Río Cauca (Álvarez & González, 1978; Calle & González, 1982; Rodríguez & Zapata, 2013). En general las rocas volcánicas de la Formación Barroso presentan una amplia variación textural y composicional, con ocurrencias desde granular fina hasta afanítica, además de derrames volcánicos cuya composición varía desde andesítica a basáltica; rocas volcánicas (espilitas, diabasas, micro- gabros, tobas), macizas, de color verde (afines a corteza oceánica y/o un arco volcánico) (Calle & González, 1982). La Formación Barroso de acuerdo a Rodríguez & Arango (2013) está constituida por litologías de derrames lávicos basálticos y andesíticos, tobas, aglomerados e intercalaciones sedimentarias de chert, lodolitas, limolitas y grauvacas. Regularmente los basaltos presentan texturas afaníticas, amigdaloides o pilotaxítica, son de color verde y negruzco, ricos en piroxeno, augita y plagioclasa cálcica a sódica conformando basaltos espiliticos (tamaño de los granos no visible a simple vista) (Vargas & Amaya, 1990). A su vez dichas rocas volcánicas son únicamente rocas porfídicas, amigdalares, vacuolares, o piroclásticas que no posean texturas “diabásicas” (Rodríguez & Arango, 2013).

Con respecto a su edad, según posiciones geográficas y cronoestratigráficas basadas en reportes de fósiles en cuerpos sedimentarios intercalados que suprayacen a la Formación Barroso sugieren edades Albiano medio (Castro & Feininger, 1965; Etayo *et al.*, 1980; Geoestudios-INGEOMINAS, 2005) con reportes de amonites sugieren edades del Coniaciano y reportes de edades radiométricas de plutones que intruyen a la Formación Barroso, asumiendo que hacen parte de un “arco toleítico” con productos volcánicos y plutónicos (Toussaint & Restrepo, 1978). Arrojan edades ligeramente antes del emplazamiento de los plutones y durante o poco antes de la sedimentación de los cuerpos sedimentarios, indicando un rango entre Cretácico Medio a Tardío (González, 1976; Calle & González, 1982; Rodríguez & Arango, 2013).

5.1.2 Formación Amagá

La Formación Amagá, aflora al noroccidente del municipio de Riosucio (Sierra *et al.*, 2003 en Patiño & Lotero, 2017). Diversidad de autores tales como Sierra *et al.* (2003, 2011), Silva *et al.* (2008), Ramírez (2012) con estudios y observaciones más actuales, subdividen la Formación Amagá en dos Miembros cada una con dos unidades de acuerdo a las asociaciones de facies y características petrográficas. El miembro inferior, consta de conglomerados cuarzosos y mal seleccionados, sublitoareniscas bien seleccionadas con altos contenidos de cuarzo, limolitas masivas de colores grisáceos y mantos de carbón. El miembro superior, posee litologías como: wackas líticas, litoarenitas feldespáticas y limonitas de colores verdosos y rojizos. En el miembro inferior han sido identificados entre 2 y 20 mantos de carbón (Castrillón, 1996; Patiño & Lotero, 2017).

Con respecto a la edad, autores como Van der Hammen (1958) señalan una edad del Oligoceno Medio, y Sierra *et al.* (2011) asigna una edad Eoceno Medio a partir del estudio de palinomorfos realizado en la zona de Camilo-C (Mina Nechí) (Ramírez, 2012). La edad del Miembro Superior fue señalada por Van der Hammen (1958) según correlación con otras unidades como del Mioceno tardío (Ramírez, 2012).

5.1.3 Formación Combia

Calle *et al.* (1980) denomina una división informalmente como Miembro volcánico y Miembro sedimentario de la Formación Combia. Dicha formación a grandes rasgos consta de rocas volcánicas de ambiente subaéreo y volcano-clásticas de ambiente continental, que afloran al este y oeste del río Cauca desde unos 20 km al sur de la ciudad de Medellín (Calle & González, 1982). Específicamente en el área de estudio la formación aflora al nororiente del municipio de Riosucio, en el corregimiento de Quiebralomo y hacia el norte al corregimiento de San Jerónimo (Patiño & Lotero, 2017). El miembro volcánico se compone principalmente de conglomerados con matriz tobácea, shales de color crema, areniscas tobáceas, tobas de cristales, tobas de cenizas, aglomerados, brechas volcánicas y derrames de basalto y andesitas (Calle & González, 1982). El Miembro sedimentario consta de sedimentos con aportes de material volcánico que suprayacen a los distintos miembros de la Formación Amagá (Grosse, 1926; Calle *et al.*, 1980 en Ramírez *et al.*, 2006). Litológicamente constituye interestratificaciones de conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas de grano fino a medio y arcillolitas de color crema rojizo. En los conglomerados y brechas, los constituyentes son variados, abundando los cantos de basalto, andesitas, tobas y areniscas de la Formación Amagá, espilitas, gabros, serpentinitas y ocasionalmente algunos clastos de rocas metamórficas (Calle *et al.* (1980; 1982) en Ramírez *et al.* (2006)).

En cuanto a su edad la Formación Combia ha sido considerada de edad Mioceno Tardío – Plioceno (Van der Hammen, 1958), con base en las correlaciones por medio de estudios fosilíferos y palinológicos realizados en la parte sur de la cuenca del Cauca.

5.1.3 Rocas Hipoabisales Porfiríticas

Asociados a la cuenca del río Cauca afloran una serie de cuerpos porfiríticos de sección semicircular, presentándose en una topografía de manera abrupta con respecto a la Formación Combia por la presencia de brechas y estratos de aglomerados, contrariamente presentando una topografía suave sobre la Formación Amagá que en ocasiones se presentan como diques o silos emplazados en la misma (Calle & González, 1982). Afloran en superficie de manera de salientes topográficas, tales como el cerro Ingrumá al occidente de Riosucio y el cerro Baranquillo al norte de Riosucio (Patiño & Lotero, 2017). Fueron identificadas dos facies, una de composición andesítica; los cuales debido a su carácter composicional y de alteración se diferencian en pórfidos andesíticos hornbléndicos y pórfidos de Marmato, la otra facie siendo de composición dacítica (Calle & González, 1982; Mahecha *et al.*, 2006). Estos cuerpos porfiríticos se asocian a todos los cuerpos hipoabisales que se encuentran a lo largo del valle del río Cauca, desde Antioquia hasta el sur del país y relacionados con el sistema de fallas de Cauca-Romeral, que sirvió de canal para la migración del magma que originó estos cuerpos (González, 1976).

La edad de estos cuerpos ha sido determinada mediante varias dataciones, por ejemplo: una muestra de pórfido andesítico hornbléndico de la carretera La Felisa-Irra, analizada mediante el método K/Ar arrojó edades: 6.8 ± 0.2 M.a en biotita y 7.1 ± 0.2 M.a en hornblenda (González, 1976). Una muestra del Stock de Marmato, datada por el método K/Ar brindó una edad de 6.3 ± 0.7 M.a (González H. comunicación verbal en Calle & González, 1982).

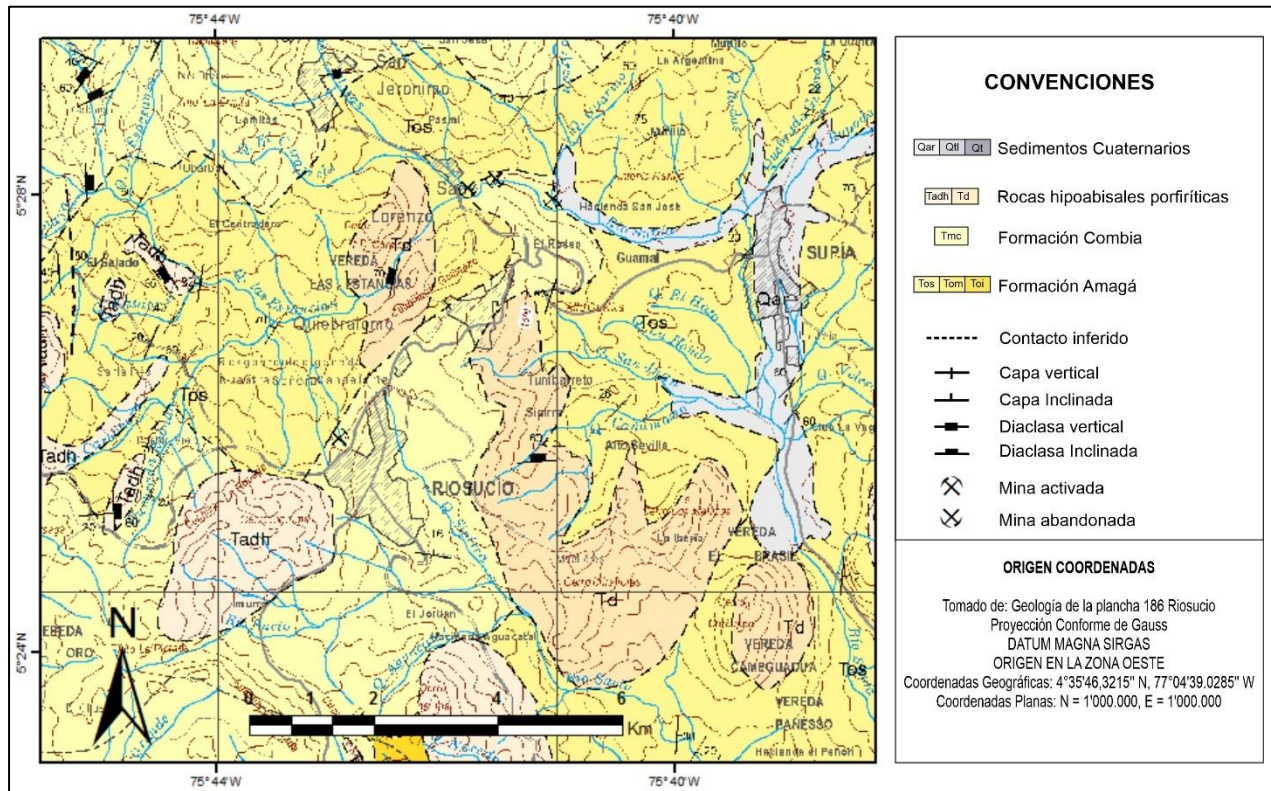
Aunque la edad más reciente es de 6.7 ± 0.06 Ma, edad Ar-Ar en biotita por Tassinari *et al.* (2008) opinando que estas edades, adicionales a las que ya se poseen sobre otros cuerpos plutónicos y subvolcánicos a lo largo de la cordillera Occidental y de la fosa Cauca-Patía de edad Terciario Superior, enmarcan un episodio magmático a finales del Mioceno probablemente es similar o el mismo que originó el plegamiento andino y la formación de la Cordillera Oriental colombiana (Alvarez, 1979; Calle & González, 1982).

5.1.4 Depósitos Cuaternarios

Esencialmente están representados por cenizas volcánicas, depósitos fluviales no consolidados de poco espesor, depósitos coluviales y aluviales recientes. Como principal modificante de estos depósitos resaltan los agentes erosivos, el alta pendiente de los cuerpos rocosos y los afluentes hídricos que resaltan en magnitud el Río Cauca, el Río Oro, la Quebrada la Palma, la Quebrada Estancias entre otros ríos que aportan material hídrico al río Cauca (Echeverri & Ospina, 1989; Sanchez, 1993). Con respecto al material piroclástico al sur de Caramanta, al este de Támesis y al sur de Riosucio aflora un material fino de color rojizo, deleznable, superpuesto a la topografía del terreno, de espesor variable, el cual se ha identificado como cenizas volcánicas (Calle & González, 1982).

Figura 7.

Geología regional. Mostrando los rasgos geológicos principales la zona que comprende los municipios de Riosucio, Supia y la vereda Queiebralomo.



Nota. Tomado y modificado de: Geología de la plancha 186 Riosucio (González, 1980).

5.2 Geología local

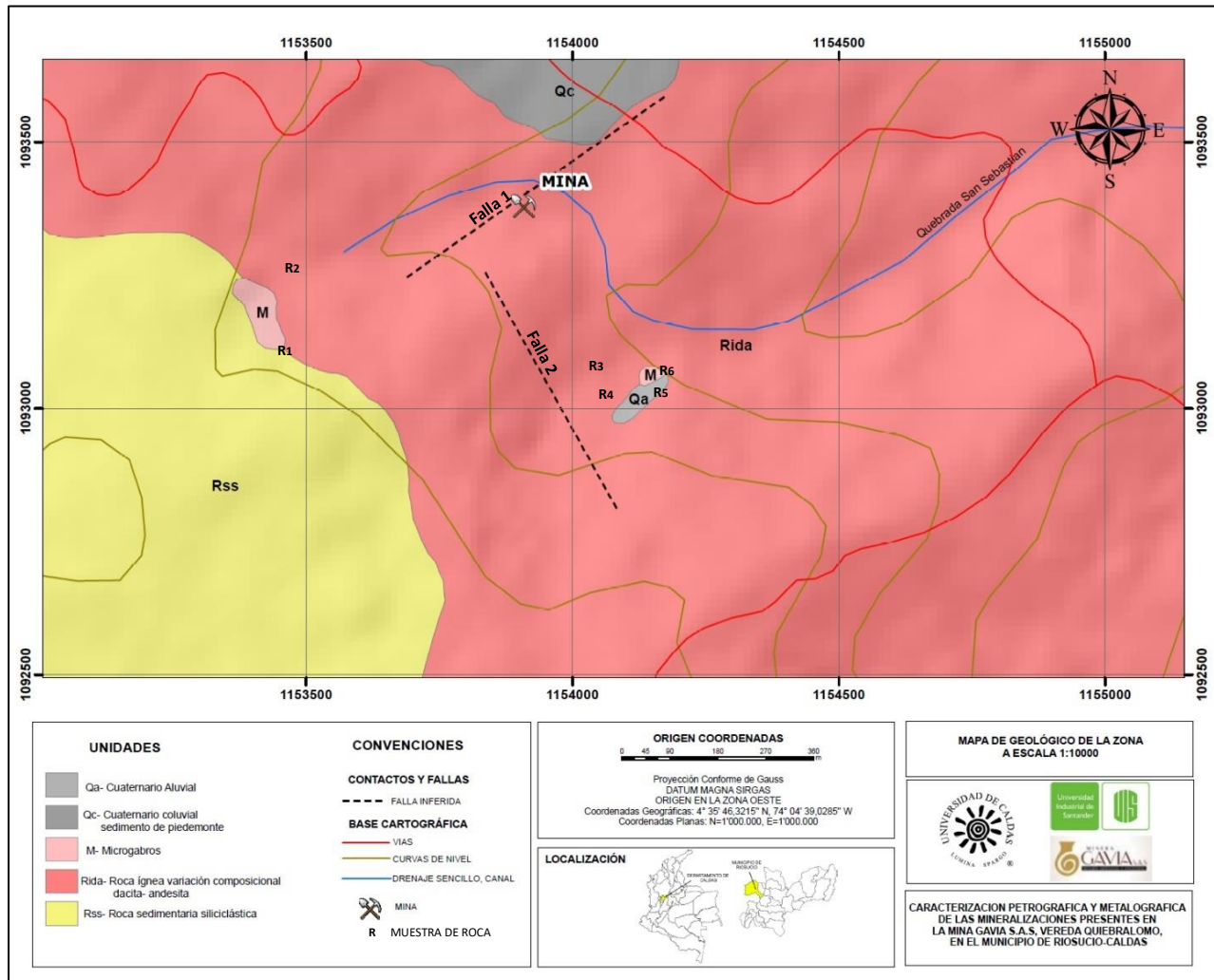
Se realizó la campaña de campo en el sector de la mina Gavia y en zonas aledañas a la mina en donde se logran identificar tres litologías predominantes, complementariamente se hace una identificación geológica superficial para generar una cartografía de la zona (ver mapa geológico,

Figura 8.

El muestreo y los puntos de control de este mismo se orientaron de norte a sureste, desde el acceso por la vía principal que va de Riosucio a Manizales a mano derecha por medio de un camino de herradura, en cercanías al caserío de Las Pilas ; con pendiente negativa hacia la mina Gavia, aguas abajo de la Quebrada San Sebastián, se obtuvieron muestras de mano las cuales denotan diferentes tipo de alteración y tres distintas probables litologías, las cuales son: Tobas dacíticas-andesíticas de ceniza muy fina a fina, microgabros y rocas andesíticas-dacíticas con texturas porfiríticas.

Figura 8.



Mapa geológico de la zona estudiada para la Mina Gavia, en la cual se identifican algunas estructuras geológicas y los contactos inferidos de las litologías presentes.






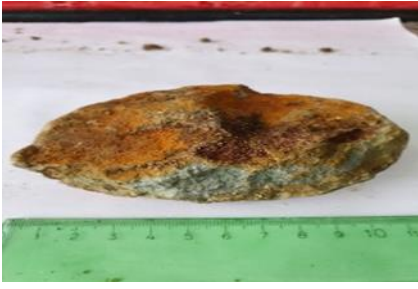
Nota. Las muestras seleccionadas para elaboración de secciones delgadas pulidas fueron extraídas en su totalidad de la mina, nótese figura ubicando la mina.

Tabla 2.

Resumen puntos de control con diferentes litologías identificadas.

Punto Control	Coordenada X	Coordenada Y	Altura m.s.n.m	Descripción	Imagen
1 (R1 Cercanía a Las Pilas)	1'153.410	1'093.118	1740	La roca de coloración negruzca a grisácea, textura fanerítica “granular”, se identifican piroxenos, anfíboles, sílice y posibles plagioclasas. Corresponde a un microgabro (Le Maitre <i>et al.</i> , 2005).	
2 (R2 Camino de herradura)	1'153.540	1'093.375	1675	Roca presentando color gris claro a anaranjada, textura porfirítica en matriz afanítica, probable alteración argílica avanzada, silicificación, plagioclasa alterando a posible pirofilita y presencia de hematita y goethita, carbonatos en baja proporción, drusas de cuarzo; la roca corresponde a una posible toba dacítica de ceniza (Le Maitre <i>et al.</i> , 2005).	

<p>3 (R3 Talud aguas abajo Quebrada San Sebastián)</p>	<p>1'154.090</p>	<p>1'093.131</p>	<p>1575</p>	<p>Roca gris verdosa con tonos anaranjados textura porfírica, matriz afanítica verdosa cloritizandose con pequeñas vetillas oxidadas alterando posiblemente a hematita. Cristales de plagioclasa alterando a sericita, hornblenda y piroxenos. Posible andesita porfírica (Le Maitre <i>et al.</i>, 2005).</p>	
<p>4 (R4 Aguas abajo Quebrada San Sebastián)</p>	<p>1'154.120</p>	<p>1'093.102</p>	<p>1522</p>	<p>Roca color gris verdoso con tonos rojizos y anaranjados (posible hematita). Textura porfírica en matriz afanítica, cristales de anfiboles, piroxenos, plagioclasa. No aparente presencia de sulfuros, es una probable toba andesítica de ceniza fina (Le Maitre <i>et al.</i>, 2005).</p>	
<p>5 (R5 Terraza aluvial de la Quebrada San Sebastián)</p>	<p>1'154.100</p>	<p>1'093.055</p>	<p>1510</p>	<p>Roca con coloración gris rojiza con tonos anaranjados, textura conglomerática, presencia de plagioclasa, piroxenos, anfiboles y carbonatos. Probable hematita y clorita de alteración. La roca hace parte de un depósito de terraza con fragmentos tobáceos en una matriz arenosa, los fragmentos van de 0.5 a 2.5 cm con baja esfericidad y son angulares a subredondeados (Cruz & Caballero, 2007).</p>	

<p>6 (R6 Aguas abajo Quebrada San Sebastián antes de El salto)</p>	<p>1'154.115</p>	<p>1'093.030</p>	<p>1500</p>	<p>Roca de color verdoso grisáceo con tonos anaranjados producto alteración a hematita superficial. La textura es fanerítica “granular”, presencia de anfíboles, piroxenos, sílice y plagioclasas. Esta cloritizandose. La roca corresponde a un microgabro (Le Maitre <i>et al.</i>, 2005).</p>	
--	------------------	------------------	-------------	--	---

Nota. La nomenclatura usada en el mapa para la muestra de roca fue usada en la tabla adecuadamente también con la letra mayúscula R.

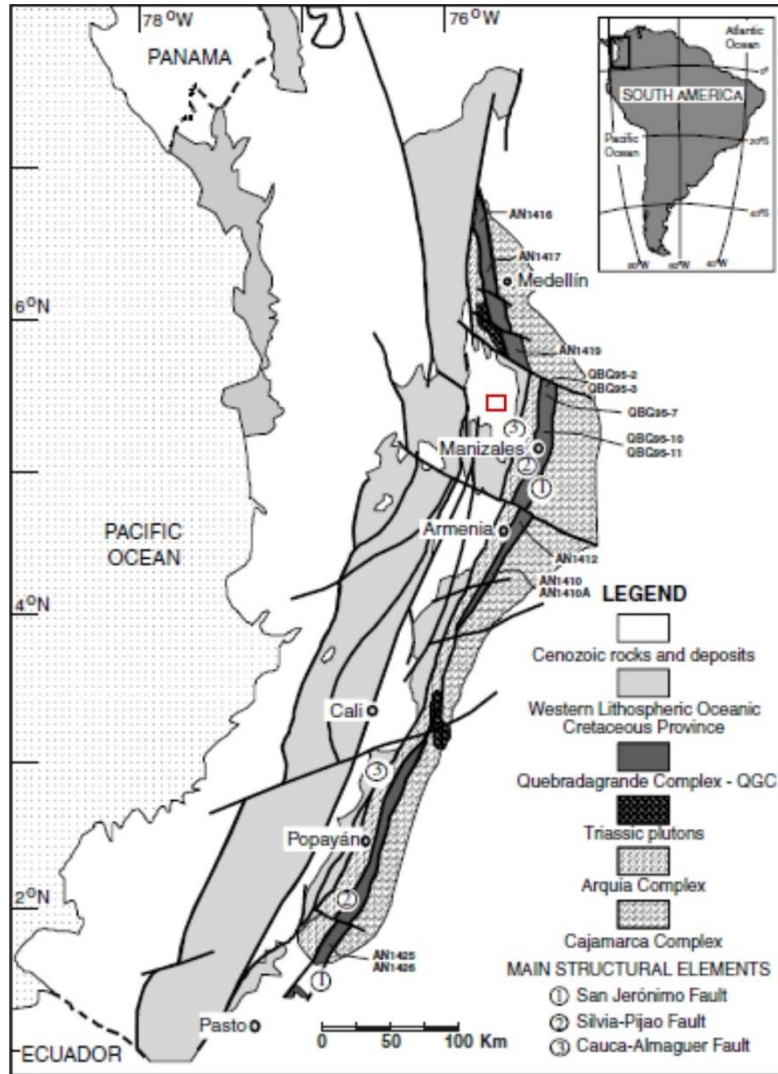
6. Geología estructural

La geología estructural se encuentra controlada por el sistema de fallas Romeral, definiendo una posible sutura de acreción de unidades lito-tectónicas alóctonas (?) de edad Jurásica (?) y Cretácica (Marin & Vinasco, 2012). Posiblemente la zona es parte del marco tectónico que afecta la Falla Silvia Pijao, siendo parte activa del mismo sistema de fallas (Gómez *et al.*, 2012). Los diversos indicadores morfoneotectónicos tales como escarpes, silletas alineadas, interrupciones en las líneas de pendientes, depósitos recientes cortados o deformados, entre otras, logran clasificar el fallamiento de carácter activo (Argoti & Garcia, 2008).

Regionalmente a localmente se encuentra afectada por las fallas Supía- San Lorenzo, Arcon- la Iberia, Rodasel palo, y el lineamiento Rapao – La Comparsita. Los municipios de Riosucio y Supía se localizan en una zona de amenaza sísmica alta (Álzate, 2019).

Figura 9.

Mapa geológico-estructural del oeste colombiano, mostrando la distribución de las fallas asociadas al sistema de fallas de Romeral.



Nota. En rojo zona aproximada del sector de Gavia, Riosucio, Caldas. Tomado y modificado de: Nivia *et al.* (2006).

Esencialmente en la zona se reconocen e identifican 3 estructuras tectónicas (fallas geológicas, enumeradas de menor a mayor edad probable) dichas controlan a su vez 3 estructuras, las cuales son vetillas mineralizadas, en el presente análisis se conservan los nombres propuestos por Minera Gavia (2019) de estas mismas. Particularmente tanto las fallas como las vetillas tienen buzamientos subverticales a cercanamente verticales (58° a 87°); Las vetillas son las siguientes: Los Maderos, La Estibina y La U (Controlada por el principal rasgo de fallamiento interno en la mina). Las vetillas se asociaron a fallas reconocidas por diversos autores que trabajaron la zona o vecindades de esta.

Falla 1: Presenta una orientación NEE en general NE, controla el curso de la Quebrada Sebastián en las zonas más altas de esta y en las zonas más cercanas a la zona minera, también es responsable del fallamiento principal en la mina con datos de planos de falla N65E/69SE y N61E/76SE. En la mina se reconoce una falla congruente con dichos datos de planos de falla en la zona de “El Santo”, la cual es caracterizada como de rumbo con cinemática dextral, con una posible componente normal vista desde perfil y basándose en el dato medido del pitch (22°) el cual indica movimiento oblicuo para valores entre 15° y 75° (Cetina *et al.*, 2019), además de escalones de falla medidos sobre el plano de falla, los cuales confirman su movimiento (ver **Figura 10.**); controlando probablemente la vetilla La U de sentido NE (N50-60E) y asociándose a ciertas estructuras tectónicas: Hacia el sur a la Falla Sabaletas orientación N50E en Echeverri & Ospina (1989), hacia la misma dirección con un sistema de fallas paralelas locales N56E/80SE identificado por Argoti & Garcia (2008) y en las zonas aledañas a la mina la Falla Uval- San Sebastián de dirección N50E también la Falla Machetá orientación N35E identificadas en Largo (2000), además de fallamientos internos en la mina haciendo referencia a fallas inversas N20E/85NW, N30E/65NW y de tipo

normal N28E/50SE por Patiño & Lotero (2017). Las muestras pertenecientes a esta falla son las MNG-CC-006 y MNG-CC-007 relacionadas a la zona del santo.

Esta estructura (Falla 1) es la que presenta mayor interés económico debido a que presenta la mayor relación con la evidencia de mineralización. Posiblemente puede estar controlando los fenómenos de hidrotermalismo y de las vetillas mineralizadas.

Figura 10.

Plano de falla, asociada a la definida Falla 1, de rumbo con cinemática dextral; zona de “El Santo”.



Nota. La dirección de la estría en rojo y rumbo en línea punteada, pitch 22°. Fotografía del autor

Falla 2: Posee una orientación NNW cercana al N-S, se reconoce está falla en la mina cuyo plano de falla es N15E/50SE, en el cual se aprecia un escalonamiento, se define como una falla de rumbo con cinemática dextral con un desplazamiento de aproximadamente 5.5 cm (ver **Figura 11.**). Además presenta similitud en algunos tramos aguas abajo con la orientación del cauce de la Quebrada San Sebastián. Haciendo parte del control de la veta Los Maderos (N20-40W) buzando

verticalmente con un trazo casi al N-S. Hacia la zona suroeste se asocia a la Falla del Río el Oro con dirección N15-25W en Argoti & Garcia (2008), en zonas aledañas al sector se asocia por sus características a la falla Gavia de orientación N45W y la falla Pilas 2 de orientación N40-60W por Largo (2000) además una falla de rumbo local identificada por Patiño & Lotero (2017) dato de falla N-S/ 87W.

Figura 11.

Falla de rumbo con escalonamiento, la cual fue confirmada por relaciones de campo, fue asociada a la definida Falla 2.



Nota. Fotografía del autor

Falla 3: Posee una orientación NWW con tendencia E-W, su orientación presenta similitud a la Quebrada San Sebastián controlando principalmente su cauce y morfología; Controla la veta la Estibina de sentido NW (N60-80W) posee un trazo casi E-W, se asocia a las fallas: Hacia la zona suroeste con la Falla Riosucio con trazo E-W y la falla La Sierra orientación N80W por Echeverri & Ospina (1989), en la zona aledaña a la Mina Gavia con las Fallas Pilas y Las Animas dirección N40-50W con altas similitudes genéticas (Largo, 2000). Además se asocia con una falla de rumbo local identificada por Patiño & Lotero (2017) orientación E-W/ 86 N. La estructura presenta evidencia de mineralización según bibliografía de la zona.

Tabla 3.

Resumen estructuras tectónicas presentes en la zona, con su orientación pertinente, las estructuras que controlan y las posibles fallas correlacionables.

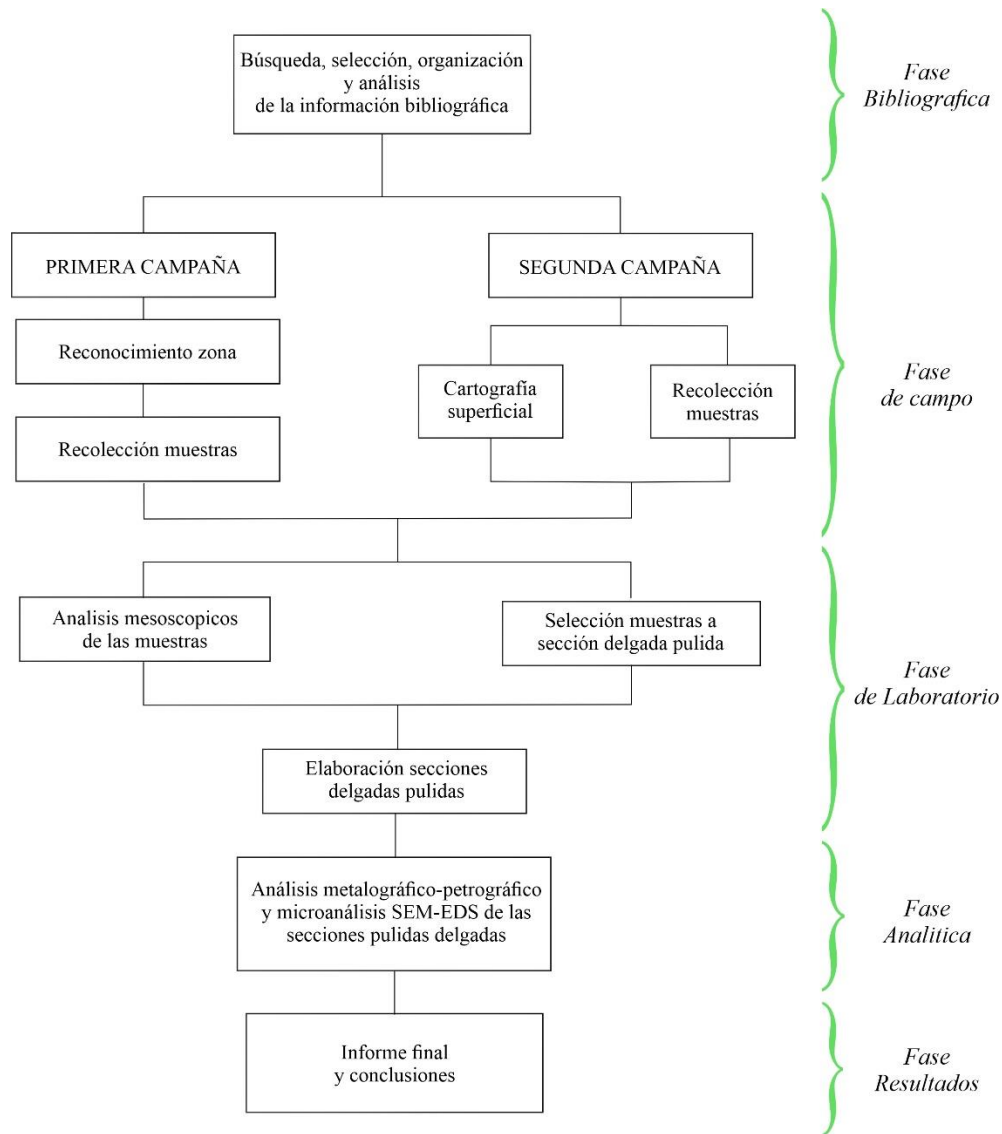
Estructuras	Orientación	Control morfológico	Veta de control	Fallas correlacionables
Falla 1	NEE general NE	Quebrada San Sebastián; zonas mayor altitud	La U NE (N50-60E)	Falla Uval- San Sebastián Fallas internas en la mina inversas y normales Falla Machetá Falla Sabaletas
Falla 2	NNW cercano al N-S	Quebrada San Sebastián; Pequeños tramos aguas abajo	Los Maderos (N20-40W)	Falla Gavia Falla Pilas 2 Falla rumbo local Falla del Rio el Oro
Falla 3	NWW cercano al E-W	Quebrada San Sebastián; Control principal de cauce	La Estibina NW (N50-80W)	Fallas Pilas y Las Animas Falla de rumbo local Falla Riosucio Falla la Sierra

7. Metodología

Las fases que conforman la metodología que se usó en el presente trabajo, sirvieron de base para generar una información lo mejor estructuradamente posible, para alcanzar los objetivos planteados y resolver los principales problemas que conlleva el depósito en cuanto a la mineralogía de menas y de roca, además del tipo de depósito en el cual se está extrayendo el oro.

Figura 12.

Metodología propuesta mediante 5 fases las cuales abarcan las actividades desarrolladas.



Nota. SEM-EDS: Microscopía electrónica de barrido- Espectrometría de dispersión de energía de rayos X.

El desarrollo del presente proyecto de investigación se realizó en las siguientes fases:

7.1 Fase bibliográfica: Búsqueda, selección, organización, y análisis de la información bibliográfica

Mediante una recopilación de distintos estudios geológicos y cartográficos elaborados; en su mayoría proporcionados por la Universidad de Caldas, la Universidad Industrial de Santander y la Mina Gavia S.A.S. Se buscó hacer una evaluación de la información actual de la zona. A su vez, tiene como fin conocer las posibles áreas claves de muestreo que ameritan un mayor detalle durante el estudio. Esta fase es realizada con artículos científicos, proyectos de grado, mapas geológicos, ponencias en eventos científicos, entre otros.

7.2 Fase campo: Reconocimiento zona, cartografía superficial y recolección de muestras

La fase de campo consistió en 2 campañas de campo. Las cuales se desarrollaron de la siguiente manera:

7.2.1 Primera campaña de campo

Esta campaña consistió en 2 días de campo en la vereda Quiebralomo, municipio de Riosucio, Caldas. Principalmente el enfoque de esta campaña fue muestreo de rocas en estructuras mineralizadas.

El primer día se dedicó a reconocimiento de la zona, la planta de beneficio, los trabajadores y entrada de reconocimiento a la mina, se visitaron los 2 primeros niveles subterráneos de la mina.

Figura 13.

Planta de beneficio, sitio principal y de encuentro en La mina Gavia.



Nota. Fotografía del autor.

Figura 14.

Reconocimiento primeros niveles de la mina Gavia S.A.S.



Nota. Fotografía del autor

El segundo día se procedió a la extracción de las muestras en la mina, se extrajeron principalmente en niveles subterráneos avanzados, para ello se hizo uso de todos los implementos de seguridad necesarios para entrar a la mina. Para la extracción de las muestras se contó con la colaboración de los auxiliares de perforación, mediante arranque mecánico y se concentró la extracción de estas en sitios con ocurrencias mineralógicas del mineral mena, estructuras mineralizantes, lugares donde se tuvieran labores en desarrollo y/o productivas, además de localidades donde se cruzarán estructuras mineralizadas posibles oreshoot. Las muestras se embalaron en bolsas plásticas transparentes con cinta adhesiva y se rotularon respectivamente.

Figura 15.

Extracción de muestras desarrollada en la zona llamada “El Santo” en la Mina Gavia.



Nota. Fotografía del autor.

7.2.2 Segunda campaña de campo

Esta campaña consistió en 3 días de campo en el municipio de Riosucio, Caldas. El enfoque de esta campaña fue cartografía superficial y muestreo de rocas en estructuras mineralizadas. Se desarrolló por la necesidad de corroborar ciertos aspectos geológicos tanto superficiales, como subterráneos en la mina. En esta campaña se trabajaron niveles subterráneos más superficiales que en la primera campaña de campo.

El primer día en la jornada de la mañana se procedió a reconocer afloramientos de roca en la zona para obtener puntos de control, estos enlazados a coordenadas de GPS para generar la cartografía de la zona. Los puntos posteriormente fueron ubicados en el mapa topográfico del IGAC (Instituto Agustín Codazzi) plancha No 186-IV-A-3 escala 1:10.000.

También se trazaron los posibles contactos de las litologías reconocidas en esta jornada. En la segunda jornada del primer día se procedió a ingresar a la mina y tomar datos estructurales de las venillas mineralizadas también a reconocer los posibles sitios de interés para extracción de muestras.

Figura 16.

Rocas aflorantes con variaciones entre dacita-andesita dentro de la zona de la Mina Gavia.



Nota. Fotografía del autor.

El segundo día en la jornada de la mañana se procedió a continuar con la cartografía y reconocimiento de ciertas estructuras tectónicas superficialmente. En la jornada de la tarde se extrajeron las muestras, de la misma manera que en la primera campaña de campo. El tercer día se dedicó a terminar la cartografía superficial y reconocimiento de estructuras.

Figura 17.

Visualización para reconocimiento de algunas estructuras tectónicas regionales.



Nota. Sobre la vía que va de Riosucio a Supia. SE: Sureste, SW: Suroeste. Fotografía del autor.

Figura 18.

Visualización para el reconocimiento de cambios litológicos, basándose en cambios de pendiente y bibliografía geológica de la zona.



Nota. Zona entre Riosucio y Supia. SE: Sureste, SW: Suroeste. Fotografía del autor.

7.3 Fase laboratorio: Selección muestras y elaboración de secciones delgadas pulidas.

Comprende un análisis mesoscópico general de las muestras de mano recolectadas en la fase 2 (Fases de campo 1 y 2); el cual consistió en describir las muestras tomadas y basado en la mineralogía de estas además de los datos obtenidos en campo, de esta manera lograr seleccionar las mejores muestras para elaborar las secciones delgadas pulidas. Se seleccionaron 9 muestras para elaboración de 9 secciones delgadas pulidas, 4 provenientes de la primera campaña de campo y 5 más resultantes de la segunda campaña.

Posteriormente se procedió a enviar las muestras para la elaboración de las secciones delgadas pulidas; Proporcionadas por la Mina Gavia S.A.S. y elaboradas en el Laboratorio MINERLAB Ltda. en la ciudad de Bogotá.

7.4 Fase analítica: Análisis de muestras

En esta fase se hace énfasis en el análisis metalográfico y petrográfico de las secciones delgadas pulidas. Las cuáles serán debidamente analizadas petrográficamente por un microscopio petrográfico-metalográfico proporcionado por la Universidad de Caldas, en la ciudad de Manizales. Se hizo posible para un análisis más detallado de ciertas composiciones minerales de las muestras (secciones delgadas pulidas; únicamente las que presentaron oro según la metalografía) el uso de microanálisis de espectrometría de dispersión de rayos X (EDS), realizado en el microscopio electrónico de barrido (SEM), proporcionado por la Universidad Industrial de Santander.

7.5 Fase resultados: Fase de resultados y elaboración del informe final

La información obtenida a lo largo del proyecto, imágenes, datos tomados y diferentes análisis realizados en las fases anteriores fue recopilada, estructurada y organizada para presentarla en un informe con sus pertinentes resultados y conclusiones.

8. Análisis Petrográfico-Metalográfico

Se realizó el análisis de 9 secciones delgadas pulidas mediante el uso del microscopio CARL ZEISS modelo PRIMOTECH de platina giratoria en el laboratorio de Metalografía de la Universidad de Caldas.

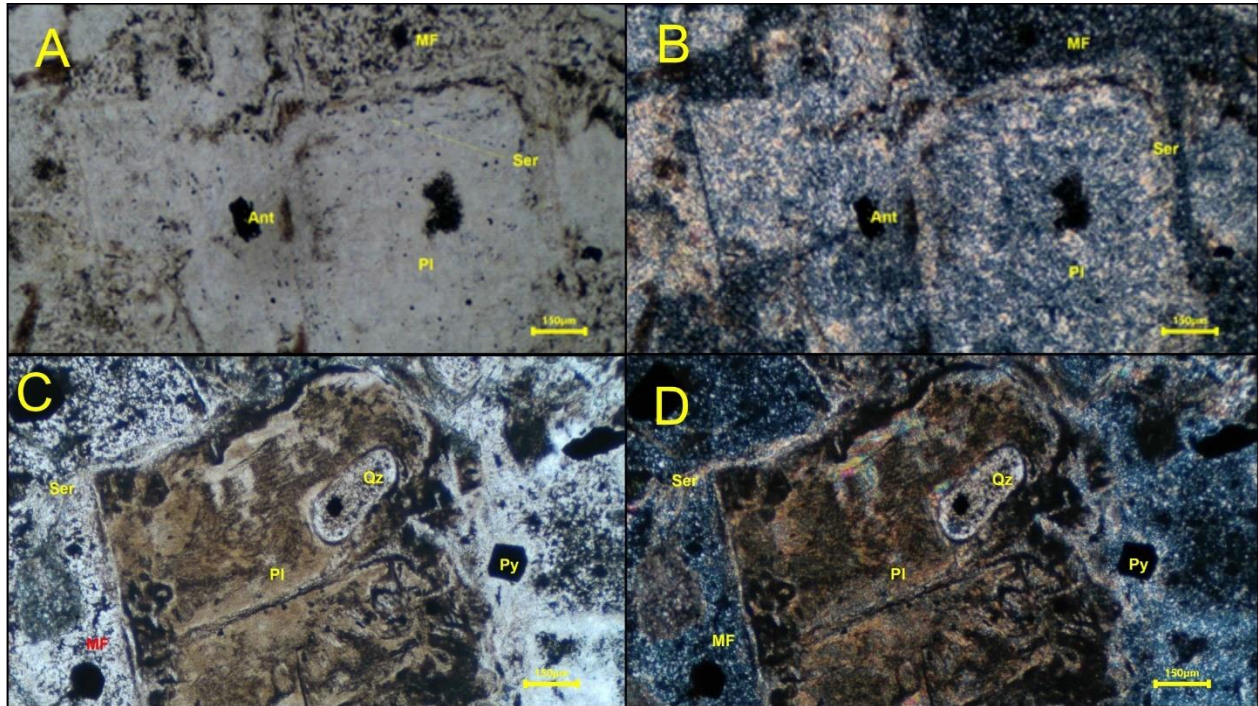
8.1 Análisis petrográfico

Las muestras presentaron petrográficamente fenocristales de plagioclasa, hornblenda, cuarzo; siendo estos tres los más abundantes y fenocristales de feldespato potásico que representan un menor porcentaje.

Los fenocristales de plagioclasa son subhedrales a euhedrales, con hábitos prismáticos tabulares, la exfoliación es regular, el tamaño promedio de los cristales es de 0.4 a 0.7 cm, la ocurrencia de los cristales no tiene un ordenamiento aparente en la masa fundamental, aunque raramente se encuentran cristales del mineral en las vetillas, ocasionalmente posee cristales incluidos de minerales mena como pirita y esfalerita, inclusive algunos cuarzos tipo beta (cuarzo de alta temperatura), eventualmente presentan aparentes maclas de penetración (**Figura 19**). Generalmente se encuentran alterando a sericita, pirofilita y alunita relacionado con el tipo de alteración hidrotermal.

Figura 19.

Cristales de plagioclasa presentando obliteración producto de la alteración hidrotermal fílica.



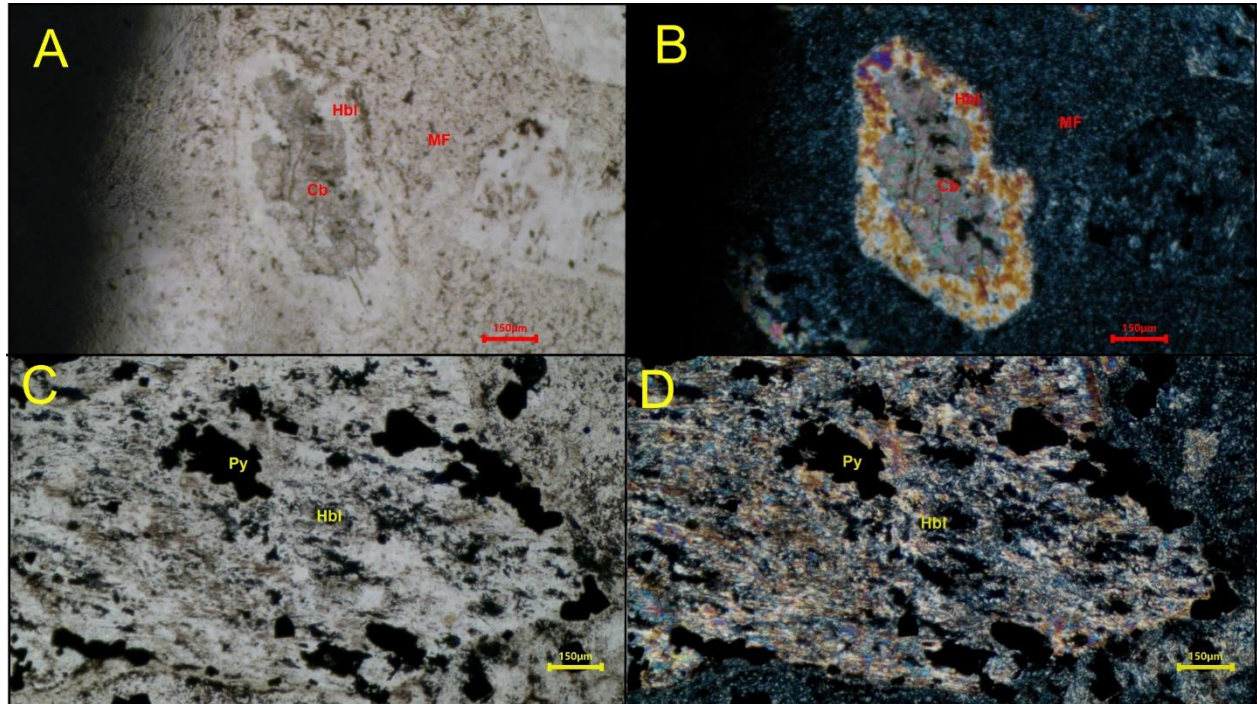
Nota. A) Fenocristales de plagioclasa alterando a sericita en macla de penetración. B) Posible macla de penetración en corte basal de cristales de plagioclasa, además anatasa incluida en los cristales de plagioclasa. C) Cristal de plagioclasa con habito subhedral e inclusión de cuarzo. D) Cristal de plagioclasa con bordes irregulares y textura de alteración; debido a la alteración hidrotermal. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A, C y nicoles cruzados B, D; 5X. Ant: Anatasa, Pl: Plagioclasa, Ser: Sericita, MF: Masa Fundamental, Qz: Cuarzo, Py: Pirita.

Los fenocristales de hornblenda son subhedrales a euhedrales, con hábitos prismáticos hexagonales, la exfoliación es regular, el tamaño promedio de los cristales es de 0.5 cm, la ocurrencia de los cristales se presenta de manera aleatoria en la masa fundamental, eventualmente presentan texturas corroídas generando espacios libres en los cuales aparentemente intercrecen minerales mena como pirita, presencia de texturas de reemplazo centrífuga o de núcleo por parte del carbonato (Malvicini & Saulnier, 1979) (**Figura 20.**).

Generalmente hornblenda se encuentra alterando a minerales como: carbonato (en todas las muestras), pirofilita y alunita; relacionados con el tipo de alteración hidrotermal.

Figura 20.

Fenocristales de hornblenda en la matriz felsítica, presentando texturas en sus cristales.

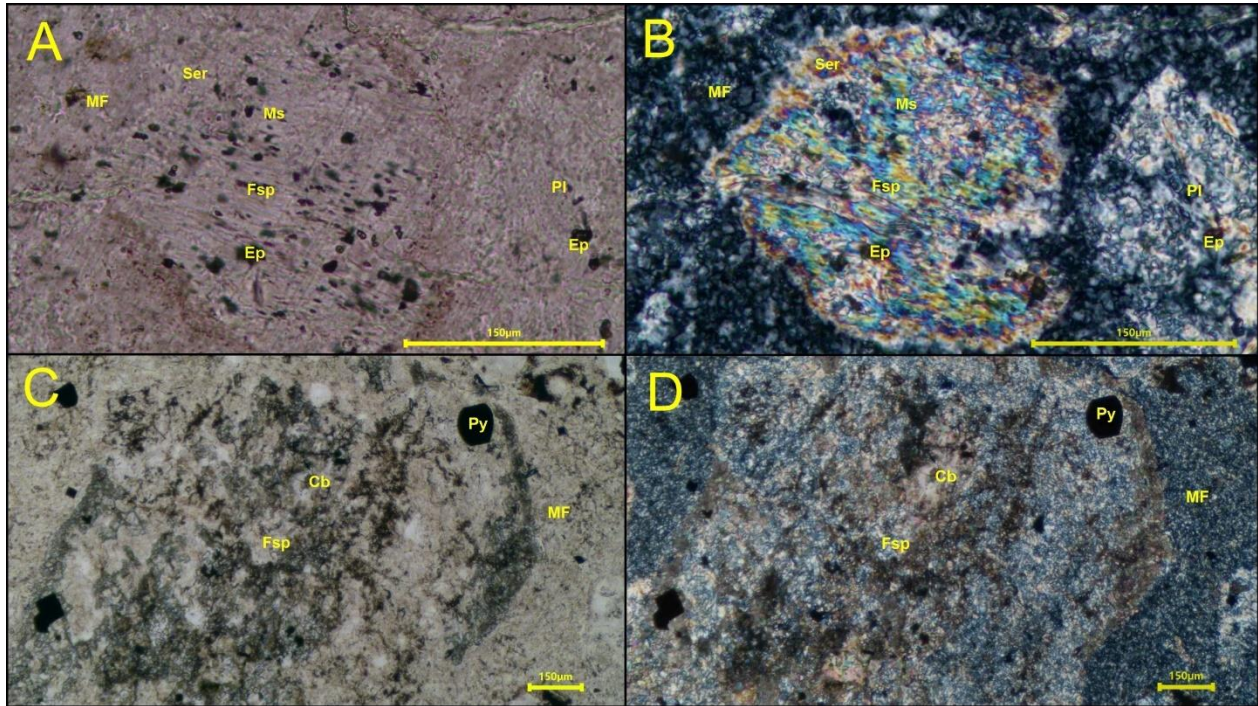


Nota. A) Textura de remplazo centrifuga o de núcleo de carbonato sobre cristal subhedral hornbléndico. B) Apreciación de la textura desarrollada sobre la hornblenda en una masa fundamental felsítica. C) Intercrecimiento de pirita en cristales de hornblenda con aparente textura de remplazamiento, desarrollándose sobre la hornblenda en la masa fundamental felsítica. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A, C y nicoles cruzados B, D; 5X. Cb: Carbonato, Hbl: Hornblenda, MF: Masa Fundamental, Py: Pirita.

Los fenocristales de feldespato potásico tipo sanidina, siendo subhedrales a anhedrales, con hábitos prismáticos tabulares, la exfoliación es regular siendo enmascarada por la alteración, el tamaño promedio de los cristales es de 0.4 cm, la ocurrencia de los cristales no tiene orientación aparente en la masa fundamental, presentan mayor alteración y menor porcentaje de presencia que los demás fenocristales. También denota leve corrosión la cual es aprovechada por una posible leve carbonatación o producto de las vetillas (**Figura 21.**). Ocasionalmente presenta inclusiones minerales como pirita y epidota. Generalmente se encuentran alterando a minerales como: sericita, pirofilita y alunita relacionados con el tipo de alteración hidrotermal.

Figura 21.

Fenocristales de feldespato potásico con características altamente obliteradas por la alteración hidrotermal fílica.

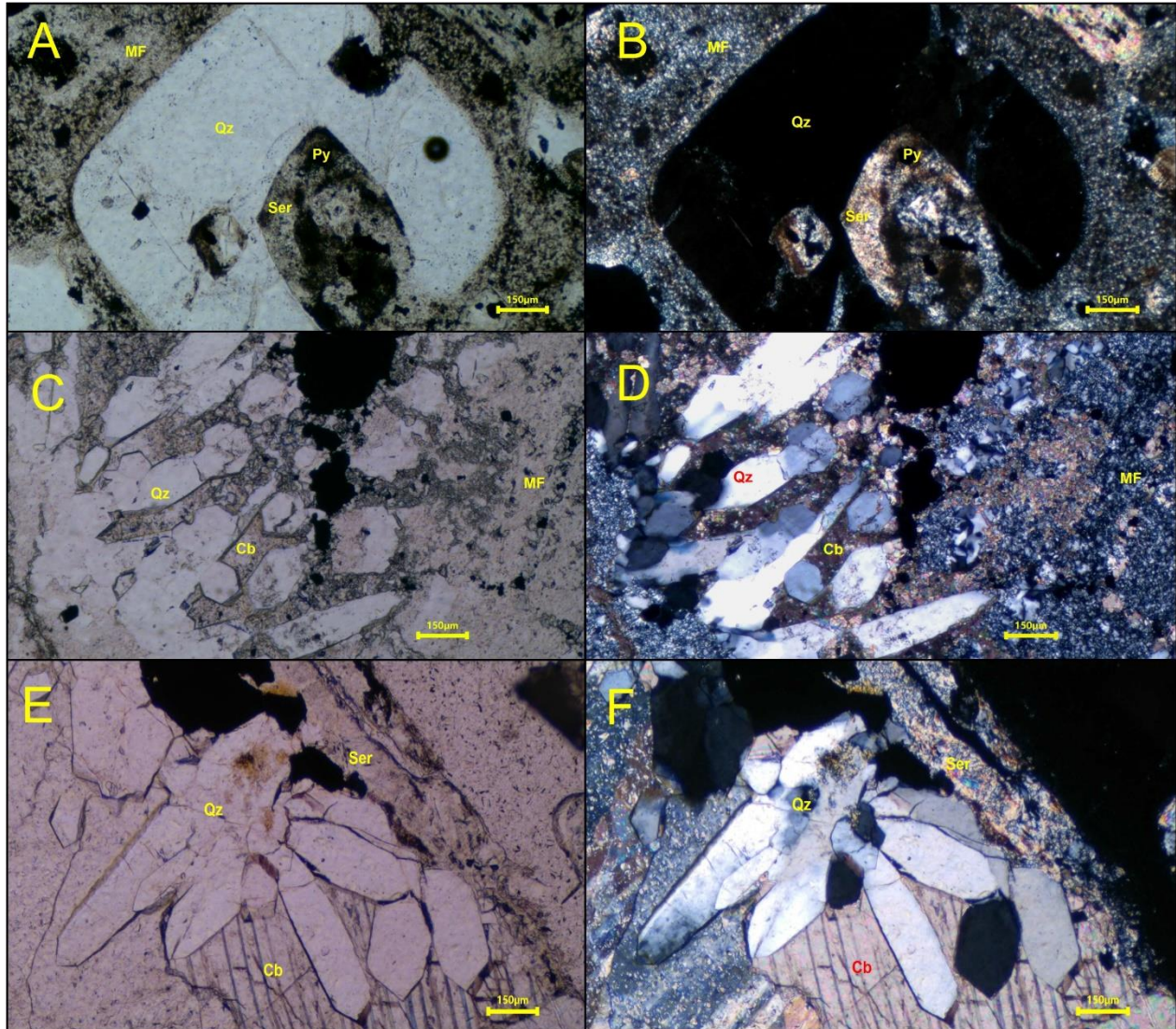


Nota. A) Cristal subhedral-anhedral de feldespato potásico con inclusiones de cristales de epidota al igual que el cristal de plagioclasa; 20X. B) Cristal de feldespato potásico alterando a sericita en una masa fundamental e inclusiones de moscovita ; 20X. C) Cristal subhedral de aparente sanidina con inclusiones de pirita; 5X. D) Cristal de feldespato potásico posible tipo sanidina, aparente carbonatación en el cristal mineral; 5X. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A,C y nicoles cruzados B, D. Fsp: Feldespato potásico, Ep: Epidota, MF: Masa Fundamental, Ep: Epidota, Pl: Plagioclasa, Py: Pirita, Cb: Carbonato, Ser: Sericita, Ms: Moscovita.

Los fenocristales de cuarzo son subhedrales a euhedrales, con hábitos variados entre los cuales resaltan prismáticos y hexagonales en corte basal (cuarzo tipo beta), el tamaño promedio de los cristales es de 0.5 cm, la ocurrencia de los cristales es aleatoriamente, cristales de cuarzo son incluidos en algunos minerales y criptocristalinos en la masa fundamental. Ocasionalmente desarrolla texturas de embahamiento (común en rocas volcánicas) producto de corrosión magmática, favorecidas por cristales de cuarzo recristalizados con tendencia deforme factibles para generar las bahías (Vernon, 2018) y concentrados en las vetillas desarrollando texturas drusiformes (Dong *et al.*, 1995) (**Figura 22.**), además se encuentra la variedad de cuarzo tipo tridimita y cristobalita (ambos en general de manera “submicroscópica”) características en condiciones de alta temperatura y baja presión (**Figura 23. Figura 49.**). Sílice está presente en las muestras y presenta apariencia similar al cuarzo, como “pequeños cristales de cuarzo” (**Figura 25.**).

Figura 22.

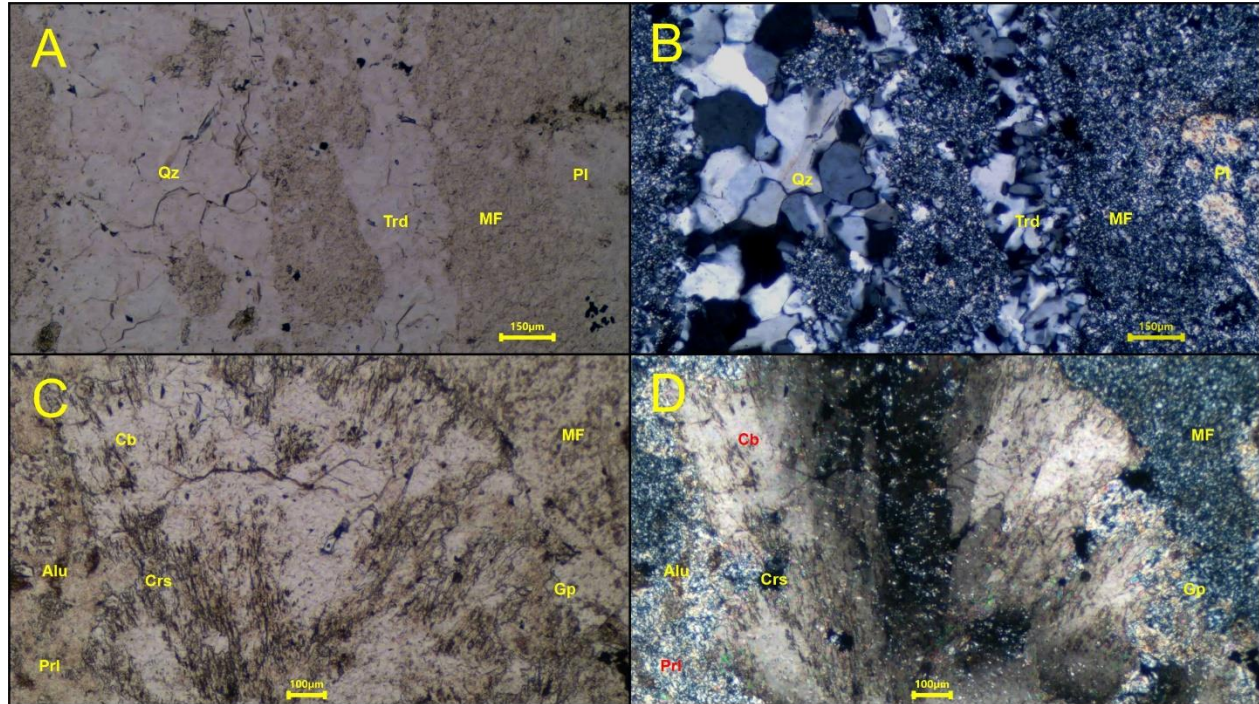
Cristales de cuarzo drusiforme y cuarzo embahiado típico de rocas volcánicas.



Nota. A) Cuarzo embahiado, corroído, con bordes irregulares en una masa fundamental felsítica (cuarzo+plagioclasa). B) Cuarzo embahiando sericita y pirita. C) Cuarzo drusiforme acompañado de carbonato. D) Cuarzo hexagonal de corte basal en la vetilla. E y F) Cuarzo drusiforme congruendo en un punto en contacto con carbonatos maclados. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A, C, E y nicoles cruzados B, D, F; 5X. Qz: Cuarzo, MF: Masa Fundamental, Ser: Sericita, Py: Pirita, Cb: Carbonato.

Figura 23.

Cristales de cuarzo, variedades cristobalita y tridimita presentes en algunas vetillas tipo E.



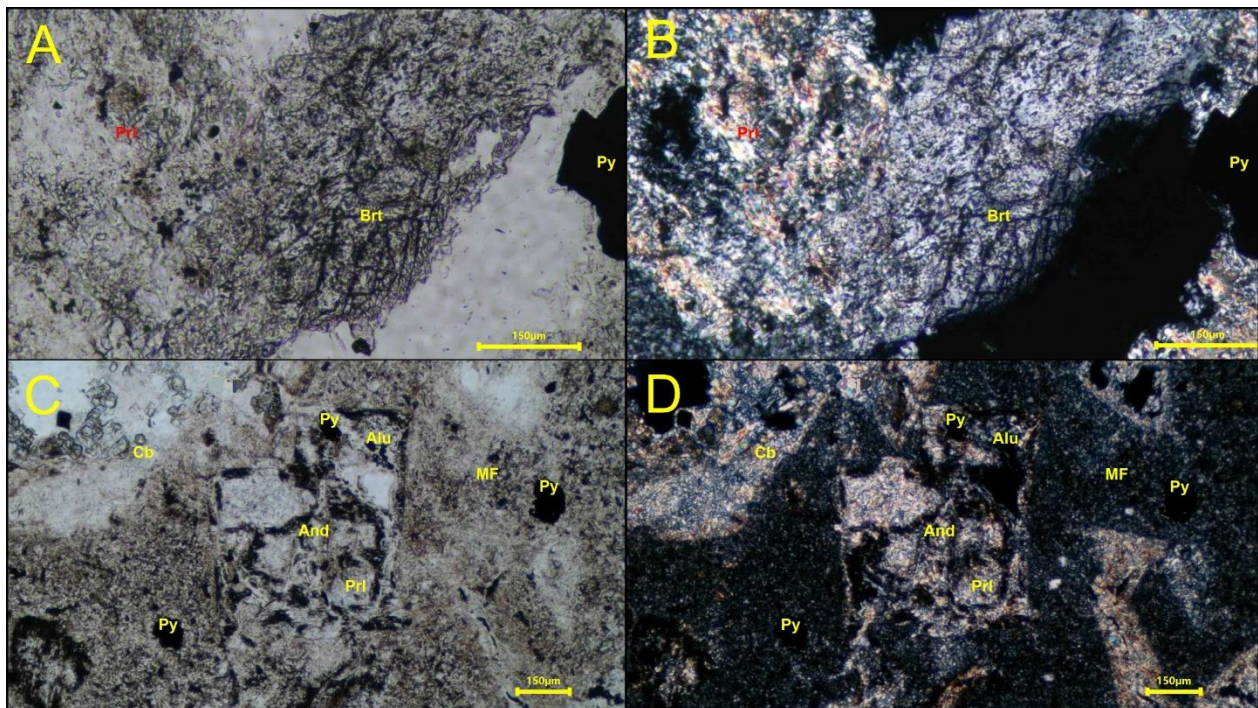
Nota. A) Cuarzo y cuarzo tipo tridimita cristalizando sobre una cavidad alargada. B) Tridimita con grupos de dobles maclas característica. C) Cristobalita aparentemente relleno una pequeña cavidad y forma de “esferulitas”. D) Cristobalita exhibiendo birrefringencia gris y débil. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A, C y nicoles cruzados B, D; 5X. Qz: Cuarzo, Trd: Tridimita, Pl: Plagioclasa, MF: Masa Fundamental, Cb: Carbonato, Crs: Cristobalita, Prl: Pirofilita, Gp: Yeso, Alu: Alunita.

Fenocristales de baritina o barita están presentes en la muestra MNG-CC-007, exhibe cristales subhedrales, con hábito masivo, presentando una buena exfoliación, el tamaño promedio de los cristales es de 0.3 cm, predominantemente alterando a pirofilita (**Figura 24.**).

Posibles fenocristales de andalucita se logran apreciar en la muestra MNG-CC-004, exhibiendo cristales subhedrales a anhedrales, hábitos prismáticos alargados con contornos cuadrados en corte basal (**Figura 24.**), exfoliación regular, el tamaño promedio de los cristales es de 0.3 cm, alterando a pirofilita y alunita. Estos dos minerales no son tan representativos en cuanto a porcentaje con respecto a la plagioclasa, hornblenda, cuarzo y feldespato potásico.

Figura 24.

Asociaciones minerales de baritina, andalucita, alunita y pirofilita producto de la alteración hidrotermal argílica avanzada.

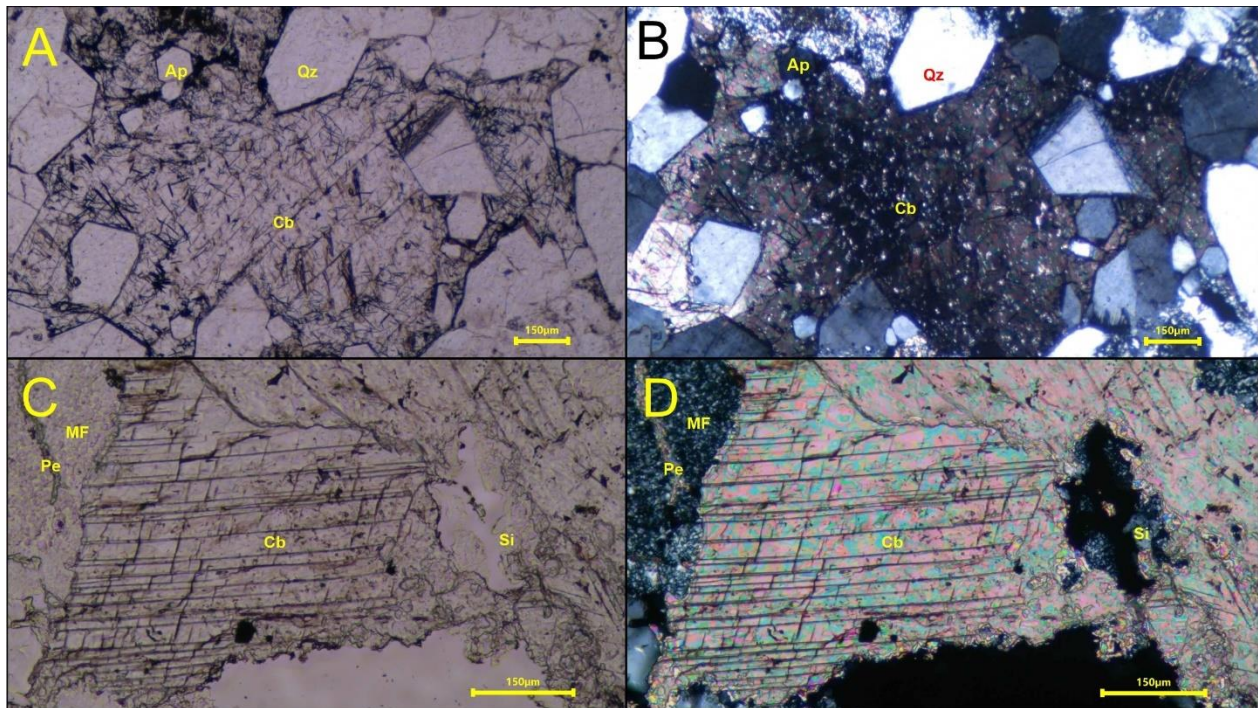


Nota. A) Cristal de baritina, exhibiendo buena exfoliación; 10X. B) Cristal de baritina en contacto con pirofilita producto de alteración; 10X. C) Cristal de andalucita presentando habito característico cuadrado en corte basal en una masa fundamental felsítica; 5X. D) Cristal de andalucita alterando a alunita y pirofilita; 5X. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A, C y nicoles cruzados B, D. Brt: Baritina, Prl: Pirofilita, Qz: Cuarzo, MF: Masa Fundamental, Py: Piritita, Cb: Carbonato, Alu: Alunita, And: Andalucita.

El carbonato es un mineral representativo en las muestras analizadas, presentando cristales subhedrales a anhedrales, hábitos muy variados como: prismáticos, masivos y en agregados granulares, las exfoliaciones varían entre buena a regular. El tamaño promedio de los cristales va de 0.8 y 1.5 cm, está asociada a las vetillas y es producto de alteración hidrotermal, además gran variedad de cristales de carbonato presenta maclas (**Figura 26. Figura 51. Figura 52.**). Es un mineral bastante representativo en las muestras.

Figura 25.

Vetilla de carbonato, presentando buena exfoliación y los minerales asociados a la vetilla tipo E.

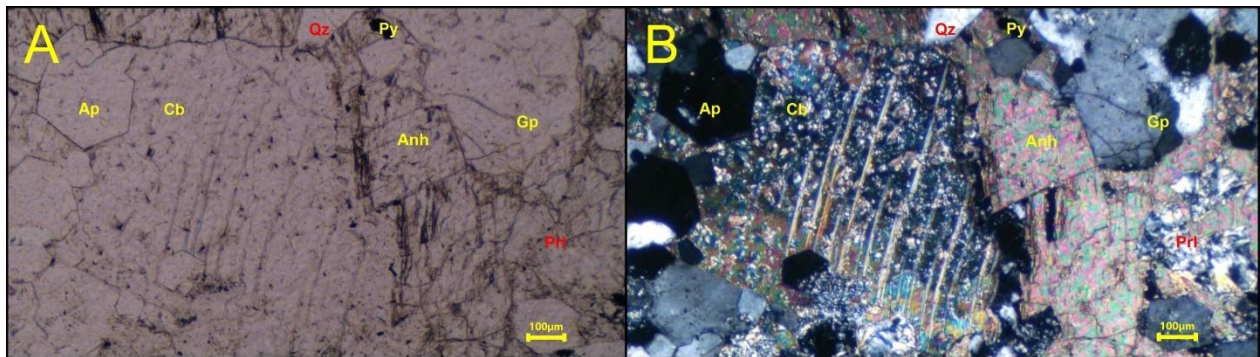


Nota. A) Cristales de carbonato presentando una aparente dirección de exfoliación y fracturas encerrados por cristales de cuarzo, inclusiones de rutilo acicular tipo “agujas de rutilo”; 5X. B) Cristal de carbonato exponiendo leve maclado; 5X. C) Calcita presenta exfoliación perfecta; 10X. D) Calcita exhibiendo birrefringencia característica, nótese “pequeños cristales de cuarzo” haciendo referencia a sílice (Si); 10X. Imágenes luz transmitida, nicoles paralelos A ,C y nicoles cruzados B, D. Ap: Apatito, Qz: Cuarzo, Cb: Carbonato, MF: Masa Fundamental, Pe: Pinita (asociación de sericita +biotita), Si: Sílice.

Minerales que se presentan como “accesorios”, en buen porcentaje en las muestras tales como el yeso presentando cristales subhedrales a euhedrales, hábitos prismáticos, mala exfoliación, tamaño de cristales promedio de 0.05 cm, los cristales de mayor tamaño y los agregados cristalinos se encuentran asociados a las vetillas. Apatito exhibiendo cristales euhedrales, hábitos hexagonales en corte basal (similares al cuarzo, pero presentando alto relieve), exfoliación no se aprecia, tamaño cristales promedio de 0.03 cm, los cristales están asociados a la vetilla, a carbonatos y a cuarzos drusiformes. Anhidrita con cristales subhedrales, hábito prismáticos y masivos, exfoliación regular a buena, tamaño promedio de los cristales 0.06 cm, los cristales están asociados principalmente a carbonato, apatito, algunas drusas y a las vetillas.

Figura 26.

Asociación mineralógica en vetilla de carbonatos tipo E, con maclamiento de carbonatos.

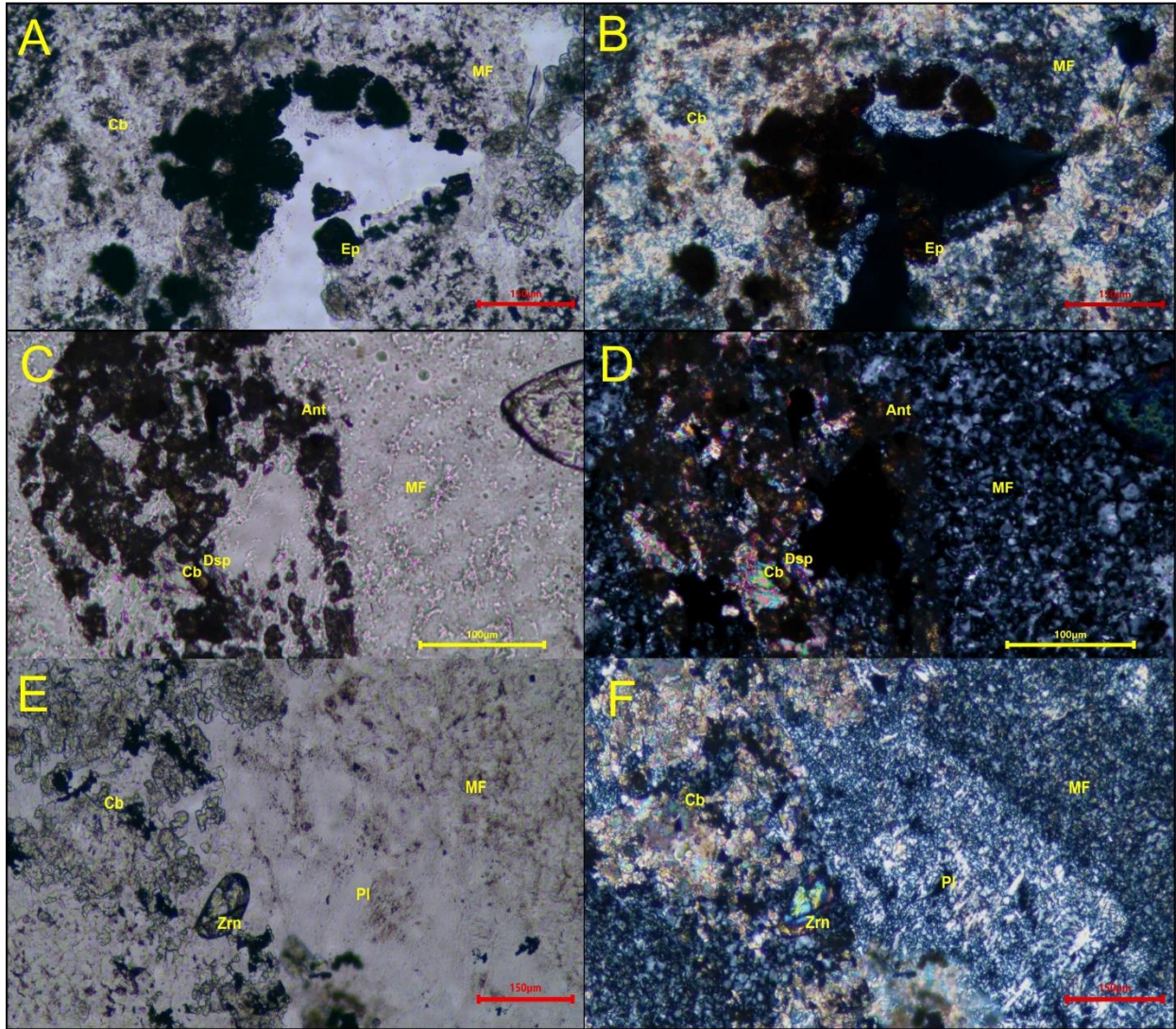


Nota. A) Apatitos hexagonales en corte basal, con alto relieve, yeso en los bordes del carbonato con un relieve más bajo y anhidrita exhibiendo en ciertas zonas exfoliación formando ángulos rectos; nicoles paralelos. B) Anhidrita presente colores de interferencia diferenciándola del carbonato además de su exfoliación, nicoles cruzados. Imágenes luz transmitida; 5X. Ap: Apatito, Qz: Cuarzo, MF: Masa Fundamental, Prl: Pirofilita, Anh: Anhidrita, Gp: Yeso, Py: Pirita.

Además de minerales con menor proporción en las muestras tales como: Epidotas en cristales subhedrales a euhedrales, hábitos prismáticos y en agregados cristalinos, se presentan generalmente en los bordes de los minerales, aparentemente como inclusiones, mala exfoliación, promedio de los cristales 0.01 cm. Biotitas como cristales subhedrales, hábitos prismáticos alargados, mala exfoliación y presentan pseudomorfismo con anatasa (Bastin, 1950), algunos cristales presentan reemplazamiento orientado de la anatasa dentro de los cristales de biotita (Malvicini & Saulnier, 1979) (**Figura 28.**). Moscovitas como cristales subhedrales de hábitos micáceos, aparente asociación con sericita, mala exfoliación, promedio de los cristales 0.02 cm (**Figura 21.**). Diásporo a manera de cristales subhedrales, hábitos prismáticos y masivos, mala exfoliación, tamaños promedio de cristales no mayores a 0.07 cm y zircones subhedrales a euhedrales, hábitos prismáticos hexagonales, se presentan en la masa fundamental felsítica sin aparente asociación (**Figura 27.**).

Figura 27.

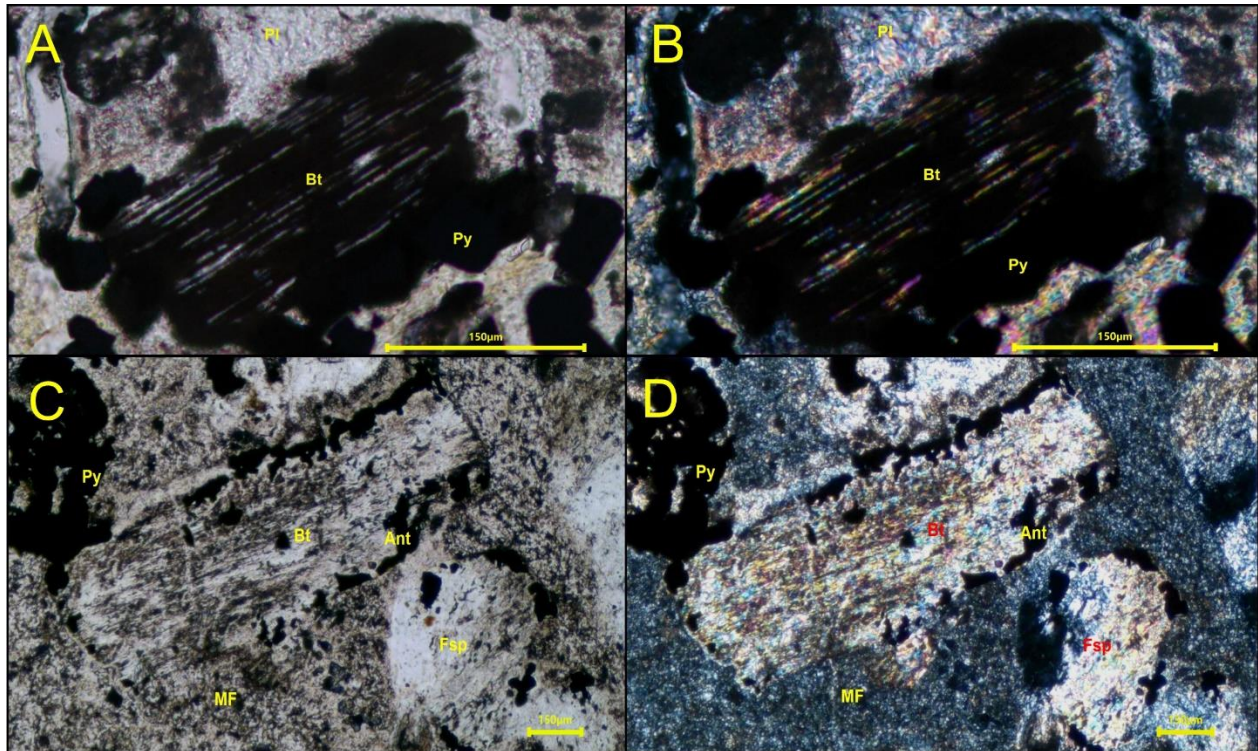
Minerales accesorios en las secciones delgadas pulidas, presentándose como inclusiones y agregados.



Nota. A) Agregado cristalino de epidotas. B) Epidotas con colores de interferencia característicos tipo “vital”. C) Cristal de diásporo presentando relieve muy alto característico, incluido en aparente cristal alterando a anatasa. D) Diásporo exhibiendo colores de interferencia característicos de cuarto orden. E) Zircón incluido en carbonato, presentando característico relieve muy alto. F) Zircón presentando colores de interferencia característicos de cuarto orden. Imágenes luz transmitida, nicols paralelos A, C, E y nicols cruzados B, C, F; 10X. MF: Masa Fundamental, Cb: Carbonato, Ant: Anatasa, Zrn: Zircón, Pl: Plagioclasa, Dsp: Diásporo, Ep: Epidota.

Figura 28.

Cristales de biotita con muy alto porcentaje de obliteración y en común reemplazamiento a anatasa.



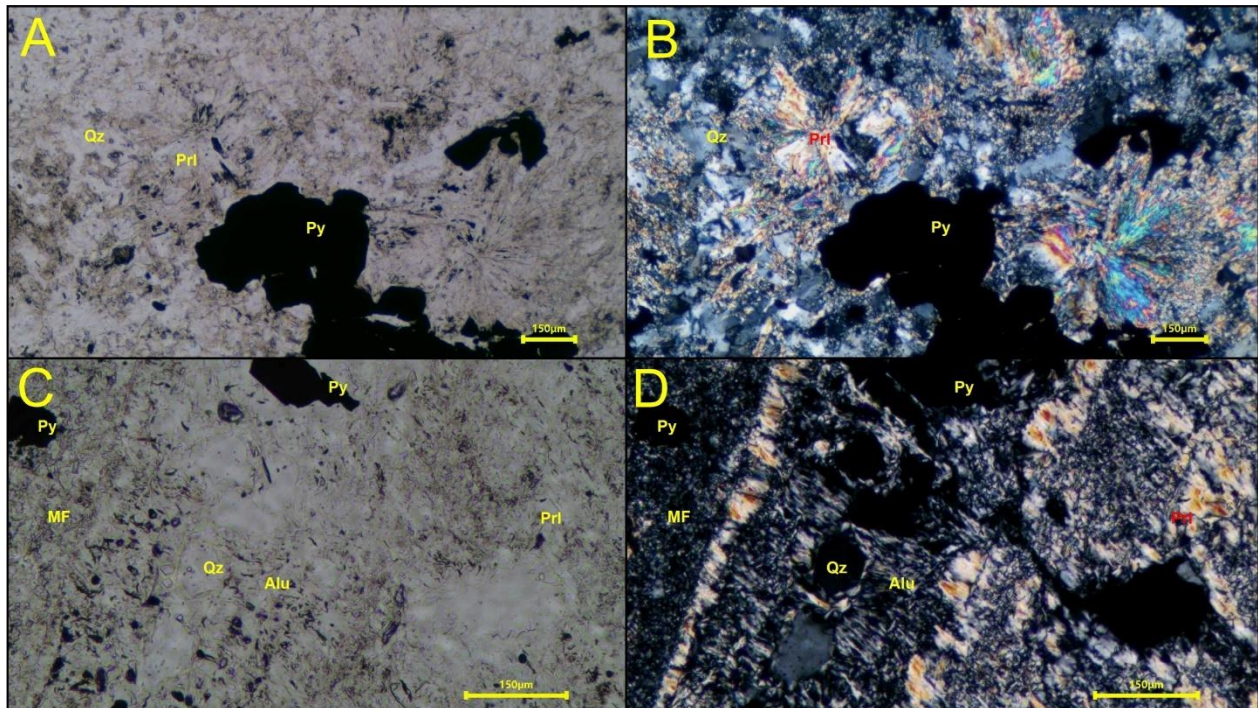
Nota. A) Cristal de biotita exhibiendo exfoliación en una dirección; 20X. B) Biotita con textura de reemplazo orientado de anatasa aprovechando la exfoliación de la biotita; 20X. C) Cristal de biotita presentando exfoliación en una dirección; 5X. D) Biotita en pseudomorfismo a anatasa en los bordes, aparente textura de caries; 5X. Imágenes luz transmitida, nícoles paralelos A, C y nícoles cruzados B, D. Bt: Biotita, Py: Pirita, Pl: Plagioclase, MF: Masa Fundamental, Fsp: Feldespato Potásico, Ant: Anatasa.

La presencia de minerales petrográficos que presentan abundancia en las muestras y que enmarcan la alteración hidrotermal son: Sericita en agregados cristalinos muy finos, no se aprecia exfoliación, los tamaños de los cristales no superan los 0.02 cm (**Figura 21.**), también caolín se presenta como una fina pátina sobre los minerales, pero las propiedades están siendo obliteradas.

Por otro lado, pirofilita, se presenta en cristales subhedrales de habito tabular, acicular formando agregados fibrosos radiados (Malvicini & Saulnier, 1979), mala exfoliación, ocasionalmente está asociada a alunita, tamaños de cristales promedio de 0.08 cm (**Figura 23., Figura 24. y Figura 29.**) y alunita exhibe cristales subhedrales, habito tabular ocasionalmente fibroso, los cristales no superan los 0.02 cm, mala exfoliación y asociada a presencia de pirofilita (**Figura 23., Figura 29. y Figura 25.**), la clorita también representa importancia en la alteración hidrotermal presentando una textura hidrotermal la cual será tratada adelante.

Figura 29.

Cristales de pirofilita y alunita producto de la alteración hidrotermal argílica avanzada en las secciones delgadas pulidas.

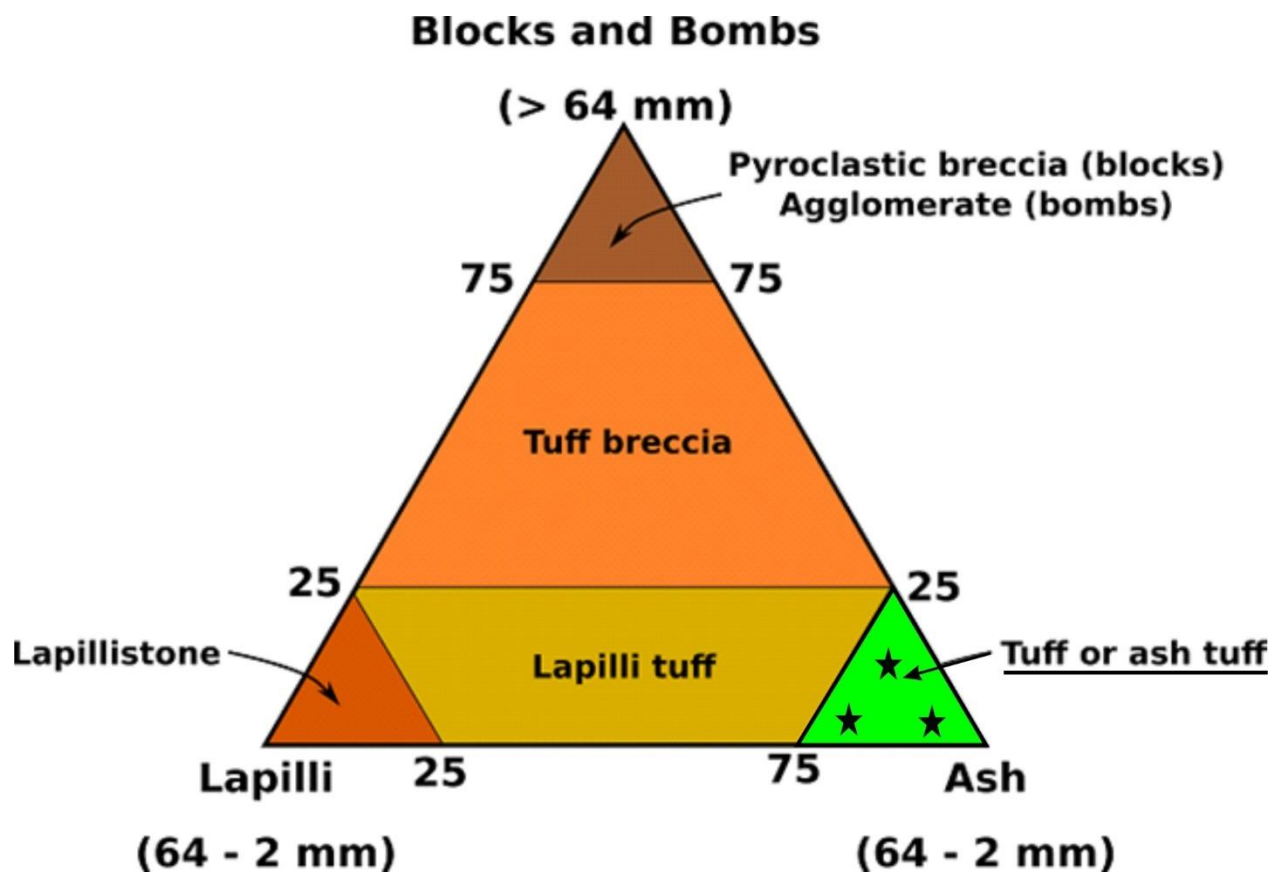


Nota. A) Cristales de pirofilita exhibiendo habito acicular; 5X. B) Cristales de pirofilita formando un agregado fibroso radiado; 5X. C) Pirita y cuarzo tipo beta (hexagonal corte basal) incluidos en cristal aparente de hornblenda; 10X. D) Aparente cristal de hornblenda alterando a alunita y bordes de pirofilita; 10X. Imágenes luz transmitida, nícoles paralelos A, C y nícoles cruzados B, D. Qz: Cuarzo, Prl: Pirofilita, Py: Pirita, Qz: Cuarzo, Alu: Alunita, MF: Masa Fundamental.

El tipo de litología que se determinó según la mineralogía y texturas observadas, es de rocas volcánicas que varían de dacitas a andesitas con texturas porfiríticas, fenocristales principalmente de plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico y hornblenda en una masa fundamental; definida como una matriz felsítica (cuarzo+plagioclasa) criptocristalina, se clasificaron según Streckeisen (1978) en Le Maitre *et al.* (2005) (**Figura 27.**) y rocas piroclásticas de tobas dacíticas-andesíticas de ceniza a ceniza fina las cuales presentan texturas de cuarzo embahiado (**Figura 22.**), algunas esferulitas. Se clasificaron según Le Maitre *et al.* (2005) en Strekeinsen (2020) (**Figura 30.** y **Figura 31.**).

Figura 31.

Clasificación polimodal de rocas piroclásticas basadas en proporción de bloques /bombas, lapilli y ceniza.



Nota. Tomado y modificado de: Le Maitre *et al.* (2005) en Strekeinsen (2020).

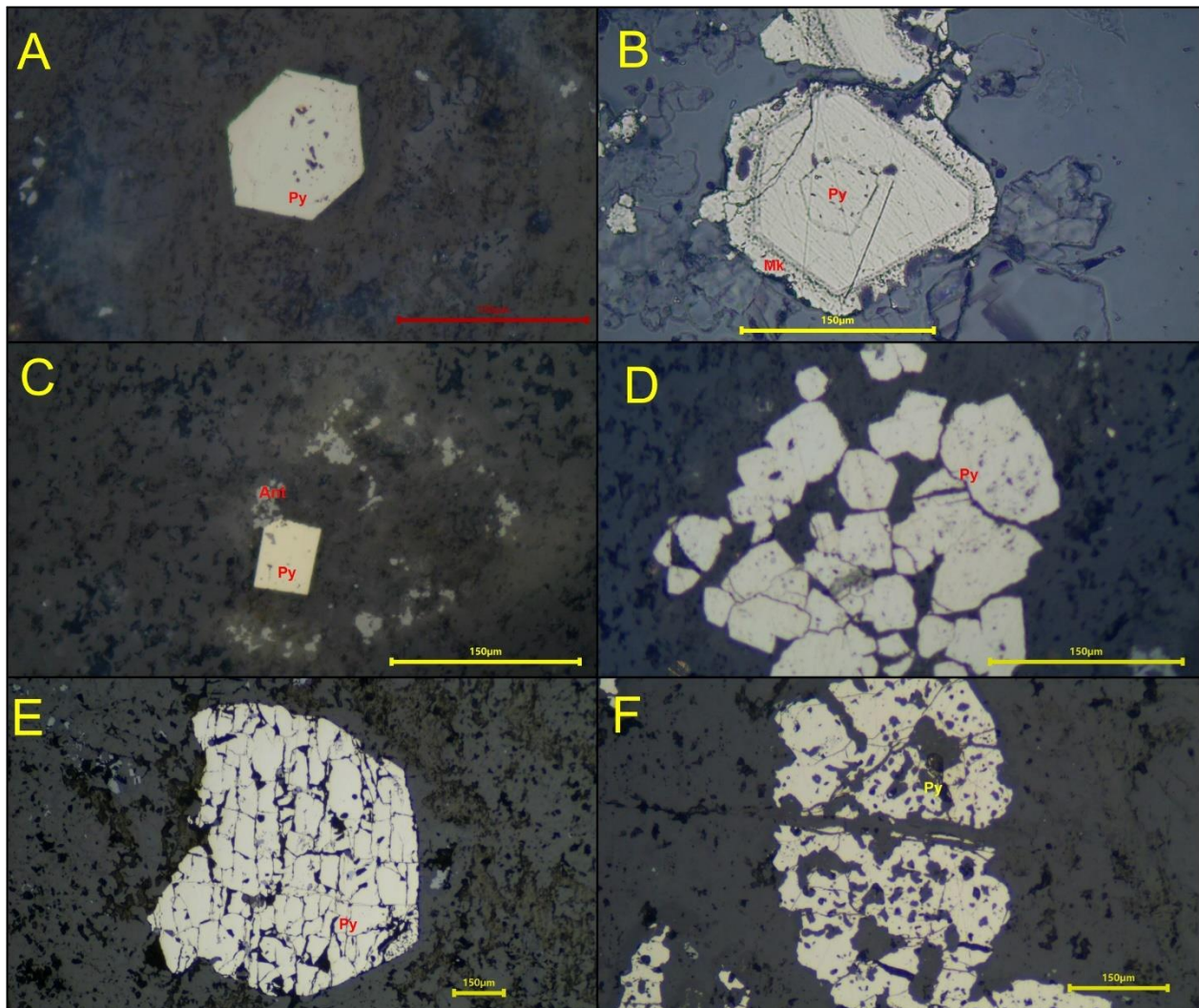
8.2 Petrografía de menas (Metalografía)

En cuanto a la descripción de minerales metalográficos, principalmente las muestras están compuestas por pirita, marcasita, esfalerita y galena en orden de menor a mayor abundancia; los cuales presentan diferentes texturas mineralógicas de mena entre sí, adicionalmente se encuentran minerales menas abundantes como melnikovita o pirita coliforme, tetraedrita (grupo de los sulfuros pero sulfosal común de Cu), calcopirita, anatasa, estibina o antimonita, como minerales accesorios manganita, magnetita, aparentes sulfosales como matildita, miargirita, estefanita, polibasita y minerales nativos como plata, oro y oro tipo electrum.

Los sulfuros están conformados principalmente por pirita encontrándose tanto diseminada como muy abundante en las vetillas, presentando cristales con diversidad de hábitos, texturas y asociaciones (**Figura 32.**) debido a la alteración que sufren las rocas. Formas anhedrales (muy alterados presentando corrosión generando espacios vacíos en los cuales pueden albergar otros minerales mena), subhedrales, euhedrales, hábitos prismáticos piritoedricos, cúbicos, puesto tiende a cristalizar cúbicamente pero también posee una tendencia a cristalizar en piritoedros, masivos, fracturados producto de deformación cataclástica (Gait, 1987; Craig & Vokes, 1993), texturas framboidales y coliformes en el caso de la melnikovita que sugiere un proceso de precipitación química (Chen, 1978); **Figura 32.** Texturas coroníticas, de atolón, de caries e inversas de caries, de “mutual boundaries” o bordes mutuos generalmente con marcasita, melnikovita, esfalerita y galena, además de textura monomineral también presente en las muestras (Edwards, 1960; Malvicini & Saulnier, 1979); **Figura 35.**

Figura 32.

Texturas y hábitos de la pirita en las muestras de secciones delgadas pulidas analizadas.

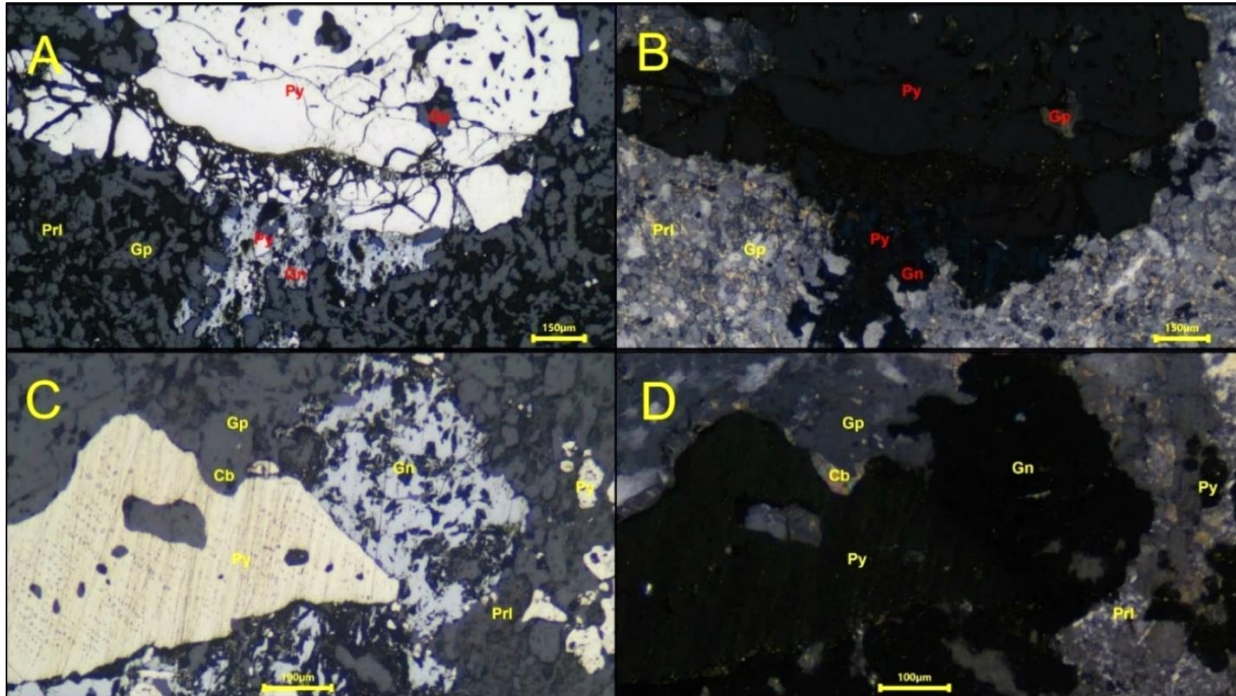


Nota. A) Pirita diseminada presentando habito piritoedrico con poco porcentaje de corrosión; 20X. B) Pirita con textura coronítica en transición a reemplazarse por pirita coloforme (melnikovita) en los bordes; 20X. C) Pirita de hábito cubico con intercrecimiento de anatasa y textura de caries; 20X. D) Cristales de pirita framboidal; 20X. E) Cristal de pirita muy fracturada indicando deformación cataclástica en la muestra; 5X F) Pirita altamente porosa producto posiblemente de disolución-reprecipitación y/o reacciones de reemplazamiento (Murowchick, 1992; Putnis, 2009); 10X. Imágenes luz reflejada, nicoles paralelos. Py: Pirita, Mk: Melnikovita, Ant: Anatasa. Luz reflejada.

Evidencias como el porcentaje de porosidad (alrededor del 2% porcentaje modal “poral” en los cristales), no “relleno poral” y la orientación en el ángulo de extinción de algunos cristales de marcasita con pirita; indica que algunas piritas son producto de inversión de marcasita (Murowchick, 1992). A su vez ciertos cristales de pirita presentan alto porcentaje “poral” el cual puede estar asociado a la corrosión de los minerales o que dichas piritas provienen de pirrotita por disolución-reprecipitación y oxidación esencialmente (alrededor 32% porcentaje modal “poral”), aunque la pirrotita esté ausente en cercanías o en los poros de los cristales de pirita, la presencia de magnetita en los poros (a modo de “relleno poral”) puede indicar que magnetita reemplazó la pirrotita haciendo nula la presencia de pirrotita en las muestras (Murowchick, 1992) (**Figura 34.**). Cabe resaltar que la porosidad presente puede ser también interpretada como un reflejo de disolución- precipitación y reacciones de reemplazamiento del mineral (Putnis, 2009).

Figura 33.

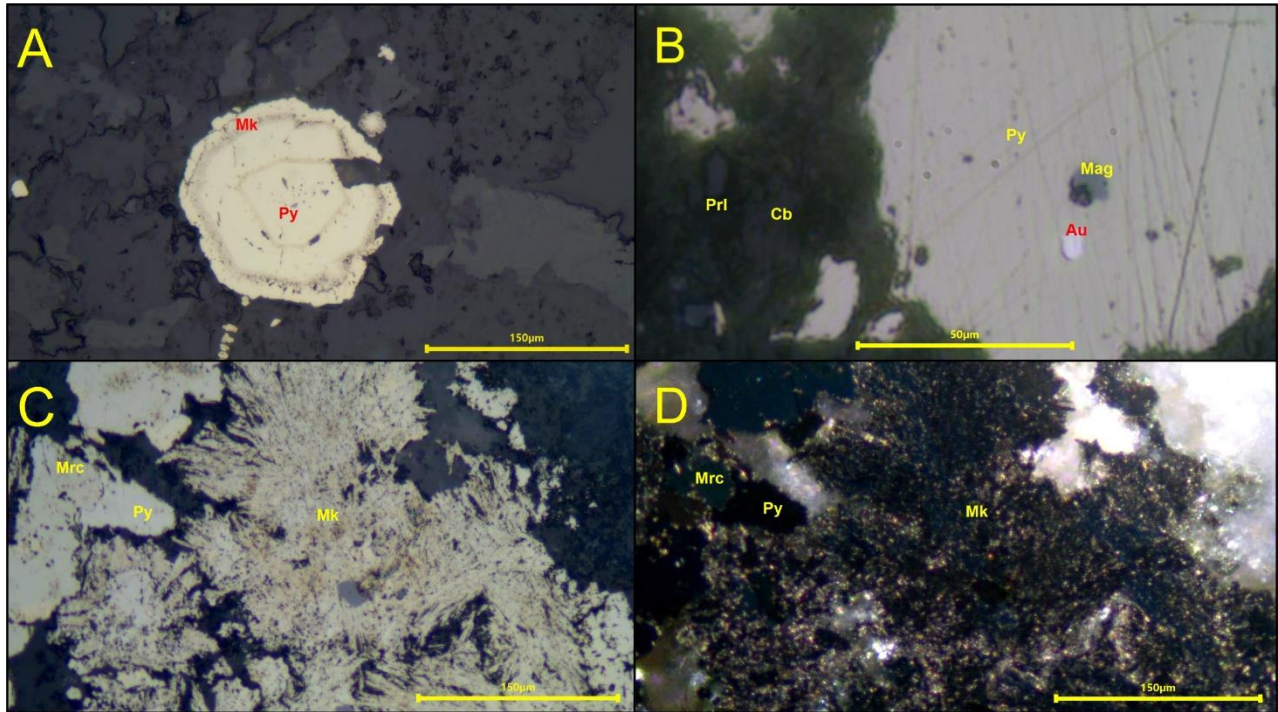
Cristales de pirita y sulfuros asociados a la misma pirita que presenta características particulares.



Nota. A) Cristal de pirita corroída y fracturada, con intercrecimiento de yeso en espacios libres, además galena también corroída, dichos minerales en mutual boundaries; nicoles paralelos, 10X. B) Pirita con leve anisotropía gris verdosa posiblemente pirita producto de inversión de la marcasita, en la zona media del cristal posible remplazamiento por pirita colorme o melnikovita; nicoles cruzados, 10X. C) Cristal anhedral de pirita levemente corroída con algunos espacios abiertos sin rellenos, en contacto con galena y presentando textura de caries por parte del carbonato; nicoles paralelos, 10X. D) Cristal de pirita presentando leve anisotropía posiblemente producto de enriquecimiento de arsénico; nicoles cruzados, 10X. Imágenes luz reflejada. Py: Pirita, Gn: Galena, Gp: Yeso, Prl: Pirofilita, Cb: Carbonato.

Figura 34.

Cristales pirita, melnikovita, marcasita, la asociación entre ellos y la manera en que se presentan.

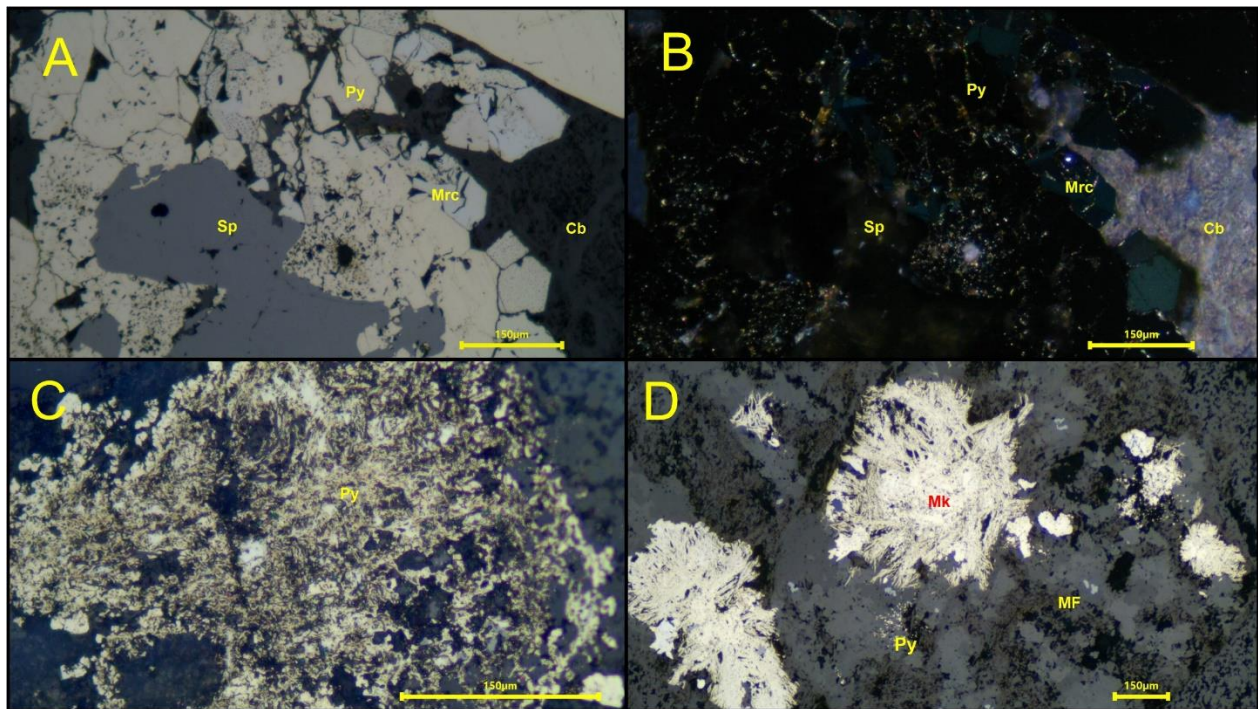


Nota. A) Pirita en aparente textura de atolón con bordes en posible alteración a melnikovita; nicoles paralelos, 20X. B) Cristal de pirita corroída, espacios abiertos rellenos de magnetita, indicando posible pirita proveniente de pirrotina, con inclusión de oro tipo electrum; nicoles paralelos, 63X. C) Cristales de melnikovita y pirita con textura de caries siendo reemplazada a marcasita; nicoles paralelos, 20X. D) Marcasita reemplazando a pirita con color de anisotropía característico gris con tonalidad verdosa; nicoles cruzados, 20X. Imágenes luz reflejada. Py: Pirita, Gn: Galena, Gp: Yeso, Au: Oro, Mag: Magnetita, Mrc: Marcasita, Mk: Melnikovita.

La marcasita se presenta en su mayoría asociada a pirita y como dimorfismo de la misma, además de presentar inversión de marcasita para formar pirita, también se encuentra marcasita asociada a melnikovita (pirita coliforme). Los cristales son subhedrales a euhedrales (principalmente euhedrales) lográndose diferenciar de pirita y melnikovita tanto por su hábito como la característica anisotropía marcada de la marcasita (gris tonalidad verdosa). Microfotografías de cristales de marcasita son apreciables en la **Figura 35**. Además, comparte cierto porcentaje de abundancia con la pirita debido a la común asociación.

Figura 35.

Cristales de sulfuros más abundantes y la manera en que están relacionados entre sí.

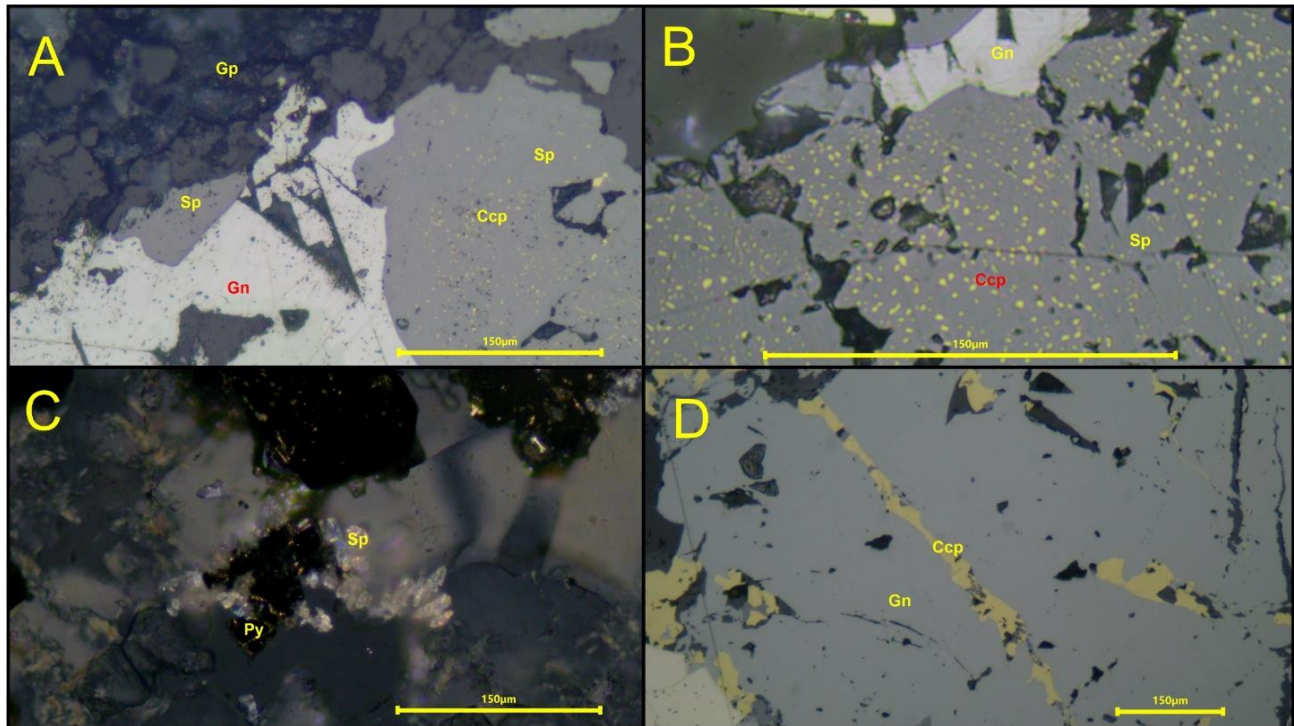


Nota. A) Pirita subhedral en contacto con marcasita euhedral fracturadas, siendo rellenos por esfalerita en texturas de caries; nicols paralelos, 10X. B) Marcasita con característica anisotropía y leves reflexiones internas oscuras; nicols cruzados, 10X. C) Pirita en transición a melnikovita; nicols paralelos, 20X. D) Agregados cristalinos de melnikovita con hábito masivo, con apariencia acicular “radiada”; nicols paralelos, 5X. Imágenes luz reflejada. Sp: Esfalerita, Py: Pirita, Mrc: Marcasita, Cb: Carbonato, Mk: Melnikovita, MF: Masa Fundamental.

Esfalerita se presentan en cristales subhedrales a anhedrales, exhibiendo un color gris característico en nicoles paralelos, en su mayoría se presentan rellenando fracturas (**Figura 35.**) y en las vetillas, generalmente en texturas de caries sobre piritas, marcasita y galena. Gran variedad de cristales de esfalerita están asociados a inclusiones e intercrecimientos de calcopirita, generando texturas de reemplazamiento tales como *watermelon texture* (la cual denota la presencia de granos apreciables de calcopirita en la esfalerita, **Figura 36.**) y *dusting of chalcopirite in sphalerite* (calcopirita de menor tamaño en la esfalerita y distribuida de manera diseminada, **Figura 36.**) indicando una característica común en la esfalerita llamada *chalcopirite disease*; dada en esfaleritas enriquecidas en hierro (esfalerita variedad marmatita), las cuales pueden reducir su contenido en hierro, debido al reemplazamiento del mismo producido por el intercrecimiento de calcopirita, a su vez como parte integral del proceso de mineralización, este proceso también afecta la anisotropía (anisotropías negras anómalas) de la esfalerita, debido al cambio composicional que está sufriendo (**Figura 35. y b**) (Barton & Bethke, 1987). Ocasionalmente se encuentran cristales con *textura Orchard* la cual se desarrolla como arreglos de cristales de calcopirita fina sobre cristales de esfalerita, generalmente bordeándolos; inclusive este constituye otro aspecto perteneciente a la textura *chalcopirite disease* (**Figura 36.**) (Barton & Bethke, 1987). Las variedades de esfalerita se pueden identificar debido a sus reflexiones internas, como ya ha sido mencionado son: tipo marmatita (rica en hierro) con reflexiones internas rojizas, esfalerita muy pura con reflexiones internas casi transparentes (aparente “alta pureza” química, **Figura 37.**) y esfalerita con anisotropías negruzcas asociadas al reemplazamiento y a cambios composicionales (**Figura 35. y b**).

Figura 36.

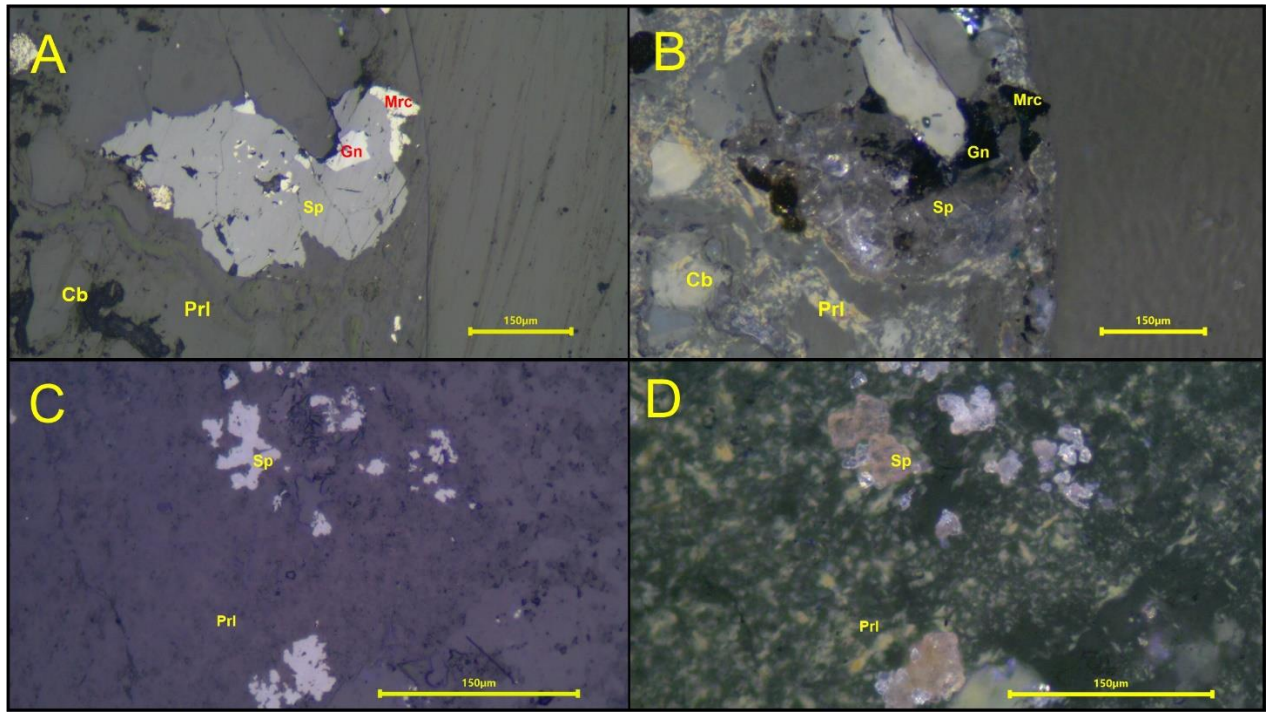
Cristales de esfalerita y galena, mostrando texturas entre ambos sulfuros, a su vez también entre esfalerita y calcopirita.



Nota. A) Asociación mineral en vetilla, galena exhibiendo característicos pits triangulares y textura de caries por parte de la esfalerita, a su vez esfalerita con textura “Dustin of chalcopyrite in sphalerite”; nicoles paralelos, 20X. B) Esfalerita corroída y desarrollando textura “watermelon” de calcopirita en esfalerita; nicoles paralelos, 40X. C) Esfalerita muy pura, denotando casi transparencia; nicoles cruzados, 20X. D) Calcopirita creciendo sobre fracturas y espacios abiertos de la esfalerita; nicoles paralelos, 10X. Imágenes luz reflejada. Gp: Yeso, Sp: Esfalerita, Gn: Galena, Ccp: Calcopirita, Py: Pirita.

Figura 37.

Variedades de esfalerita según sus reflexiones internas, notoria presencia de variedad marmatita.



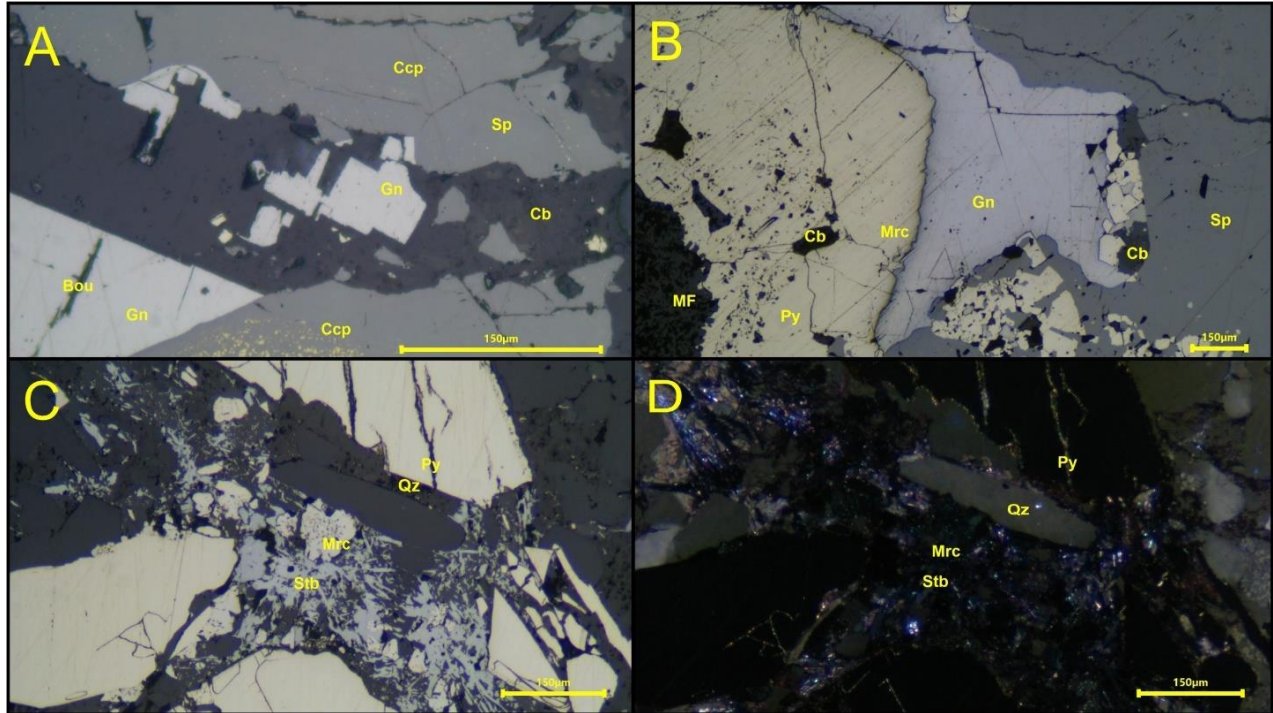
Nota. A) Esfalerita con inclusiones de galena y marcasita en borde; nicoles paralelos, 10X. B) Esfalerita muy pura casi transparente sin reflexiones internas; nicoles cruzados, 10X. C) Esfalerita masiva; nicoles paralelos, 20X. D) Esfalerita con reflexiones internas rojizas indicando ser variedad marmatita; nicoles cruzados, 20X. Imágenes luz reflejada. Sp: Esfalerita, Gn: Galena, Mrc: Marcasita, Prl: Pirofilita, Cb: Carbonato.

Galena es un mineral representativo en las secciones se presenta en cristales subhedrales a anhedrales, hábitos masivos y ocasionalmente cúbicos, con su color característico blanco, reflectancia alta y gran variedad de cristales alterando en sus bordes a boulangerita, además exhibe sus característicos pits triangulares (**Figura 36.** y **Figura 38.**), aunque siendo isotrópica algunos cristales presentan leve anisotropía producto de posible desequilibrio estequiométrico entre plomo y azufre (**Figura 39.**), el mineral está asociado a las vetillas, esfalerita, pirita y estibina; (**Figura 38.** y **Figura 39.**).

Estibina o antimonita presenta cristales euhedrales a subhedrales, color blanco con tonalidades grises, hábitos masivos con intercrecimientos de galena, prismáticos alargados y en agregados radiales, cristales con fuerte anisotropía, en asociación con galena y esfalerita; **Figura 38.** Tetraedrita exhibe cristales euhedrales a subhedrales, hábito tetraédrico, con un color gris verde oliva e isotrópica, asociada a pirita y galena; **Figura 38.** Calcopirita como cristales subhedrales a anhedrales, color amarillo, hábitos masivos, forma de “granos”, se presentan relleno espacios vacíos en las vetillas, generando texturas de caries y anticaries, en asociación con esfalerita en texturas de reemplazamiento propias de *chalcopyrite disease*; **Figura 36. Figura 37. Figura 38. y Figura 39.**

Figura 38.

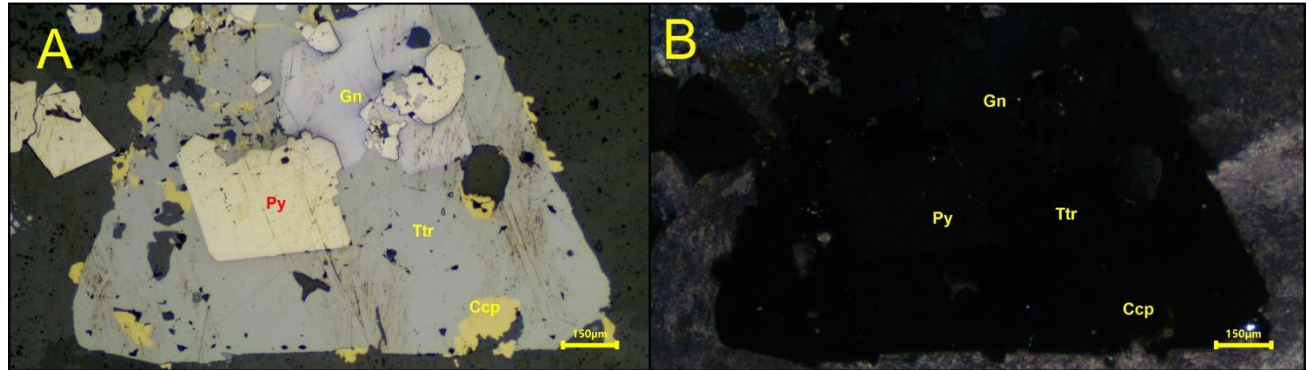
Cristales de sulfuros que presentan menor porcentaje en las secciones delgadas pulidas.



Nota. A) Galenas de habito cubico con alteración en borde a boulangerita (tono verdoso), en vetilla de carbonato; nicoles paralelos, 20X. B) Galena exhibiendo pits triangulares con aparente leve carbonatación en borde; nicoles paralelos, 5X. C) Estibina en cristales radiales; nicoles paralelos, 10X. D) Estibina exponiendo fuerte anisotropía característica (fuerte azul con tonos grises); nicoles cruzados, 10X. Imágenes luz reflejada. Sp: Esfalerita, Gn: Galena, Ccp: Calcopirita, Mrc: Marcasita, Cb: Carbonato, Bou: Boulangerita, Stb: Estibina, Qz: Cuarzo, Py: Pirita.

Figura 39.

Cristal de tetraedrita con buen hábito y desarrollo de texturas con sulfuros.

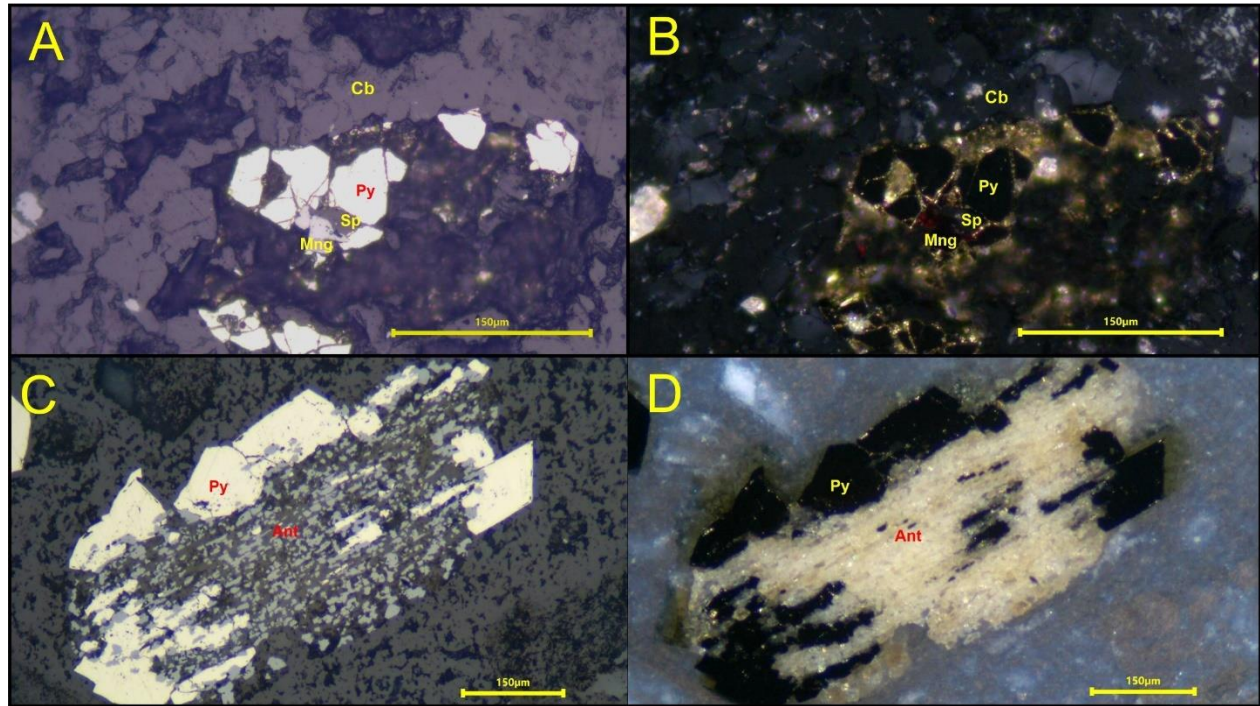


Nota. A) Tetraedrita presentando hábito común tetraédrico con inclusiones de pirita y galena, además textura de caries por parte de la calcopirita, también “mutual boundaries” entre pirita y galena ; nicoles paralelos, 5X. B) Galena con leve anisotropía; nicoles cruzados, 5X. Imágenes luz reflejada. Gn: Galena, Ccp: Calcopirita, Ttr: Tetraedrita, Qz: Cuarzo, Py: Pirita.

Óxidos están principalmente representados por anatasa denota cristales subhedrales a anhedrales, hábitos prismáticos, tabulares y masivos, en asociación con pirita y biotita presentando una textura de reemplazamiento orientado de la misma biotita (Malvicini & Saulnier, 1979); **Figura 28.** Manganita en cristales anhedrales hábitos masivos, de color levemente similar a la galena, asociada a la esfalerita y la pirita, se caracteriza por reflexiones internas rojizas-sangre; **Figura 40.** Magnetita en cristales anhedrales, hábitos masivos y se presenta como producto de oxidación en espacios abiertos de la pirita producto de la corrosión; **Figura 34.**

Figura 40.

Cristales de minerales óxidos y texturas que desarrollan con respecto a ciertos sulfuros.

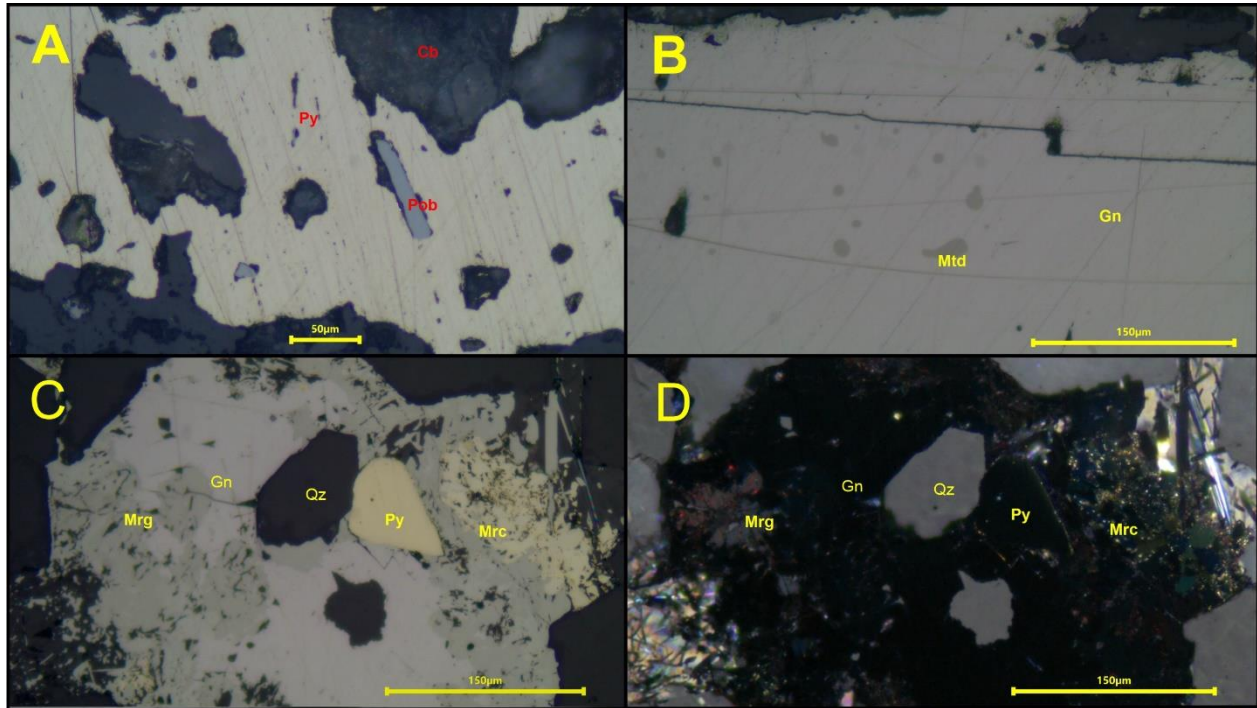


Nota. A) Manganita desarrollando textura de anticaries en esfalerita que a su vez esta en textura de caries en cristales de pirita fracturada en la vetilla de carbonato y “mutual boundaries” entre esfalerita y manganita; nicoles paralelos, 20X. B) Reflexiones rojizas internas características de manganita; nicoles cruzados, 20X. C) Textura de reemplazamiento orientado de la biotita a anatasa, pirita bordeando el cristal de biotita y presentando “mutual boundaries” con la anatasa que a su vez presenta textura de caries hacia la pirita; nicoles paralelos, 10X. D) Isotropía y anisotropía característica de pirita y anatasa; nicoles cruzados, 10X. Imágenes luz reflejada. Cb: Carbonato, Py: Pirita, Sp: Esfalerita, Ant: Anatasa, Mng: Manganita.

Minerales accesorios se presentan posibles sulfosales tales como miargirita, matildita, polibasita y estefanita; **Figura 41.** La miargirita es un sulfosal de plata se presenta anhedral a subhedral, hábitos masivos, fuerte anisotropía con colores grises verdosos, asociada a galena. Matildita sulfosal de plata se presenta anhedral, en hábito masivo y asociada a galena. La polibasita sulfosal de cobre y plata, está presente en cristales subhedrales, de hábitos tabulares. Aparente estefanita sulfosal de plata como cristales anhedrales a subhedrales, hábitos prismáticos y masivos (**Figura 42.**).

Figura 41.

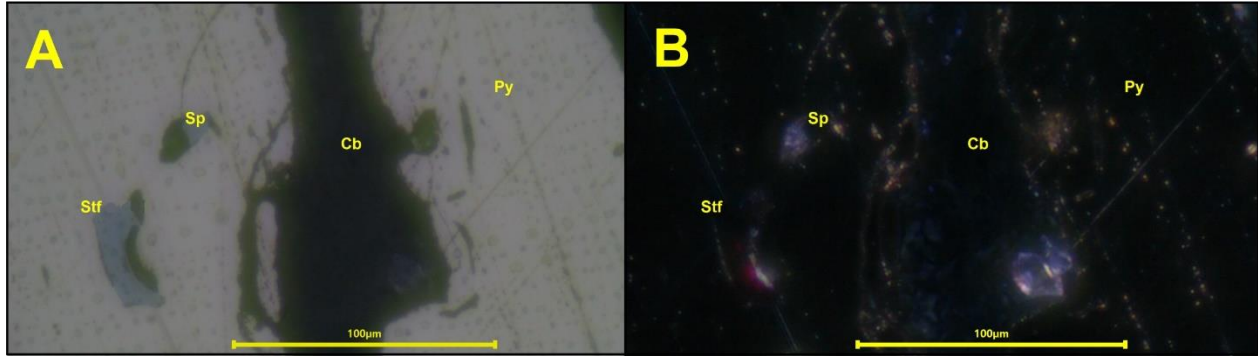
Minerales metalográficos accesorios, tipo sulfosales, polibasita, miargirita y matildita.



Nota. A) Polibasita relleno de espacios vacíos en la pirita presentando hábito tabular característico; nicols paralelos, 5X. B) Matildita masiva incluida en galena; nicols paralelos, 20X. C) Color característico gris con tonos verdes de la miargirita, además inclusiones de cuarzo, pirita y marcasita desarrollando texturas de caries en un cristal de galena; nicols paralelos, 20X. D) Reflexiones internas rojizas y colores grises verdosos de la miargirita, además anisotropía característica de la marcasita; nicols cruzados, 20X. Imágenes luz reflejada. Pob: Polibasita, Py: Pirita, Cb: Carbonato, Mtd: Matildita, Gn: Galena, Qz: Cuarzo, Mrg: Miargirita, Mrc: Marcasita.

Figura 42.

Cristal de estefanita en relación con pirita en vetilla de carbonato tipo E.



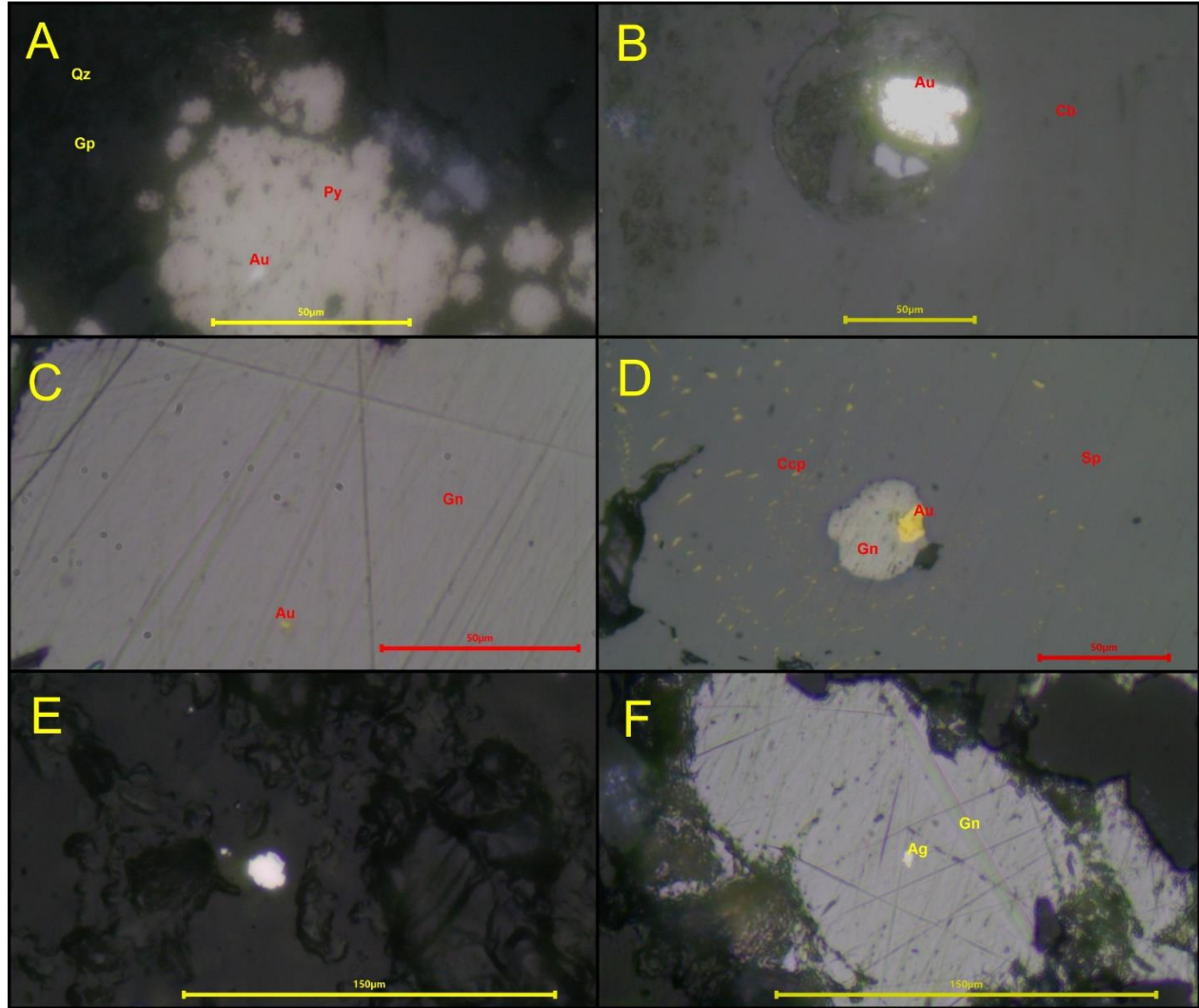
Nota. A) Estefanita masiva desarrollándose en espacio libre de la pirita al igual que esfalerita; nicoles paralelos, 20X. B) Reflexiones internas rojizas comunes de la Estefanita; nicoles paralelos, 20X. Imágenes luz reflejada. Py: Pirita, Cb: Carbonato, Sp: Esfalerita, Stf: Estefanita.

Los metales nativos son plata y oro; el oro se presenta anhedralmente, en hábitos masivos “gránulos”, isotrópico y en asociación principalmente con pirita, incluido en la misma y del mismo modo incluido en la galena, a su vez está relleno espacios libres. Además, hay presencia de oro tipo electrum comúnmente en asociación con la galena (**Figura 43.** y **Figura 44.**). La plata se presenta de igual forma (incluida) en galena, de forma subhedral a anhedral, hábitos masivos “granulares”, isotrópica, en asociación con galena y con posible oro tipo electrum (**Figura 43.** y **f**). También se encuentra aparente oro libre en ciertos casos relleno espacios libres como en vetillas mineralizadas de carbonato (**Figura 43.**).

Las muestras en las que se aprecia oro y plata microscópicamente fueron las muestras MNG-CC-006 Y MNG-CC-007, y únicamente presencia de plata en la muestra MNG-CC-005; en la zona de “El Santo” en la mina Gavia, en vetillas con orientaciones NE.

Figura 43.

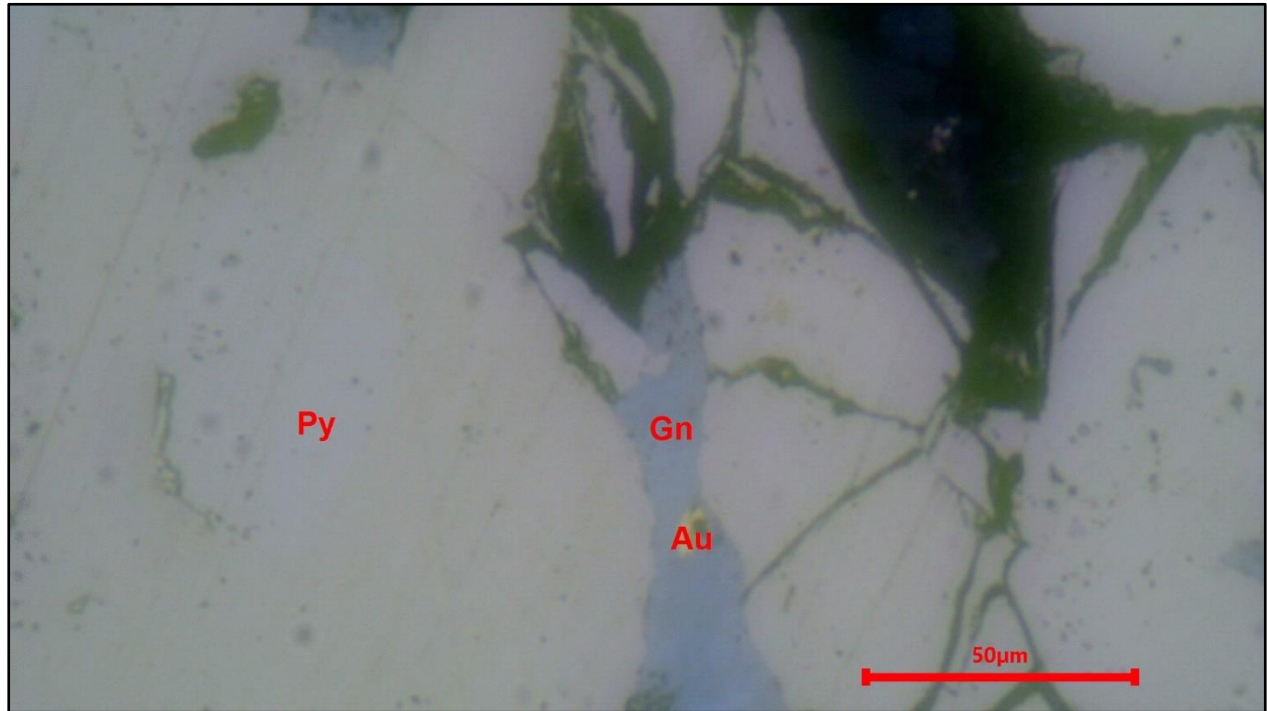
Cristales minerales nativos presentes; oro, oro tipo electrum y plata.



Nota. A) pirita corroída con inclusión de oro tipo electrum en vetilla mineralizada de yeso ;63X. B) Oro tipo electrum en vetilla mineralizada de carbonato; 40X. C) Oro incluido en galena ;63X. D) Galena incluida en esfalerita con textura de calcopirita disease a su vez con inclusión de oro hacia el borde; 40X. E) Cristal de plata; 40X. F) Cristal masivo de plata incluido en galena; 40X. Imágenes luz reflejada, nicoles paralelos. Py: Pirita, Au: Oro, Qz: Cuarzo, Gp: Yeso, Gn: Galena, Ag: Plata, Ccp: Calcopirita, Sp: Esfalerita.

Figura 44.

Cristal de oro incluido en galena rellenando fractura de cristal de pirita.



Nota. Imagen luz reflejada; 40X, nicoles paralelos. Py: Pirita, Gn: Galena, Au: Oro.

8.3 Química mineral

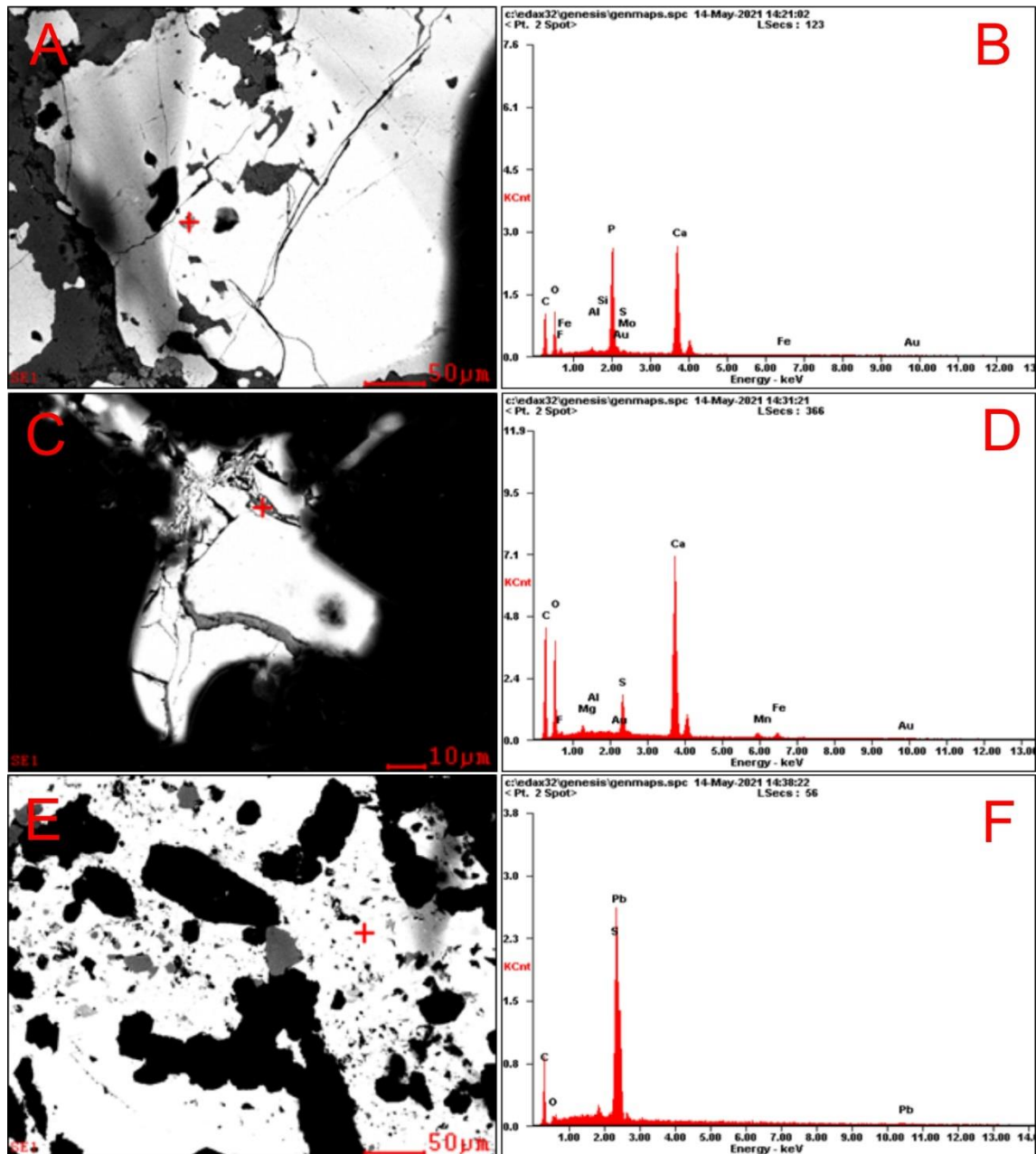
La composición química semicuantitativa de algunos minerales de interés se logró determinar por medio de microanálisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), realizado en el microscopio electrónico de barrido (SEM) FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, sede de la Universidad Industrial de Santander, el análisis fue desarrollado sobre las muestras MNG-CC-006 y MNG-CC-007, las cuales presentan mayor atención.

8.3.1 Dacita. Sección MNG-CC-006

Esta sección delgada pulida presenta sulfuros con alto contenido de Fe, Pb, Zn, minerales tales como pirita (Fe) la cual presenta aparentes inclusiones de Au y Mo (**Figura 45. y b**) probablemente debido a relaciones entre el Au y As en la pirita (Reich *et al.*, 2005; Deditius *et al.*, 2014), esfalerita (Zn) (**Figura 46. y b**) y galena (Pb) (**Figura 45. y f**) además sulfosales de Cu y Pb como boulangerita-bornita (**Figura 46.**) y silicatos (**Figura 45.**).

Figura 45.

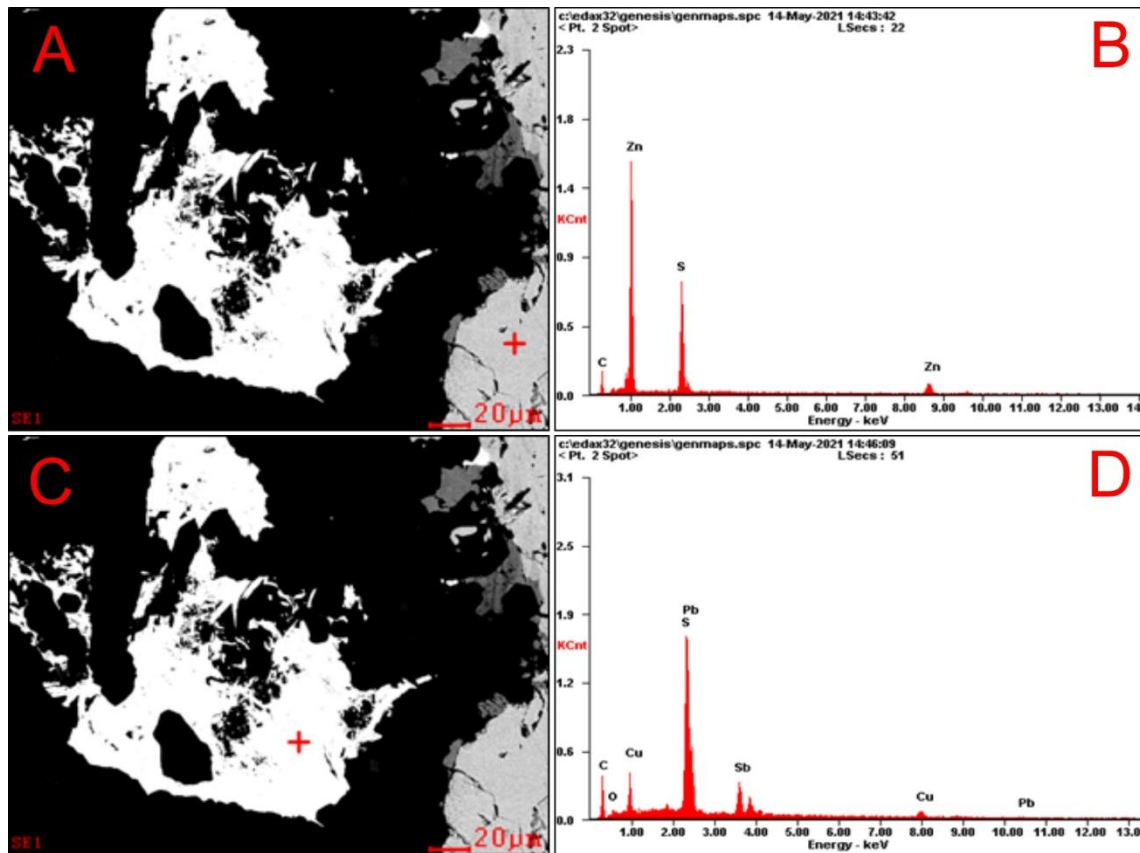
Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).



Nota. A y B Pirita con inclusiones de Au y Mo. C y D Pirita con inclusiones de Au y silicatos. E y F Galena.

Figura 46.

Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).



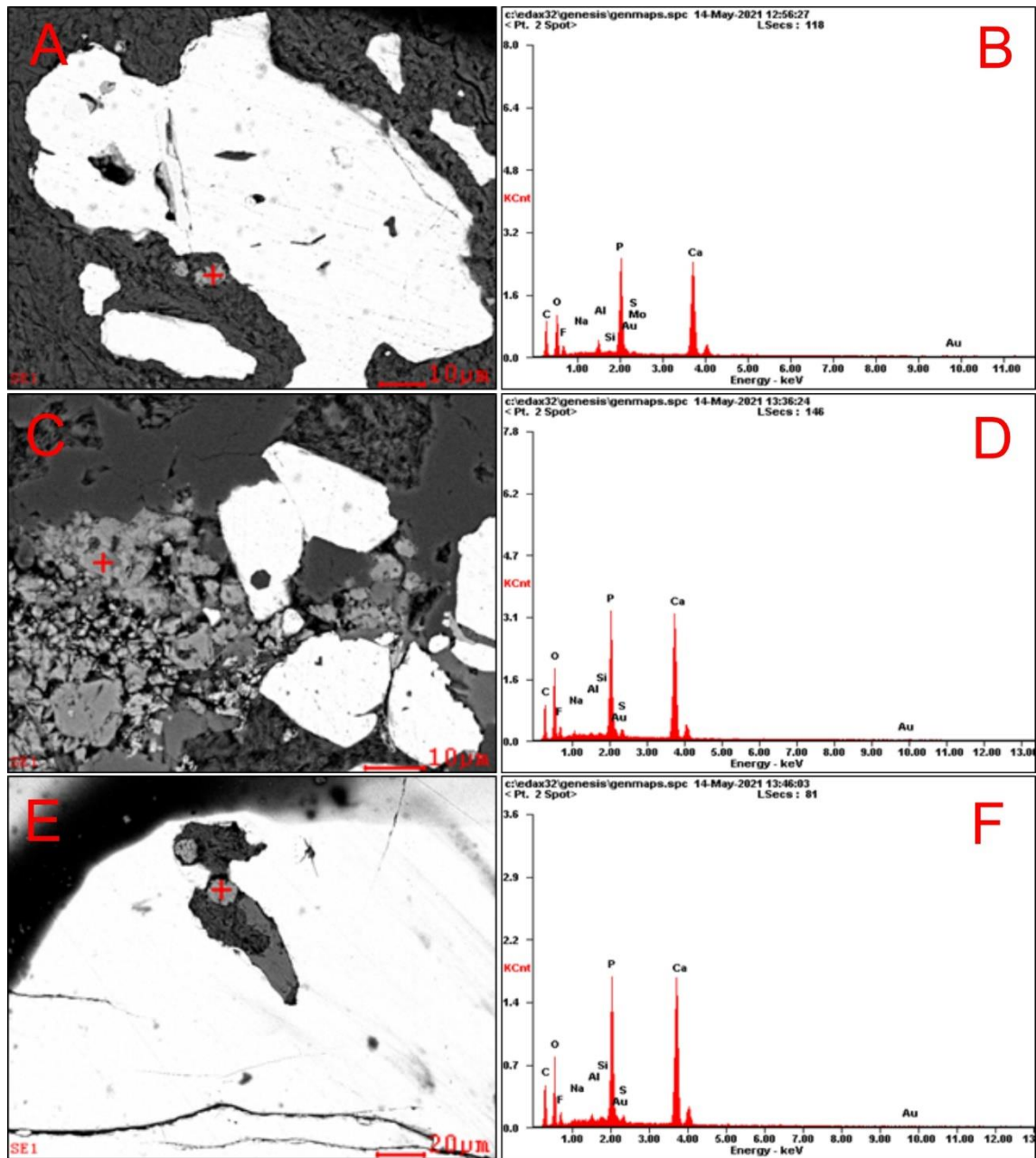
Nota. A y B Esfalerita. C y D Boulangerita-Bornita.

8.3.2 Dacita. Sección MNG-CC-007

La sección igualmente presenta sulfuros, básicamente pirita (Fe) la cual a su vez presenta inclusiones de Au comúnmente llamadas “oro invisible” (**Figura 48.**) y Mo, con adición de inclusiones de silicatos (**Figura 47.**); esta ocurrencia es común en las piritas además exhiben contenidos de elementos traza como As y Au (Maddox *et al.*, 1998; Dediditius *et al.*, 2011), el contenido de Ca de posible aporte de apatito (fosfato cálcico) y silicatos que también contienen inclusiones de Au (**Figura 47.**).

Figura 47.

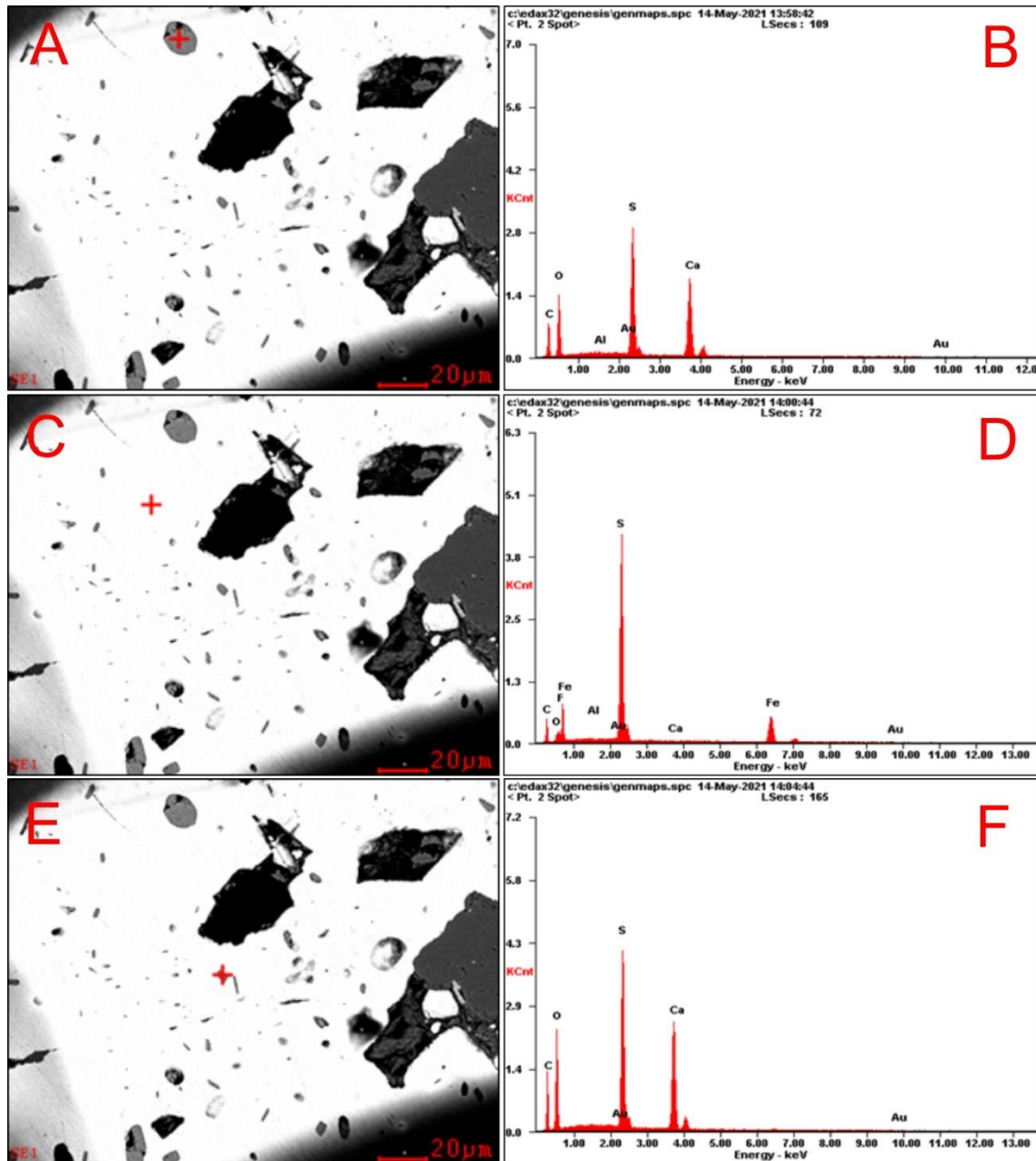
Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).



Nota. A y B Pirita con inclusiones de Au, Mo + Silicatos. C y D Inclusiones de Au en silicatos. E y F Pirita porosa con inclusiones de Au, silicatos + Apatitos; porosidad se puede deber a procesos de disolución (Deditius *et al.*, 2011).

Figura 48.

Microfotografías SEM (microscopía electrónica de barrido) y espectros EDS (espectrometría de dispersión de energía de rayos X).



Nota. A y B Pirita porosa rica en Au. C y D Pirita con Au “invisible”. E y F Pirita con inclusiones de Au “invisible”.

8.4 Asociaciones minerales

Las asociaciones minerales de mayor importancia y ocurrencia identificadas en las secciones delgadas pulidas mediante petrografía-metalografía son descritas a continuación.

Minerales en asociación común como Pirita+Marcasita, acompañada en algunas muestras por melnikovita y en compañía de otros minerales tales como sericita, esfalerita, masa fundamental felsítica (cuarzo+plagioclasa) criptocristalina, carbonatos, plagioclasas, feldespatos potásico, cuarzo, pirofilita, ocasionalmente acompañados de galena y estibina. Sin embargo se podría decir que la pirita se puede presentar en asociación con casi todos los minerales, debido a la abundancia de la misma en las muestras. Otros minerales que aparentemente están en asociación con la mayoría de los minerales son: carbonatos, galena y esfalerita, aunque estos están restringidos a ciertas muestras y regiones en las secciones delgadas pulidas. En la **Tabla 4.** se muestran las asociaciones más importantes de cada muestra (sección delgada pulida) analizada.

Tabla 4.

Asociaciones minerales presentes en las secciones delgadas pulidas analizadas.

No Muestra	Asociaciones minerales
MNG-MP-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Py+Mrc+Sp+Ttr+MF+Fsp • Ttr+Gn+Py+Cb+MF • Py+Ccp+Ttr+Gn+Cb+MF
MNG-MP-2003	<ul style="list-style-type: none"> • Py+Ant+Cb+Ser+MF+Sp • Cb+MF+Ser+Py+Mrc+Mk. • Hbl+Cb+Chl+Ser+MF+Pl+Py+Ant
MNG-MP-2004	<ul style="list-style-type: none"> • Py+Sp+Cb+MF+Gp+Hbl+Ep
MNG-MP-2006	<ul style="list-style-type: none"> • Cb+Anh+Py+Ap+Gp • Hbl+Qz+Cb+Py+Sp+Gn+MF+Ant+Prl. • Hbl+Pl+Cb+Ms+MF+Chl+Py+Sp • Prl+Ser+MF+Qz+Py
MNG-CC-004	<ul style="list-style-type: none"> • Py+Mrc+Mk+Gn+Ttr+Cb+MF+Fsp • Cb+Dsp+Alu+Prl+MF+Hbl+Ap+Ant+Py+Sp • Gp+Qz+Prl+MF+Hbl+Cb+Gn+Sp+Py+Ap+And • Bt+Hbl+Prl+Fsp+MF+Alu+Prl+Qz+Py+Ant
MNG-CC-004,1	<ul style="list-style-type: none"> • Ttr+Ccp+Gn+Gp+Cb+Anh+Hbl • Py+Mrc+Mk+Sp+Cb+Anh+MF+Pl+Hbl • Dsp+MF+Alu+Prl+Pl+Hbl+Py+Ant+Gn+Sp+Ccp
MNG-CC-005	<ul style="list-style-type: none"> • And+Prl+Alu+Py+Sp+Cb+MF+Hbl • Ant+Py+Gn+Prl+Alu+Ms+MF+Hbl+Cb+Sp+Qz
MNG-CC-006	<ul style="list-style-type: none"> • Gp+Alu+Py+Sp+MF+Mk • Py+Pl+Sp+Gn+Stb+Gp+Cb+Prl+Alu+Ant
MNG-CC-007	<ul style="list-style-type: none"> • Alu+Pl+Fsp+Ms+Hbl+Gp+Py • Brt+Prl+Alu+Py+MF

Nota. Py: Pirita, Mrc: Marcasita, Sp: Esfalerita, Ttr: Tetraedrita, MF: Masa fundamental, Fsp: Feldespato potásico, Gn: Galena, Cb: Carbonato, Ccp: Calcopirita, Ser: Sericita, Ant: Anatasa, Prl: Pirofilita, Alu: Alunita, Mk: Melnikovita, Hbl: Hornblenda, Pl: Plagioclasa, Ant: Anatasa, Sp: Esfalerita, Ms: Moscovita, Gp: Yeso, Anh: Anhidrita, Ap: Apatito, Bt: Biotita, Dsp: Diásporo, Brt: Baritina, Stb: Estibina (Chace, 1956; Whitney & Evans, 2010).

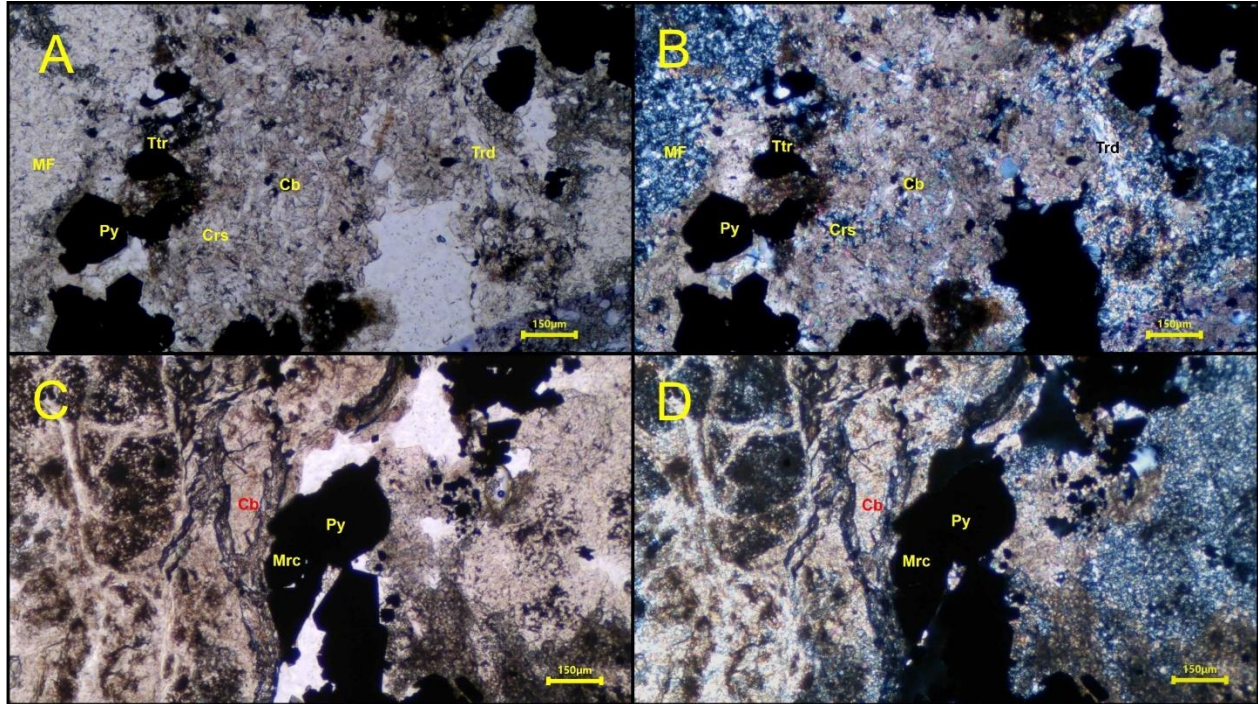
8.5 Tipo de Vetillas

8.5.1 Clasificación según la mineralización-microscópica

En cuanto a la clasificación de las vetillas según Gustafson & Hunt (1975); Sillitoe *et al.* (2010) corresponden a vetillas de tipo E por sus características de abundante presencia de carbonatos, algunos halos de cuarzo-sericita con carbonatos, pirita como el sulfuro predominante con respecto a los demás sulfuros presentes además ocurrencia ocasional de tetraedrita en las vetillas (**Figura 49.**, **Figura 50.** **Figura 51.** **Figura 52.**). Dichas vetillas de tipo E en temporalidad están asociadas a una etapa hidrotermal tardía y comúnmente presentan valores anómalos de Pb, Zn y As (como minerales indicadores, con contenido de estos elementos: galena, esfalerita y sulfosales).

Figura 49.

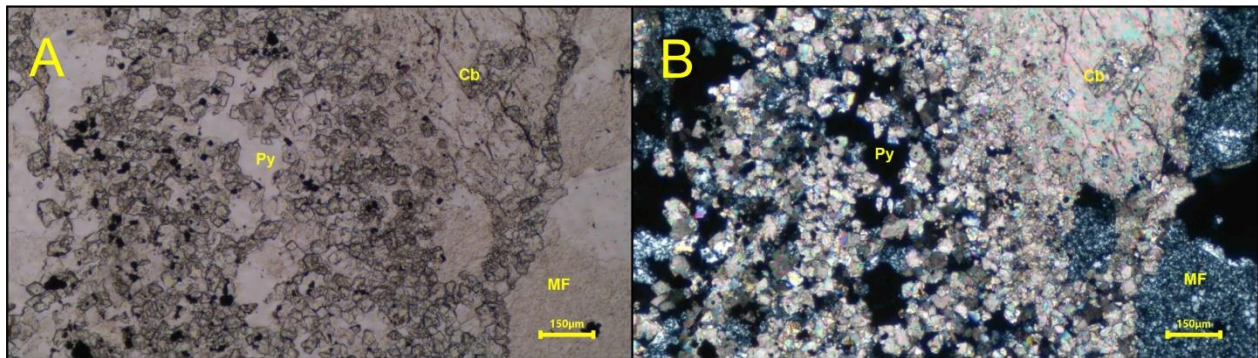
Asociaciones mineralógicas las cuales están presentes en las vetillas de carbonato tipo E.



Nota. A (nicoles paralelos) y B (nicoles cruzados) Vetillas de carbonatos acompañadas de pirita y algunos sulfuros, denotando aparente crecimiento de borde (masa fundamental) a centro, característico de morfología antitaxial, nótese la presencia de tridimita y cristobalita (presenta forma de “esferulitas” en paralelos y birrefringencia grisácea característica). C (nicoles paralelos) y D (nicoles cruzados) vetilla con apariencia caótica-irregular indicando que posiblemente fue producto de relleno de una fractura y/o con componente de dinamismo. Imágenes luz transmitida, 5X. Ttr: Tetraedrita, Py: Pirita, Trd: Tridimita, Crs: Cristobalita, MF: Masa Fundamental, Cb: Carbonato, Mrc: Marcasita.

Figura 50.

Vetilla compuesta netamente por presencia de carbonato y pirita, clasificada como tipo E.



Nota. E (nicos paralelos) y F (nicos cruzados) vetilla de carbonato, cristales de carbonato de menor magnitud que el general con presencia de cristales de pirita. Imágenes luz transmitida, 5X.

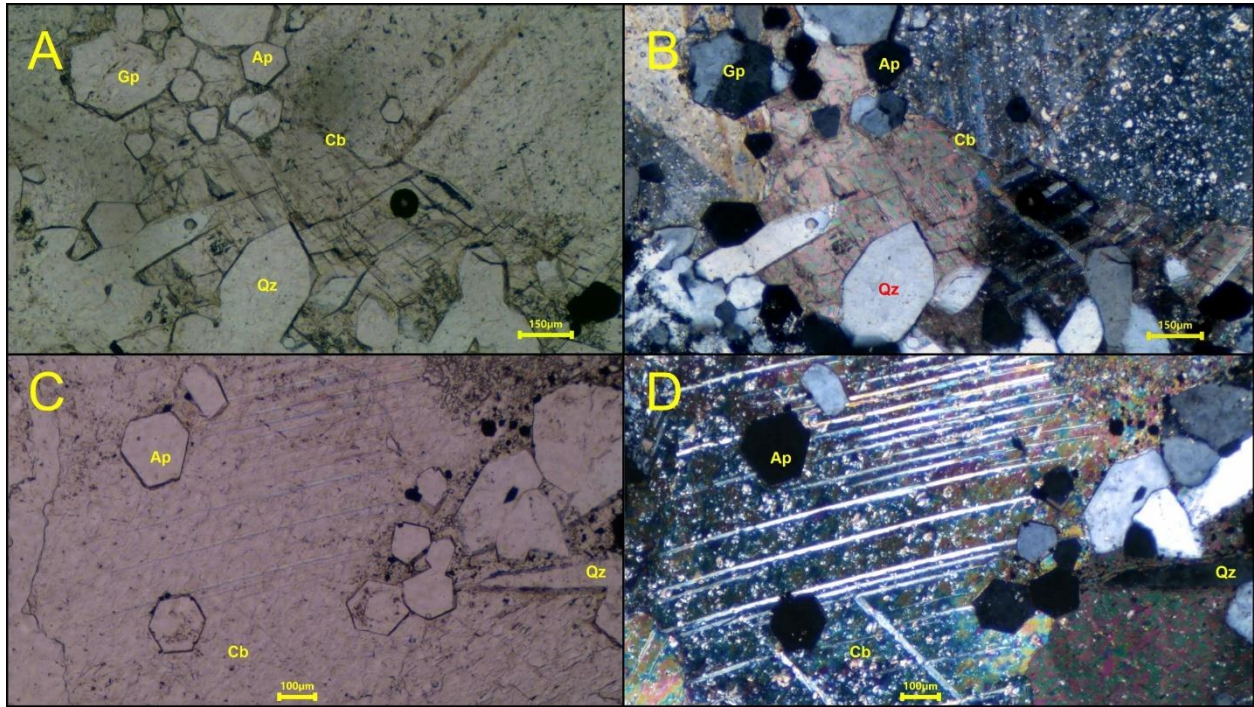
Py: Pirita, MF: Masa Fundamental, Cb: Carbonato.

El maclado en los cristales de carbonato en casi su totalidad este asociado a vetillas tipo E lo que permite arrojar un indicativo de la temperatura a la cual habría estado sometido el depósito, a partir de la intensidad del mismo en los cristales, la morfología, las dimensiones que presentan las maclas además del valor promedio de sets de maclas (suma espesor de todas las maclas en un cristal/# maclas en el cristal) que se presentan (Ferril *et al.*, 2004). Teniendo en cuenta ello se puede clasificar el maclado como de tipo II un maclamiento tabular grueso con algunos casos tipo III haciendo referencia a maclas gruesas curvas, cónicas y lenticulares, además según la intensidad de las maclas (# maclas en un cristal/espesor del cristal; medido perpendicular a las maclas en mm) se pueden inferir temperaturas, como punto clave dicha intensidad del maclado es inversa al aumento de temperatura; es decir a menor intensidad de maclado (valores de 13.26 a 22.8) mayor temperatura, en este caso los carbonatos en las secciones exhiben una intensidad baja (promedio no mayor a 13), de esta manera indicando altas temperaturas a su vez que la mayor temperatura que podrían alcanzar las maclas es de 400° C y valores de los sets de maclas no superan el valor

promedio de 11, arrojando una temperatura promedio entre 250°- 350 °C; datos comparados y analizados con respecto a Ferril *et al.* (2004). (Figura 26. Figura 51. y Figura 52.).

Figura 51.

Vetillas de carbonato clasificadas como de tipo E según Gustafson & Hunt (1975).



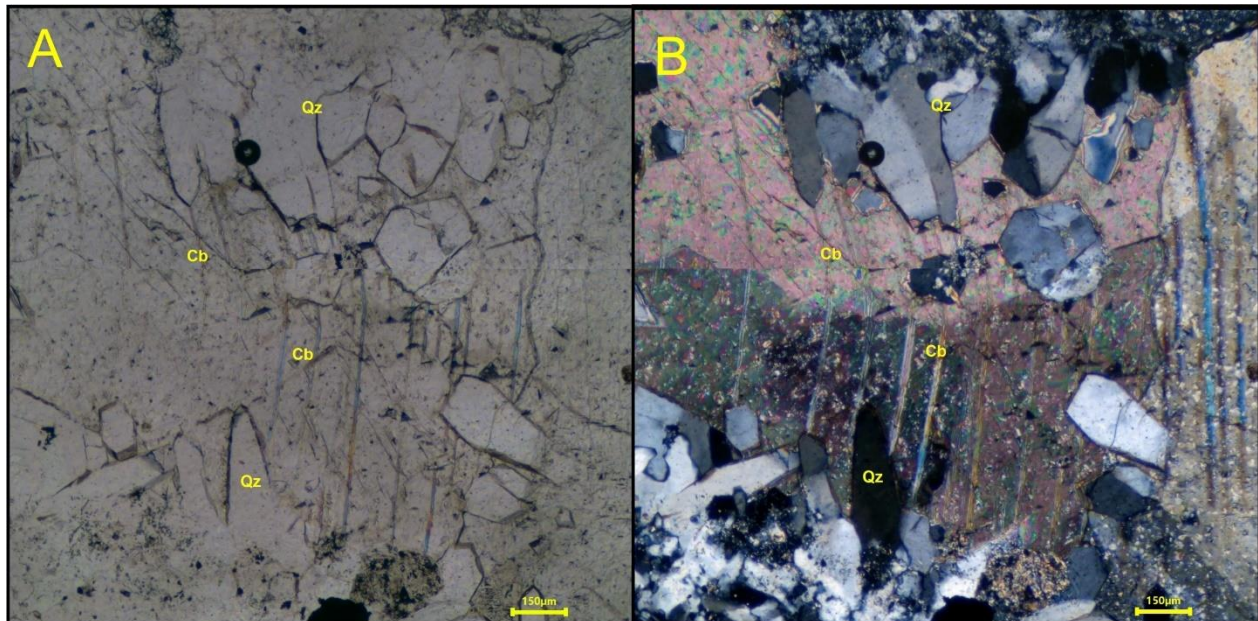
Nota. Los carbonatos están maclados y en la imagen D se puede apreciar cruce de maclas. Imágenes luz transmitida. A y C (nicos paralelos), B y D (nicos cruzados); 5X. Gp: Yeso, Ap: Apatito, Qz: Cuarzo.

8.5.2 Clasificación estructural-microscópica

Entre las características que se pueden identificar de las vetillas se encuentra la morfología de crecimiento, la cual aparentemente indica ser antitaxial; según el mineral formado en las vetillas con respecto al mineral hospedante, debido a que dicho mineral formado en las vetillas (Carbonato) es distinto del mayor mineral constituyente (Masa fundamental felsítica (cuarzo+plagioclasa) y sulfuros) de la roca hospedante, característica común en morfología de crecimiento antitaxial y de presentar un crecimiento desde las vecindades de la vetilla hacia el centro de la misma, además la apariencia de los minerales en la vetilla presentan similitudes con vetillas de crecimiento de tipo antitaxial (Bons, 2000) (**Figura 51.** y **Figura 52.**)

Figura 52.

Mosaico de microfotografías, exhibiendo vetilla de carbonato antitaxial tipo E, mostrando la asociación y orientación mineral en la vetilla.



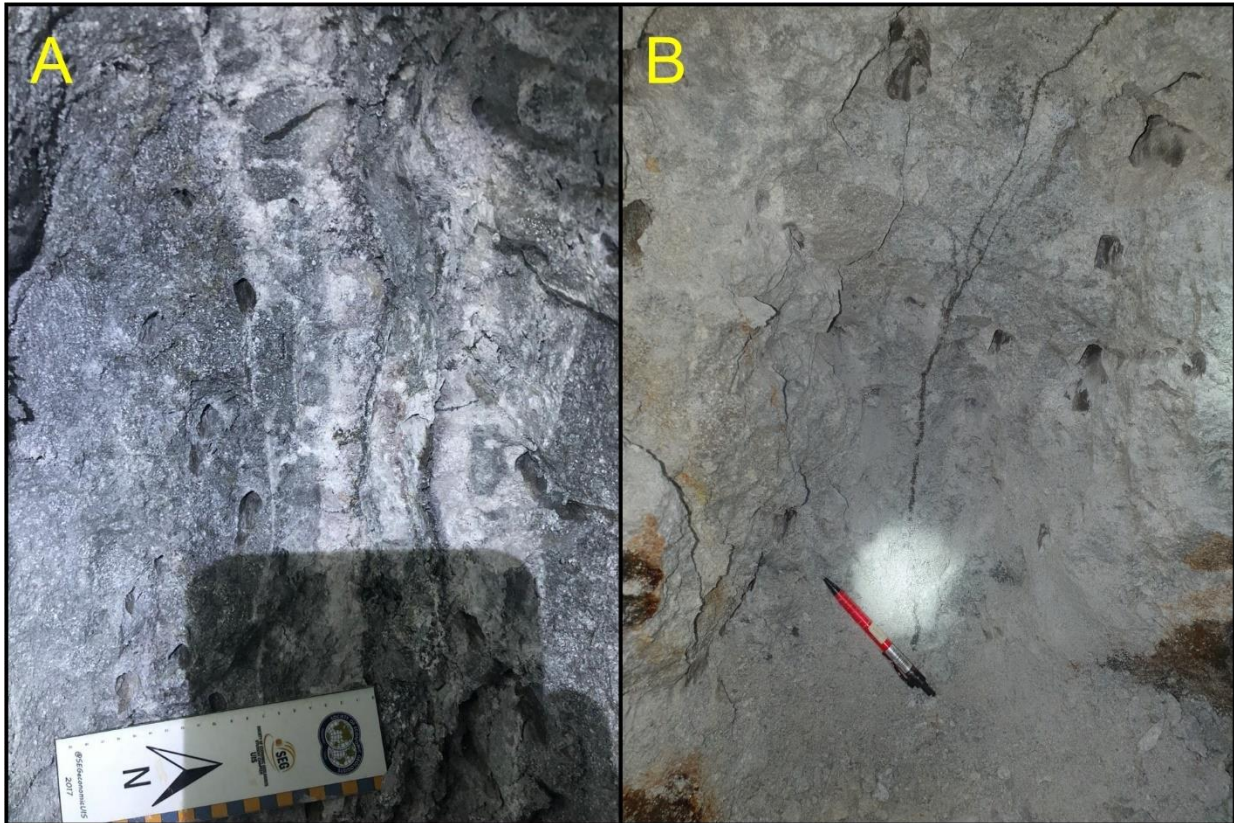
Nota. Vetilla de carbonatos, en los bordes con Cuarzo drusiforme, nótese las maclas perpendiculares del carbonato. Imágenes luz transmitida. A nicoles paralelos, B nicoles cruzados; 5X. Qz: Cuarzo, Cb: Carbonato.

8.5.3 Clasificación macroscópica

Otro tipo de vetilla, apreciable a escala macroscópica pero no menos importante, son vetillas tipo D las cuales están constituidas principales por sulfuros, sulfatos, cierto porcentaje de cuarzo y carbonato, especialmente pirita, seguida de galena y esfalerita, algunas vetillas con halos de sericita y con una capa externa de carbonato. Con una potencia de centímetros, además son continuas con orientación preferencial. La temporalidad corresponde a la etapa hidrotermal principal con temperaturas menores de 400°C asociadas comúnmente a la alteración sericita-clorita, posterior a la alteración fílica (**Figura 11.** y **Figura 53.**) Gustafson & Hunt (1975). Pueden estar asociadas a depósitos de clase epitermales profundos de baja sulfuración con alteración de roca adyacente silica-sericita-pirita y mena mineral dominada por pirita-calcopirita. (Gustafson & Hunt, 1975; Sillitoe *et al.*, 2010).

Figura 53.

Vetillas de escala macroscópica tipo D, presentando halo y sin presencia de halo mineralógico de alteración fílica.



Nota. A) vetilla tipo D con halo de sericita y exteriormente carbonato. B) vetilla tipo D sin halo presentando continuidad y orientación preferencial, escala bolígrafo 15cm. Fotografía del autor.

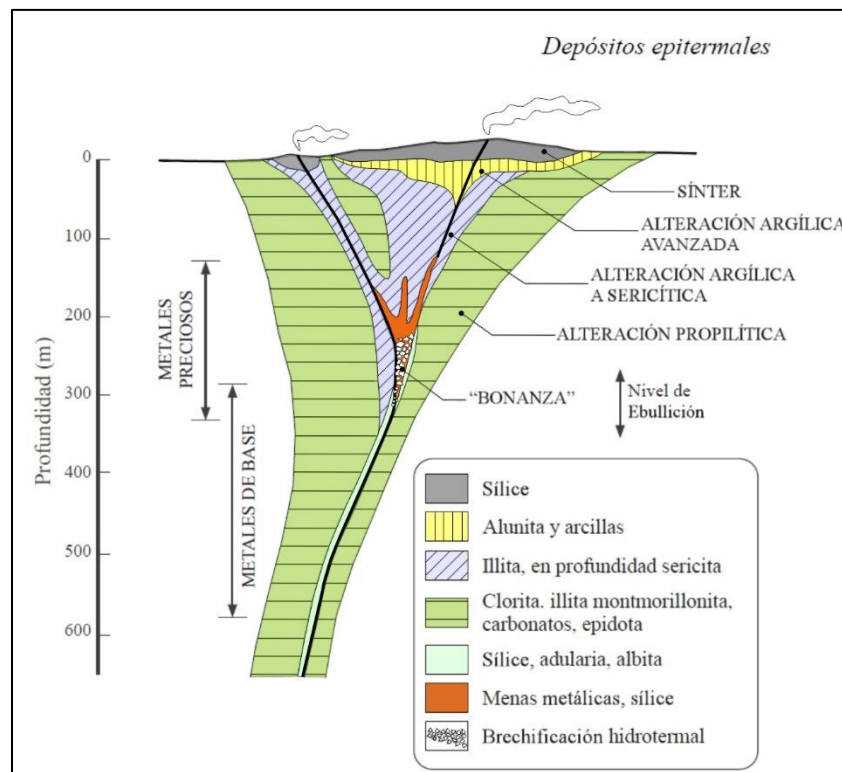
8.6 Alteración hidrotermal

La Alteración Hidrotermal está definida como: Los cambios mineralógicos, texturales, y químicos, producto de la interacción de la roca caja con fluidos hidrotermales, tanto fluidos acuosos calientes o volátiles (Camprubí & Albinson, 2006; Corbett, 2017). Debido a esta interacción se genera una nueva asociación mineral en equilibrio, de acuerdo a ciertas condiciones fisicoquímicas.

La microscopia facilita un acercamiento al tipo de alteraciones presentes en las secciones analizadas. Además, los fluidos podrían tener un origen magmático, meteórico de circulación profunda “evolucionado” y/o meteórico superficial (Camprubí & Albinson, 2006; Patiño & Lotero, 2017).

Figura 54.

Esquema general de las alteraciones hidrotermales en los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración).



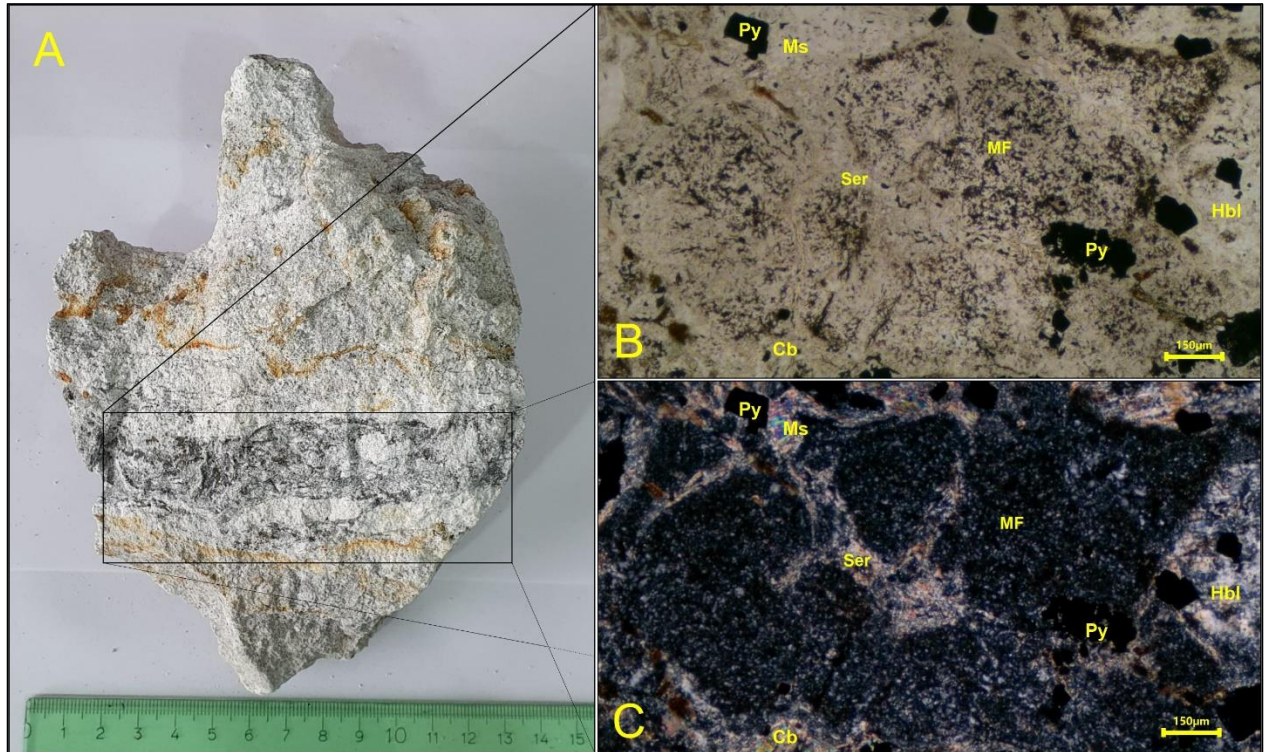
Nota. Tomado y modificado de: Camprubí & Albinson (2006).

8.6.1 Alteración fílica (Sericítica)

La alteración fílica generalmente indica formación en condiciones acidas a neutras (pH 4,7-7) y usualmente altas temperaturas ($>350^{\circ}\text{C}$), los minerales que permiten caracterizar la alteración en las secciones son: sericita, pirita, clorita, pirofilita, carbonato, cuarzo, feldespato potásico y en menor proporción anhidrita (Corbett, 2017). Dichos rasgos indican la presencia de alteración fílica, aunque aparentemente existe una sobreimpresión de la alteración argílica sobre esta alteración fílica temprana a modo de “venas de fracturas transversales” y una alteración pervasiva por parte de la alteración argílica. Este comportamiento podría ser un compuesto de la alteración fílica-argílica o migración del ambiente retrógrado (alteración Argílica-Sericítica) y sobre impresión de roca fresca (Camprubí & Albinson, 2006; Corbett, 2017). Ejemplo macroscópicamente **Figura 53.** y microscópicamente **Figura 19.** y **Figura 21.**

Figura 55.

Muestra de mano conteniendo una vetilla mineralizada tipo D, plagioclasas alterando a sericita y microfotografías de la sección delgada pulida confirmando la alteración fílica.



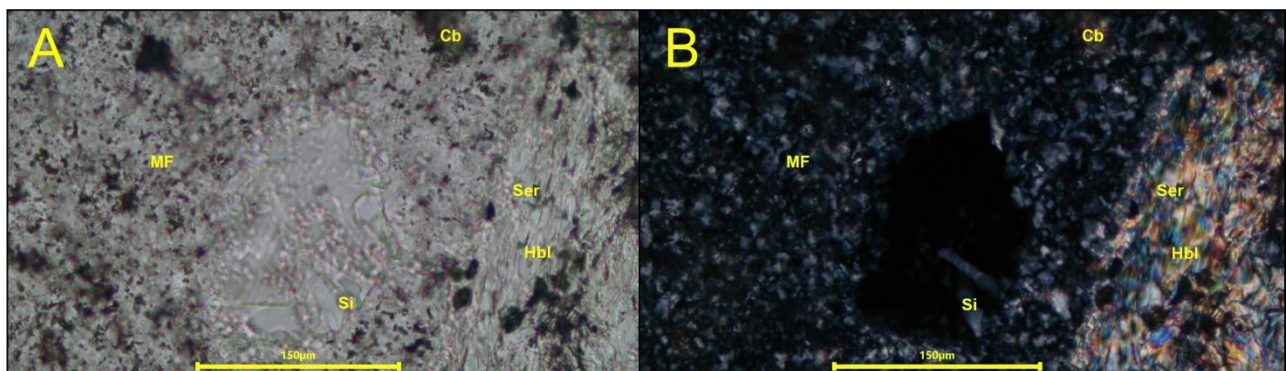
Nota. A) Muestra de mano exhibiendo la alteración sericítica. B) Sericita producto de la alteración hidrotermal sobre zonas de fracturas en la matriz felsítica. Imagen luz transmitida, nicoles paralelos, 5X. C) La sericita presenta asociación en la muestra con ciertos cristales de moscovita y carbonato en la masa fundamental felsítica. Imagen luz transmitida, nicoles cruzados, 5X. Cb: Carbonato, Hbl: Hornblenda, MF: Masa Fundamental, Py: Piritas, Ms: Moscovita, Ser: Sericita.

8.6.2 Alteración Argílica Intermedia

La alteración argílica según los minerales que la conforman indica temperaturas relativamente bajas ($< 250^{\circ}\text{C}$) y condiciones casi neutras (pH 5-6) a moderadamente acidas (pH 4-5), los minerales que permiten identificar la alteración son: piritita, cuarzo, clorita, caolín y carbonato, en menor proporción sericita y sílice. Aparenta una alteración pervasiva que se desarrolla por la permeabilidad de la roca hospedante y brechas (de tipo hidrotermal), presencia de mayor grado de hidrólisis con respecto a la fílica. El carácter de esta alteración es de tipo argílica intermedia siendo una transición de argílica avanzada a intermedia, la presencia del diásporo ante la aparente ausencia de la illita (mineral más típico en la alteración argílica) indicaría mayor temperatura y la transición entre los tipos de alteraciones argílicas (Camprubí & Albinson, 2006; Corbett, 2017). Ejemplos macroscópicamente **Figura 57.** y **Figura 58.** y microscópicamente **Figura 25.**

Figura 56.

Asociación mineral de sericita, sílice y carbonato que marca la alteración argílica intermedia en una matriz felsítica.



Nota. A) Nícoles paralelos B) Nótese cristal de hornblenda siendo alterado a sericita y pequeño cristal de sílice sobre una oquedad. Nícoles cruzados. Imágenes luz transmitida, 20X. MF: Masa Fundamental, Ser: Sericita, Cb: Carbonato, Hbl: Hornblenda, Si: Sílice.

Figura 57.

Muestra de mano con presencia de abundante caolín, pirita, sericita y carbonato.



Nota. Fotografía del autor.

Figura 58.

Vetilla macroscópica tipo D, presentando alteración, en transición de alteración argílica intermedia a avanzada.



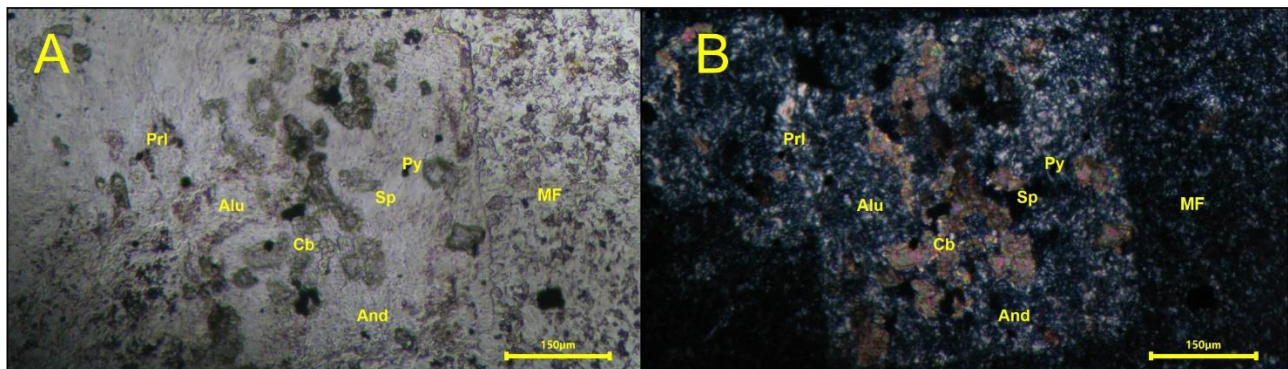
Nota. Vetilla de aproximadamente 4cm con halo de alteración de 5cm, presencia de carbonato y caolín; también llamado “pantano” por los trabajadores. Fotografía del autor.

8.6.3 Alteración Argílica avanzada

Esta alteración se desarrolla en condiciones ácidas ($\text{pH} < 4$), alunita es el mineral más característico presente (**Figura 24.** y **Figura 59.**) variando a pirofilita, indicando altas temperaturas (igualmente que la andalucita) en el rango de la alteración y condiciones levemente menos ácidas, además la existencia de minerales como: diásporo, cuarzo tipo tridimita y cristobalita (condiciones ácidas y bajas temperaturas) también cristales de silica. El grado de hidrólisis es mucho mayor con respecto a las anteriores alteraciones ya enunciadas, la zona de transición de alteración argílica intermedia-argílica avanzada esta obliterada por el carácter pervasivo de la alteración argílica avanzada (Camprubí & Albinson, 2006; Corbett, 2017). Principalmente se pueden apreciar las asociaciones de alunita, pirofilita en la **Figura 29.** y pirofilita, alunita, andalucita **Figura 24.** y **Figura 59.** además de la presencia de cloritas esferulíticas en la **Figura 61.** y cuarzo tipo cristobalita, tridimita en las **Figura 23.** y **Figura 49.**

Figura 59.

Asociación mineral de pirofilita, alunita y fenocristal de andalucita con inclusiones de sulfuros, esfalerita y pirita en la matriz felsítica.



Nota. Imágenes luz transmitida, 5X. A) Nicoles paralelos B) Nicoles cruzados. 5X. Prl: Pirofilita, MF: Masa fundamental, Alu: Alunita, Cb: Carbonato, And: Andalucita, Sp: Esfalerita, Py: Pirita.

8.6.4 Silicificación

La silicificación se da de manera ocasional en algunas rocas y podría formarse a partir de enfriamiento de agua, teóricamente se encuentra a profundidades desde la superficie y aparentes menores a 500 m, puede significar la porción más somera del sistema y/o flujo penetrativo (Camprubí & Albinson, 2006); indica el mayor grado de hidrólisis presente.

Figura 60.

Silica de alrededor 3 cm la cual se ha formado en la vetilla debió al proceso de hidrólisis.



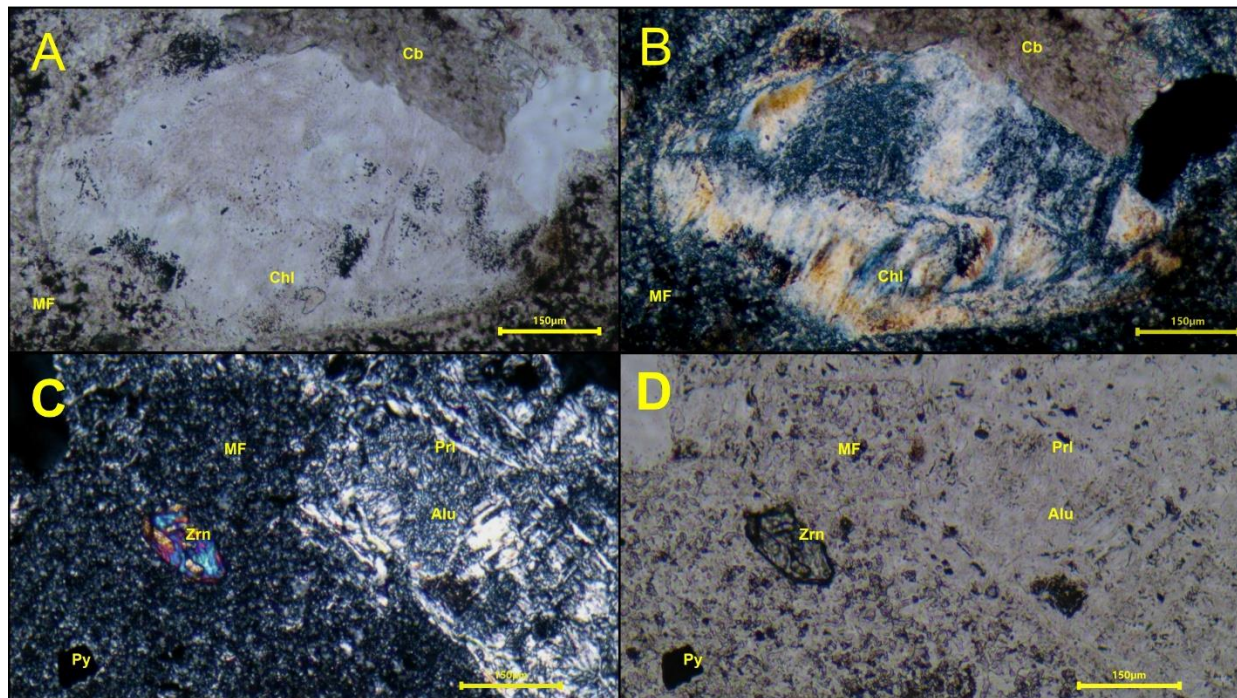
Nota. Silica producto de silicificación en zona superior de color blancuzco a anaranjado. Fotografía del autor.

8.6.5 Cloritas esferulíticas

Las cloritas esferulíticas pueden ser de consideración mineralógica y asociadas a la alteración hidrotermal, su formación se da a partir de fluidos hidrotermales en fracturas, microfracturas o espacios intergranulares en rocas ígneas como un mineral hidrotermal primario y frecuente en venas hidrotermales (Ciesielczuk, 2012). El factor principal que controla la formación de clorita es la temperatura, inclusive a menudo es usada como geotermómetro, debido a las similitudes con la clorita que se presenta en los granitos de Strzelin en Ciesielczuk (2012) podría estar entre un rango de 320°-355°C (rango de temperaturas simplemente tentativo).

Figura 61.

Cristales de cloritas esferulíticas y alunita; los cuales son representativos en la alteración argílica avanzada y que marcan la misma.



Nota. A (Nicoles paralelos) y B (Nicoles cruzados) cloritas esferulíticas, C (Nicoles paralelos) y D (Nicoles cruzados) Alunita acompañada de zircón y pirofilita. Imágenes luz transmitida, 5X. Cb: Carbonato, Chl: Clorita, MF: Masa Fundamental, Zrn: Zircón, Py: Pirita, Alu: Alunita, Prl: Pirofilita.

9. Discusión

Las rocas analizadas en este trabajo mediante microscopía de luz reflejada y luz transmitida, logran ser identificadas como rocas que varían de dacitas-andesitas con textura porfirítica y tobas dacíticas-andesíticas de tamaño ceniza a ceniza fina, clasificadas mineralógicamente y texturalmente según Streckeisen (1978); Le Maitre *et al.* (2005); Strekeinsen, (2020). Las rocas pueden ser correlacionadas con la Formación Combia, al igual que pequeños cuerpos de microgabros identificados que hacen parte de la litología identificada, esta formación está datada como de edad Miocénica superior concordando con reportes de trabajos realizados anteriormente en la zona principalmente según Sanchez, 1993 y los más actuales Largo (2000) y Patiño & Lotero (2017).

En cuanto a la geología estructural la zona como se ha enunciado hace parte y se encuentra controlada a grandes rasgos por el sistema de fallas de Romeral. Localmente y en zonas aledañas a Gavia mediante geología superficial, análisis de fotos satelitales y las campañas de campo en las cuales se observaron diferentes rasgos geomorfológicos asociados a posibles fallamientos, además del valioso aporte geológico-bibliográfico a la zona, se logran definir tres estructuras tectónicas que fueron llamadas Falla 1, Falla 2, Falla 3 a su vez correlacionadas con estructuras reportadas por Echeverri & Ospina (1989); Largo (2000); Argoti & Garcia (2008); Patiño & Lotero (2017), las cuales podrían jugar un papel importante en el control de 3 estructuras de menor escala (vetillas), estas vetillas contienen la mineralización y son correlacionadas manteniendo lo propuesto por Minera Gavia (2019).

Además mediante los análisis descriptivos petrográficos-metalográficos y de microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) realizados en secciones delgadas pulidas, los cuales arrojaron valores de oro nativo y plata nativa, en muestras tanto aledañas como pertenecientes a la vetilla La U, de orientación NE y controlada por la Falla 1, infiriendo que la mineralización y ciertos procesos hidrotermales podrían ser controlados por la Falla 1 y se evidenciaron en las secciones MNG-CC007 y MNG-CC-006, extraídas en la zona del Santo.

Petrográficamente, en las muestras estudiadas se distinguieron algunas texturas corroídas generando espacios libres, también de reemplazo tales como centrífuga o de núcleo con crecimiento de carbonato en el núcleo de la hornblenda (siendo el carbonato un mineral muy abundante en las muestras, de posible producto de alteración hidrotermal), textura de reemplazamiento orientado de anatasa en biotita y aparente pseudomorfismo de esta en la biotita, texturas representativas en minerales de cuarzo como embahiamiento; característico de rocas volcánicas, además cuarzo drusiforme y asociado a las vetillas en compañía general de carbonato, texturas hidrotermales como cloritas esferulíticas y cristales de pirofilita en agregados fibrosos radiados, siendo estas dos últimas características relacionadas netamente con la alteración hidrotermal (Bastin, 1950; Malvicini & Saulnier, 1979; Ciesielczuk, 2012). Cabe resaltar que las muestras presentan abundante obliteración en promedio del 35% de las propiedades mineralógicas produciendo un enmascaramiento, debido a la alteración presente siendo pervasiva.

Metalográficamente, según las muestras estudiadas se reconocen texturas de mena, su mayoría presentes en sulfuros siendo los más abundantes pirita, marcasita, galena y esfalerita, seguidos de estibina o antimonita, tetraedrita (sulfosal), calcopirita, además hay presencia de posibles sulfosales como matildita, miargirita, estefanita, polibasita, también se identificaron minerales óxidos como: anatasa, magnetita y manganita. La pirita es el principal sulfuro el cual muestra variedad de texturas, siendo las texturas más relevantes la coloforme; caso de la melnikovita pretendiendo un proceso de precipitación química (Chen, 1978), de caries (generalmente como mineral en contacto la esfalerita) y de anticaries (comúnmente como mineral en contacto la galena) infiriendo procesos de reemplazamiento por parte de otros minerales mena siendo la pirita el mineral hospedante.

La pirita presenta diversidad de tamaños y hábitos tales como: prismáticos piritóedricos y cúbicos, el aumento en el tamaño de grano de la pirita puede indicar recristalización de la misma, los porcentajes de porosidad de 2% porcentaje modal “poral” en los cristales de pirita y una leve anisotropía anómala en la pirita de tenues tonalidades de tendencia verde oscura a azul-violácea, tienen relación con pirita producto de inversión de marcasita, otra causa probable de la leve anisotropía en la pirita puede ser la presencia de elementos traza como arsénico (Fleet, 1970, *et al.*, 1989, 1993, 1997; Murowchick, 1992), la misma marcasita se encuentra generalmente en depósitos de venas de baja temperatura (low-temperature vein deposits), estudios demuestran que marcasita podría convertirse en pirita si se tienen aumento en las temperaturas de alrededor de 150° y 400°C, en condiciones excesivas de azufre (Craig & Vokes, 1993), a su vez Murowchick (1992) indica que podría ser usada como un indicador de $\text{pH} < 5$ y $T < 240^\circ\text{C}$ si se logra determinar que marcasita primaria es la fuente de la pirita, como rasgo general la marcasita se forma en condiciones de baja temperatura como producto de la actividad hidrotermal.

Por otra parte, pirritas con altos porcentajes porales pueden ser producto de la corrosión de los cristales o que provienen de pirrotita por disolución-reprecipitación y oxidación; aproximadamente 32% porcentaje modal “poral” (Murowchick, 1992), la observación metalográfica arroja magnetita presente en los “poros”, lo que podría indicar que la magnetita reemplazo a la pirrotita generando ausencia de pirrotita en las cavidades (Murowchick, 1992).

Esfalerita está presente en buen porcentaje en las muestras, esta generalmente rellena fracturas y en las vetillas. Las variedades de esfalerita se pueden diferenciar debido sus reflexiones internas siendo: la primera de tipo marmatita (rica en hierro, reflexiones rojizas), la segunda de “alta pureza” química (reflexiones nulas, casi transparente) y la última de cambios composicionales (anisotropía negruzca anómala), las texturas que se presentan en la esfalerita son: *watermelon texture*, *dusting of chalcopyrite in sphalerite*, *orchard*; dichas texturas en orden decreciente de tamaño de grano y dispuestas como inclusiones e intercrecimientos de calcopirita en la esfalerita, siendo aspectos pertenecientes a la textura *chalcopyrite disease* la cual se desarrolla en esfaleritas enriquecidas en hierro, que debido al reemplazamiento por calcopirita resultaran empobrecidas en el mismo elemento; siendo parte integral del proceso de mineralización. Dicho reemplazamiento probablemente se formaría en depósitos vetiformes y de sulfuros masivos de fondo oceánico sobre temperaturas entre un rango de 200-400°C que no hayan estado sujetos a mayores temperaturas posteriormente (Barton & Bethke, 1987). Entre las consideraciones mineralógicas también se encuentra la galena que conforma buen porcentaje de sulfuros en las muestras y posee alteración en los bordes de los cristales a boulangierita, además algunos cristales poseen una leve anisotropía probablemente debido a un desequilibrio estequiométrico entre plomo y azufre. Otro sulfuro que juega un papel importante es la estibina o antimonita; puesto es clave en la clasificación del tipo de depósito epitermal y la relación que presenta con el tipo de rocas del depósito (dacitas-andesitas) (Hedenquist *et al.*, 2000; Camprubí & Albinson, 2006; Corbett, 2017).

Posibles sulfosales como minerales accesorios miargirita, matildita, polibasita y estefanita son minerales indicativos para la clasificación del tipo de depósito, como se logra apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la paragénesis mineral. Los metales nativos como el oro y la plata presentaron dimensiones entre un rango de 5 μm hasta casi 45 μm , reconocibles mediante microscopia de luz reflejada. El oro está asociado a la pirita y la galena, con mayor porcentaje de oro en la pirita que en la galena y probable presencia de oro tipo electrum en la galena, la plata esta estrictamente asociada a la galena según la metalografía; ambos metales se presentan a modo de inclusión y en ciertos casos posible oro libre relleno de espacios libres, como en las vetillas mineralizadas de carbonato.

Basado en las observaciones, principalmente en la metalografía como ya se había enunciado la presencia de oro en la pirita y la galena, además el estudio de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), realizado en el microscopio electrónico de barrido (SEM) FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, sede de la Universidad Industrial de Santander, el cual logro identificar cantidades de elementos traza en los minerales de enfoque (piritas y galenas); haciendo énfasis en las piritas tratándose como principal mineral conteniendo oro y las características de esta misma ante ciertos cambios fisicoquímicos a los cuales puede ser sometida en el depósito, la influencia de estos cambios con respecto al contenido de oro que pudiese albergar el mineral (pirita), dichos cambios han sido estudiados por diversidad de autores.

Entre las características que podrían estar asociadas se tienen que: pirita hidrotermal puede poseer contenidos significantes de elementos traza como: As, Pb, Sb, Bi, Cu, Co, Ni, Zn, Au, Ag, Se y Te los cuales pueden ser contenidos como nanopartículas a manera de solución sólida hospedadas en piritas ricas en arsénico, pero también pueden estar ligados estructuralmente a la pirita (Fleet *et al.*, 1989, 1997; Cook & Chryssoulis, 1990; Arehart *et al.*, 1993; Richards & Kerrich, 1993; Savage *et al.*, 2000; Cline *et al.*, 2001, 2005; Emsbo *et al.*, 2003; Pals *et al.*, 2003; Palenik *et al.*, 2004; Deditius *et al.*, 2008, 2009, 2011, 2014; Large *et al.*, 2009; Hough *et al.*, 2011).

Las nanopartículas en los estudios tienen un rango de dimensiones regularmente y aproximadamente entre 5 a 20 nm, las cuales se pueden haber formado debido a exsolución de la matriz de la pirita (tamaños <10 nm) o a precipitación directa del fluido hidrotermal con depositación probablemente durante el crecimiento de la pirita (tamaños >20 nm); este comportamiento de ser sincrónico (depositación de oro durante el crecimiento de la pirita) puede estar relacionado con presencia de nanopartículas de oro en superficies de la pirita, puesto la pirita puede contener tanto oro en su superficie como dentro de sí misma. Otros mecanismos que podrían también formar estas partículas son resultado de reacciones de disolución-precipitación y/o reemplazamiento (Bakken *et al.*, 1989; Putnis, 2002; Palenik *et al.*, 2004; Vikentyev, 2015). También el oro puede estar a modo de oro "invisible" caracterizado por presentarse submicroscópicamente (<0,1 μm), en muchas ocasiones el oro en sulfuros puede ocurrir de esta manera y muy probable "ligado químicamente" debido a la afinidad química que presenta con los sulfuros, dicho oro se asume que es depositado por precipitación e inducido por cambios de temperatura, presión o pH del fluido relacionado al oro (Romberger, 1988; Bowers, 1991; Vikentyev, 2015).

Teniendo en cuenta la posible presencia de minerales traza tales como As, Pb, Sb, Bi, Cu, Co, Ni, Zn, Au, Ag, Se y Te (Schneiderhohnh, 1930) y como principal elemento el arsénico siendo correlacionable con el contenido del oro, este elemento puede ser contenido con mayor abundancia en la pirita, además por la capacidad de la pirita arseniosa de contener buen porcentaje de elementos menores y traza en ambientes de alta y baja temperatura. Dicho elemento (Arsénico) presente en las muestras analizadas como se enunció anteriormente, facilitaría la incorporación de oro en la pirita; pero esta incorporación varía dependiendo de la naturaleza química del fluido mineralizante, temperatura, interacciones fluido-pirita, procesos de recristalización y las características de la pirita misma (como la temperatura de formación, cinética y tasa de crecimiento, vecindades con otros minerales traza, características electroquímicas de la superficie mineral, porosidad, vacantes, defectos en la superficie mineral y/o efectos estructurales además del tamaño individual de grano) (Sha P, 1993; Fleet *et al.*, 1997; Widler & Seward, 2002). El máximo contenido de oro que puede ser incorporado estaría en función de la concentración del arsénico; relaciones en los cristales de pirita entre arsénico y oro han sido estudiadas, a su vez comprobadas siendo en este caso positivas, otra relación importante dada en pirita es el reemplazamiento de azufre por arsénico en piritas ricas en arsénico además químicamente cantidades elementales de oro reemplazando al hierro, por última pero no menos importante la relación inversa entre el tamaño individual de grano con la cantidad incorporable de arsénico y oro en piritas, por otra parte la ebullición en depósitos epitermales favorecería la formación de pirita arseniosa e incorporación de oro como solución sólida; además composiciones de oro nativo; electrum y pirita arseniosa son comunes en sistemas epitermales (Hayba *et al.*, 1986; Cook & Chryssoulis, 1990; Arehart *et al.*, 1993; Mumin *et al.*, 1994; Fleet *et al.*, 1997; Hofstra & Cline, 2000; Cline, 2001; Emsbo *et al.*, 2003; Kolker *et al.*, 2003; McClenaghan *et al.*, 2004; Palenik *et al.*, 2004; Vaughan & Kyin, 2004; Reich *et al.*, 2005,

2013; Large *et al.*, 2007, 2009; Wagner *et al.*, 2007; Deditius *et al.*, 2008, 2009, 2014; Morey *et al.*, 2008; Maslennikov *et al.*, 2009; Sung *et al.*, 2009; Muntean *et al.*, 2011; Cook *et al.*, 2013).

Cristalización de pirita, marcasita y arsenopirita tiene lugar en bajas temperaturas, menores de 300°C y particularmente pirita en depósitos epitermales usualmente se formaría en condiciones de temperaturas entre 150°C y 350°C, algunos autores acuerdan un rango menor de 150°C a 250°C (Hayba *et al.*, 1986; Murowchick & Barnes, 1986; Wu & Delbove, 1989; Schoonen & Barnes, 1991a, 1991c, 1991b; Hofstra & Cline, 2000; Pokrovski *et al.*, 2002; Reich *et al.*, 2005; Schoonen & Barnes, 1991a, 1991c, 1991b; Jones & Heinrich, 2005; Reich *et al.*, 2005; Simmons *et al.*, 2005; Deditius *et al.*, 2011).

En cuanto a la galena estudios han encontrado una correlación entre arsénico y el contenido de oro ligado a minerales mena de sulfuros, a su vez correlacionado con el plomo el cual puede explicar la presencia de oro invisible en galena, además con respecto a la plata concentraciones razonables de la misma en galena pueden ser incorporadas como solución sólida mediante una doble sustitución de plata, antimonio y plomo a temperaturas entre 240°C-380°C (Tauson, 1999; Lueth *et al.*, 2000; Chutas *et al.*, 2008; Vikentyev, 2015).

Por medio de la metalografía también fueron identificadas las asociaciones minerales (**Tabla 4.**) en las muestras analizadas, además los tipos de vetillas según Gustafson & Hunt, 1975; Sillitoe *et al.*, 2010 arrojando dos tipos; tipo E asociadas con una etapa hidrotermal tardía, macroscópicamente tipo D asociada a una etapa hidrotermal principal de posibles temperaturas menores de 400°C, ambas vetillas ricas en carbonatos pero la vetilla D posee mayor cantidad de sulfuros, a su vez fue identificada su morfología de crecimiento tipo antitaxial según Bons (2000). La gran cantidad de carbonatos y maclas en los mismos permitiría clasificar dichas maclas como tipo II y tipo III según Ferril *et al.* (2004) y definiendo un promedio de temperaturas entre 250°C-350°C. Otra característica que aporta información acerca de temperatura como a la alteración es la existencia de cloritas esferulíticas arrojando un rango tentativo de temperaturas entre 320°-355°C (Ciesielczuk, 2012).

La petrografía permite clasificar las tres alteraciones mineralógicas presentes: fílica, argílica intermedia y avanzada, por medio de la identificación de minerales característicos como: sericita y carbonato (Fílica), pirita, caolín (Argílica intermedia) y diásporo (marcando la transición de Argílica intermedia a Argílica avanzada), por últimos alunita, pirofilita, cuarzo tipo cristobalita y tridimita (Argílica avanzada), además de sílica-sílice (Silicificación), las alteraciones siendo relacionadas con datos en Camprubí & Albinson (2006); Corbett (2017) pueden arrojar temperaturas tentativas desde 250°C y no mayores a los 400°C. Teniendo en cuenta también la abundancia del mineral y como se presenta, que logran diferenciar asociaciones minerales de una alteración con respecto a otra. La pirita se encuentra muy abundante en todas las muestras, pero podría estar asociada debido a su abundancia principalmente a la alteración Argílica Intermedia, seguida de la alteración Fílica (sericítica); aunque es el mineral mena más abundante en la Alteración Argílica avanzada decrece su contenido con respecto a las demás alteraciones.

La secuencia paragenética como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** inicia con un evento primario de cristalización de pirita, acompañada de carbonatos, marcasita y melnikovita. El segundo evento está dominado y corresponde a la precipitación de esfalerita y galena, posterior calcopirita en la esfalerita; acompañados de una fase de pirita con menos desarrollo de caras en los cristales con tendencia anhedral. Los eventos relacionados a la etapa tardía están dominados por la alteración; donde la hidrólisis tiene un papel importante, además minerales como alunita, yeso, pirofilita (alteración Argílica avanzada, donde se concentran el oro y la plata), finalmente sílice (silicificación) son representativos.

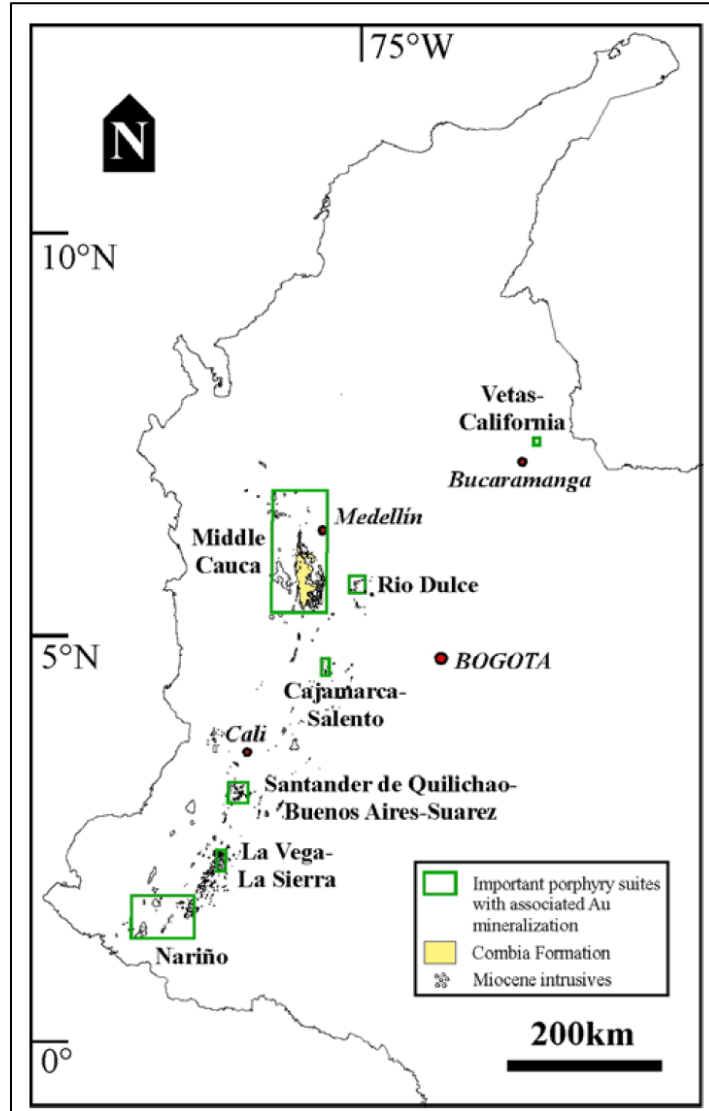
Entre las variedad de presentaciones del oro, usualmente se presenta en inclusión en la pirita y galena indicando que posiblemente se formó en una etapa mucho más temprana que la pirita y la galena, quedando estas partículas de oro atrapadas en los cristales de los sulfuros durante su formación y crecimiento, también ciertos cristales de oro estarían enriquecidos en plata y corresponderían a oro electrum; aunque ciertamente hay diversidad de tamaños en el oro existente en las muestras, a grandes rasgos como nanopartículas y como “oro invisible” según diversidad de autores ya mencionados, estas variedades de oro pueden ser producto de diversos procesos que no pueden ser definidos de momento y necesitan estudios más a detalle, también hay que tener en cuenta que en la mina se ha hallado buenas concentraciones de oro libre.

El magmatismo relacionado al depósito hace referencia al definido como séptimo evento metalogénico por Mejía (2011) el cual a grandes rasgos comprende mineralizaciones tipo pórfido Au (Cu, Mo) y epitermal Au (Ag, As, Sb, Pb, Zn) asociadas a la intrusión de cuerpos hipoabisales de Mioceno al Pleistoceno, estas ocurrencias han sido asociadas a diversos segmentos de arco que han migrado y cambiado a través del tiempo en direcciones de sur a norte y de oeste a este; a su vez distribuidos a lo largo de los Andes Colombianos, en el caso particular de la cordillera central. Este evento metalogénico es considerado como el de mayor importancia debido a que los recursos auríferos actuales en su mayoría están asociados al mismo. Las rocas que conforman el depósito son pertenecientes a la Formación Combia de edades promedio 10-6 Ma (Ramírez *et al.*, 2006) y se encuentran en un régimen dominado por el sistema de Fallas Romeral, como han sido identificadas diversas fallas locales aparentemente relacionadas a dicho sistema de fallas, las cuales habrían controlado la distribución de la mineralización (Mejía, 2011).

La edad de la mineralización/alteración hidrotermal puede ser relacionada a la propuesta para el distrito de Marmato por su cercanía y ciertos rasgos comunes determinada por Tassinari *et al.* (2008) análisis en K-Ar de plagioclasa sericitizada arrojando una edad Mioceno tardío 5.6 ± 0.6 Ma. Por otra parte, podría ser asociada a la edad de mineralización de los depósitos del sector de Quinchía por la manera en cómo se presenta el oro, indicando edades de 8.2 ± 0.7 Ma y 7.7 ± 0.2 Ma estudios realizados en K-Ar (Biotita secundaria) y Re-Os (Molibdenita); Siendo las tres edades tentativas al depósito y pertenecientes a Mioceno Tardío (Mejía, 2011; SGC, 2018).

Figura 63.

Distribución del Magmatismo Miocénico sobre los Andes Colombianos.



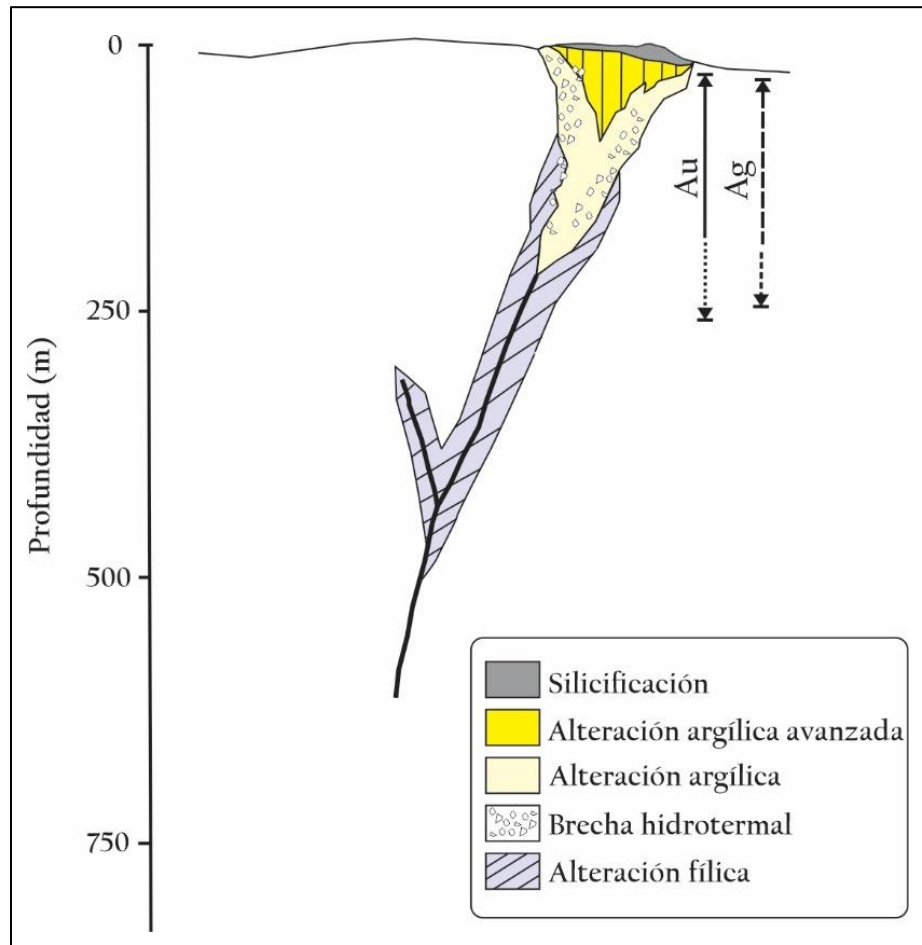
Nota. Tomado y modificado de: Mejía (2011).

Con respecto al depósito como tal se puede clasificar como de tipo epitermal debido a todos los datos obtenidos; tanto mediante este trabajo como bibliografía consultada. Dentro de los depósitos epitermales relacionados a las ocurrencias de Au- Ag, pueden lograr también clasificar el depósito características como oro asociado a sulfuros; la abundancia de los mismos, como buena presencia de pirita, marcasita, esfalerita, galena, carbonato y otras características indicativas como ocurrencias de oro electrum, pirita arseniosa, sulfosales (indicadoras tales como: tetraedrita, polibasita, estefanita, miargirita), vetillas tipo D y tipo E, barita, sílice, variedades de cuarzo cristobalita y tridimita, minerales de alteración como alunita, sericita, pirofilita, cloritas esferulíticas, también teniendo en cuenta que las temperaturas tentativas que se tienen encajan en los valores de temperaturas para la formación de la mayoría de yacimientos epitermales, comprendiendo un rango de <150 y $\sim 300^{\circ}\text{C}$ (y eventualmente mayores). Por otro lado, las litologías identificadas y la tectónica del depósito, sugieren relación con este tipo de depósitos (Berger & Eimon, 1983; Heald, 1987; Sillitoe, 1988, 2008; Mitchell & Balce, 1990; Nesbitt, 1990; Reyes, 1990, 1991; Wood *et al.*, 1990; Staude, 1993; Ponce & Glen, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Sugiriendo que el depósito es de tipo epitermal de media y baja sulfuración, tipo B según Camprubí & Albinson (2006) o epitermales alcalinos según Sillitoe (1977); puesto que dichos depósitos pueden coexistir en las mismas regiones para la dinámica y el control Andino, a su vez siendo concordante con lo propuesto anteriormente por autores que trabajaron en esta zona tales como: Sanchez (1993); Patiño & Lotero (2017). El modelo propuesto (**Figura 64.**) basado en Camprubí & Albinson (2006); Sillitoe (2008); SGC (2018) simplemente es tentativo e indica la zona en la cual puede estar concentrada la mineralización.

Figura 64.

Posible modelo del yacimiento en la Mina Gavia, siendo clasificado como depósito epitermal de baja a media sulfuración.



Nota. Sí se toman valores de mayor profundidad podría ser inferido un cuerpo intrusivo, el cual sería infrayacente al modelo epitermal sirviendo de posible “fuente magmática” al depósito; basado en Sillitoe (2008). Tomado y modificado de: Camprubí & Albinson (2006).

10. Conclusiones

En la Mina Gavia ubicada en la vereda Queiebralomo se ha venido desarrollando extracción mineral de oro a través de los años, las litologías que afloran en la mina son de rocas ígneas volcánicas que varían de dacitas a andesitas con texturas porfiríticas con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y hornblenda en una masa fundamental (matriz felsítica criptocristalina), además rocas piroclásticas de tobas dacíticas-andesíticas de ceniza; reconocidas y clasificadas mediante petrografía (microscopia de luz transmitida), las litologías fueron correlacionadas con la Formación Combia de edad Miocénica. La metalografía logró identificar sulfuros siendo el más representativo la pirita además de óxidos, sulfosales y metales nativos.

El análisis textural mediante metalografía (luz reflejada) y petrografía (luz transmitida) permitió reconocer características típicas y claves para el reconocimiento de los tipos de alteraciones hidrotermales; ocurriendo alteración fílica, argílica intermedia y avanzada; estando la mineralización concentrada en la última enunciada, dichas observaciones acompañadas de relaciones bibliográficas como el reconocimiento del tipo de vetillas (tipo D y E), grosor de las maclas en carbonato, textura de cloritas esferulíticas y condiciones mineralógicas arrojarían un valor de temperatura promedio del depósito, entre 150° a menos de 400°C. Es necesario enunciar también que las muestras MNG-CC-007 y MNG-CC-006 extraídas de la zona “El Santo” y relacionadas con la Falla 1 con tendencia de rumbo NE presentan valores de oro y plata además de la mineralización asociada a la alteración argílica avanzada.

Finalmente, con la suma de lo anteriormente enunciado se define el tipo de depósito que se encuentra en la zona, siendo de tipo epitermal de baja a media sulfuración. Por medio de la técnica analítica SEM-EDS, se logró comprobar la presencia de minerales identificados en la microscopia-metalografía como sulfosales de Cu y Pb (boulangerita-bornita), la existencia de oro principalmente en pirita, seguidamente de galena la cual además contenía oro electrum y plata; dichos metales a modo de inclusión y “oro invisible”, también se detectó la presencia de elementos traza como el arsénico el cual fue correlacionado de manera positiva con la presencia de oro en la pirita.

11. Recomendaciones

En primera instancia se recomienda desarrollar un estudio más detallado de la geología superficial y analizar mayor cantidad de secciones delgadas pulidas, de la misma manera llevar las muestras de mayor interés al detalle por medio del uso del SEM microscopio electrónico de barrido (SEM), de esta manera reduciendo la incertidumbre antes las relaciones planteadas y posiblemente plantear nuevas relaciones e hipótesis. Una herramienta que podría aportar información valiosa en cuanto a los fluidos en el depósito es el análisis de inclusiones fluidas, para definir el tipo de las mismas, su origen, el tipo de mecanismo de precipitación mineral, posibles temperaturas de los fluidos y del depósito, de esta manera reduciendo el grado de incertidumbre de los datos presentados en este trabajo. Además de estudios geocronológicos en minerales alterados mediante métodos adecuados, para aportar al conocimiento y tener un acercamiento a la edad de mineralización del depósito debido a que los estudios de geocronología han sido aplicados en otras zonas y distritos mineros. El estudio de la relación Ar-Au mediante métodos pertinentes, ya que dicha relación puede ser un monitor de la evolución del fluido hidrotermal y predecir la forma química dominante del Au en pirita arseniosa. Y con respecto al problema del “oro invisible” la solución más pertinente sería el uso de métodos modernos de alta resolución.

En términos generales se sugiere un análisis de mayor sensibilidad de esta manera reconocer en que fases minerales se encuentra el oro y generar una guía metalotéctica, teniendo en cuenta las recomendaciones planteadas lograr generar un modelo más detallado, con mayor información y más porcentaje de asertividad.

Referencias Bibliográficas

- Alvarez, A. (1983). Geología de la cordillera central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenozoicos. *Boletín Geológico, Ingeominas*, 26-No. 2, 23–35.
- Álvarez, E., & González, H. (1978). Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). Ingeominas. Informe 1761, Medellín. 347.
- Alzate, L. (2019). Análisis de parámetros morfométricos, morfología fluvial y relación de la cobertura vegetal con los movimientos en masa de la cuenca del río Supía. Universidad de Caldas, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Manizales. https://caldas.gov.co/index.php/component/easyfolderlistingpro/?view=download&format=raw&data=eNpFT8tOwzAQ_BXLP5BEhQLbU5SaKoiSyKXnyI03qaW8ZLtQCfHv2HFcIk47M_uYWQFJAj8GtkCbsZOo6c5AsgHao1RcInpje3ZgfBYToDeDOoyZWQIar632hsb-n3gCWlWz5tlzWB1Ej57GQH3ZBIVJulMQhyWN3
- Arehart G. B., Chryssoulis S. L., & Kesler S. E. (1993). Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: implications for depositional processes. *Economic Geology*, 88, 171–185.
- Argoti, A., & Garcia, Y. (2008). Estudio geológico minero de 4 minas en el departamento de caldas en los municipios de Belalcázar y Riosucio. In Caldas:
- Bakken, B. M., Hochella Jr., M.F., Marshall, A. F., & Turner, A. M. (1989). High-resolution microscopy of gold in unoxidized ore from the Carlin mine, Nevada. *Economic Geology* 84, 171–179., 84, 171–179.
- Barton, P., & Bethke, P. (1987). Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. *American Mineralogist*, 72, 451–467.

- Bastin, E. (1950). Interpretation of ore textures. The Geological Society of America, Memoir 45.
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. & Cordani, U. (2010). Paleomagnetic data and K-Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: A preliminary interpretation for block rotation and translations. Bogotá: Journal of South American Earth Sciences, 29, 818.
- Berger, B. R., & Eimon, P. L. (1983). Conceptual models of epithermal precious metal deposits, en Shanks, W.C. (ed.), Cameron volume on unconventional mineral deposits: New York, New York, E.U.A. Society of Mining Engineers, 191–205.
- Bons, P. D. (2000). The formation of veins and their microstructures. In: Stress, Strain and Structure. Journal of the Virtual Explorer, In honor.
- Botero, R. J., & Zuluaga, M. C. (1980). Geoquímica y estructura de los depósitos de oro de Marmato. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ciencias, Medellín, 141.
- Bowers, T. S. (1991). The deposition of gold and other metals: Pressure induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 2417–2434.
- Buddington, A. F. (1935). High-temperature mineral associations at shallow to moderate depths. Economic Geology, 30, 205–222.
- Calle, B., & González, H. (1982). Geología y geoquímica de la plancha 186 Riosucio.
- Calle, B., González, H., de La Peña, R., Escorce, E., & Durango, J. et al. (1980). Geología de la Plancha 186 Riosucio. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Medellín.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la sociedad geológica mexicana, conmemoración, 27–81.

- Case, J.E., Durán, L.G., López, A. & Moore, W. R. (1971). Tectonic investigations in western of Colombia and Eastern Panamá. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 2685–2711.
- Castrillón, M. (1996). Geología del sector la estación-La Corona, municipios de Angelópolis y Amagá. *ECOCARBON, Ltda, Amagá, Antioquia*.
- Castro, N., & Feininger, T. (1965). Geología en la región entre Buriticá y Santa Fe de Antioquia, Con especial referencia a la geología económica de un cuerpo andesítico. *Ingeominas, Informe Interno, Medellín, 37*.
- Cetina, L. M., Velandia, F., & Patiño-Sanabria, H. A. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yariguíes-Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 41 (3), 31–56. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019002>
- Chace, F. (1956). Abbreviations in field and mine geological mapping. *Geology, Economic*, 51, 712–723. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.51.7.615>
- Chen, T. T. (1978). Colloform and framboidal pyrite from the Caribou deposit New Brunswick. *Canadian Mineralogist*, 16, 9–15.
- Chutas, N. I., Kress, V. C., Ghiorso, M. S., & Sack, R. O. (2008). A solution model for high temperature PbS–AgSbS₂–AgBiS₂ galena. *American Mineralogist*, 93, 1360–1640.
- Ciesielczuk, J. (2012). Chlorite of hydrothermal origin in the Strzelin and Borów granites (Fore-Sudetic Block, Poland). *Geological Quarterly*, 56, 333–344. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7306/gq.1025>
- Cline J. S. (2001). Timing of gold and arsenic sulfide mineral deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, North- Central Nevada. *Econ. Geol.*, 96, 75–89.
- Cook N. J., & Chryssoulis S. L. (1990). Concentrations of “invisible gold” in the common sulfides. *Canadian Mineralogist*, 28, 1–16.

- Cook N. J., Wade B., Silcock D., Meria D., & Ciobanu C. L. (2013). Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements. *Economic Geology* .
- Corbett, G. J. (2017). Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration – short course manual. Corbett Geological Services Pty Ltd.
- Craig, J., & Vaughan, D. (1994). *Ore microscopy and ore petrography* (Second). John Wiley & Sons, Inc.
- Craig, J., & Vokes, F. (1993). The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview. *Mineralogical Magazine*, 57 (386), 3–18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1180/minmag.1993.057.386.02>
- Cruz, L. E., & Caballero, V. M. (2007). Descripción y clasificación de rocas terrígenas por su textura, *Guía de Laboratorio de Sedimentología para Geólogos*. Escuela de Geología UIS, 2,9,10.
- Deditius A, Utsunomiya S, Reich M, Kesler S, Ewing R, Hough R, & Walshe J. (2011). Trace metal nanoparticles in pyrite . *Ore geology reviews* , 42, 32–46.
- Deditius, A. P., Kesler, S. E., Renock, D., Ewing, R. C., Ramana, C. V., & Becker, U. (2008). A proposed new type of arsenian pyrite: composition, nanostructure and geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 2919–2933.
- Deditius, A. P., Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Chryssoulis, S. L., Walshe, J., & Ewing, R. C. (2014). The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.045>
- Deditius A. P., Utsunomiya S., Ewing R. C., & Kesler S. E. (2009). Nanoscale “liquid” inclusions of As–Fe–S in arsenian pyrite. *American Mineralogist*, 94, 391–394.

- Dong, G., Morrison, G., & Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland-classification, origin, and implication. *Economic Geology*, 90, 1841–1856.
- Echeverri, C. J., & Ospina, E. J. (1989). Cartografía geológica y prospección geoquímica entre los municipios de Riosucio (Caldas) Y Quinchía (Risaralda).
- Emsbo P., Hofstra A. H., Lauha E. A., Griffin G. L., & Hutchinson R. W. (2003). Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Mickle and neighboring Carlin-type deposits, Northern Carlin Trend, Nevada. *Econ. Geol.*, 98, 1069–1105.
- Etayo, F., González, H., & Álvarez, J. (1980). Med Albian ammonites from northern Western Cordillera, Colombia. *Geología Norandina*, 2, 25–30.
- Ferril, D., Morris, A., Evans, M., Burkhard, M., Groshong Jr, R., & Onasch, C. (2004). Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer. *Journal of Structural Geology*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.028>
- Fleet, M. E., MacLean, P. J., & Barbier, J. (1989). Oscillatory-zoned As-bearing pyrites from strata bound and stratiform gold deposits: An indicator of ore fluid evolution. *Economic Geology. Monograph*, 6, 356–362.
- Fleet M. E., & Mumin A. H. (1997). Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis. *American Mineralogist*, 82, 182–193.
- Galvis, J De la Espriella, R. (1988). La Gran Falla del Borde Llanero. Bogotá: *Geología Colombiana*, 16, 105-110.
- Geoestudios-INGEOMINAS. (2005). Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa Fé de Antioquia y 146 Medellín Occidental.
- Gómez, E., Marín, J., & Hincapié, G. (2012). Análisis de paleoesfuerzos mediante datos de fallas estriadas en el “Stock” de Chinchiná-Santa rosa, en la Cantera La Virgen Manizales,

- Caldas. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica. Bogotá, Colombia., 37, 28.
- Gonzalez, H. (1976). Geología del cuadrángulo J-8 Sonsón. Informe 1704. Ingeominas, Bogotá.
- González, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín Geológico, Ingeominas, 23, 174.
- Grosse, E. (1926). El Terciario Carbonífero de Antioquia. Berlín: Dietrich Reimer. E. Vohsen, 321.
- Guarin, G. G. (1971). Ocurrencias minerales del departamento de Risaralda. Instituto Nacional de Investigación Geológico-Mineras, 66.
- Guiral Vega, J. S., Rincón-Gamero, J. J., & Ordoñez-Carmona, O. (2015). Geology of the southern part of Sabanalarga Batholith. Implications for terrane theory in the west of Colombia. Boletín de Ciencias de La Tierra, 38, 41–48. <https://doi.org/10.15446/rbct.n38.46367>
- Gustafson L, & Hunt J. (1975). The Porphyry Copper Deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, 70(50).
- Hayba, D. O., Bethke, P. M., Heald, P., & Foley, N. K. (1986). Geologic, mineralogy, and geochemical characteristic of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. Reviews in Economic Geology, 2, 129–167.
- Heald, P. et al. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. Bulletin of Society of Economic Geologists, 82 No 1, 22.
- Hedenquist, J., Arribas, A., & Urien-Gonzalez, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology, 13, 245–277.
- Hedenquist, J. W. (1987). Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin. In Transactions 4th Circum Pacific Energy and Mineral Resources Conference (pp. 1–26).

- Hofstra, A. H., & Cline, J. S. (2000). Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology* , 13, 163–220.
- Kolker, A., Woodruff, L. G., Haack, S. K., Cannon, W. F., Westjohn, D. B., Kim, M. J., & Nriagu, J. (2003). Arsenic in southeastern Michigan. In: Welch, A.H., Stollenwerk, K.G. (Eds.), *Arsenic in Ground Water*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 281–294.
- Large, R. R., Foster, J., Danyushevsky, L., Hollit, C., Maslennikov, V. V., Meffre, S., Gilbert, S., Bull, S., Scott, R., Emsbo, P., Thomas, H., & Singh, B. (2009). Gold and trace elements zonation in pyrite using Laser Imaging Technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-Style sediment-hosted deposits. *Economic Geology* , 104, 635–668.
- Large R. R., Maslennikov V. V., Chang Z., Danyushevsky L., & Robert F. (2007). Multistage Sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 102, 1233–1267.
- Largo, Y. (2000). Cartografía geológica y estudio de las mineralizaciones auríferas de los sectores de Gavia y Vendecabezas, municipio de Riosucio, Caldas. Universidad de Caldas.
- Le Maitre, R., Streckeisen, A., Zanettin, B., le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, A., Dudek, S., Efremova, J., Keller, J., Lameyre, P. A., Sabine, R., Schmid, H., Sørensen, A. R., & Woolley. (2005). The, “Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics Rocks, Igneous. Ed. Cambridge University Press, 2nd edition.
- Lindgren, W. (1933). Mineral Deposits. In *Mineral Deposits* (p. 930). McGraw-Hill Book Co.
- Lueth, V. W., Megaw, P. K. M., Pingitore, N. F., & Goodell, P. C. (2000). Systematic variation in galena solid-solution compositions at the Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. *Economic Geology*, 95, 1673–1687.

- Lufkin, J. (2012). *Ore Mineralogy & Microscopy*. In Golden publishers (First). Golden publishers.
www.johnlufkin.com.
- Maddox L.M, Bancroft G.M, Scaini M.J, & Lorimer J.W. (1998). *Invisible gold: Comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite (Vol. 83)*.
- Mahecha, H., Trujillo, J., Tejada, M., Paniagua, F., & Weber, M. (2006). *Cartografía geológica de las vulcanitas de la Formación Combia, en un área de 200 km² en los alrededores del municipio de Jardín (Departamento de Antioquia, Colombia)*. Ingeominas, Colombia, 19–25.
- Malvicini, L., & Saulnier, E. (1979). *Texturas de depósitos minerales. Asociación argentina de mineralogía petrología y sedimentología serie didáctica, 3*.
- Marin, M., & Vinasco, C. (2012). *Contribuciones al conocimiento de la evolución geológica del sistema de fallas de Romeral*. *Boletín Ciencias de La Tierra, Medellín.*, 32, 61–64.
- McClenaghan S. H., Cabri L. J., & Lentz D. R. (2004). *Abundance and speciation of gold in massive sulfide of the Bathrust mining camp, New Brunswick, Canada*. *Can. Miner.*, 42, 851–871.
- Meissner, R., Flueh, E., Stibane, F. & Berg, E. (1977). *Dinámica del límite de placas activo en el sur de Colombia de acuerdo a recientes mediciones geofísicas. Proyecto Cooperativo Internacional Nariño Colombia*, 169–198.
- Mejía, H. (2011). *Phanerozoic gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. Memoria de Tesis Doctoral Para Optar al Título de Doctor Por La Universitat de Barcelona*, 31–950.
- Minera Gavia. (2019). *Cartografía y muestreo de las mineralizaciones presentes en la mina Gavia, en el distrito minero de Riosucio, Caldas*.

- Servicio Geológico Colombiano & Ministerio Colombiano de Minas y Energía. (2018). Guía Metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso del mercurio. Marmato, Riosucio, Quinchía y Caramanta. 48–60.
- Mitchell, A. H. G., & Balce, G. R. (1990). An overview of epithermal gold mineralisation in the Philippines. *Journal of Geochemical Exploration*, 35, 241–296.
- Morey, A. A., Tomkins, A. G., Bierlin, F. P., Wienberg, R. F., & Davidson, G. J. (2008). Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: examples from the Archean Boorara and Bardoc shear systems, Yilgarn craton, Western Australia. *Economic Geology*, 103, 599–614.
- Mumin A. H., Chryssoulis S. L., & Fleet M. E. (1994). Gold mineralization in As-rich mesothermal gold ores of the Bogosu- Prestea mining district of the Ashanti Gold Belt, Ghana: remobilization of “invisible” gold. *Mineral. Deposita*, 29, 445–460.
- Muntean, J. L., Cline, J. S., Simon, A. C., & Longo, A. A. (2011). Magmatic-hydrothermal origin of Nevada’s Carlin-type gold deposits. *Nat. Geosci.*, 4, 122–127.
- Murowchick, J. (1992). Marcasite Inversion and the Petrographic Determination of Pyrite Ancestry. *Economic Geology*, 87, 1141–1152.
- Murowchick J. B., & Barnes H. L. (1986). Marcasite precipitation from hydrothermal solutions. *Geochim. Cosmochim., Acta* 50, 2615–2629.
- Nesbitt, B. E. (1990). Fluid flow and chemical evolution in the genesis of hydrothermal ore deposits, en Nesbitt, B.E. (ed.), *MAC Short Course on fluids in tectonically active regimes of the continental crust*. Mineralogical Association of Canada, 261–297.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 285–317.

- Nivia, A., Marriner, G., Kerr, A., & Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21, 423–436.
- Ocola, L., et al. (1977). Estructura de la corteza por debajo de los Andes en el sur de Colombia y norte de Ecuador en base a los datos de refracción de refracción sísmica. Proyecto Cooperativo Internacional - Nariño. Colombia, 71–81.
- Palenik, C. S., Utsunomia, S., & Reich, M. , et al. (2004). “Invisible” gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin type deposit. *American Mineral.*, 89, 1359–1366.
- Pals D. W., Spry P. G., & Chryssoulis S. (2003). Invisible gold and tellurium in arsenic-rich pyrite from the Emperor gold deposit, Fiji: implications for gold distribution and deposition. *Economic Geology* , 98, 479–493.
- Panteleyev, A. (1988). A Canadian Cordilleran Model for Epithermal Goldsilver Deposits en Roberts, R.G., Sheahan, P.A. (eds.). *Ore Deposit Models: Geoscience Canada Reprint Series*, 3, 31–43.
- Patiño, C. C., & Lotero, O. D. (2017). Caracterización geológico minera y elementos para el diseño del plan de trabajos y obras (Pto) de la mina La Sombra, sector de Gavia, Riosucio, Caldas. Universidad de Caldas.
- Pokrovski G. S., Kara S., & Roux J. (2002). Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids. *Geochim. et Cosmochim., Acta* 66, 2361–2378.
- Ponce, D. A., & Glen, J. M. G. (2002). Relationship of epithermal gold deposits to large-scale fractures in Northern Nevada. *Economic Geology*, 97, 3–9.
- Pracejus, B. (2015). *The ore minerals under the microscope; An optical guide (Second)*. Elsevier B.V. All rights reserved. <http://store.elsevier.com/>

- Putnis, A. (2002). Mineral replacement reactions: from macroscopic observations to microscopic mechanisms. *Mineralogical Magazine*, 66, 689–708.
- Putnis, A. (2009). Mineral replacement reactions. *Review In Mineralogy and Geochemistry*, 70, 87–124.
- Radelly, & Pagnaco. (1962). Informe geológico de Marmato, Caldas. Informe 1433, INGEOMINAS. Bogotá.
- Ramírez, D., López, A., Sierra, G., & Toro, G. (2006). edad y proveniencia de las rocas volcánico sedimentarias de la formación Combia en el suroccidente Antioqueño - Colombia. Departamento de Geología, Universidad EAFIT, 10–11.
- Ramírez, J. (2012). Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) del Miembro Superior de la Formación Amagá, sección Quebrada Sabaleticas, Suroccidente Antioqueño. Universidad EAFIT, Medellín, 24–29.
- Reich, M., Deditius, A., & Chryssoulis, S. (2013). Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochim Cosmochim*, 104, 42–62.
- Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Palenik, C. S., Chryssoulis, S. L., & Ewing, R. C. (2005). Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>
- Reyes, A. G. (1990). Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43, 279–309.
- Reyes, A. G. (1991). Mineralogy, distribution and origin of acid alteration in Philippine geothermal systems. *Geological Survey of Japan Reports*, 277, 59–65.

- Richards J. P., & Kerrich R. (1993). The Porgera gold mine Papua New Guinea; magmatic hydrothermal to epithermal evolution of an alkaline-type precious metal deposit. *Economic Geology* 88, 1017– 1052., 88, 1017–1052.
- Rodríguez, C. (1986). Proyecto zonas aledañas a Marmato. Segundo informe técnico. ECOMINAS, Departamento de Geología.
- Rodríguez, G., & Arango, M. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera occidental de Colombia. *Boletín Ciencias de La Tierra, Medellín*, 33, 17–38.
- Rodríguez, G., & Zapata, G. (2013). Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el Sistema de Fallas de Romeral en los Andes del norte? *Boletín Ciencias de La Tierra, Medellín*, 33, 39–58.
- Romberger, S. B. (1988). Geochemistry of gold in hydrothermal deposits. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1857-A, A9–A25.
- Sanchez, O. (1993). Geología y mineralogía de los yacimientos Gavia Y Gasparillos Riosucio-Caldas.
- Savage K. S., Tingle T. N., O'Day P. A., Waychunas G. A., & Bird D. K. (2000). Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode gold district. Tuolumne County, California. *Appl. Geochem.*, 15, 1219–1244.
- schneiderhohnh, H. (1930). Mineral chemische und mikroskopische Beobachtungen an Beli-zink und Kies-erzen der Deutsch-Bleischarley Grube, Oberschleisen. *Chemie Der Erder*, 5, 385–395.
- Schoonen M. A. A., & Barnes H. L. (1991a). Mechanisms of pyrite and marcasite formation from solution; III, Hydrothermal processes. *Geochim. Cosmochim., Acta* 55, 3491–3504.

- Schoonen M. A. A., & Barnes H. L. (1991b). Reactions forming pyrite and marcasite from solution; I, Nucleation of FeS₂ below 100 degrees C. *Geochim. Cosmochim., Acta* 55, 1495–1504.
- Schoonen M. A. A., & Barnes H. L. (1991c). Reactions forming pyrite and marcasite from solution; II, Via FeS precursors below 100 degrees C. *Geochim. Cosmochim., Acta* 55, 1505–1514.
- Sha P. (1993). Geochemistry and genesis of sediment-hosted disseminated gold mineralization at the Gold Quarry mine, Nevada. Ph.D. thesis. Univ. of Alabama, Tuscaloosa.
- Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., & MacDonald, W. (2011). Fábrica magnética de los sedimentos de la Formación Amagá. XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología. Medellín. Memorias.
- Sierra, G. M., Silva, J. C., & Correa, L. G. (2003). Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 15, 722.
- Sillitoe, R. (2008). Special Paper: Major Gold Deposits and Belts of the North and South American Cordillera: Distribution, Tectonomagmatic Settings, and Metallogenic Considerations. *Economic Geology*, 103, 663–687.
- Sillitoe, R. H. (1977). Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 7(1).
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1977.007.01.13>
- Sillitoe, R. H. (1988). Environments, styles and origins of gold deposits in western Pacific island arcs, en *Bicentennial Gold 88*. Geological Society of Australia, Abstracts, 22, 127–138.
- Sillitoe, R. H., Perello, J., & Garcia, A. (2010). Sulfide-Bearing Veinlets Throughout the Stratiform Mineralization of the Central African Copperbelt: Temporal and Genetic Implications. *Economic Geology*, 105(8). <https://doi.org/10.2113/econgeo.105.8.1361>

- Sillitoe, R., & Hedenquist, J. (2003). Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Society of Economic Geologists, Special Pu.
- Silva, J. C., Sierra, G. M., & Corre, L. G. (2008). Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 369–382.
- Simmons S. F., John D. A., & White N. C. (2005). Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Econ. Geol.*, 100, 485–522.
- Staude, J.-M. (1993). Gold, silver, and base metal epithermal mineral deposits around the Gulf of California, Mexico: relationship between mineralization and mayor structures, en Scott, R.W. Jr., Detra, P.S., Berger, B.S. (eds.), *Advances related to United States and international mineral resources: developing frameworks and exploration technologies*. U.S. Geological Survey Bulletin, 2039, 69–78.
- Streckeisen, A. (1978). IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. Recommendations and suggestions. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie*, 134, 1–14.
- Sung Y.-H., Brugger J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., & Nugus M. (2009). Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archean gold deposit: sunrise Dam Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Miner. Deposita*, 44, 765–791.
- Taboada, A., Dimaté, C., & Fuenzalida, A. (1988). Sismotectonica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Ingeominas, Física de La Tierra*, 10, 111–147.
- Tassinari, C. C., Diaz, F., & Buenaventura, J. (2008). Age and source of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia – A Miocene- Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33, 505–518.

- Tassinari, C. C. G., Pinzon, F. D., & Buena Ventura, J. (2008). Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene–Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.002>
- Tauson V. L. (1999). Gold solubility in the common gold-bearing minerals: experimental evaluation and application to pyrite. *Eur. J. Mineral.*, 11, 937–947.
- Toussaint, J., & Restrepo, J. (1978). Edad K/Ar de dos rocas básicas del flanco noroccidental de la Cordillera Central. *Boletín de Ciencias de La Tierra. Universidad Nacional de Colombia*, 15, 1.
- van der Hammen, T. (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes colombianos (con 7 planchas). *Boletín Geológico*, 6, 67–128.
- Vargas, G., & Amaya, C. (1990). Geología y petrografía de facies cataclásticas de la Formación Barroso e intrusivos y metamorfitas asociados en Cañafisto, Antioquia. *Boletín de Geología, Bucaramanga*, 19, 89–115.
- Vaughan, J. P., & Kyin, A. (2004). Refractory gold ores in Archean greenstones, Western Australia: Mineralogy, gold paragenesis, metallurgical characterization and classification. *Mineral. Mag.*, 68, 255–277.
- Vernon, R. (2018). *A Practical Guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press, second edi, 123–126. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
- Vikentyev. (2015). Invisible and Microscopic Gold in Pyrite: Methods and New Data for Massive Sulfide Ores of the Urals. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*, 57(4), 267–298.
- Wagner, T., Mattsson, B., Wenzel, T., & Klemd, R. (2007). Gold upgrading in metamorphosed massive sulfide ore deposits: Direct evidence from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis of invisible gold. *Geology*, 35, 775–778.

- Whitney, D., & Evans, B. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, 185–187.
- Widler A. M., & Seward T. M. (2002). The adsorption of gold (I) hydrosulphide complexes by iron sulphide surfaces. *Geochim. Cosmochim.*, 66, 383–402.
- Williams-Jones A. E., & Heinrich C. A. (2005). Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.*, 100, 1287–1312.
- Wood, D. G., Porter, R. G., & White, N. C. (1990). Geological features of some Paleozoic epithermal gold occurrences in northeastern Queensland, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 413–443.
- Wu X., & Delbove F. (1989). Hydrothermal synthesis of gold-bearing arsenopyrite. *Econ. Geol.*, 84, 2029–2032.