



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

“Establecimiento de guías de exploración de estructuras del skarn La Parrilla, Durango, a través del estudio geológico de los cuerpos mineralizados Vacas y Quebradillas”.

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Kevin Alonso García Cruz

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Este trabajo está dedicado a mis padres  
por el apoyo y la confianza incondicional que me han mostrado siempre.*

*También quiero dedicar esta tesis a mi familia y amigos,  
agradezco las enseñanzas que me dejaron y que siguen presentes.  
Por los que estuvieron, están y estarán.*

*“La geología tiene una tristeza apabullante que nunca podrá sacarse de encima. Esta tristeza proviene  
de la idea de que el tiempo trabaja en su contra.”  
Salvador Dalí*

## Agradecimientos

*Agradezco a mis padres, por el apoyo que me han brindado durante toda mi vida. Por los ánimos frente a los retos que se me han presentado. A ti mamá, por enseñarme a no rendirme, por ser mi ejemplo de fortaleza y por siempre estar a mi lado. A ti papá, por tu esfuerzo diario y por los ánimos que me das para cumplir mis sueños.*

*A mis hermanos José y Linette, por ser mis compañeros en innumerables aventuras, darme fortaleza y confiar en mí. Por ser mis amigos, mis confidentes y por escucharme cuando más lo he necesitado.*

*Agradezco a la empresa First Majestic Silver por las facilidades prestadas para la elaboración de esta tesis en la unidad La Parrilla, así como a Jesús Quintanilla, José Navarro, Fredy López y a todo el equipo de servicios técnicos y personal de la unidad mineral La Parrilla por su ayuda y amabilidad.*

*Agradezco al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz por haberme otorgado la oportunidad de desarrollar mi tesis dentro de la unidad minera La Parrilla. Por las oportunidades ofrecidas desde antes de iniciar este trabajo y hasta el momento. Por confiar en mis capacidades y por su paciencia para instruirme. Por la increíble disposición para compartir sus conocimientos y aclarar mis dudas. Por contagiarme la pasión de la Geología y el conocimiento. Gracias Doctor porque no hubo momento que no aprendiera algo de usted.*

*A la MC Edith Fuentes Guzmán, Al Laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del Instituto de Geología, al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía y al Laboratorio de petrografía, microtermometría del Instituto de Geofísica por las facilidades y el apoyo brindado a mi persona.*

*Así mismo agradezco al jurado evaluador por sus observaciones para la mejora de este trabajo.*

*A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, porque en ella viví mi carrera, conocí a excelentes profesores y amigos. Porque durante cuatro años y medio fue mi segunda casa y en ella conocí la pasión de mi vida, la Ingeniería Geológica.*

*A mis profesores por siempre guiarme por el camino del aprendizaje y enseñarme a amar la geología.*

*Agradezco a Olimpia, Alfredo, Emmanuel, Hugo, Mario, por siempre estar ahí y las increíbles aventuras que hemos tenido, al team, a Jesús, Sofi, Gires, a todos mis amigos y compañeros que me han ayudado a crecer como estudiante y como persona.*

*Gracias.*

Índice	Pag.
Agradecimientos.....	3
Resumen.....	10
I. Introducción .....	11
I.1. Planteamiento del problema.....	11
I.2. Objetivo .....	12
I.2.1 Objetivos particulares .....	12
I.3 Hipótesis .....	12
I.4 Antecedentes.....	13
I.5 Localización de zona de estudio .....	15
II. Marco Geológico .....	17
II. 1 Marco Geológico Regional.....	17
II.1.1. Cretácico - Paleoceno .....	21
II.1.2. Eoceno .....	21
II.1.3. Pulsos Oligoceno-Plioceno .....	21
II.1.4. Límite Sierra Madre Occidental - Mesa Central .....	22
II.1.5. Tectónica Regional .....	24
II.2. Marco Geológico Local .....	27
II.2.1. Formación Mezcalera (Barremiano-Albiano) .....	28
II.2.2. Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano) .....	29
II.2.3. Formación Indidura (Cenomaniano-Coniaciano) .....	30
II.2.4. Cuerpos intrusivos de composición Granodiorítica-Diorítica (Cretácico Tardío) .....	30
II.2.5. Conglomerado, secuencias ignimbríticas y Aluvión (Cenozoico) .....	31
II.2.6. Contexto estructural.....	32
II.2.7. Estratigrafía .....	34
III. Metodología .....	36
III.1. Análisis de registros existentes .....	36
III.2. Muestreo y Mapeo en superficie .....	38
III.3. Logueo de Barrenos.....	40
III.4. Reconocimiento en interior mina.....	41

III.5. Espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR).....	42
III.6. Petrografía y Mineragrafía de láminas delgadas.....	43
III.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	44
III.8. Microtermometría.....	45
IV. Resultados.....	47
IV.1. Roca encajonante.....	47
IV.2. Cuerpos Intrusivos.....	48
IV.3. Estructura mineralizada.....	49
IV.4. Asociación mineral.....	51
IV.4.1. Vacas: Zona mineralizada inferior.....	53
IV.4.2. Vacas: Zona mineralizada media.....	54
IV.4.3. Vacas: Zona mineralizada superior.....	55
IV.4.4. Relación mineralógica y paragénesis.....	56
IV.5. Alteraciones hidrotermales: Espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR).....	59
IV.6. Estudio de granates y mena: Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	61
IV.7. Microtermometría.....	65
V. Discusión.....	73
VI. Conclusiones.....	85
Referencias.....	87
Anexo A.....	93
Anexo B.....	119
Anexo C.....	141
Anexo D.....	145
Anexo E.....	148

## Índice de figuras

Figura I.1 Ubicación de los cuerpos Vacas y Quebradillas en la unidad minera La Parrilla en el estado de Durango, México. 16

Figura II.1 Ubicación de la unidad minera La Parrilla en la zona colindante de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central. Modificado de: (Aguillón-Robles et al., 2009). 17

Figura II.2. Localización de la provincia extensional del norte de México (PENM), campos volcánicos del Neógeno y Cuaternario distribuidos por toda la región continental al norte de la FVTM, y las cuatro provincias volcánicas propuestas por Demant y Robin (1975). 18

Figura II.3. Núcleo de la SMO no deformado y flancos con presencia de fallamiento. Se observan los límites de fallas y su orientación, así como la ubicación del distrito minero La Parrilla. Modificado de (Ferrari et al., 2005). 19

Figura II.4. Geología Regional del área de estudio. Modificado de: (Ferrari et al., 2018). 20

Figura II.5. Mapa geológico de la Unidad Minera La Parrilla mostrando como litologías principales, cuerpos intrusivos, secuencias de calizas - lutitas y conglomerados. 23

Figura II.6. Configuración geológica general de México basada en terrenos tectonoestratigráficos y la distribución del bloque subcontinental Oaxaquia, simplificado de (Centeno-García et al., 2008 tomado de Camprubí, 2013). 24

Figura II.7. Ubicación del distrito minero La Parrilla en el límite tectónico-estructural de la SMO y la MC sobre el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, modificado de (Camprubí, 2013). 25

Figura II.8. Mapa tectónico de la parte central de la SMO con indicación de la orientación y edad de la deformación extensional. Modificado de (Ferrari et al., 2005). 26

Figura II.9. A) Escarpe en superficie de la mina Vacas mostrando la secuencia de calizas – lutitas intrusionada por un cuerpo tipo sill y con fallamiento normal a la izquierda. B) Manto mineralizado en el interior de la mina Vacas. C) Cuerpos intrusivos aflorando en la superficie de la mina Quebradillas. D) Manto mineralizado en el interior de la mina Quebradillas. 27

Figura II.10. A y B) Intervalo de núcleos de barrenos de la mina Vacas donde se presenta la secuencia de caliza mudstone y wackstone de color gris oscuro y gris claro, con presencia de lutita y marga. C) Arenisca interestratificada con limolita. D) Vetilleo de calcita. 28

Figura II.11. A y B) Afloramientos de calizas en el área del cuerpo mineralizado Vacas. con intercalación de limonitas color rosado y bandas de pedernal. C) Intercalación de lutitas y limolitas rosas en superficie de la mina Vaca. D) Bandas de pedernal en núcleos de barrenación de la mina Vacas. 29

Figura II.12. A y B) Hornfels en el interior de la mina Quebradillas producto del metamorfismo de contacto de la sucesión de calizas y lutitas de la formación Indidura. 30

Figura II.13. A) Cuerpo intrusivo en barreno de la mina Vacas. B) Cruce de dique con sill en interior mina Vacas. C) Intrusivos de la mina Quebradillas. D) Dique en interior mina Quebradillas deformando la estratificación. 31

Figura II.14. Mapa estructural de la zona que comprende las minas Vacas y Quebradillas en el distrito minero La Parrilla, Modificado de (SGM, 2001). 33

*Figura II.15. Columna estratigráfica semiregional y columna estratigráfica local modificada de (Barboza-Gudiño et al., 2004). 34*

*Figura III.1. Ubicación de los barrenos utilizados para muestreo en modelo de corte trasversal del yacimiento mineral Vacas. 37*

*Figura III.2. Recorrido superficial en el área de la mina Quebradillas para revisión general de la geología observada en superficie. 38*

*Figura III.3.1. Mapa del área circundante a la mina Vacas y ubicación de los datos estructurales tomados. 39*

*Figura III.3.2. Mapa de ubicación de barrenos utilizados y su proyección en planta. 40*

*Figura III.4. Formato de delimitación de intervalos de interés y muestreo. El muestreo final contemplado se encuentra desglosado en el Apéndice E. 41*

*Figura III.6. Equipo utilizado para espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR). 42*

*Figura III.7. Microscopio óptico Olympus. 43*

*Figura III.8. Equipo HITACHI TM-1000 utilizado en el análisis MEB. 44*

*Figura III.9. Equipo para estudio microtermométrico LINKAM. 45*

*Figura IV.1. A y B) Textura matriz-soportada con más del 10% de granos y núcleo de barreno muestreado, VC-40 roca encajonante. C) Formación mezcalera en la zona profunda de Vacas. D) Formación Indidura con metamorfismo de contacto en el interior de la mina Quebradillas. 47*

*Figura IV.2. A) Fotomicrografía de cuerpo intrusivo granodiorítico de la mina Quebradillas. B) Fotomicrografía de cuerpo intrusivo de la mina Vacas. C) Núcleo de barreno de la mina Quebradillas con cuerpo intrusivo granodiorítico de textura fanerítica. D) Núcleo de barreno de la mina Vacas con cuerpo intrusivo cuarzo-monzonítico de textura porfídica. 48*

*Figura IV.3. A) Manto mineralizado asociado a una falla en la mina Quebradillas. B) Manto mineralizado concordante a la estratificación en la mina Vacas. 49*

*Figura IV.4. Cuerpos Vacas y Quebradillas, modelos de explotación y desarrollo minero en AutoCAD. (First Majestic, 2019). 50*

*Figura IV.5. Barrenos muestreados del yacimiento mineral Vacas. 51*

*Figura IV.6. A) Barreno muestreado de la mina Vacas. B) Microcristales de calcopirita, esfalerita y arsenopirita vistos con luz reflejada. C) Microcristales de cuarzo, calcita, granate y vetilleo de pirita en lámina delgada. D) Fenocristales de granate en lámina gruesa 60 µm. 53*

*Figura IV.7. Cristalización de fenocristales de granate, calcita, cuarzo y algunos sulfuros en el interior de la mina Quebradillas. 54*

*Figura IV.8. A) Eventos de cristalización de esfalerita, VC-14. B) Minerales de mena en el barreno VC-26. C) Bandas en la cristalización de sulfuros, esfalerita, galena, calcopirita y sulfosales VC-14. D) Sulfuros masivos, galena, calcopirita y sulfosales de plata VC-26. 54*



*Figura IV.9. Minerales asociados a la mena. A) Calcita tardía asociada con esfalerita. B) Clorita microcristalina. C) Cuarzo plumoso con esfalerita. D) Cuarzo plumoso y microcristales de epidota. 55*

*Figura IV.10. A) Cristales de marcasita, calcopirita y esfalerita. B) Cristales de Pirita, marcasita y microcristales de galena. C) Cristobalita en la zona mineralizada superficial del yacimiento Vacas. D) Cristales de fluorita asociada a calcita en la mina Vacas. 56*

*Figura IV.11. Cuadro paragenético de las muestras estudiadas. 58*

*Figura IV.12. A) Epsomita como agregados fibrosos en el interior de la mina Vacas. B) Curva resultante comparada mediante análisis SWIR. 59*

*Figura IV.13. A) Muestras de alteración en la superficie Vacas tomadas en una obra antigua con montmorillonita, caolinita, halloysita y algunas arcillas amorfas. B) Curva resultante comparada mediante análisis SWIR de halloysita. 59*

*Figura IV.14. Cuadro comparativo de las curvas resultantes del método SWIR obtenidos para ambos yacimientos en interior mina y en la zona superficial. 60*

*Figura IV.15. A) Imagen de SEM-BSE y análisis de EDS realizado a sulfosal asociada con galena en la zona de mena media. B) Imagen SEM-BSE y análisis de EDS realizado a sulfosal asociada a marcasita en zona de mena profunda presentando impurezas de bismuto. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde. 61*

*Figura IV.16. Imagen de SEM-BSE y análisis SEM de zona mineralizada media. A y C) Tetraedrita argentífera – freibergita. C) Tetraedrita sin plata. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde. 62*

*Figura IV.17. Imagen SEM-BSE y análisis EDS llevado a cabo en los cristales de sulfosales asociados a cristales de calcopirita. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde. 62*

*Figura IV.18. Imagen de SEM-BSE y análisis EDS llevado a cabo en los cristales de granate de la fase progradada de alteración. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde. 63*

*Figura IV.19. Diagrama ternario composicional de granates para discriminación de tipo de skarn. Nótese que los puntos de los granates de Vacas caen en el campo de los depósitos de Zn y Cu. Modificado de Meinert, 1983. 64*

*Figura IV.20. A) Inclusiones fluidas en esfalerita de la zona profunda. B) Inclusiones fluidas monofásicas y bifásicas en esfalerita de la zona profunda con grados de relleno muy variables. 65*

*Figura IV.21. Gráfico de salinidad vs temperatura de homogenización de la muestra BX156C2. 66*

*Figura IV.22. A y B) Inclusiones fluidas en calcita primarias y pseudosecundarias asociadas a la mineralización en la zona media del yacimiento Vacas. 66*

*Figura IV.23. A) Inclusiones fluidas en calcita primarias y pseudosecundarias asociadas a la mineralización en la zona superior del yacimiento Vacas. B) Inclusiones fluidas primarias en calcita asociada a la mineralización en la zona superior del yacimiento Vacas. Nótese el grado de relleno diferente, sugiriendo un proceso de ebullición. 67*

*Figura IV.24. Histograma acumulativo de Th y Salinidad del yacimiento Vacas. 68*

*Figura IV.25. Resultados de microtermometría del yacimiento Vacas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes. 69*

*Figura IV.26. Inclusiones fluidas monofásicas y bifásicas en las muestras de Quebradillas. A) Inclusiones en cuarzo presentando distintos grados de relleno en plano vertical. B) Inclusiones fluidas en calcita. 70*

*Figura IV.27. Histograma acumulativo de Th y Salinidad del yacimiento Quebradillas. 70*

*Figura IV.28. Resultados de microtermometría del yacimiento Quebradillas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes. 71*

*Figura IV.29. Evolución y rangos de temperatura-salinidad de los yacimientos Vacas y Quebradillas. 72*

*Figura V.1. Yacimientos minerales de la Época Cretácico-Paleoceno sobre el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, modificado de (Camprubí, 2013). 73*

*Figura V.2. Mapa geológico de la Unidad Minera La Parrilla mostrando como litologías principales, cuerpos intrusivos, secuencias de calizas - lutitas y conglomerados. 74*

*Figura V.3. Modelo geológico de los yacimientos Vacas y Quebradillas. 75*

*Figura V.4. Zonación mineralógica, de temperatura y de salinidad de depósitos de tipo skarn proximal, medio y distal. Tomado de (Meinert, 1992). 78*

*Figura V.5. Zonación mineral e isothermas en el yacimiento mineral Vacas. 79*

*Figura V.6. Zonación mineral de sulfuros y salinidad en el yacimiento mineral Vacas. 80*

*Figura V.7. Resultados de microtermometría del yacimiento y Quebradillas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes. 81*

*Figura V.8. Modelo general y zonación mineral de un yacimiento hidrotermal Kouzmanov & Pokrovski (2012). 82*

*Figura V.9. Modelo de zonación mineral y de temperaturas en un yacimiento mineral. Tomado de (Cooke, 2019). 83*

## **Índice de Tablas**

*Tabla IV.1. Relación mineralógica de minas Vacas y Quebradillas. 52*

*Tabla IV.2. Análisis de química mineral EDS de bandas de granate zonado del yacimiento Vacas. 64*

*Tabla IV.3. Tabla resumen de los datos obtenidos en el estudio de microtermometría en los yacimientos Vacas y Quebradillas. 67*

*Tabla V.1. Tabla comparativa yacimiento Vacas y Quebradillas. 84*

## Resumen

Mexico is the main producer of silver in the world due to its great variety of mineral deposits of epithermal vein type and skarns, some of them are considered world class deposits. The La Parrilla mining unit is located in the state of Durango, being one of the deposits for its production of the most important skarn type Pb-Zn-Ag. The objective of the present investigation is to demonstrate the processes that originated the *Vacas* silver deposit, as well as its relationship with the emplacement of the *Quebradillas* mineralized body to help in the future exploration of similar bodies. The methodologies used for the study of mineralized bodies include petrography, electron microscopy, infrared spectroscopy and microthermometry of fluid inclusions. The mineral association in bodies is comparable and can be grouped into prograde and retrograde. The prograde mineral group consists of garnet (Grossular-Andradite), diopside, quartz, calcite and pyrite, for the retrograde group tremolite-actinolite, quartz, calcite, epidote, chlorite, illite-smectite, kaolinite, pyrite, galena, galena argentiferous, sphalerite, chalcopyrite, copper gray rich in silver and sulfosalts. The mineralized bodies have comparable mineral associations, emplacement temperatures and paragenesis, however, the mineralization processes show a boiling process for *Vacas*, which hosts greater silver mineralization. The advance in the results will be able to verify more particularities in the mineralized bodies and to complement the understanding of the location of *Vacas* and *Quebradillas*.

México es el principal productor de plata en el mundo debido a su gran variedad de depósitos minerales de vetas epitermales y skarns, algunos de ellos son considerados depósitos de clase mundial. La unidad minera La Parrilla está ubicada en el estado de Durango, siendo uno de los depósitos para la producción del skarn más importante tipo Pb-Zn-Ag. El objetivo de la presente investigación es demostrar los procesos que originaron el depósito de plata de *Vacas*, así como su relación con el emplazamiento del cuerpo mineralizado de *Quebradillas* para ayudar en la exploración futura de cuerpos similares. Las metodologías utilizadas para el estudio de cuerpos mineralizados incluyen petrografía, microscopía electrónica, espectroscopía infrarroja y microtermometría de inclusiones fluidas. Las muestras fueron de superficie, subterráneas y núcleos de perforación. La asociación mineral en los cuerpos es comparable y puede agruparse en prograda y retrógrada. El grupo mineral progrado consiste en granate (Grossrad-Andradita), diópsido, cuarzo, calcita y pirita, para el grupo retrógrado tremolita-actinolita, cuarzo, calcita, epidota, clorita, illita-esmectita, caolinita, pirita, galena, galena argentífera, esfalerita, calcopirita, cobres grises ricos en plata y sulfosales. Los cuerpos mineralizados tienen asociaciones minerales comparables, temperaturas de emplazamiento y paragénesis, sin embargo, los procesos de mineralización cuentan con proceso de boiling para *Vacas*, que alberga una mayor mineralización de plata. El avance en los resultados podrá verificar más particularidades en los cuerpos mineralizados y complementar la comprensión de la ubicación de *Vacas* y *Quebradillas*.

## I. Introducción

La zona centro y centro-este de la República Mexicana es reconocida por su abundancia de yacimientos minerales metálicos hidrotermales de gran importancia económica, esta distribución comprende yacimiento en la SMO, SMO<sub>r</sub>, y mesa Central, yacimientos históricos por sus niveles de producción, (e.g. los yacimientos eocénicos tipo skarn de Zn-Pb-Cu-Ag más grandes del país como Zimapán, Mapimí, Charcas, Concepción del Oro, y San Martín, al igual que yacimientos tipo skarn con contenido económico de oro como Peñasquito en Mazapil, (Camprubí, 2009).

En el estado de Durango, el cual es uno de los principales estados productores de plata del país con poco más de 67,000 kilos producidos hasta agosto del presente año (INEGI, 2019), se encuentra una serie de cuerpos mineralizados con plata con una ley promedio de 113-145 g/T (First Majestic, 2019), reconocidos coloquialmente como “La Parrilla”, actualmente en explotación en primera instancia por la empresa minera Grupo México, y actualmente por la compañía First Majestic Silver. Entre los cuerpos mineralizados en La Parrilla, los más importantes por sus leyes y volumen son *Vacas* y *Quebradillas*. A pesar de ello, tanto su historia genética, como la concreta relación de emplazamiento de estos yacimientos ubicados muy próximos entre sí, no ha sido estudiada detalladamente con fines de aplicación a exploración de áreas similares en La Parrilla.

### I.1. Planteamiento del problema

La exploración minera se utiliza tanto en la unidad minera *La Parrilla* como en muchos otros proyectos mineros con el fin de encontrar o expandir las reservas minerales. Actualmente, el proceso de localización de reservas aumenta su complejidad de manera progresiva debido a que los indicios geológicos utilizados en los métodos tradicionales de exploración han tenido poco desarrollo, y han perdido efectividad en lo que respecta a la localización de yacimientos minerales menos superficiales. Como consecuencia, se pronostica un aumento progresivo en los costos de exploración, así como una reducción significativa de la probabilidad de éxito en exploraciones futuras, haciendo cada vez más necesario el desarrollo de métodos más sofisticados de exploración combinando nuevas técnicas con métodos tradicionales. Debido a esto se puede derivar en la suspensión de actividades o el cierre de unidades mineras en el estado de Durango y, como una de las principales actividades económicas de la región (INEGI, 2019), esto repercutiría directamente en la sociedad al desacelerar el crecimiento económico de la región y vulnerando la principal fuente de ingresos de las familias de las comunidades aledañas.

En los cuerpos mineralizados *Vacas* y *Quebradillas* subsiste el problema de la continuidad y la localización de nuevas estructuras mineralizadas como parte del desarrollo minero, así como la localización de cuerpos de características similares en otras zonas del distrito minero para su explotación, las guías de exploración actualmente empleadas se pueden mejorar mediante el correcto estudio e interpretación de las características genéticas de estos yacimientos.

## 1.2. Objetivo

El centro de este proyecto consiste en elaborar una guía de exploración minera que facilite el reconocimiento espacial y paragenético de un yacimiento tipo Skarn, así como proporcionar indicios perceptibles que indiquen la factibilidad de localizar un yacimiento con presencia de minerales de mena polimetálicos y de plata similar a los existentes.

### 1.2.1 Objetivos particulares

Determinar el tipo de estructuras mineralizadas basado en su distribución espacial y su relación con roca caja y estructuras geológicas.

Identificar la asociación mineral y textural de los cuerpos mineralizados mediante petrografía de luz transmitida y luz reflejada.

Identificar y caracterizar la mena, especialmente las fases de plata utilizando minerografía y microscopía electrónica de barrido con análisis de química semicuantitativa.

Asociar los tipos de alteraciones presentes y sus características mineralógicas con su proximidad a estructuras mineralizadas.

Determinar mediante el estudio de microtermometría de inclusiones fluidas, la salinidad y temperatura de formación de minerales observados en la zona mineralizada profunda, media y superior del yacimiento *Vacas*, así como en la zona de alteración.

Correlacionar los procesos evidenciados en los yacimientos minerales *Quebradillas* y *Vacas* a través del estudio microtermométrico.

## 1.3 Hipótesis

El yacimiento *Vacas* es un yacimiento hidrotermal de tipo Skarn emplazado a través de un plano de estratificación o zona de debilidad (e.g. falla o fractura) generada debido a uno o varios eventos de compresión y extensión relacionado con el *Basin and Range* mexicano con posible continuidad a profundidad evidenciada por mineralización en el barreno VC-45. Se teoriza que el origen de la mineralización se debe a la presencia de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica en el área del distrito minero La Parrilla. La cercanía del cuerpo mineral *Quebradillas* con el cuerpo *Vacas*, y la similitud mineralógica de los cuerpos intrusivos encontrados en ambas minas evidencia la posibilidad de que los eventos que dieron origen a la mineralización en ambas minas sean correlacionables o procedan de una misma fuente magmática. Dicho lo anterior se puede generar a través la interpretación de ambos yacimientos una guía de características mineralógicas y alteración hidrotermal producida por la intrusión de ambos cuerpos que facilite la localización de yacimientos similares en el área del distrito minero La Parrilla.

#### **I.4 Antecedentes**

En el distrito minero de *La Parrilla* se han realizado estudios geológicos principalmente dirigidos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) para la elaboración de proyectos como la carta geológico minera San José de La Parrilla 1:50000 (SGM, 2001) y la elaboración de la carta geoquímica por zinc 1:50000 (SGM, 1988). El Servicio Geológico Mexicano cuenta con la publicación del reporte del “Panorama Minero del estado de Durango 2018” el cual integra la información de la infraestructura geológica y minera con la que cuenta la entidad. Estas publicaciones tienen como objetivo dar a conocer el contexto de la actividad minera en la actualidad, en estos documentos se presenta la distribución de los distintos distritos mineros incluyendo a La Parrilla. También se cuenta con un total de 16 informes técnicos del municipio de Nombre de Dios Durango, municipio en el cual se encuentra la unidad minera, realizados entre 1971 y 2008, con descripciones geológicas generales de la zona. Los informes presentados por el SGM reportan el avance en los proyectos de exploración, barrenación y características mineralógicas en distintos yacimientos de la unidad minera La Parrilla.

En el año de 1928 se terminó la primera carta geológico-minera del Estado de Durango, bajo el auspicio del Instituto Geológico de México, dependiente en ese entonces de la Secretaría de Fomento. Dicha carta, compilada y editada por la Oficina de Geología Minera del Instituto, fue dada a conocer en la VI Conferencia Internacional Americana, celebrada en La Habana, Cuba.

El Consejo de Recursos Naturales No Renovables (1956-1975), dependiente de la entonces Secretaria de Patrimonio y Fomento Industrial, realizó estudios regionales de prospección minera en el Estado, principalmente en la región de Las Quebradas elaborándose planos geológicos de varios distritos mineros. A partir del año de 1976 a la fecha el Consejo de Recursos Minerales, ha continuado con estos estudios geológicos de las principales regiones mineras del Estado, habiendo publicado en 1980 en convenio con el gobierno estatal la Carta Geológica y Metalogenética de Durango en escala 1:500 000 (Carrasco M.L. 1980).

El Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, publicó una serie de Cartas Geológicas de México en escala 1:100 000, en las cuales se da a conocer la geología regional de la porción noreste y este del Estado, mediante las cartas: Cuencamé, Nazas, Torren, Pedriceña, San Pedro del Gallo y San Juan de Guadalupe (1962-1968). Este Instituto además ha publicado algunos artículos relacionados con la geología de la porción norte y noreste del estado.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), ha publicado cartas litológicas en las escalas 1:50 000 las cuales cubren toda la porción norte, noreste, este y sur del Estado; así mismo ha editado en cartas a escala 1:250 000 las porciones centro, norte, noreste, oeste y sur del mismo. El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), ha aportado valiosa información geológica entre la que se destaca la determinación por primera vez en el Estado de dos localidades del Paleozoico en las inmediaciones de la población de Santa María del Oro. (Pacheco G., Castro M. y Gómez A. 1984). Pemex, por su parte ha contribuido con información geológica regional principalmente de la porción norte y noreste del Estado, definiendo parte de su estratigrafía, así como la cabalgadura de San Felipe en la región de Mapimí (Eguiluz de Antuñano, 1988). Diversos autores extranjeros han publicado trabajos geológicos de algunas porciones de la Sierra Madre Occidental, así como de diversos distritos mineros.

En 1858, el ingeniero alemán Federico Waidner publicó el primer estudio sobre el yacimiento de hierro Cerro de Mercado. El directorio oficial minero de México, da a conocer las compañías que trabajaban a fines del siglo pasado y principios del presente, haciendo referencia a los directivos, ubicación, infraestructura, leyes y obras mineras. La carta geológico-minera de M. Santillán 1936, describe los principales distritos mineros que operaban en el siglo pasado y principios de éste, dando a conocer en algunos de ellos su historia minera, su ubicación, su geología, sus minerales, así como su origen y leyes de éstos; destacando como bibliografía los artículos de El Minero Mexicano, artículos de compañías extranjeras, así como del Instituto Geológico Mexicano (1811-1935).

En 2007 se realizó un estudio de la geología general de la unidad minera *La Parrilla* por la empresa First Majestic Plata. A finales de 1980 se hizo un estudio de polarización inducida a detalle en el área de las minas El Recuerdo, Quebradilla y Vacas, complementando un primer estudio que se tenía por el método Turam, con resultados positivos en diferentes puntos (First Majestic, 2007). A través estudios en el área norte de los fundos mineros realizados mediante el método de Resistividad Aparente, Polarización Inducida y Magnetometría en 1999, se localizaron tres sitios de importancia como zonas anómalas; Cerro del Venado, Cerro del Conejo y Porción Oriente del Cerro de la Cruz (First Majestic, 2007).

De acuerdo al reporte presentado por First Majestic Silver, la mina *Quebradillas* ha representado una de las principales fuentes de recursos de la unidad La Parrilla, es un yacimiento compuesto por diversos cuerpos mineralizados que presentan significativos contenidos de plata, un ejemplo de los cuerpos mineralizados explotados es la veta N-S orientada a N45°W en promedio, con un echado de 71° al noroeste, esta veta tiene una extensión vertical de 95 m, y su espesor varía de 0.25 a 5 m. La estructura es una veta de falla alojada por la Formación Indidura y un stock de granodiorita, con cuerpos de reemplazamiento desarrollados en el bloque de piso y bloque de

techo. La mineralogía general presente en las vetas consiste en galena, esfalerita, acantita, freibergita, plata nativa, pirita, pirrotita, arsenopirita, cuarzo, calcita y fluorita (First Majestic, 2019). Otros cuerpos presentes en la mina *Quebradillas*, con una composición mineralógica similar a la anteriormente descrita, presentan una orientación variante con un rango que oscila desde N80°W hasta N88°E (First Majestic, 2019).

La compañía describe la mina *Vacas* como una veta de remplazamiento con orientación N17°W en promedio, con echado de 58° hacia el noreste. La zona mineralizada tiene una extensión vertical de 400 m y un espesor de hasta 18 m. La mina *Vacas* consistió en la explotación de un solo cuerpo mineralizado y comenzó su producción en el segundo semestre de 2013 a una tasa de 300 tpd. La mina produjo mineral de sulfuro con altos grados de plata de 200 a 240 g/t., pero las reservas minerales conocidas se agotaron en diciembre de 2016. El cuerpo de reemplazo se describe alojado en la Formación Indidura y concordante con una zona de falla que corre a lo largo de los planos de estratificación. La mineralogía de la veta de reemplazo descrita consiste en galena, esfalerita, acantita, freibergita, jamesonita, plata nativa, pirita, pirrotita, arsenopirita, cuarzo, calcita y fluorita (First Majestic, 2019).

### **I.5 Localización de zona de estudio**

El distrito minero La Parrilla se encuentra a 70 km al sureste de la ciudad de Durango en el municipio de San José de la Parrilla, Nombre de Dios (Figura I.1), en la zona de transición de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central. Para llegar a las instalaciones, se toma un entronque que se localiza en el km 13 de la carretera federal No. 45 en la ruta que va de las ciudades de Vicente Guerrero a Nombre de Dios, y de ahí por una carretera pavimentada donde a una distancia de 4 km se llega al poblado de San José de La Parrilla. En el distrito minero se encuentran dos cuerpos mineralizados que conforman parte de la unidad minera nombrados *Vacas* y *Quebradillas*, los cuales se encuentran en las coordenadas 23°43'9.79"N, 104° 5'30.32"O y 23°43'20.11"N, 104° 6'8.38"O respectivamente.



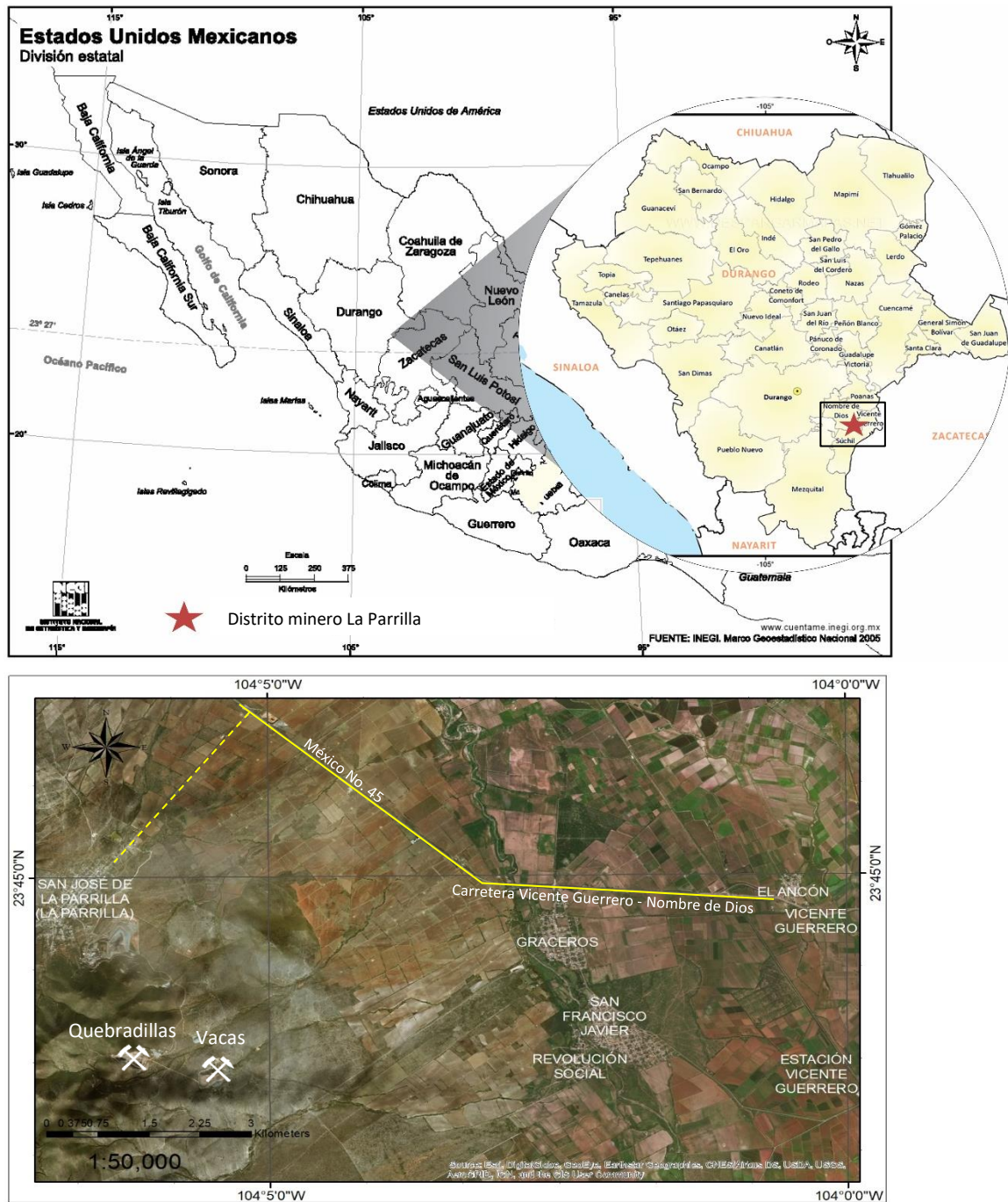


Figura I.1 Ubicación de los cuerpos Vacas y Quebradillas en la unidad minera La Parrilla en el estado de Durango, México.

## II. Marco Geológico

### II. 1 Marco Geológico Regional

Con el nombre de Sierra Madre Occidental (SMO) se define tradicionalmente a la provincia fisiográfica y geológica del occidente de México, donde se encuentra el distrito minero La Parrilla, que cuenta con una extensión de aproximadamente 1200 km de largo por 200-400 km de ancho, la cual se extiende desde la frontera con los Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana, en el centro de México y limitada al oeste por el Golfo de California y al este por el Altiplano Central (o Mesa Central) mexicano (Figura II.1) (Ferrari et al., 2005).

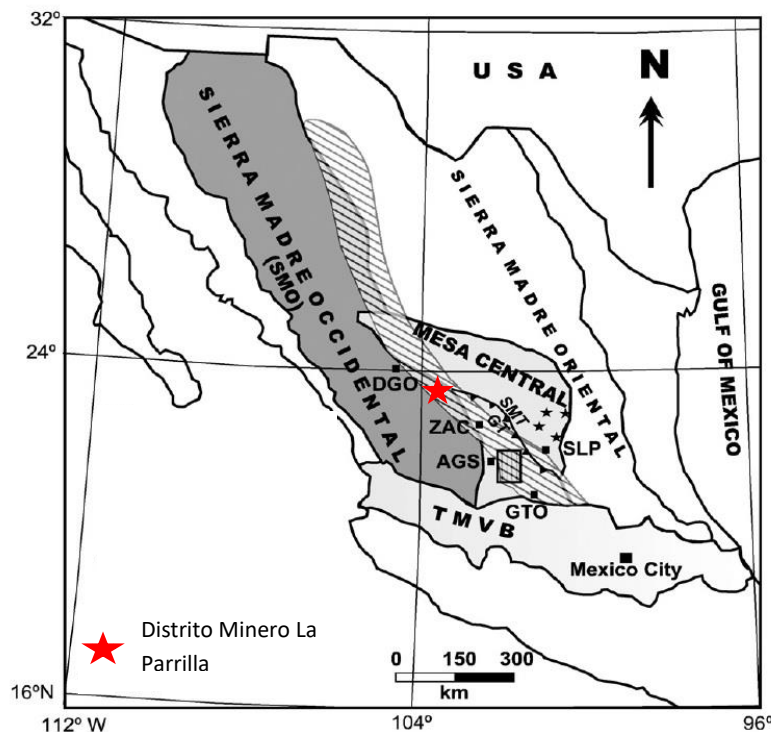


Figura II.1 Ubicación de la unidad minera La Parrilla en la zona colindante de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central. Modificado de: (Aguillón-Robles et al., 2009).

Las rocas en la parte inferior de la Sierra Madre Occidental son batolitos del Cretácico tardío al terciario temprano, calco-alcalinos, granodioríticos a graníticos que intrusionan rocas volcanosedimentarias voluminosas contemporáneas (Henry y Fredrikson, 1987; Aguirre-Díaz y McDowell, 1993). Las rocas volcanosedimentarias fueron nombradas Supergrupo Volcánico Inferior por McDowell y Keizer (1977) y representan la actividad magmática que tuvo lugar durante la orogenia de Laramide (Staude & Barton, 2001). Sin embargo, los 1.000 m superiores de la sucesión de la Sierra Madre Occidental consisten en ignimbritas silíceas y, en menor medida,

domos riolíticos y menores lavas basálticas a andesíticas (el Supergrupo Volcánico Superior de McDowell y Keizer, 1977). Estas rocas marcan el llamado *ignimbrite flare up* de la Sierra Madre Occidental, y se han emplazado a principios del Oligoceno a lo largo de toda la Sierra Madre Occidental y a principios del Mioceno en el sur de la Sierra Madre Occidental (Camprubí et al., 2003).

La provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental es la acumulación más grande de ignimbritas silíceas hasta ahora conocida en la Tierra (Aranda-Gómez et al., 2000). El magmatismo silíceo que originó la SMO es un fenómeno poco usual en el registro geológico, el cual debió originarse a condiciones tectónicas muy particulares. Este tipo de magmatismo contribuye fuertemente a modificar la estructura reológica y la composición de la litósfera continental (Ferrari et al., 2005), así como en generar yacimientos minerales (Camprubí & Ferrari, 2003).

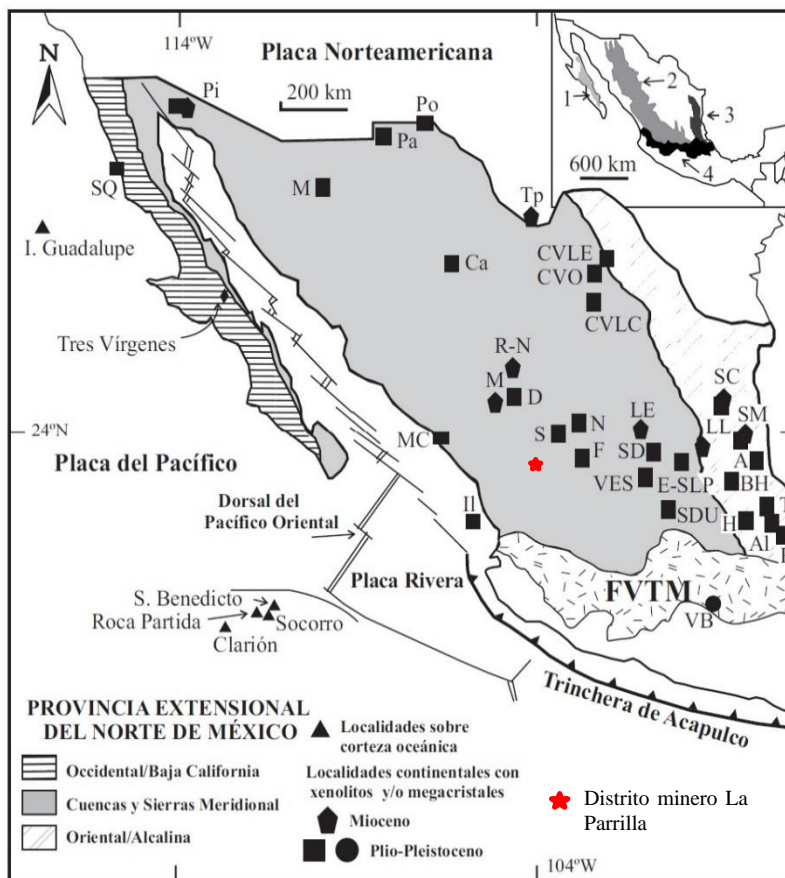


Figura II.2. Localización de la provincia extensional del norte de México (PENM), campos volcánicos del Neógeno y Cuaternario distribidos por toda la región continental al norte de la FVTM, y las cuatro provincias volcánicas propuestas por Demant y Robin (1975). Clave: 1=Californiana, 2=Sierra Madre Occidental, 3=Oriental y 4=Faja Volcánica Transmexicana. Modificado de (Aranda-Gómez et al., 2005).

La SMO durante el Mioceno, antes de la apertura del Golfo de California y del inicio de la actividad de la FVTM que la disgregaron y sepultaron parcialmente, debió ser considerablemente más extensa y estar unida a la provincia volcánica de Baja California. Las regiones que bordean al núcleo actual (sin una deformación por extensión muy manifiesta) de la SMO son o fueron parte de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras (CyS), también conocido como *Basin and Range*, un área vasta de la Cordillera Norteamericana que ha experimentado tectónica distensiva en el Cenozoico medio y tardío. Actualmente CyS abarca en forma continua desde el suroeste de Canadá hasta el límite de la Mesa Central y la FVTM (Figura II.2) (Aranda-Gómez et al., 2000).

La SMO se eleva a casi 3 km de altura en su zona central, donde las ignimbritas son de al menos un kilómetro de espesor y se presenta el mayor espesor cortical de México de ~55 km, esto debido a una corteza inferior fuertemente intrusionada por magmas máficos (Bryan & Ferrari, 2013). En todo el núcleo elevado de la SMO las ignimbritas están dispuestas horizontalmente, mientras que en los flancos se presentan falladas e inclinadas (Figura II.3) (Ferrari et al., 2005).

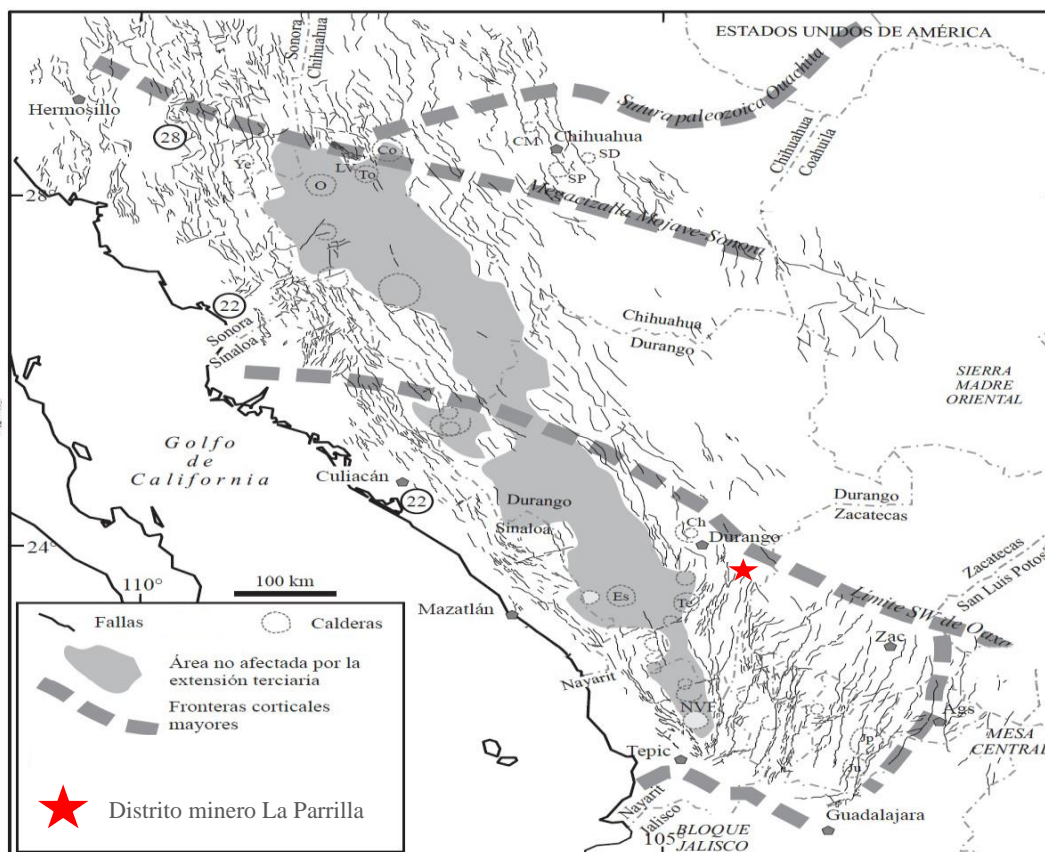


Figura II.3. Núcleo de la SMO no deformado y flancos con presencia de fallamiento. Se observan los límites de fallas y su orientación, así como la ubicación del distrito minero La Parrilla. Modificado de (Ferrari et al., 2005).

Las ignimbritas que componen la SMO son de composición riolítica y presentan edades de entre 38 Ma y 18 Ma, con un volumen total de alrededor de 400,000 km<sup>3</sup> (Ferrari & Bryan, 2013). La SMO fue formada por dos pulsos principales de ignimbritas, uno en el Oligoceno el cual representa por lo menos tres cuartas partes del volumen total, mientras que el resto corresponde a un pulso del mioceno (Ferrari & Bryan, 2013). La ignimbrita riolítica representa del 85% al 90% del volumen total, con el volumen restante de lavas/domos riolíticos y lavas basálticas (Figura II.4) (Ferrari & Bryan, 2013).

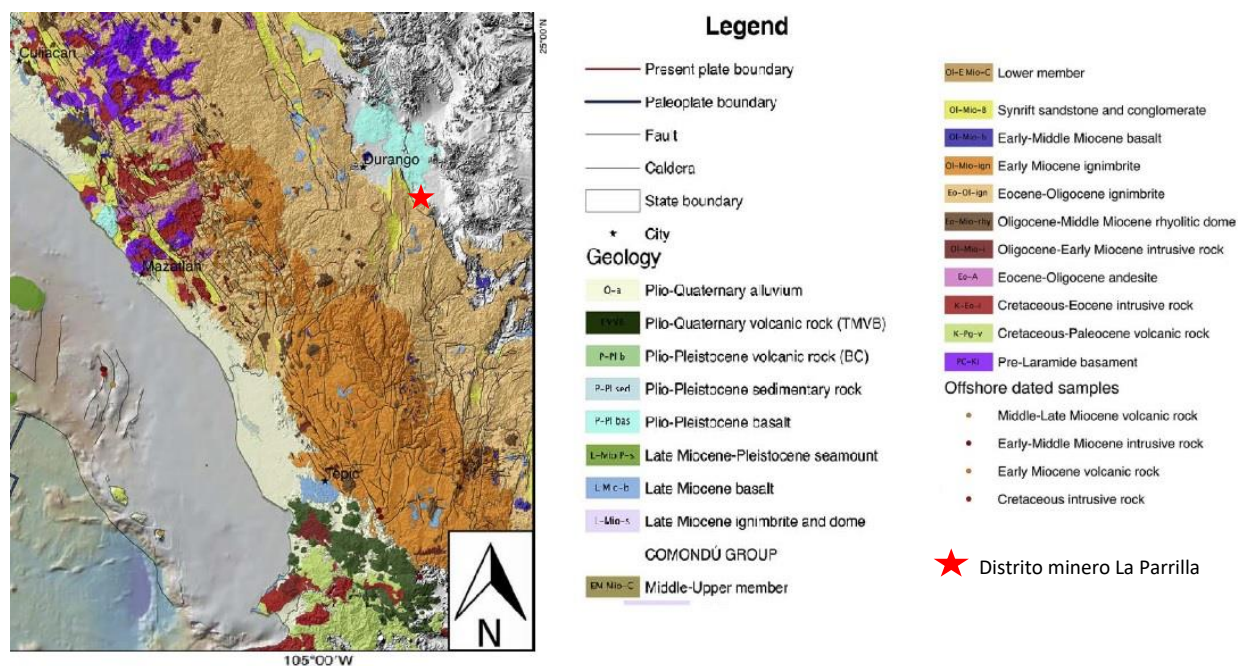


Figura II.4. Geología Regional del área de estudio. Modificado de: (Ferrari et al., 2018).

Durante el Oligoceno, el volcanismo félsico fue intenso y generalizado en SMO en el oeste de México. Las rocas félsicas del SMO se han clasificado por Aguillón Robles (2009) dentro de la suite calcialcalina. La mayor parte de este volcanismo fue explosivo y se lo conoce como “Ignimbrite flare-up” (Aguillón Robles et al., 2009). Sin embargo, parte de este volcanismo del Paleógeno - Neógeno fue efusivo, en particular, en el sur de la Mesa Central, donde casi todo el volumen del magmatismo félsico del oligoceno medio está representado por domos de lava félsicos y solo alrededor de una quinta parte por ignimbrita, observable en el área de La Parrilla. Algunos de estos domos están relacionados con la mineralización hidrotermal que formó importantes depósitos de metales preciosos en toda la SMO (Burt et al., 1982; Huspeni et al., 1984; Scheubel et al., 1988; Webster et al., 1996 en Aguillón-Robles et al., 2009). En el sector de la SMO donde se encuentra el distrito minero La Parrilla, existen debajo de las secuencias anteriormente mencionadas extensas secuencias de rocas marinas que cubren las rocas cristalinas proterozoicas del norte y noroeste de

México y estas secuencias tienen una continuidad temporal desde la parte superior del Proterozoico a través de todo el Paleozoico (Stewart y Poole 2002), finalmente se tiene la existencia de un basamento pre-Cenozoico no volcánico (Gastil et al., 1978; Ferrari et al., 2000).

### II.1.1. Cretácico - Paleoceno

En el área del estado de Durango durante el fin del Cretácico, el magmatismo estuvo dominado por la orogenia Laramide en Norteamérica, y como resultado la actividad de esta orogenia creó un arco volcánico que produjo una gran cantidad de rocas plutónicas y volcánicas, que fueron agrupadas en el llamado Complejo Volcánico Inferior (CVI) (McDowell & Keizer 1977). El complejo está constituido por grandes batolitos graníticos compuestos, que varían en composición desde diorita y cuarzodiorita a granito alcalino (Roldán-Quintana 1991; Valencia-Moreno et al., 2001 en Ferrari et al., 2005) y que afloran en el estado de Durango.

Aunque la cubierta ignimbrítica es la característica más obvia de la SMO el CVI es igualmente importante dado que este conjunto, constituido por rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico-Paleógeno similares en edad y composición a los batolitos peninsulares y al bloque Jalisco, constituye la roca encajonante de depósitos de plata y cobre (Ferrari et al., 2005).

### II.1.2. Eoceno

En la parte central de la SMO donde se encuentra el distrito minero La Parrilla, el mayor espesor de rocas eocénicas observado se encuentra en el límite Sinaloa-Durango (Henry & Fredikson, 1987), donde el río Piaxtla ha disectado un profundo cañón que expone por lo menos 1 500 m de la secuencia eocénica con importante mineralización de oro y plata (Horner & Enríquez, 1999;).

La secuencia, que se encuentra fuertemente basculada al ENE, consiste de coladas riolíticas y andesíticas, y cuerpos subvolcánicos de composición diorítica que han arrojado edades de 39.9 a 36.6 Ma (Enríquez & Rivera, 2001). Esta secuencia se encuentra separada de una serie ignimbrítica del Mioceno inferior por una secuencia fluvio-lacustre de conglomerados, areniscas y lutitas, al sur de la ciudad de Durango, en el graben de Mezquital, ubicado al suroeste del distrito minero La Parrilla (McDowell & Keitzer, 1977).

### II.1.3. Pulsos Oligoceno-Plioceno

La sucesión ignimbrítica con espesores de hasta más de 1 000 metros que cubre gran parte del occidente de México conocida también como el Supergrupo Volcánico Superior (SVS), y que comprende el área de estudio, fue emplazada de manera discordante sobre las rocas del CVI (McDowell & Kaizer, 1977) y del arco Eocénico. El SVS está compuesto por una potente secuencia de tobas de flujos piroclásticos, tobas de caída y lavas de composición silícica a intermedia, y en menor proporción, flujos de composición máfica particularmente expuestos en los bordes de la provincia volcánica (McDowell & Clabaugh, 1979; Cochemé & Demant, 1991 en Ferrari et al., 2005).

Se presenta volcanismo postignimbrítico, después del pulso ignimbrítico (definido como *ignimbrite flare up* por McDowell y Clabaugh, 1979), y el magmatismo se vuelve más heterogéneo y disperso en la SMO. Entre las rocas máficas se pueden distinguir un grupo de composición basáltico-andesítica emplazado poco tiempo después del pulso ignimbrítico, y un grupo de composición más máfica y alcalina generalmente posterior al término de la subducción (Ferrari et al., 2005). En el área suroeste del distrito minero La Parrilla se observa este grupo basáltico suprayaciendo al Supergrupo Volcánico Superior (SVS) (SGM, 2001), estas coladas basálticas fechadas entre 30 y 29 Ma cubren la secuencia ignimbrítica de Durango y, por su composición y edad, estas rocas se asocian a las andesitas Basálticas del Sur de la Cordillera (Southern Cordillera Basaltic Andesite o SCORBA) (Ferrari et al., 2005).

#### *II.1.3.1. Volcanismo alcalino y peralcalino*

En la zona del distrito minero La Parrilla el volcanismo alcalino consta esencialmente de basaltos alcalinos emplazados como pequeños derrames fisúrales hasta campos monogenéticos de dimensiones mayores. Derrames de basalto alcalino se presentan hacia el norte en el municipio de Nombre de Dios. En general estas rocas máficas se encuentran en la periferia de la SMO, tanto en su límite con la Mesa Central, como a la orilla del Golfo de California y se asocian a tres episodios extensionales principales del Mioceno temprano (24-22 Ma), el Mioceno tardío (13-11 Ma) y el Plioceno-Cuaternario (4-0 Ma) (Henry & Aranda-Gómez, 2000 en Ferrari et al., 2005).

#### *II.1.4. Límite Sierra Madre Occidental - Mesa Central*

Los yacimientos en La Parrilla se encuentran en la transición de las provincias fisiográficas de La Sierra Madre Occidental y La Mesa Central. La Mesa Central concentra varios campos volcánicos oligocénicos, con varios domos volcánicos y derrames de lava traquidacíticos a riolíticos, que cubren a un basamento formado por secuencias volcánicas de los terrenos Guerrero y Sierra Madre (Campa & Coney, 1983). El Terreno Guerrero es uno de los mayores terrenos tectonoestratigráficos acrecentados de México, y se acrecionó al cratón de Norte América en el Cretácico Tardío posterior al Cenomaniano (Centeno-García et al., 1993 en Aguillón et al., 2009).

La secuencia del Terreno Guerrero incluye complejos de diques de andesita, arenisca, lutita y lavas máficas con edades desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Temprano, mientras que el terreno de la Sierra Madre consiste en una secuencia marina (calizas, areniscas y lutitas) mesozoica plegada, formada principalmente por carbonatos, que se deposita en la Cuenca Mesozoica de México Central y en la plataforma submarina Valles-San Luis Potosí (Carrillo-Bravo, 1971; López-Doncel, 2003 en Aguillón et al., 2009). La mayoría de las lavas félsicas del Oligoceno en la Mesa Central cubren rocas más antiguas del SMO que pertenecen al Supergrupo Volcánico Superior (SVS) (Lee-Moreno, 1972; McDowell and Clabaugh, 1979; Cameron et al., 1980; Huspeni et al., 1984; Aguirre-Díaz & McDowell, 1993; Aguirre-Díaz et al., 2008 en Aguillón et al., 2009).

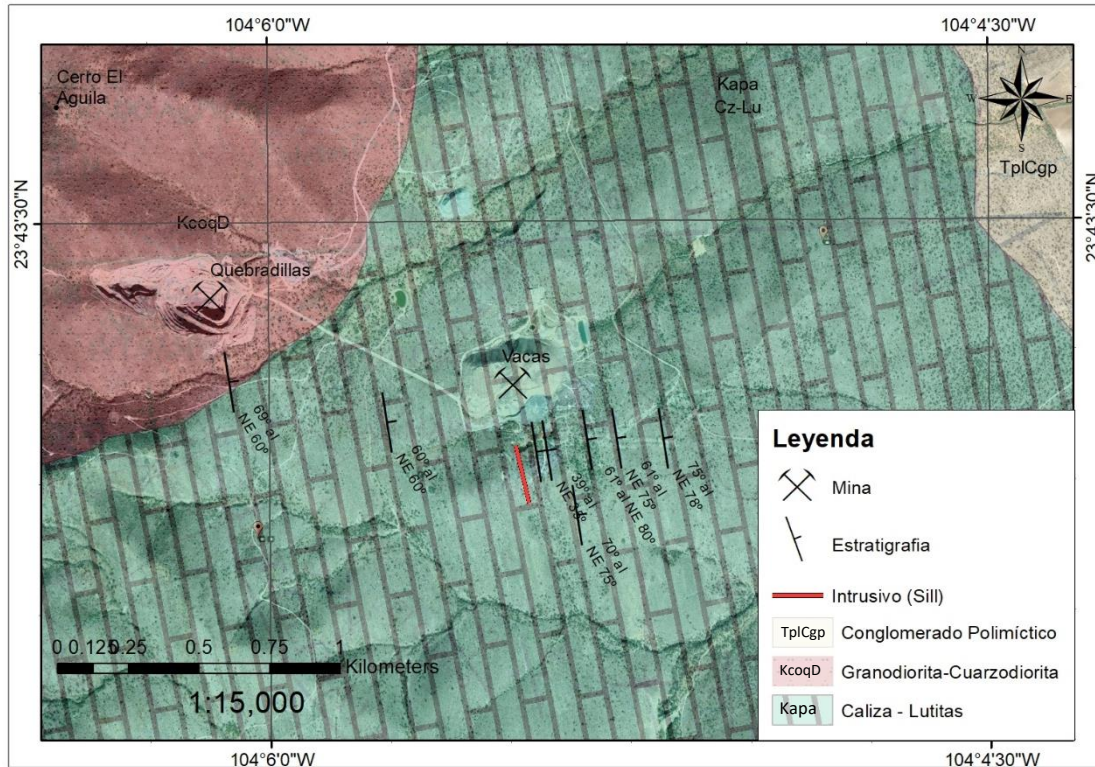


Figura II.5. Mapa geológico de la Unidad Minera La Parrilla mostrando como litologías principales, cuerpos intrusivos, secuencias de calizas - lutitas y conglomerados.

Tectono-estratigráficamente la zona de estudio se ubica en el contexto del Terreno Guerrero de acuerdo a la carta 1:50000 San José de la Parrilla (SGM,2001), se presenta una secuencia de calizas wackstone, mudstone y lutitas, las secuencias presentan metamorfismo de contacto por la intrusión de cuerpos de composición cuarzodiorítica de edad Coniaciano, cubriendo discordantemente a la caliza se tiene un conglomerado polimíctico bien consolidado y mal clasificado del Eoceno Tardío – Oligoceno (Figura II.5) (SGM, 2001).

Finalmente, en el Plioceno se tiene un conglomerado polimíctico (TplCgp) (Figura II.5) producto de la disgregación mecánica de las rocas preexistentes de la zona, y que cubre el área noreste del distrito minero La Parrilla con espesores de hasta 50 m, subsecuentemente un conglomerado polimíctico relleno de fosas con hasta 200 m del pleistoceno y sobre el río graseros, al noreste del distrito minero, se presentan materiales aluviales compuestos de arena, limo, arcilla y grava de edad Holoceno descritas por el SGM, 2001 y en la Monografía geológico-minera del estado de Durango (Cárdenas-Vargas et al., 1993).



### II.1.5. Tectónica Regional

La configuración geológica de México se puede esquematizar como una agrupación de terrenos tectonoestratigráficos acrecentados que incluyen una amplia variedad de series volcánicas asociadas a varios sistemas de tras arco a arco magmático Mesozoico (e.g., Centeno-García et al., 2008, Martini et al., 2013). El basamento subcontinental central sobre el que se realizó la acreción se denomina Oaxaquia y extiende el NNW-SSE de Coahuila a Oaxaca (Figura II.6) (Camprubí, 2013).

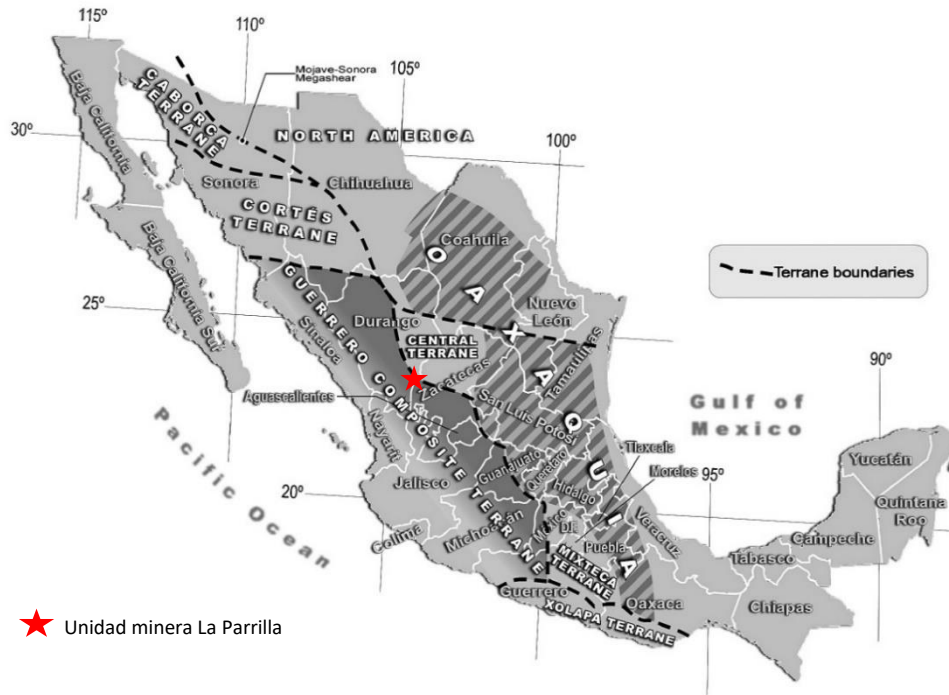


Figura II.6. Configuración geológica general de México basada en terrenos tectonoestratigráficos y la distribución del bloque subcontinental Oaxaquia, simplificado de (Centeno-García et al., 2008 tomado de Camprubí, 2013).

La Sierra Madre Occidental, que ocupa el tercer lugar en términos de volumen y el segundo en términos de flujo de magma entre las provincias ígneas más grandes del mundo (Bryan et al., 2007), está comprendida, en parte, dentro del Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero al igual que el distrito minero La Parrilla (Figura II.6) en su límite al este, este magmatismo excepcional, que se asocia con la progresión de las orogenias Sevier y Laramide, y la rápida subducción de la placa de Farallón, explica el rápido engrosamiento de la corteza en México durante el Cenozoico, mientras que la posible conexión entre dicho magmatismo y el predominio de la sulfuración intermedia sobre los depósitos de alta sulfuración sigue siendo un problema sin resolver, al menos en términos de la probable profundidad de emplazamiento de los respectivos intrusivos parentales (Camprubí, 2013).

El establecimiento de un régimen predominantemente extensivo dio origen a la provincia de *Basin and Range* después de la orogenia de Laramide, incluida la Gran Cuenca en Nevada, el Golfo de California, la extensión de la fase tardía de la grieta del Río Bravo y, posiblemente, la provincia alcalina del este de México, no detuvo los procesos de mineralización magmático-hidrotermal sino que los reorganizó, tanto geográfica como genéticamente (Camprubí, 2013).

El distrito minero La Parrilla se encuentra en el límite tectónico-estructural de la SMO y la MC formando parte del borde sur de la Mesa Central (el sistema de fallas regionales San Luis-Tepehuanes), que se extiende casi a lo largo de la sección noreste de la zona de sutura entre el terreno compuesto Guerrero y el Paleocóntinente mexicano. Los depósitos minerales del distrito minero La Parrilla se colocaron en esta sutura tras el cambio de los entornos tectonomagmáticos extensionales (relacionados al *basin and range*) a compresivos en el Cretácico Superior (Figura II.7) (Camprubí, 2013).

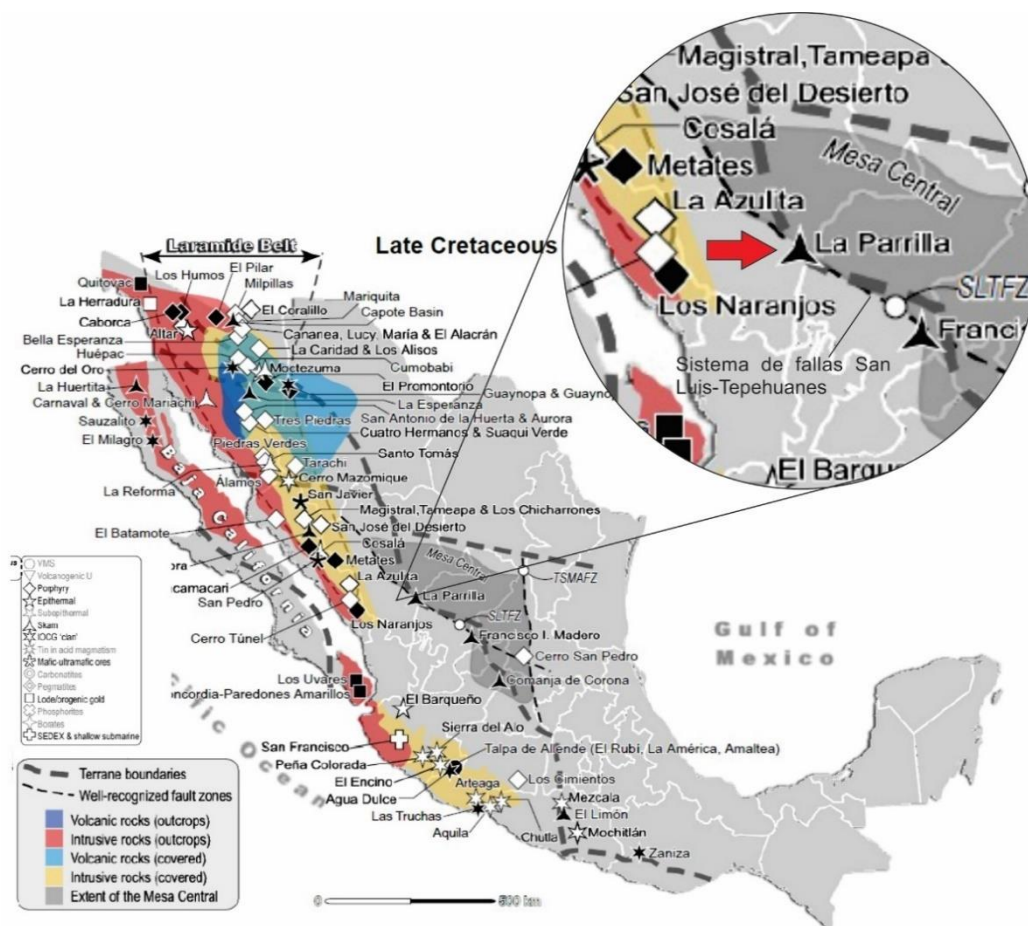


Figura II.7. Ubicación del distrito minero La Parrilla en el límite tectónico-estructural de la SMO y la MC sobre el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, modificado de (Camprubí, 2013).

### II.1.5.1. Tectónica pre-Oligoceno

En el borde oriental, en Durango, se han desarrollado fallas normales de alto ángulo que definen estructuras tipo *Basin and Range* similares a las que se encuentran en Chihuahua. La edad de la deformación extensional se remonta por lo menos al principio del Oligoceno y se caracteriza por un alargamiento general ENE-WSW (Figura II.8) (Ferrari et al., 2005).

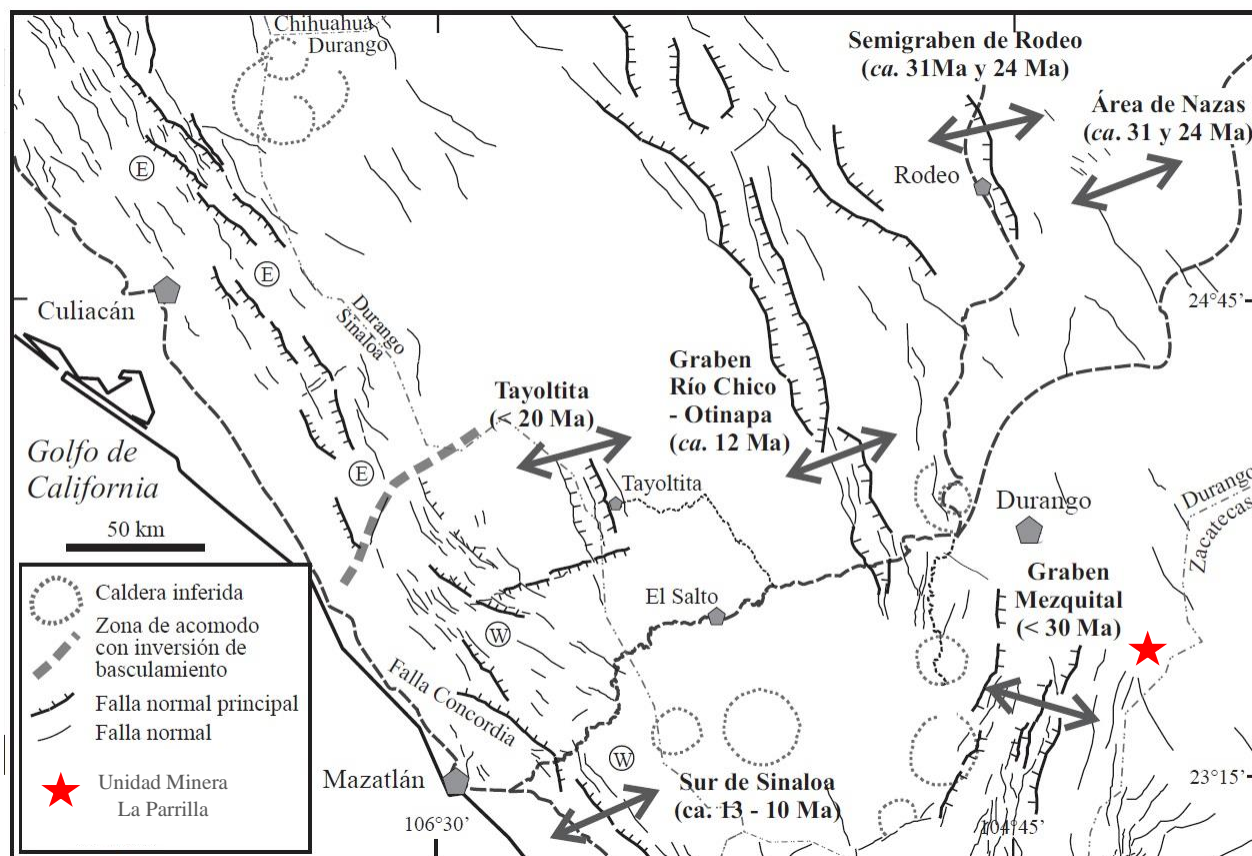


Figura II.8. Mapa tectónico de la parte central de la SMO con indicación de la orientación y edad de la deformación extensional. Modificado de (Ferrari et al., 2005).

Al sureste de Durango y oeste y suroeste de La Parrilla se encuentra el graben de Mezquital (Figura II.8), que es una estructura de aproximadamente 40 km de ancho y dirección general NNE (Aranda-Gómez et al., 2003). En esta área se observaron dos generaciones de estrías en planos de fallas normales: la más antigua indicaría una extensión NW, mientras que la más reciente tiene dirección NE y hacia el poniente de Durango, el graben Río Chico-Otinapa es una estructura extensional de más de 160 km de largo y 20 km de ancho, con dirección N-S a NNW-SSE y un desplazamiento máximo de 900 m (Aranda-Gómez et al., 2003).

## II.2. Marco Geológico Local

La litología general del área donde se encuentran las minas *Vacas* y *Quebradillas* está integrada por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, con edades que varían del Cretácico Superior al reciente. Los yacimientos *Vacas* y *Quebradillas* con una edad estimada del Cretácico Tardío de entre 99.6 a 65.5 Ma (Camprubí, 2013), se encuentran emplazados en forma de mantos (*Vacas*), vetas y mantos (*Quebradillas*) en rocas cretácicas de las Formaciones Mezcalera (Barremiano-Albiano), Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano) e Indidura (Cenomaniano-Coniaciano) (Imlay, 1936; SGM, 2018). Las litologías predominantes en la zona son una alternancia de estratos de calizas, calizas arcillosas, cuerpos intrusivos y lutitas (Figura II.9), con orientación general N11°W cubiertas en partes por aluvión y caliche, en la parte E y SE de la unidad minera La Parrilla aflora un conglomerado de calizas bien cementado (Paleógeno) cubriendo las anteriores Formaciones (SGM, 2001). Las rocas calcáreas fueron intrusionadas y plegadas por cuerpos tipo dique y sill en ambas minas de composición Granodiorítica-Diorítica (Coniaciano) con apófisis, presentando generalmente textura fanerítica en el cuerpo *Quebradillas* y porfídica en el cuerpo *Vacas*.



Figura II.9. A) Escarpe en superficie de la mina Vacas mostrando la secuencia de calizas – lutitas intrusionada por un cuerpo tipo sill y con fallamiento normal a la izquierda. B) Manto mineralizado en el interior de la mina Vacas. C) Cuerpos intrusivos aflorando en la superficie de la mina Quebradillas. D) Manto mineralizado en el interior de la mina Quebradillas.

### II.2.1. Formación Mezcalera (Barremiano-Albiano)

En la mina *Vacas* se tiene reportada la presencia de Caliza-Lutita en interior mina correspondiente a La Formación Mezcalera del Cretácico Temprano (Barremiano-Albiano) (SGM, 2001), esta Formación se encuentra como roca encajonante del yacimiento mineral *Vacas* en la cual presenta estratificación semivertical con rumbo general N11°E con alternancia de calizas mudstone y wackestone de color gris oscuro y claro, arenisca y lutitas, observándose con un intenso vetilleo de calcita. La litología de Formación Mezcalera está descrita como calizas mudstone, mudstone arcilloso y wackestone color gris oscuro y claro en capas delgadas y medias, estratos medianos a delgados de arenisca interestratificada con limolita, lutita y marga (Figura II.10), arenisca conglomerática y estratos de limolita con algunas intercalaciones delgadas de bentonita verde (Araujo-Mendieta & Arenas-Partida, 1986). Esta Formación se observó solamente en núcleos de barrenación de exploración de la mina *Vacas* dado que la mina se encuentra fuera de operación e inundada.

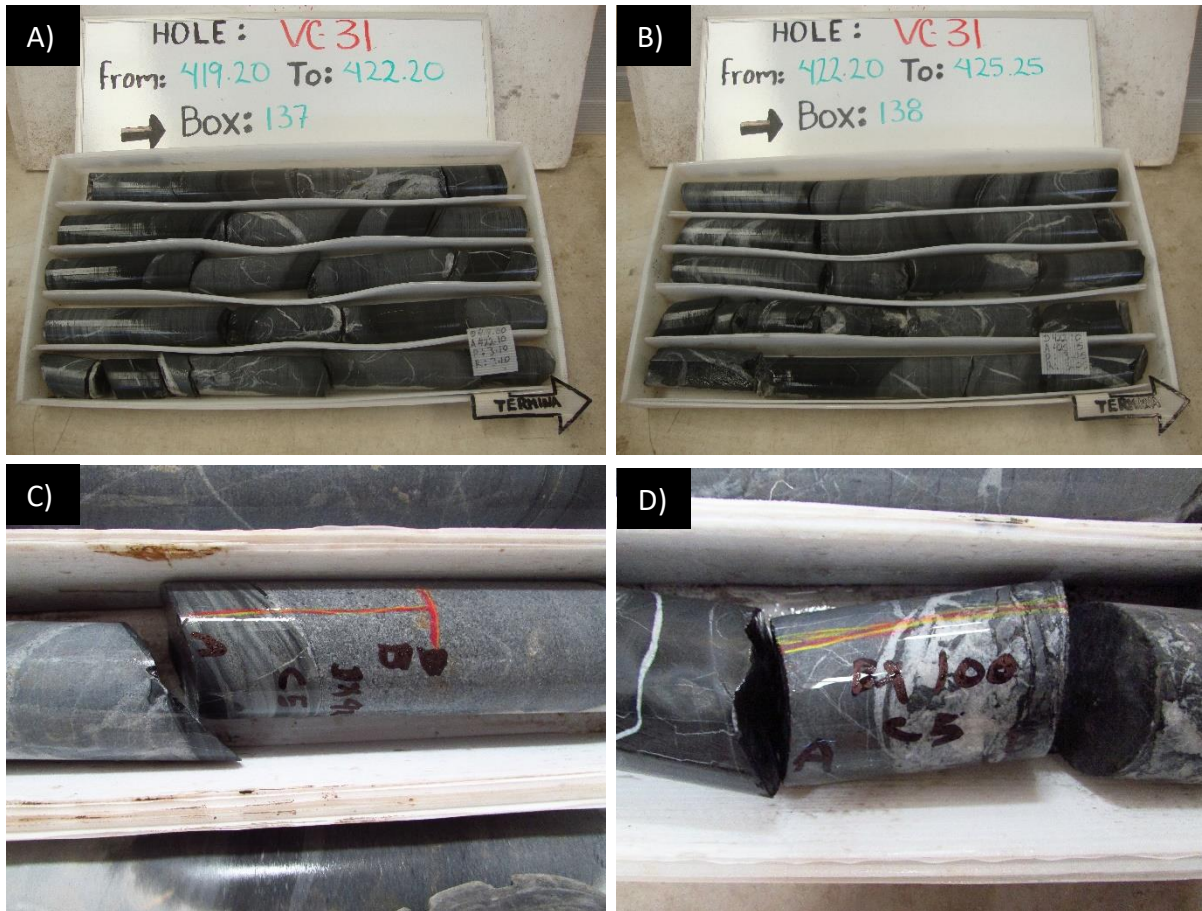


Figura II.10. A y B) Intervalo de núcleos de barrenos de la mina *Vacas* donde se presenta la secuencia de caliza mudstone y wackestone de color gris oscuro y gris claro, con presencia de lutita y marga. C) Arenisca interestratificada con limolita. D) Vetilleo de calcita.

## II.2.2. Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano)

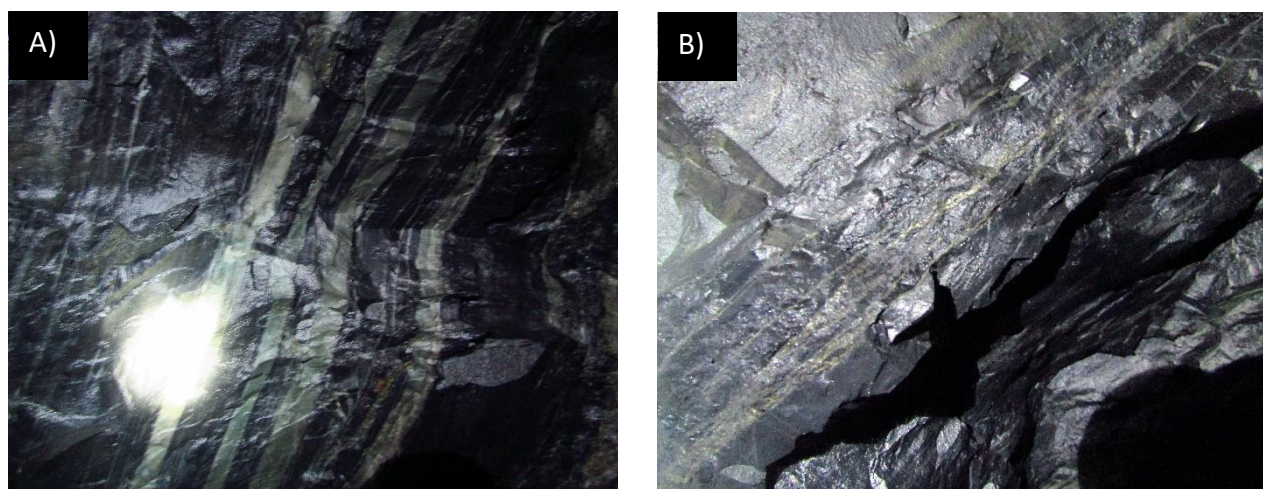
En campaña de reconocimiento en superficie y núcleos de barrenación se localizaron litologías consistentes de calizas tipo mudstone y wackstone de espesor variable entre 8 cm hasta más de 50 cm con presencia de lentes y bandas delgadas de pedernal de hasta un centímetro y medio de espesor. Se presenta intercalación de estratos delgados de limolitas color rosa y lutitas en la sucesión de calizas (Figura II.11). Las litologías encontradas son correspondientes a las descritas para la Formación Cuesta del Cura, caliza gris obscura de estratificación delgada a mediana ondulante, en estratos de 20 a 70 cm de espesor, de texturas wackestone a mudstone con estructura laminar, con intercalaciones de horizontes y lentes delgadas de pedernal negro y limonita de color rosa entre capa y capa de edad Albiano-Cenomaniano (Imlay, 1936 en González-Arroyo & Salas-Vázquez, 1996). Esta formación se encuentra aflorando en superficie y como roca encajonante de la mina Vacas.



*Figura II.11. A y B) Afloramientos de calizas en el área del cuerpo mineralizado Vacas. con intercalación de limonitas color rosado y bandas de pedernal. C) Intercalación de lutitas y limolitas rosas en superficie de la mina Vaca. D) Bandas de pedernal en núcleos de barrenación de la mina Vacas.*

### II.2.3. Formación Indidura (Cenomaniano-Coniaciano)

Las secuencias sedimentarias que constituyen la roca encajonante en la mina *Quebradillas* están conformadas principalmente una alternancia de estratos de calizas negras, calizas arcillosas y lutitas. Estas secuencias se observan predominantemente deformadas y metamorizadas a hornfels por la presencia de cuerpos intrusivos (Figura II.12), los espesores varían desde estratificación media de 20 cm hasta laminación en las lutitas con unos pocos milímetros de espesor. La litología corresponde con la Formación Indidura, descrita por Imlay (1936) está como una formación del Cenomaniano-Coniaciano compuesta de litología una variable compuesta por calizas negras, calizas arcillosas, areniscas, yeso y lutitas. El mismo autor reporta la Formación Cuesta del Cura cubierta por capas de yeso perteneciente a este miembro.



*Figura II.12. A y B) Hornfels en el interior de la mina Quebradillas producto del metamorfismo de contacto de la sucesión de calizas y lutitas de la formación Indidura.*

### II.2.4. Cuerpos intrusivos de composición Granodiorítica-Diorítica (Cretácico Tardío)

Las rocas calcáreas de La Parrilla fueron intrusionadas y plegadas por cuerpos intrusivos de composición Granodiorita-Diorita del Coniaciano (SGM, 2001) con presencia de apófisis, los intrusivos presentan morfología de dique y sill que originan una aureola metamórfica en las rocas de la zona (First Majestic Plata, 2007). Los cuerpos presentan principalmente una textura fanerítica en *Quebradillas*, mientras que en *Vacas* predomina la textura porfídica. Los cuerpos intrusivos en *Quebradillas* generan una aureola de metamorfismo de contacto y plegamiento en la cual se puede observar hornfels deformado (Figura II.13D). En el área de la mina *Vacas*, donde los intrusivos granodioríticos-monzoníticos tipo sill predominan y son cortados por diques de composición similar. Se observa poca deformación en la roca encajonante donde predomina la alteración hidrotermal sobre el metamorfismo de contacto. En el cuerpo mineralizado *Vacas* es la superposición de cuerpos intrusivos es generada debido a la historia ígnea multipulsante en la zona (Figura II.13).

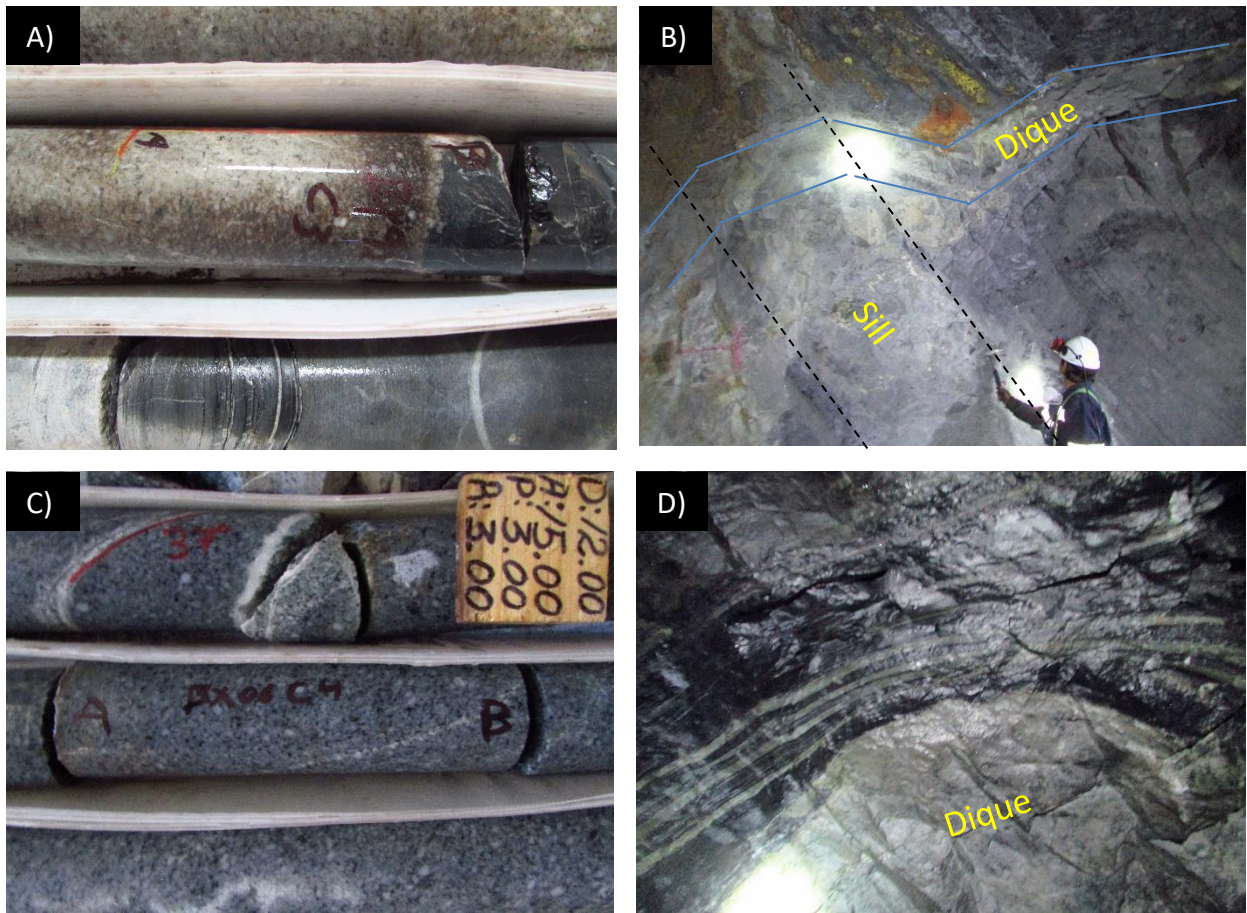


Figura II.13. A) Cuerpo intrusivo en barreno de la mina Vacas. B) Cruce de dique con sill en interior mina Vacas. C) Intrusivos de la mina Quebradillas. D) Dique en interior mina Quebradillas deformando la estratificación.

### II.2.5. Conglomerado, secuencias ignimbríticas y Aluvión (Cenozoico)

En la parte NE y SE de la unidad minera La Parrilla aflora un conglomerado polimíctico producto de la disgregación mecánica de las rocas preexistentes de la zona (Paleógeno), subsecuentemente un conglomerado polimíctico relleno de fosas con hasta 200 m de espesor del pleistoceno (SGM, 2001). Hacia el noroeste y suroeste de la zona se encuentra aflorando una sucesión de ignimbritas y toba riolítica – ignimbrita, a la sucesión de toba riolítica – ignimbrita por su posición estratigráfica con las demás unidades se les asigna una edad del Oligoceno mientras que la unidad de ignimbrita, que forma parte del Supergrupo Volcánico Superior (SVS), por relación de campo se considera de edad Oligoceno – Mioceno y en algunas zonas al suroeste de la unidad minera se encuentran algunos afloramientos de basalto del Mioceno (SGM, 2001). Finalmente, al noreste del distrito minero La Parrilla, se presentan materiales aluviales compuestos de arena, limo, arcilla y grava de edad Holoceno (SGM, 2001). En el área inmediata superficial de las minas *Vacas* y *Quebradillas* no se tiene presencia de estas secuencias.



## II.2.6. Contexto estructural

En la zona se denota la presencia de pliegues anticlinales y sinclinales hacia el sur - suroeste de la unidad minera La Parrilla siendo el pliegue anticlinal Piedras Azules y el sinclinal Alcaparra los más cercanos respectivamente (SGM, 2001). Hacia la mina *Vacas* se tiene la presencia de fallamiento concordante con el rumbo de la estratificación y diferente inclinación, estas fallas solo persisten por algunos metros. La orientación preferencial de la estratificación en la zona se determinó en rumbo N11°W y buzamiento al NE con ángulos de 60° - 75° en la superficie e interior de la mina *Vacas*.

En la mina *Quebradillas* estructuralmente se observan algunos plegamientos de las calizas del Cretácico originadas por los eventos tectónicos que afectaron la zona sur y centro de Durango y plegamientos causados por el emplazamiento de los cuerpos intrusivos de la zona. En la mina *Quebradillas* se presenta un rumbo de estratificación general NW-SE con echados muy pronunciados (de 70° a 90°) de calizas y lutitas de la formación Indidura (First Majestic Plata, 2007).

Se tiene un importante dominio de fallas de alto ángulo con rumbos muy variables, desde N-S hasta W-E, donde algunas estructuras como la falla *Víboras* son muy relevantes dado que controla la mineralización. Se puede observar de igual manera pliegues y fallamiento normal en las rocas sedimentarias en los escarpes generados por el minado del cuerpo *Quebradillas* (Figura II.14).

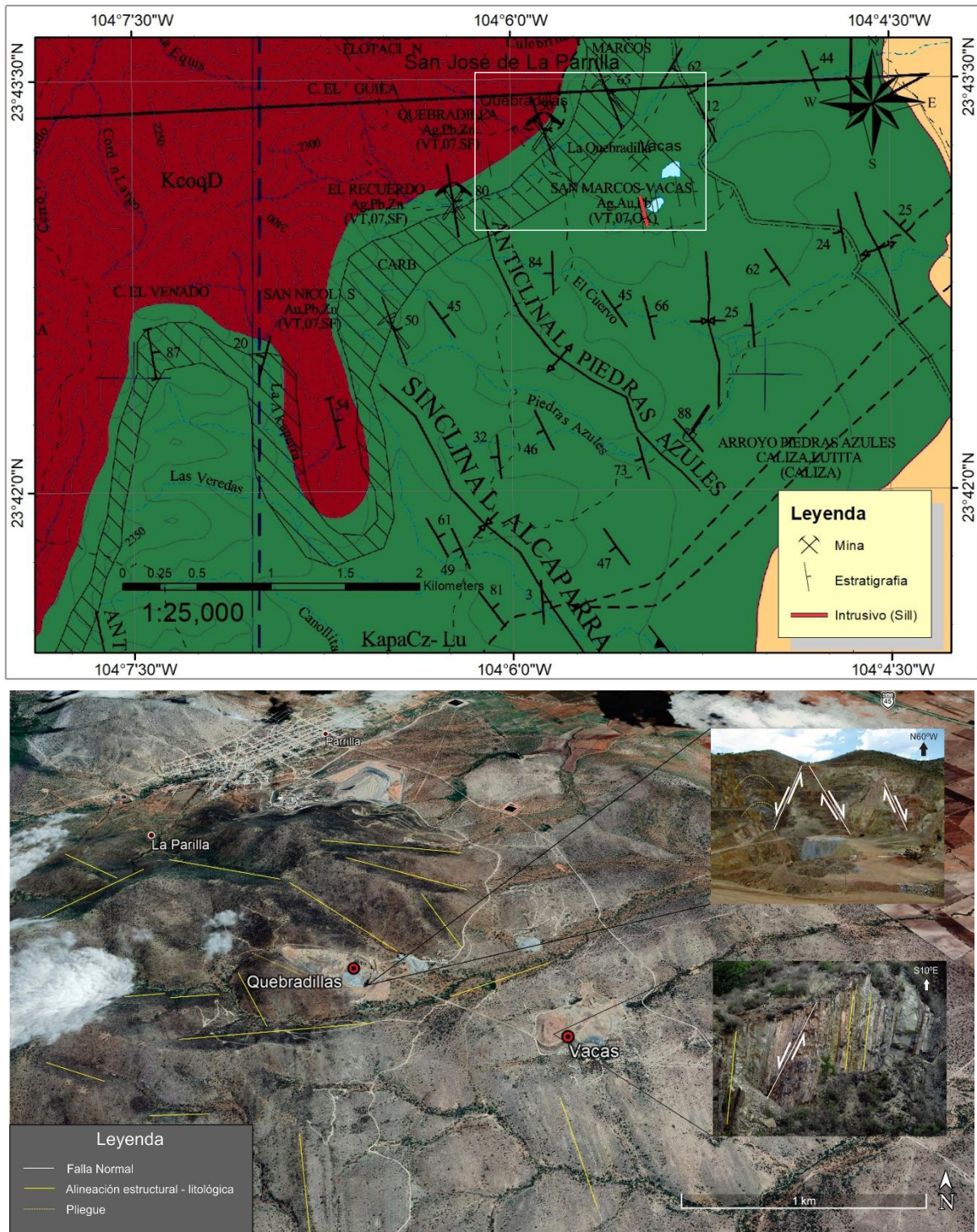


Figura II.14. Mapa estructural de la zona que comprende las minas Vacas y Quebradillas en el distrito minero La Parrilla, Modificado de (SGM, 2001).

## II.2.7. Estratigrafía

De manera general en el área de la mina *Vacas* y *Quebradillas* se encuentran emplazados en tres Formaciones, en primer lugar, La Formación Mezcalera compuesta principalmente de calizas y lutitas del Cretácico Temprano (Berriasiano-Albiano) (SGM,2001), observada en núcleos de barreno como roca encajonante en la mina *Vacas*, esta Formación se encuentra subyaciendo a La Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano) (Imlay, 1936) observada en núcleos de barrenos y en la superficie de la mina *Vacas* como una sucesión de calizas con bandas de pedernal y limolita, ambas Formaciones se presentan como roca encajonante y son intrusionadas por diques y sills de composición variable Granodiorita-Diorita (SGM,2001) (Figura II.15).

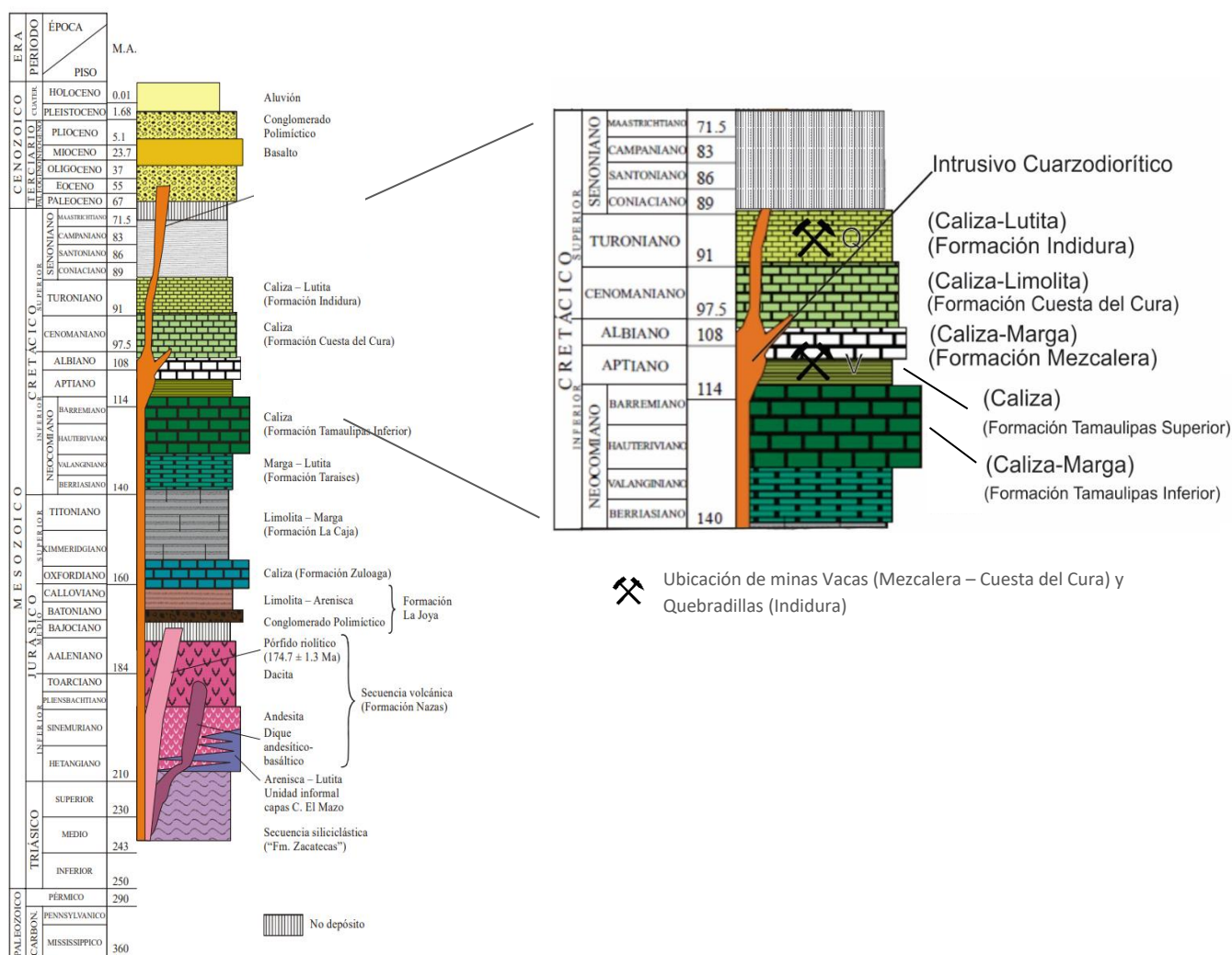


Figura II.15. Columna estratigráfica semiregional y columna estratigráfica local modificada de (Barboza-Gudiño et al., 2004).

El yacimiento *Quebradillas* se encuentra emplazado en La Formación Indidura compuesta de calizas, lutitas y margas, esta Formación se encuentra intrusionada, deformada y metamorfozada por diques y sills de composición granodiorítica principalmente. Se determinó la continuidad estratigráfica en contacto superior de La Formación Cuesta del Cura con La Formación Indidura (Cenomaniano-Coniaciano) (Imlay, 1936) de acuerdo a la geología descrita en el reporte realizado por la empresa minera (First Majestic, 2007).

La Formación Indidura y las anteriores son cubiertas en algunas áreas por las secuencias ignimbríticas del Supergrupo Volcánico Superior (SVS) y las secuencias basálticas, conglomeráticas y aluviales del Cenozoico (SGM, 2001). Finalmente, de acuerdo a la columna descrita por Barboza - Gudiño et al., (2004) se determinó el contacto inferior de Formación Mezcalera con la Formación Tamaulipas Superior (Albiano).

### III. Metodología

Con el fin de mejorar el entendimiento de los procesos que dieron origen a los cuerpos minerales *Vacas* y *Quebradillas* se realizó una visita a la unidad minera La Parrilla en el estado de Durango por un periodo de dos meses, donde tomaron muestras de 9 barrenos, seleccionados debido a ser representativos de la diversidad litológica presente en el yacimiento. Cada muestra tomada fue dividida en dos partes, procurando dejar un testigo del material analizado en cada sección analizada, siendo empaquetadas y enviadas al Instituto de Geofísica en la Ciudad de México para su análisis. Las muestras fueron analizadas macroscópicamente y de ellas se seleccionaron 25 muestras representativas que resumieran las características observadas para la elaboración de láminas delgadas, con el fin de estudiar sus características en el microscopio petrográfico y minerográfico, además de someter a algunas muestras a análisis en Microscopio Electrónico de Barrido (MEB o SEM por sus siglas en inglés), y, realizar estudios de microtermometría de inclusiones fluidas.

#### III.1. Análisis de registros existentes

Durante la estancia en la unidad minera se verificó la base de datos de barrenación de la compañía, en la cual se incluye la litología, profundidad, orientación, estudios de laboratorio y archivo fotográfico de los núcleos de barreno recuperados en los proyectos de exploración de la unidad minera La Parrilla. Se localizaron barrenos que fuesen representativos de las características genéticas del cuerpo mineralizado *Vacas*, en los cuales se realizó el muestreo, además de un barreno del cuerpo *Quebradillas* que pudieran tener relación genética.

Se fijaron como principales objetivos de muestreo los intervalos con presencia de menas ricas en plata, en estos intervalos se tomaron secciones de barrenos con base en su relación espacial a profundidad y posición en el cuerpo mineralizado *Vacas* (Figura III.1). Se colectaron tres grupos generalizados de muestras de la zona: Región superficial, zona intermedia y zona profunda o las raíces del cuerpo mineralizado.

Los criterios para seleccionar muestras de estas tres regiones fueron basados en características texturales, relaciones de corte, alteraciones hidrotermales presentes, mena con altos contenidos de plata o metales base y finalmente, muestras periféricas de la zona de ganga, además de roca encajonante y cuerpos intrusivos. Para mejorar el entendimiento de la geología de la zona, se acordó participar en actividades propias de la unidad, como mapeo de niveles subterráneos de la mina *Quebradillas* y el reconocimiento de estructuras y zonas con mineralización en ambos cuerpos, *Vacas* y *Quebradillas*.

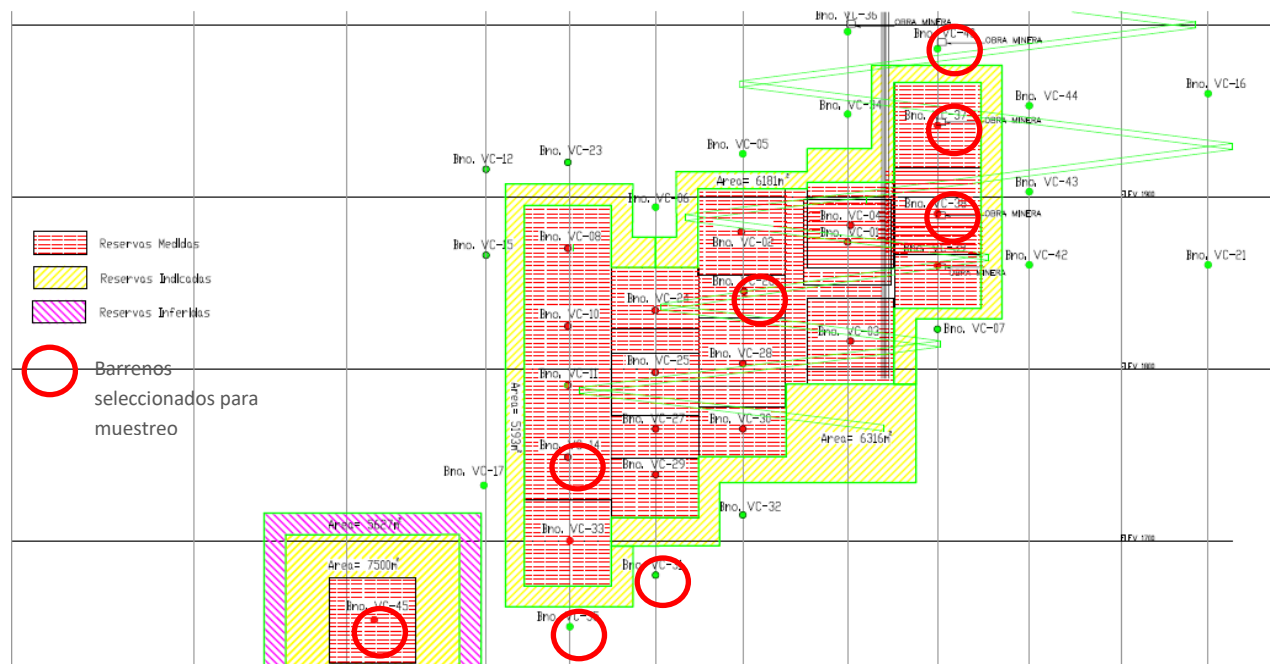


Figura III.1. Ubicación de los barrenos utilizados para muestreo en modelo de corte transversal del yacimiento mineral Vacas.

Se realizó un recorrido en superficie por la unidad minera La Parrilla para conocer el panorama geológico general de la zona con ayuda de los ingenieros geólogos de la empresa (Figura III.2). Se abordaron temas generales como los estudios realizados hasta el momento del yacimiento, la información litológica disponible y los principales retos geológicos a resolver presentes en la unidad. Se mencionaron los cuerpos actualmente en producción, incluyendo a la mina *Quebradillas*, así como la mina *Vacas*, que se encuentra actualmente fuera de operación.

Finalmente, se revisó con ayuda del personal de servicios técnicos de la unidad La Parrilla la disposición espacial de los cuerpos *Vacas* y *Quebradillas*, con ayuda del programa AutoCAD y su extensión Promine, con lo cual se señalaron los procesos de extracción realizados hasta el momento, los registros y ubicación de los diferentes barrenos realizados en la mina y su clave de identificación. Se visitó la bodega de barrenación de la unidad para corroborar la ubicación y protocolo de almacenamiento de las cajas de barrenos.



*Figura III.2. Recorrido superficial en el área de la mina Quebradillas para revisión general de la geología observada en superficie.*

### III.2. Muestreo y Mapeo en superficie

El área comprendida por el cuerpo mineralizado *Vacas* se recorrió con caminamientos en dirección noreste perpendicularmente a la dirección de estratificación medida en la zona donde se recolectaron datos cartográficos, litológicos y estructurales para realizar un mapa geológico de la zona y mejorar la comprensión del contexto geológico del cuerpo emplazado, se obtuvieron muestras de campo de un tamaño promedio de 10 a 20 cm de diámetro para control estratigráfico con ayuda de personal y herramientas de la compañía First Majestic. Los objetivos considerados para muestreo fueron estructuras geológicas como intrusivos tipo sill y muestras de estratificación de la zona conformada por calizas y limolitas. Se tomaron muestras de la alteración proximal al manto mineralizado de la mina *Vacas* para identificar y correlacionar su mineralogía con la observada en el área circundante.

Se realizó el mapeo a escala 1:10000 (Figuras III.3.1), con campaña de muestreo litológico y alteraciones. Se revisaron obras antiguas, como catas y socavones, para revisar y corroborar los datos estratigráficos o litológicos del área además de denotar características especiales visibles en los estratos tales como intercalación de litologías o cuerpos intrusivos. Se corroboró la ubicación de la barrenación existente en campo y se proyectó la longitud de los barrenos en planta gracias a los registros electrónicos de barrenación dibujados en el programa AutoCAD, con su extensión Promine, considerando el ángulo de rompimiento y la curvatura del barreno (Figura III.3.2). Una vez obtenidos los datos se transcribieron a archivos digitales en documentos Word y bases de datos en Excel con el fin de utilizarlos en programas especializados. Se realizó un mapa de la zona con los datos obtenidos en el programa ArcGIS con ayuda de información y metadatos del INEGI, imágenes de satélite e información de cartas geológicas y geológico mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

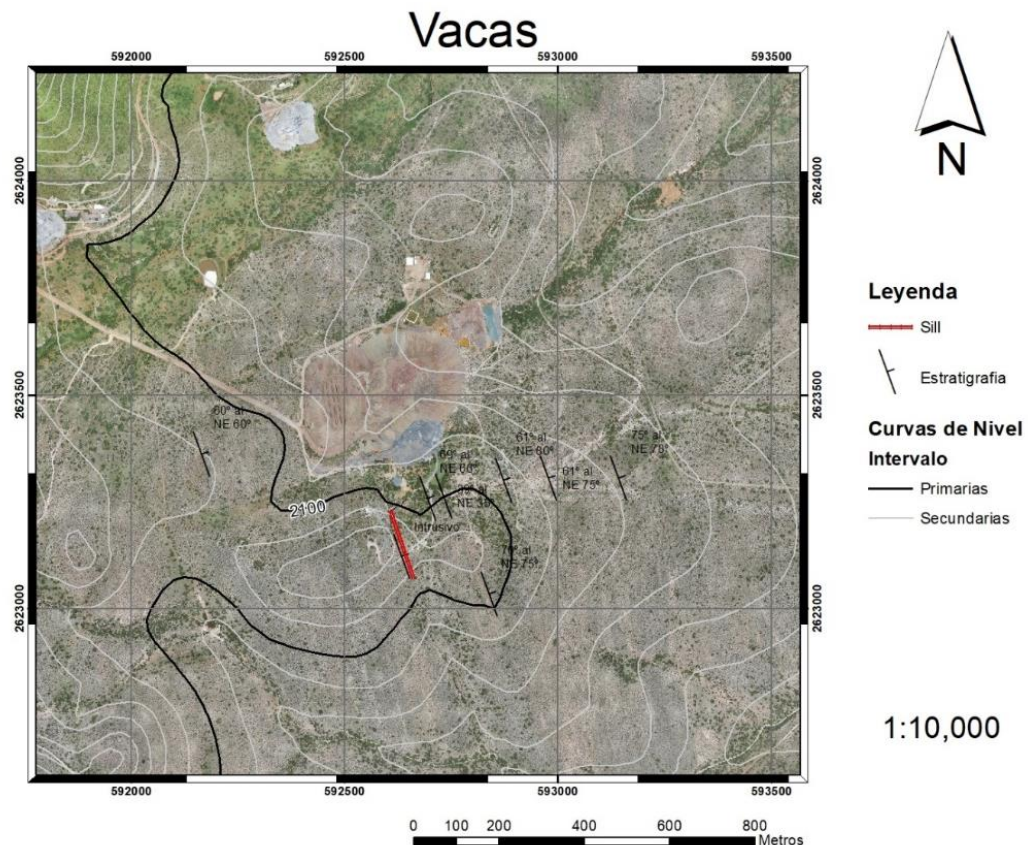


Figura III.3.1. Mapa del área circundante a la mina Vacas y ubicación de los datos estructurales tomados.



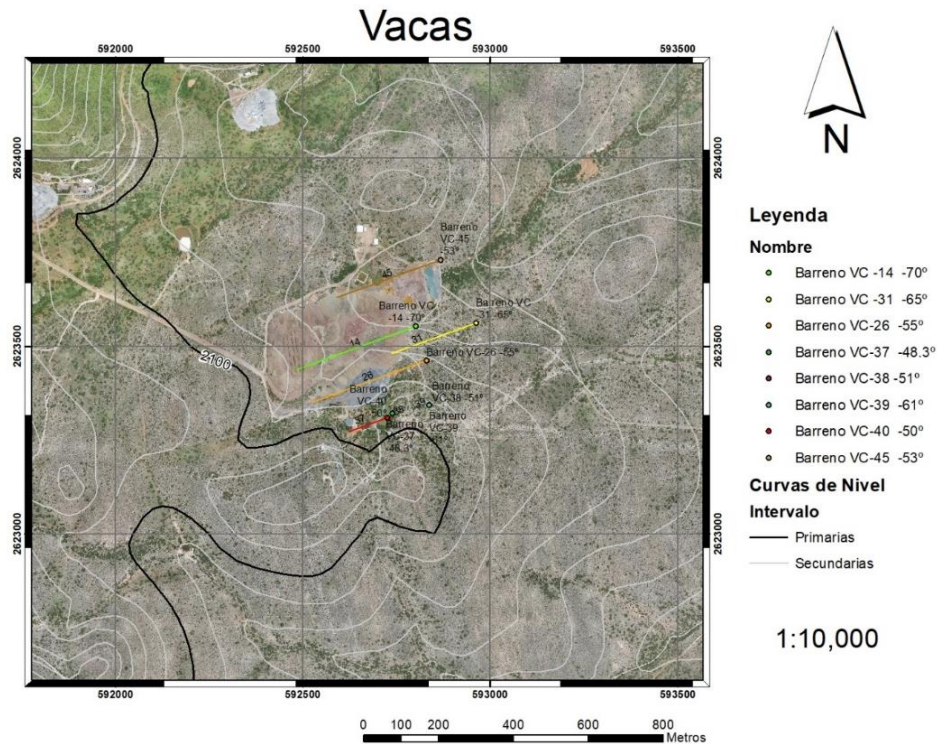


Figura III.3.2. Mapa de ubicación de barrenos utilizados y su proyección en planta.

### III.3. Logueo de Barrenos

Una vez seleccionados los barrenos representativos del yacimiento, se localizaron en la bodega de barrenos y se identificó en un modelo de la mina realizado en el programa AutoCAD las profundidades de las cuales sería necesario obtener las muestras, se eligieron los barrenos VC-26, VC-14, VC-37 y VC-38 para obtener el intervalo de corte de minerales de mena, debido a que ejemplifican la mineralización en las zonas media, profunda y superior. También se tomaron los barrenos VC-40 y VC-31 para muestrear la litología de la roca caja y alteración además de los barrenos VC-45 y ILP-VC-15-11 que fueron incluidos para revisar si existe una relación con la mineralización observada en niveles superiores indicando un posible blanco de exploración. Se realizaron análisis físicos en las muestras de barreno con la ayuda de ácido clorhídrico diluido al 10%, rayador, lupa y agua para determinar su mineralogía y posibles zonas de interés geológico que resultara conveniente analizar en laboratorio, siendo señaladas dichas características para su posterior discriminación una vez finalizado el muestreo.

Las muestras tomadas fueron seleccionadas con base en su representatividad de las características del yacimiento y la profundidad del barreno en el que se encontrara, así se clasificó cada una de las muestras con una clave y profundidad indicada en un documento electrónico y marcadas en sus respectivos contenedores para su posterior estudio en laboratorio (Figura III.4.).

Figura III.4. Formato de delimitación de intervalos de interés y muestreo. El muestreo final contemplado se encuentra desglosado en el Apéndice E.

### III.4. Reconocimiento en interior mina

Se realizaron recorridos en interior mina en los cuerpos *Quebradillas*, *Vacas* y *Rosarios* se hicieron campañas para observar las características litológicas, mineralizantes a profundidad y muestreo. Se revisó el emplazamiento del cuerpo mineralizado en la mina *Vacas*, además de las alteraciones proximales y distales que se apreciaban en cada mina.

En el interior de la mina *Vacas* se colectaron muestras de intrusivos (Dique y Sill) para estudiar en tipo de alteración presente en cada uno y poder relacionar su emplazamiento con el depósito de minerales de interés económico. Finalmente, se revisaron los lugares visitados en la mina *Vacas* con los planos digitales existentes de la mina para corroborar los lugares donde se realizó el muestreo, las características del yacimiento en dichos niveles y para realizar su registro con datos de profundidad, leyes obtenidas y características estructurales del lugar.

Como información complementaria se determinó el nivel freático del espejo de agua observado a los 1908 msnm en recorrido en interior mina para interpretación del modelo de emplazamiento, en la determinación del nivel estático se descartó la influencia del radio de abatimiento generado por el bombeo continuo en la mina *Quebradillas*.

### III.5. Espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR)

Las muestras recolectadas en la unidad minera La Parrilla se analizaron mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR o Short-wave infrared) utilizando el espectrómetro *oreXpress* de la marca SPECTRAL EVOLUTION para identificar la mineralogía de alteración presente en las rocas de la zona. Mediante el empleo del equipo, que es capaz de detectar los espectros ultravioleta, visible e infrarrojo, se obtienen curvas características de mineral estudiado, las cuales son comparadas con una base de

datos de curvas tipo distintos minerales estudiados en varios países almacenadas en el software DARWin SP utilizado junto con el espectrómetro, para identificar el mineral estudiado correlacionándolo con la curva característica más parecida almacenada en la base de datos del programa.

La espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR) funciona en la región de longitud de onda (1.0–2.5  $\mu\text{m}$ ) y es particularmente útil para realizar determinaciones de composición al medir las características de absorción espectral relacionadas con los procesos moleculares en carbonatos, hidratos y sulfatos que contiene hidroxilo, silicato y otros minerales (Hunt, 1977; Hunt et al., 1971; Hunt & Salisbury, 1970 en Mars & Rowan, 2010).

El espectrómetro *oreXpress* SPECTRAL EVOLUTION puede ayudar a detectar alteraciones minerales y variaciones químicas/cristalinas que no se notan de inmediato, el equipo funciona con tres sensores, el primero cubre la gama del espectro visibles con una matriz de silicio de 512 elementos que funciona de 350 a 1000 nm y, cuenta con dos detectores SWIR que operan desde (970–1910 nm) y (1900–2500 nm) con arreglos de InGaAs (indium gallium arsenide) de 256 elementos. Estos últimos proporcionan la definición adicional de InGaAs con la alta sensibilidad y velocidad de los arreglos para la identificación mineral (Spectral Evolution, 2019).



Figura III.6. Equipo utilizado para espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR).

### III.6. Petrografía y Minerografía de láminas delgadas

Para este estudio se emplearon 25 láminas delgadas elaboradas a partir del muestreo de barrenos previo y la selección de muestras representativas del yacimiento, las láminas empleadas tienen dimensiones de 4 x 2.2 cm, pulido metalográfico para estudio de minerales traslucidos y opacos, y, se elaboraron con el fin de realizar el análisis minerográfico y petrográfico para delimitar la mineralogía principal, así como la identificación de texturas y asociaciones minerales correspondientes a diferentes eventos genéticos y de alteración, se determinan de igual manera los minerales de mena de metales base, de plata y secuencia paragenética.



*Figura III.7. Microscopio óptico Olympus.*

El análisis se realizó empleando un microscopio óptico Olympus (Figura III.7) con luz transmitida y reflejada, ubicado en el Instituto de Geología, y un microscopio Zeiss AxioPlan del Laboratorio de Petrografía y Microtermometría (LPM) del Instituto de Geofísica de la UNAM, en los cuales se revisó cada lámina determinando los porcentajes de cada mineral presente en la muestra con el fin de clasificar la muestra de la cual se elaboró. Se tomó evidencia fotográfica de cada muestra con ayuda del software Imagefocus especializado para la captura de imágenes de microscopio con una cámara EUROMEX – CMEX DC 1300 acoplada al microscopio, en distintas zonas representativas de la mineralogía general de la lámina delgada o rasgos claves que evidenciaran procesos que dieron origen al yacimiento.

Se detalló un registro de cada muestra, incluyendo el barreno y profundidad de procedencia, con evidencia fotográfica en la cual se incluye una descripción general de la lámina, alteraciones hidrotermales, la asociación mineral, texturas y la secuencia paragenética interpretada.

### III.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Este método no destructivo se empleó en láminas delgadas con superficie pulidas para una identificación más precisa de aquellos minerales en los cuales sus características petrográficas o minerográficas fuesen poco perceptibles debido a su tamaño. Se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido Hitachi TM-1000 (Figura III.8) ubicado en el LPM del Instituto de Geofísica UNAM, en conjunto con el programa del mismo nombre TM-1000 y el programa SwiftED-TM necesarios para los análisis de química mineral semicuantitativa.



*Figura III.8. Equipo HITACHI TM-1000 utilizado en el análisis MEB.*

Las muestras de lámina delgada son marcadas con base en observaciones petrográficas para analizar los puntos de interés. La lámina es colocada dentro del equipo en una cámara y mediante una bomba de vacío se sella la cámara. El equipo ya en vacío utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. El MEB tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra de hasta 20X. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación de hasta 10000X.

Con este equipo se ubican minerales específicos a los cuales por medio de ablación en una zona plana de su superficie se obtiene su composición de elementos en forma de gráfica con picos en los elementos presentes de la muestra, conjunto con el contexto geológico y estudios petrográficos se determina que mineral se observa.

El microscopio electrónico de barrido (MEB o scanning electron microscope, SEM) se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir del barrido de la misma con un haz de electrones, como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra. Para analizar una muestra en el SEM se requieren generalmente condiciones estrictas de vacío en el interior del microscopio, ya que de lo contrario los electrones pueden ser dispersados por las moléculas de aire (Melgarejo et al., 2010). Los mejores resultados se obtienen con muestras conductoras o convertidas en conductoras mediante un recubrimiento pelicular con un material conductor (generalmente, grafito; pueden emplearse también oro o aluminio).

Las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra originan la emisión de electrones secundarios, de electrones retrodispersados y de rayos X característicos de los elementos presentes en la muestra (para el análisis químico cualitativo y, en algunos casos, semi-cuantitativo). En el SEM, diferentes detectores amplifican la señal emitida por la superficie de la muestra cuando es barrida por un delgado haz de electrones. La intensidad de la señal amplificada es interpretada por el equipo y es visualizada en una pantalla convencional de televisión o computadora (Melgarejo et al., 2008).

### III.8. Microtermometría

El análisis microtermométrico se condujo mediante el empleo de un equipo de microtermometría compuesto por una platina térmica LINKAM THMSG-600, dos equipos reguladores de temperatura LINKAM LNP y TMS 94 junto con un contenedor de nitrógeno conectados a un microscopio Olympus modelo BX60, con el fin de estudiar once láminas de 60-100 micras de espesor promedio, con análisis de petrografía y minerografía previo. Las muestras de inclusiones fluidas consisten en secciones doblemente pulidas y con acabado metalográfico.



*Figura III.9. Equipo para estudio microtermométrico LINKAM.*

El equipo utilizado se ubica en el Laboratorio de Microtermometría y Catodoluminiscencia del Instituto de Geología. Se utilizó el programa *Linksys32* para controlar el calentamiento y el suministro de nitrógeno en la platina, además de emplearse para el ajuste de la rampa de calentamiento o enfriamiento requerida. Se empleó al igual el programa *Scope Essentials x64* para la obtención de imágenes del microscopio a través de una cámara instalada en su parte superior, con la cual se supervisó en vivo los cambios en las inclusiones fluidas durante el estudio, además de obtener fotografías escaladas de la zona observada.

Las inclusiones fluidas estudiadas consistieron en inclusiones primarias o pseudosecundarias localizadas en cristales traslucidos, las cuales fueron localizadas antes de comenzar el estudio mediante petrografía de inclusiones fluidas, basadas en observaciones texturales y paragenéticas. Las láminas delgadas doblemente pulidas empleadas se sometieron a un proceso de desprendimiento del portaobjetos con la ayuda de acetona concentrada. Se recolectaron los fragmentos de los sectores seleccionados manualmente para el estudio.

El procedimiento de análisis consistió en colocar el fragmento a analizar dentro de la platina, localizando la familia de inclusiones fluidas a estudiar. Se procedió al enfriamiento de la muestra hasta  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , observando la temperatura eutéctica del hielo, al aumentar la temperatura. Ocasionalmente se llegó a observar la temperatura eutéctica en valores entre  $-21$  y  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Al aumentar la temperatura desde la fase de congelamiento se observó la temperatura de fusión del hielo (Tfh) y se registró. Terminado el proceso se prosiguió a la etapa de calentamiento, desde una temperatura ambiente con rampa programada hacia temperatura máxima de  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se registró el cambio de fase de gas a fluido con la temperatura de homogenización (Th).

Los resultados obtenidos fueron registrados en una base de datos conteniendo el mineral que contenía la inclusión o asociación de inclusiones fluidas, así como el tipo de inclusión observada, su tamaño, su grado de relleno y las fases presentes observadas (ver Anexo C). Posteriormente con el archivo de datos de temperatura de fusión y temperatura de homogenización se calculó el porcentaje de cloruro de sodio equivalente de las inclusiones (NaCl equiv.) de acuerdo a la fórmula de Bodnar (1993) con base en la Tfh:  $\text{Salinidad (peso \%)} = 0.00 + 1.78 \theta - 0.0442 \theta^2 + 0.000557 \theta^3$ , donde  $\theta$  es la Tfh en grados Celsius. Finalmente, con los resultados calculados se utilizó el programa Excel para generar un gráfico de temperatura de homogenización contra salinidad para compararlo con el gráfico de rangos genéricos de temperatura y salinidad de tipologías de depósitos minerales de Wilkinson (2001). Además, se realizaron análisis estadísticos y distribuciones de poblaciones de datos de Th vs. Salinidad para denotar tendencias que evidenciaron procesos de mineralización (e.g. Goldstein Reynolds, 1994; Wilkinson 2001).

Las inclusiones fluidas son defectos o interrupciones en la estructura cristalina de un mineral que han atrapado algún tipo de fluido durante el crecimiento del mismo. Representan porciones atrapadas de los fluidos (líquidos, gases, fundidos) a partir de los cuales se generó el crecimiento cristalino. Así, las IF pueden estudiarse para reconstruir las condiciones ambientales de crecimiento cristalino, así como para caracterizar la química de los líquidos, gases o fundidos que las IF contienen (Ramos Rosique, 2018).

Si bien es difícil generalizar acerca de las propiedades de las inclusiones fluidas que ocurren en diferentes tipos de depósitos de mineral, una serie de parámetros son lo suficientemente consistentes para ser estudiados. La forma de caracterizar las inclusiones fluidas presentes es en términos de temperatura de homogeneización (Th – La disolución de la fase gaseosa en la fase líquida) y salinidad equivalente a NaCl calculada con base en la temperatura de fusión del hielo (Tfh – Temperatura a la que se funde el último cristal de hielo) con la fórmula de Bodnar (1993). Si bien estas propiedades no son funciones directas de la temperatura del fluido y la salinidad del fluido, la relación general que existe y la variabilidad natural de estos dos parámetros en los sistemas hidrotermales los hace útiles para fines comparativos (Wilkinson, 2001).

## IV. Resultados

### IV.1. Roca encajonante

En el yacimiento mineral *Vacas* se encuentra alojado en la Formación Mezcalera hacia la zona inferior y principalmente en la Formación Cuesta del Cura, como se reportó en el apartado de geología. La roca caliza predominante en el cuerpo mineralizado *Vacas* se estudió mediante una lámina delgada en roca sana de caliza del barreno VC-40, donde se caracterizó la roca como una caliza wackstone con matriz soportada, cristales de cuarzo y feldespato mayores al 10% de la muestra, también se encuentra cortada por vetillas de calcita de un evento posterior y presenta vetilleo de magnesio que se observa con una tonalidad más oscura. Se pudo identificar la presencia de microcristales de pirita diseminada sin presencia de vórgulos o porosidad. Esta caliza se identificó como perteneciente a La Formación Cuesta del Cura por su relación estratigráfica y características litológicas como la presencia de lentes de pedernal (Figura IV.1). La mina *Quebradillas* se encuentra, de acuerdo a lo reportado por First Majestic (2007), emplazada en La Formación Indidura. La roca encajonante predominante en la mina *Quebradillas* por sus características en afloramiento y barrenos se clasificó macroscópicamente como perteneciente a esta formación.

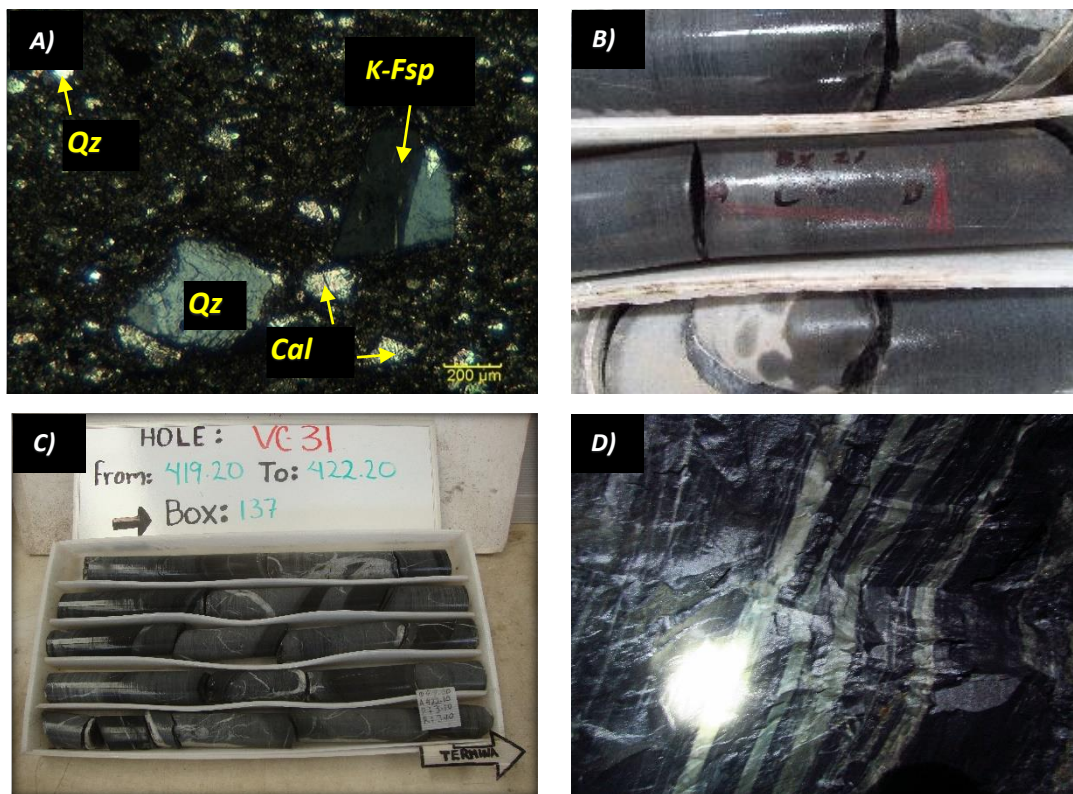


Figura IV.1. A y B) Textura matriz-soportada con más del 10% de granos y núcleo de barreno muestreado, VC-40 roca encajonante. C) Formación mezcalera en la zona profunda de Vacas. D) Formación Indidura con metamorfismo de contacto en el interior de la mina Quebradillas.



## IV.2. Cuerpos Intrusivos

Con el estudio petrográfico en muestras de barreno se identificaron en ambas mineralizaciones la presencia de cuerpos intrusivos. En la mina *Vacas* se pudo constatar la presencia de dos familias principales de cuerpos tipo sill y dique, de composición granodiorítica - cuarzo monzonítica (con base en estimación visual y Streckeisen, 1976). Los cuerpos tipo sill se presentan próximos y paralelos al cuerpo mineral, mientras que los diques se presentan de forma semidistal. Los cuerpos intrusivos en *Vacas* son mesocráticos-leucocráticos y presentan sills de hasta un metro de grosor. Los cuerpos presentan textura porfídica con fenocristales de feldespatos y cuarzo, con matriz fina compuesta de minerales varios. Un cuerpo intrusivo muestreado en el barreno VC-40 (Figura IV.2) presenta composición cuarzomonzonítica de textura porfídica con fenocristales principalmente de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa y minerales de alteración propilítica retrógrada como clorita, epidota, sericita, fluorita y calcita tanto de alteración como en vetilleo de calcita posterior al emplazamiento, la calcita de baja temperatura se encuentra asociada con fenocristales de fluorita intercumulus (Anexo A-10) asociada a la última etapa de depósito de sulfuros.

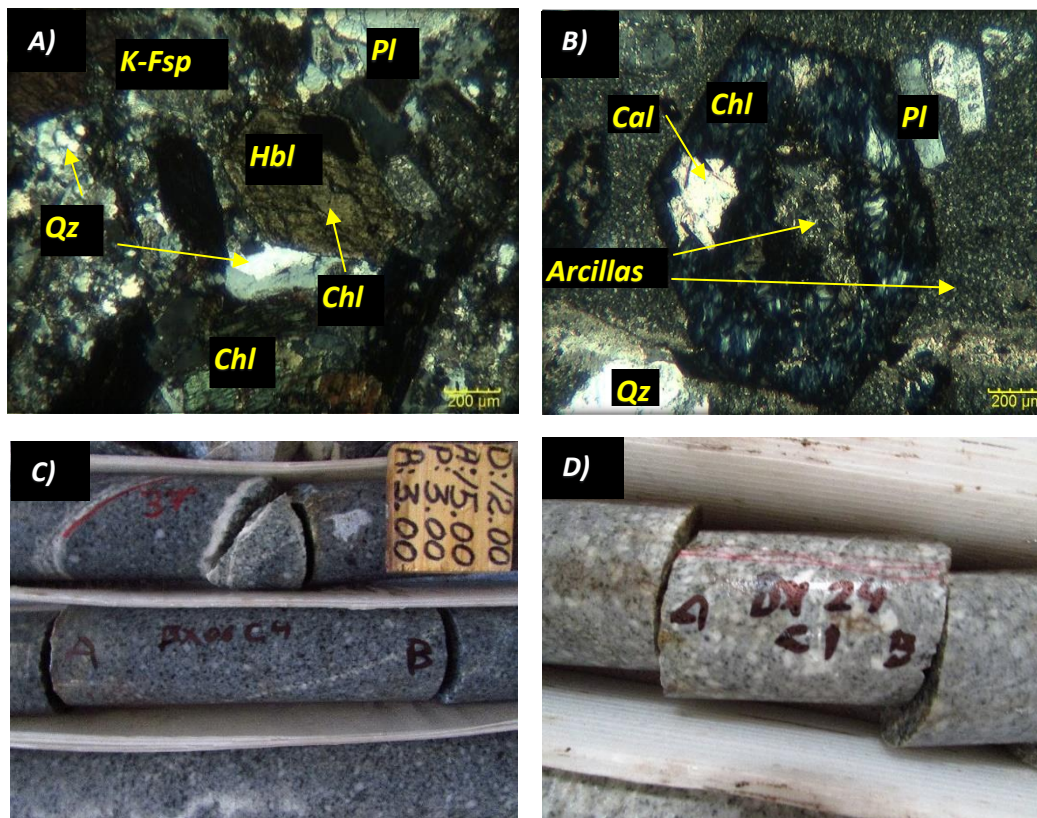


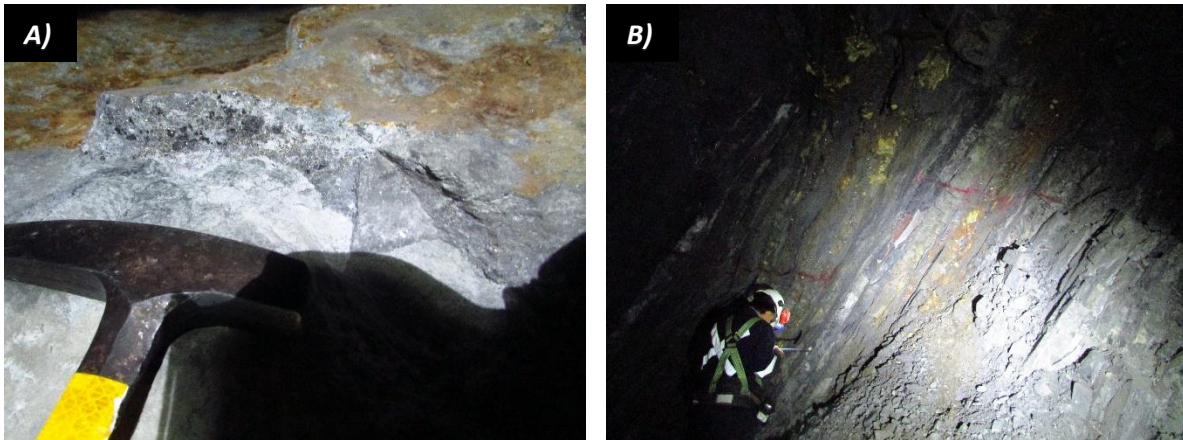
Figura IV.2. A) Fotomicrografía de cuerpo intrusivo granodiorítico de la mina Quebradillas. B) Fotomicrografía de cuerpo intrusivo de la mina Vacas. C) Núcleo de barreno de la mina Quebradillas con cuerpo intrusivo granodiorítico de textura fanerítica. D) Núcleo de barreno de la mina Vacas con cuerpo intrusivo cuarzo-monzonítico de textura porfídica.

En la mina *Quebradillas* se encontraron abundantes cuerpos intrusivos tipo dique y sill de composición granodiorítica-diorítica presentando predominantemente textura fanerítica (con base en estimación visual y Streckeisen, 1976) (Figura IV.2). La granodiorita se presenta principalmente en la mina *Quebradillas* en cuerpos mesocráticos, presenta textura holocristalina e inequigranular en la zona de intrusivo con menor alteración, ocasionales plagioclasas zoneadas y feldespato potásico, así como relleno intercumulus de cuarzo y plagioclasa. Se tiene pirita diseminada y epidota, se tienen microcristales de apatito remanente de la fase progradada, al igual que minerales de alteración propilítica en la fase retrogradada (clorita, epidota, illita) (Figura IV.2) (Anexo A-2).

Los cuerpos intrusivos se encuentran alterados hidrotermalmente presentando mineralogías correspondientes a alteración propilítica. Los cuerpos en la mina *Vacas* son más ricos en sílice y presentan ocasionalmente minerales ferromagnesianos muy alterados, mientras que en *Quebradillas* son más abundantes estos minerales y presentan menor grado de alteración.

### IV.3. Estructura mineralizada

En la mina *Vacas* la estructura mineralizada consiste en un manto de hasta que sigue la orientación de la estratificación semivertical de alrededor de 70° de inclinación de la sucesión de calizas y lutitas de las Formaciones Mezcalera y Cuesta del Cura que comprenden la roca encajonante (Figura IV.3). El manto mineralizado presenta engrosamiento en la zona media del yacimiento y estrechamiento hacia la zona superficial.



*Figura IV.3. A) Manto mineralizado asociado a una falla en la mina Quebradillas. B) Manto mineralizado concordante a la estratificación en la mina Vacas.*

Las estructuras mineralizadas en *Quebradillas* son mantos y vetas de espesores variables (< 3 m), depositados debido a una sucesión de eventos mineralizantes. Se encuentran dominados estructuralmente por fallas, principalmente, que sirven como conducto del fluido hidrotermal y además como zona de depósito de los minerales de mena. La superposición de eventos en esta mina y el control estructural genera cuerpos que varían en su espesor y continuidad con una orientación preferencial NW-SE y rumbo variable desde 10°- 89°(Figura IV.4).

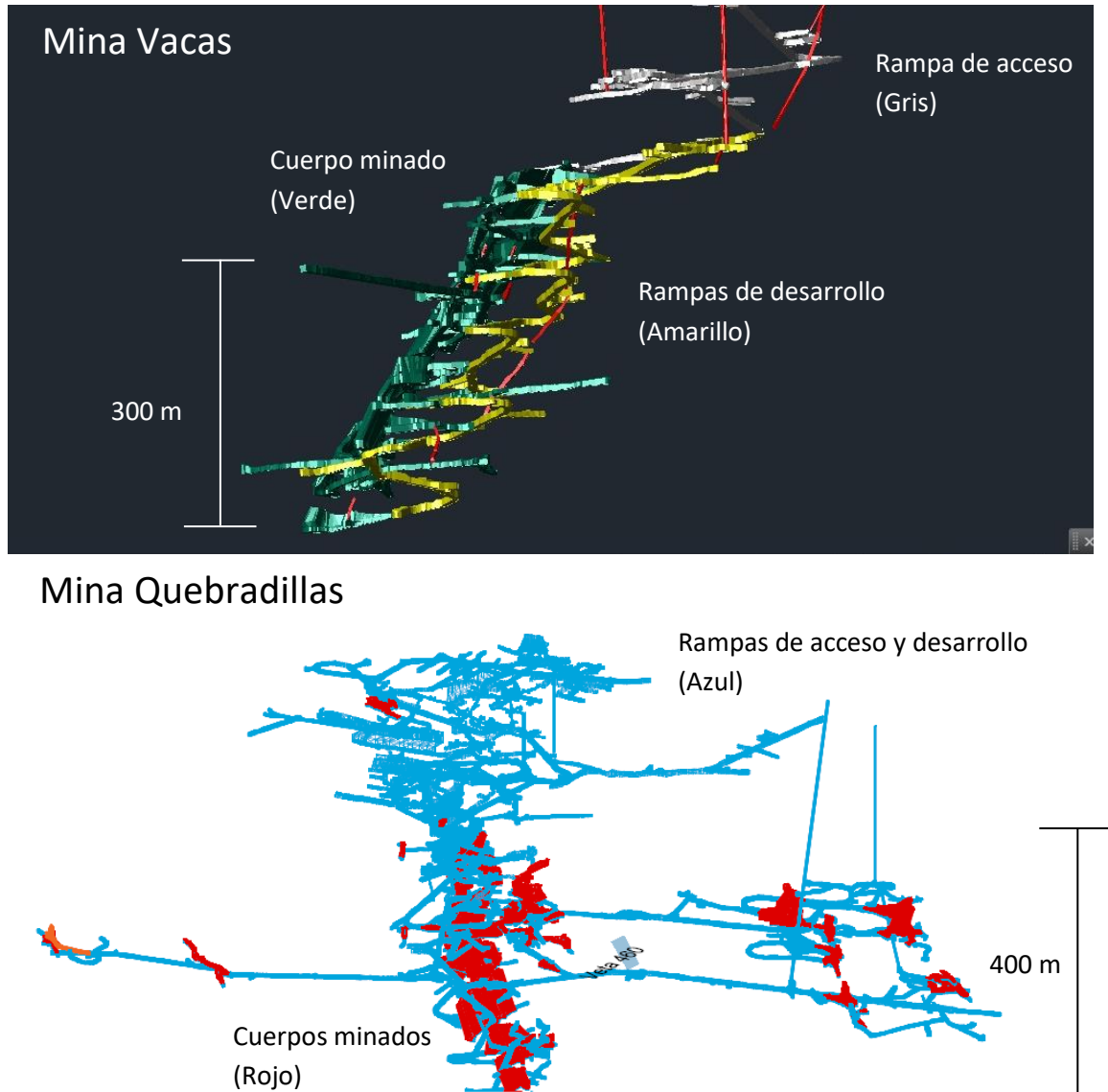


Figura IV.4. Cuerpos Vacas y Quebradillas, modelos de explotación y desarrollo minero en AutoCAD. (First Majestic, 2019).

#### IV.4. Asociación mineral

Después de obtenerse las muestras de barrenos del cuerpo *Vacas* en sus distintas zonas (Figura IV.5) y mediante la petrografía, microscopía electrónica y análisis de química semicuantitativa se determinó que la asociación mineral y relaciones texturales en los cuerpos *Vacas* y *Quebradillas* son comparables y pueden identificarse en ambos cuerpos la fase progradada y retrogradada. El grupo mineral progradado consiste de granate (Grosularia-Andradita), diópsido, cuarzo, calcita y pirita. El grupo retrogradado consta de apatito, tremolita-actinolita, cuarzo, calcita, epidota, clorita, illita-esmectita, pirita, pirrotita, arsenopirita, galena, galena argentífera, esfalerita, calcopirita, cobres grises ricos en plata y sulfosales. El desarrollo de granates y minerales de alta temperatura es mayor en la mina *Quebradillas* (Tabla IV.1).

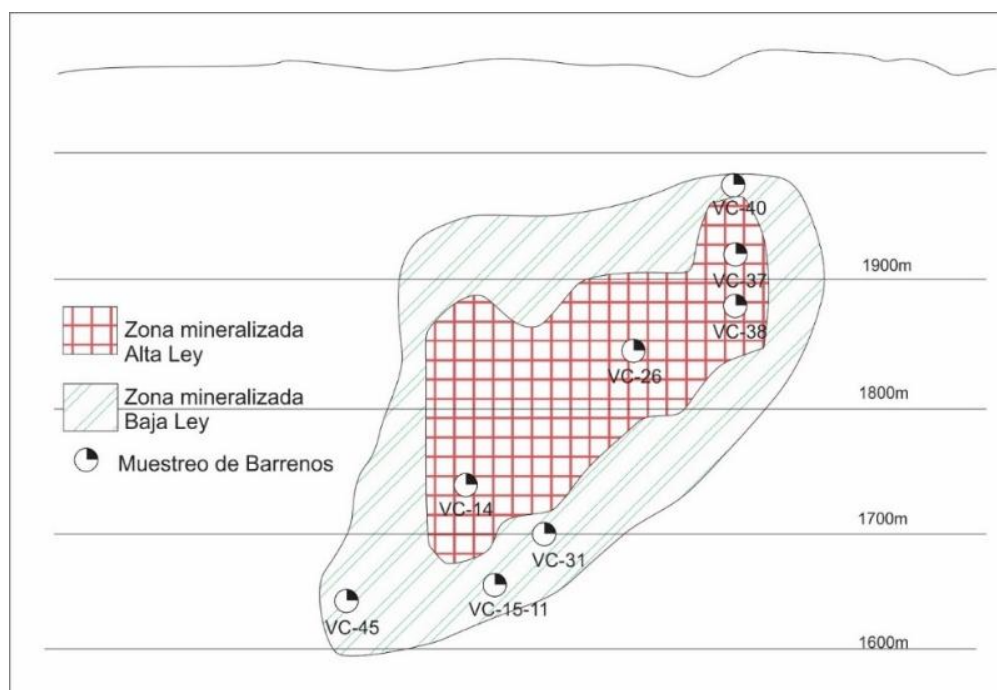


Figura IV.5. Barrenos muestreados del yacimiento mineral *Vacas*.

En el yacimiento se presenta alteración retrogradada con propilitización y, con mayor desarrollo, cloritización reconocida por petrografía y espectroscopía. La presencia de epidota en las muestras de barrenación de la mina *Quebradillas* es abundante mientras que en *Vacas* es mucho menor. En ambos yacimientos el desarrollo de cristales de clorita como alteración subpropilítica es muy abundante en la zona mineralizada y, discreto en la roca encajonante. También se identificó en *Quebradillas* un evento tardío de veta epitermal de cuarzo calcedónico cortando la mineralización de Skarn.

Con la petrografía de muestras tomadas a distintas profundidades de la mina *Vacas* fue elaborado un cuadro paragenético mineral para las zonas de muestreo profunda, media y superficial, y comparada con lo observado en las muestras de la mina *Quebradillas*.

*Tabla IV.1. Relación mineralógica de minas Vacas y Quebradillas.*

Grupo	Mineral	Vacas	Quebradillas		
Skarn Fase Prograda	Granate (Ca)	X	X		
	Diópsido	-	X		
	Cuarzo	X	X		
	Calcita	X	X		
	Pirita	X	X		
Skarn Fase Retrograda	Apatito	X	X		
	Epidota	X	X	X	Presente
	Clorita	X	X	X	Abundante
	Tremolita - Actinolita	X	X	-	No observado
	Cuarzo	X	X		
	Calcita	X	X		
	Fluorita	X	-		
	Pirita	X	X		
	Pirrotita	X	X		
	Arsenopirita	X	X		
	Esfalerita	X	X		
	Calcopirita	X	X		
	Galena	X	X		
	Sulfosales de plata	X	X		
	Sericita e Illita	X	X		
Veta hidrotermal	Oz calcedónico	-	X		

#### IV.4.1. Vacas: Zona mineralizada inferior

En la zona profunda de la mina *Vacas* ( $Z = 1700$  msnm), correspondiente a las muestras obtenidas de los barrenos VC-45, VC-15-11 Y VC-31 (Anexo A), se puede observar una mineralogía congruente con la zona de alteración cercana al cuerpo intrusivo mineralizante: granate del grupo Grosularia-Andradita (ver apartado MEB), diópsido, cuarzo, calcita y pirita, correspondientes a una zona con alteración progradada. Los sulfuros presentes son: esfalerita, calcopirita, pirita, arsenopirita y marcasita de alteración retrograda (Figura IV.6). Acompañando a la mena se tiene una asociación epidota únicamente reemplazando en parches a las plagioclasas y en microcristales, clorita muy abundante, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita y apatito.

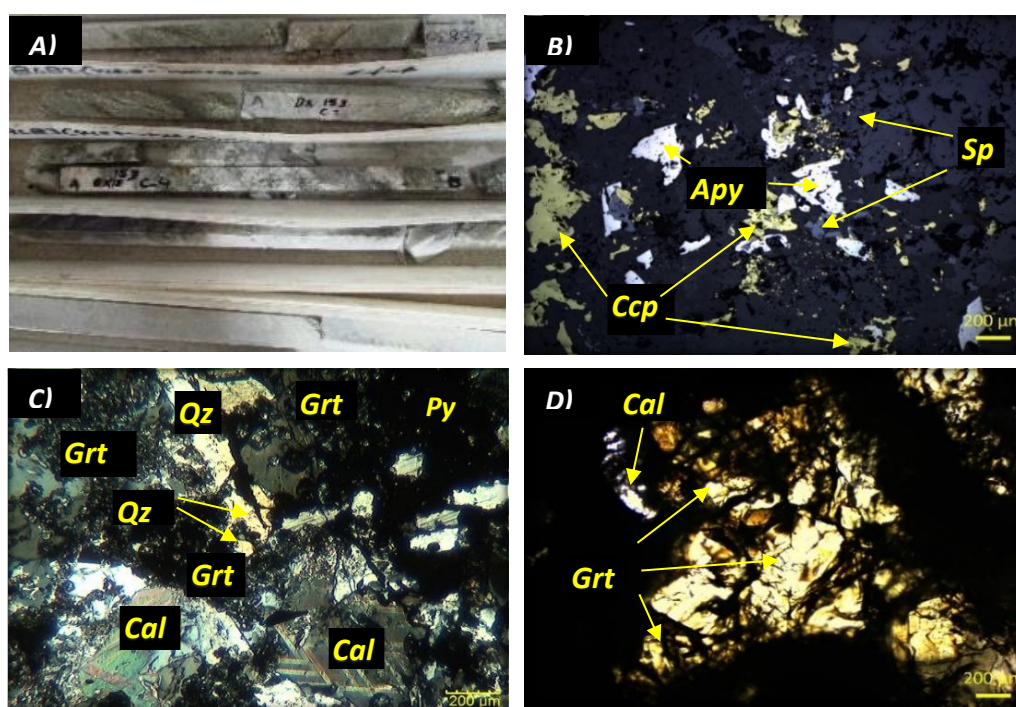


Figura IV.6. A) Barreno muestreado de la mina Vacas. B) Microcristales de calcopirita, esfalerita y arsenopirita vistos con luz reflejada. C) Microcristales de cuarzo, calcita, granate y vetilleo de pirita en lámina delgada. D) Fenocristales de granate en lámina gruesa 60  $\mu$ m.

En las muestras estudiadas de la mina *Quebradillas* se identificó la presencia de granates en recorridos en interior mina en los niveles más profundos (Nivel 1800 msnm), se pudo corroborar la asociación mineral de granates del mismo grupo grosularia – andradita asociado con cuarzo, pirita y calcita de la fase progradada. Se observó el depósito de sulfuros como esfalerita, pirrotita y pirita. Los fenocristales de granate presentes en el interior de la mina *Quebradillas* presentan un tamaño mucho mayor al de *Vacas* llegando hasta los 7 mm (Figura IV.7).

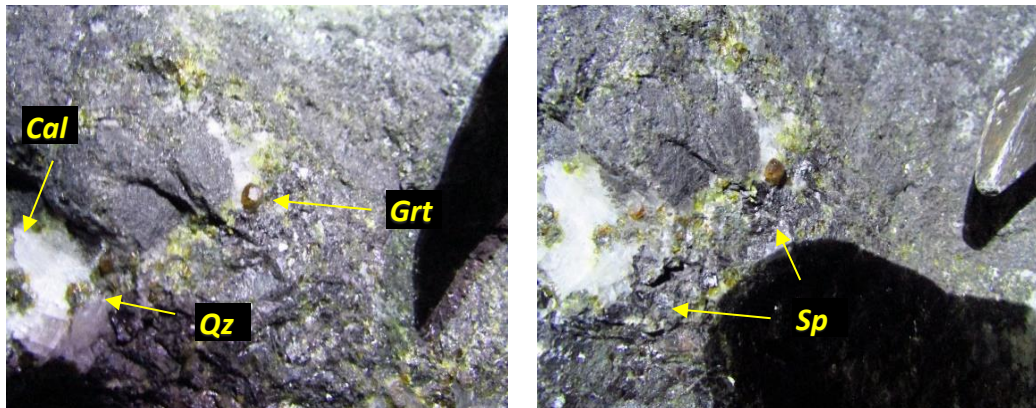


Figura IV.7. Cristalización de fenocristales de granate, calcita, cuarzo y algunos sulfuros en el interior de la mina Quebradillas.

#### IV.4.2. Vacas: Zona mineralizada media

En la zona mineralizada media de Vacas (Z = 1800 msnm) se presentan minerales de mena con las leyes de plata más altas. En esta zona representada por los intervalos muestreados en los barrenos VC-14 y VC-26, se presenta el depósito de sulfuros masivos; calcopirita, esfalerita, galena y sulfosales de plata de la serie tetraedrita argentífera – freibergita (ver apartado MEB).

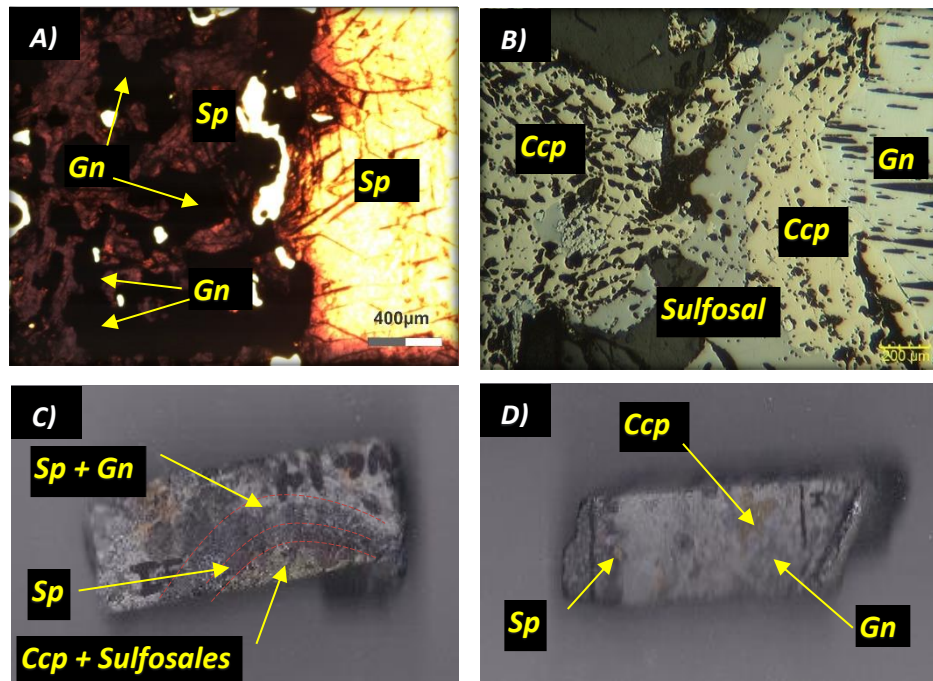


Figura IV.8. A) Eventos de cristalización de esfalerita, VC-14. B) Minerales de mena en el barreno VC-26. C) Bandas en la cristalización de sulfuros, esfalerita, galena, calcopirita y sulfosales VC-14. D) Sulfuros masivos, galena, calcopirita y sulfosales de plata VC-26.

Se pueden reconocer eventos multipulsantes de sulfuros como en la esfalerita, observándose un evento con esfalerita rica en hierro asociada con glena y otro evento con esfalerita con menor contenido de hierro, color rojizo y cristales traslucidos (Figura IV.8).

En la zona media se presenta la cristalización de minerales de ganga como marcasita, pirita, cuarzo, epidota (microcristales), clorita, calcita y arcillas, correspondientes a la alteración propilítica en la fase retrograda del skarn, asociada a la mineralización de sulfuros. Se puede observar una cristalización abundante de microcristales de clorita en esta zona con cuarzo plumoso y cuarzo zonado en contraste con la zona inferior (Figura IV.9).

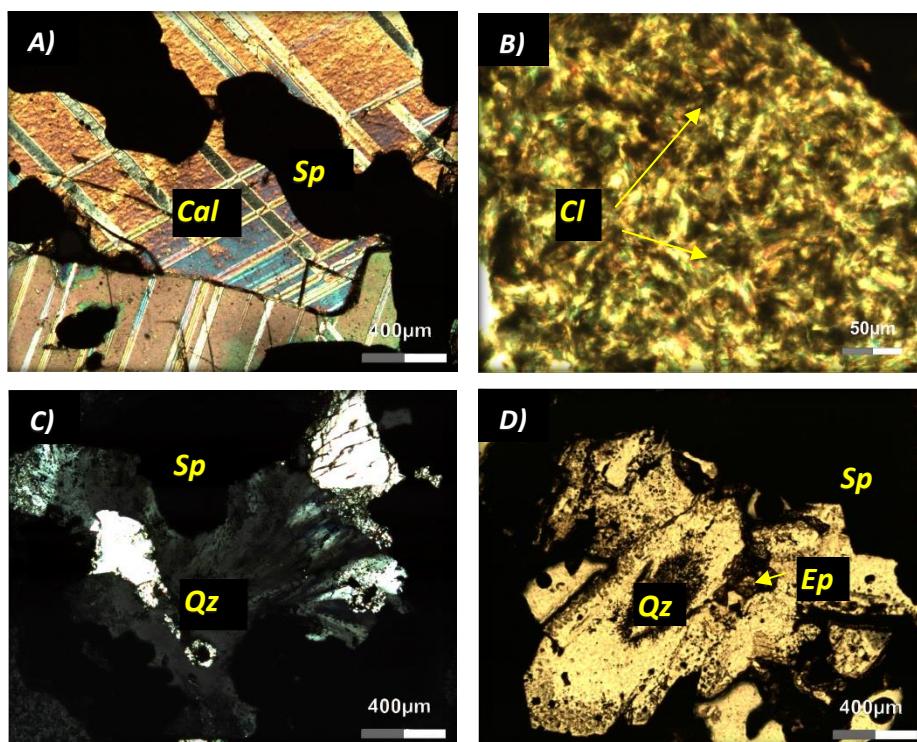


Figura IV.9. Minerales asociados a la mena. A) Calcita tardía asociada con esfalerita. B) Clorita microcristalina. C) Cuarzo plumoso con esfalerita. D) Cuarzo plumoso y microcristales de epidota.

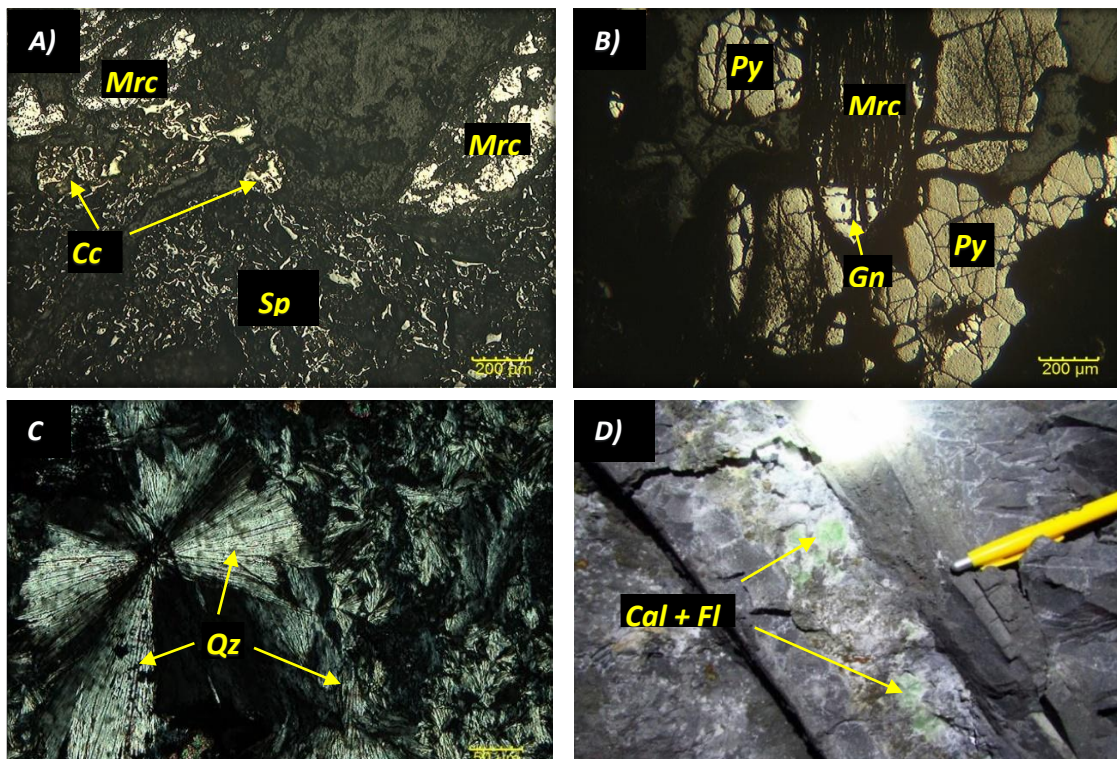
#### IV.4.3. Vacas: Zona mineralizada superior

Hacia la zona menos profunda del yacimiento (Z = 1900 msnm), representada por las muestras seleccionadas de los barrenos VC-37, VC-38 Y VC-40, se puede observar la fase distal y final de depósito de sulfuros como pirita, marcasita, esfalerita, calcopirita y galena. En esta zona de mineralización la mena es muy poco abundante en minerales de plata, siendo la esfalerita, pirita y marcasita los sulfuros principales. Los microcristales de calcopirita y galena se presentan de manera poco frecuente. En esta zona se pueden encontrar minerales correspondientes a una alteración subpropilítica de menor temperatura representada por clorita, sericita, illita, calcita y



cuarzo radial (Figura IV.10), y donde la textura del cuarzo radial, del tipo cristobalita, exhibe cristales inequigranulares.

En reconocimiento de campo de los mantos mineralizados de la mina *Vacas*, se pudo constatar la presencia de fluorita asociada con calcita en la parte final del depósito de sulfuros de la zona menos profunda del yacimiento, situada en el contacto al alto con la sucesión de calizas y lutitas de La Formación Cuesta del Cura. Se presenta una alteración argílica intermedia representada por montmorillonita, cuarzo y caolinita.



*Figura IV.10. A) Cristales de marcasita, calcopirita y esfalerita. B) Cristales de Pirita, marcasita y microcristales de galena. C) Cristobalita en la zona mineralizada superficial del yacimiento Vacas. D) Cristales de fluorita asociada a calcita en la mina Vacas.*

#### IV.4.4. Relación mineralógica y paragénesis

La mineralogía observada y clasificada de los yacimientos se divide la fase progradada, retrogradada y un evento posterior hidrotermal que sólo se observó en la mina *Quebradillas*. La fase progradada en la mina *Vacas* está marcada por la presencia de microcristales de granate, diópsido, pirita, cuarzo y calcita asociados, esta fase se distingue principalmente en la zona más profunda y se relaciona con el principio del depósito de sulfuros de zinc, cobre, hierro (pirrotita y marcasita) y con muy bajos contenidos de plata. La etapa progradada presente en *Quebradillas* presenta la cristalización

de granates de hasta 7 mm con asociaciones minerales similares a *Vacas*, pero mayor contenido de pirrotita y mayor contenido de esfalerita.

La mineralogía expresa la presencia de dos eventos en la fase retrograda observados en láminas delgadas de ambos yacimientos. En los yacimientos *Vacas* y *Quebradillas* se presenta alteración retrograda con propilitización y con gran desarrollo de cristales de clorita (subpropilítica) en ausencia de epidota. La fase retrograda en *Vacas* se caracteriza por la presencia de microcristales de epidota y poco abundantes, asociados con apatito, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita, illita y clorita abundante asociados con sulfuros de mena como esfalerita rica en hierro la cual además está asociada con galena, calcopirita y sulfosales. Se identificó un segundo evento de la fase retrograda con mineralogía similar, pero sin epidota y con cristalización de esfalerita con mayor contenido de zinc sin asociación con galena, presentando un telescopio de la mineralización de mena. Se presenta illita para fase retrograda con propilitización, hasta clorita y montmorillonita sólo al final de la cloritización en la alteración subpropilítica. En ambos cuerpos se puede denotar la presencia de cuarzo, montmorillonita y caolinita representando la alteración argílica intermedia como guía de mineralización superficial en ambas estructuras en zonas distales del manto y subsuperficiales.

En la mina *Quebradillas* se pudo diferenciar la superposición de eventos retrógrados, un primer evento con la cristalización microcristales de epidota asociada con piritita, cuarzo, calcita e illita, cortados por un segundo evento donde, debido a un evento de extensión compresión, se cristalizó epidota columnar con depósito de algunos microcristales de piritita asociados, cuarzo, clorita y caolinita. Además, se pudo identificar un evento rico en sílice calcedónico en hasta 30% de la lámina y fenocristales de calcita, además presenta microcristales opacos de óxidos de hierro, arsenopirita, epidota y arcillas en cantidades accesorias.

Finalmente, de acuerdo a los análisis petrográficos realizados (Anexo A) y a la relación textural de cristalización de minerales presente en ambos yacimientos, se determinó el cuadro paragenético general del yacimiento, donde se puede observar la fase prograda de alteración hidrotermal sin depósito de sulfuros de mena, seguida por la fase retrograda donde se encuentran los eventos mineralizantes de mena de zinc, cobre, plomo y plata (Figura IV.11). La alteración argílica intermedia con presencia de caolinita se presenta en superficie tanto en *Vacas* y *Quebradillas*.

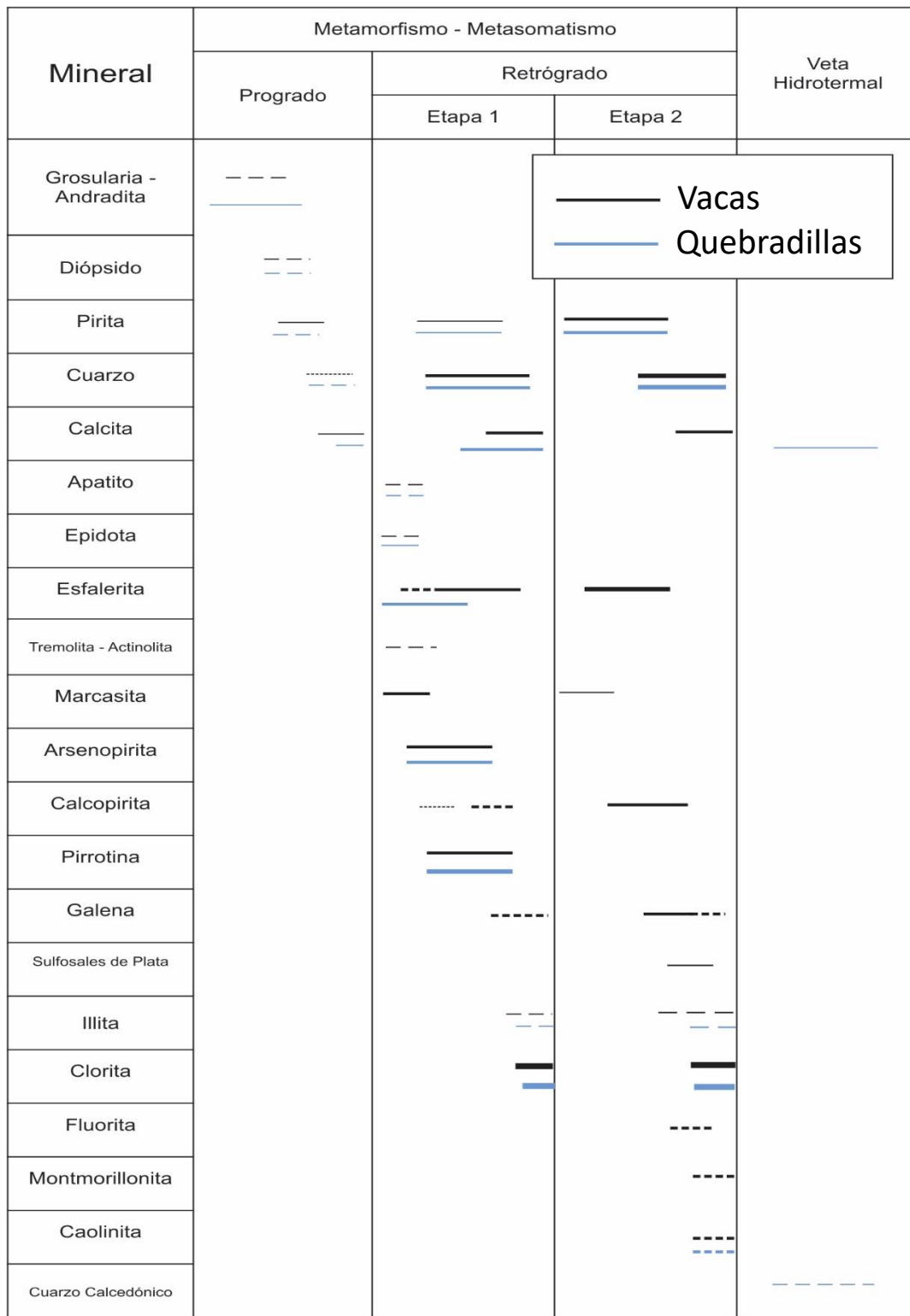


Figura IV.11. Cuadro paragenético de las muestras estudiadas.

#### IV.5. Alteraciones hidrotermales: Espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR)

A las muestras recolectadas en la unidad minera La Parrilla se le realizaron estudios mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR, *Short-wave infrared*) para reconocer las características de los minerales de alteración observados en la mina Vacas y Quebradillas, y para realizar una comparación entre las curvas de los espectros resultantes obtenidas a través de este método en ambos yacimientos.

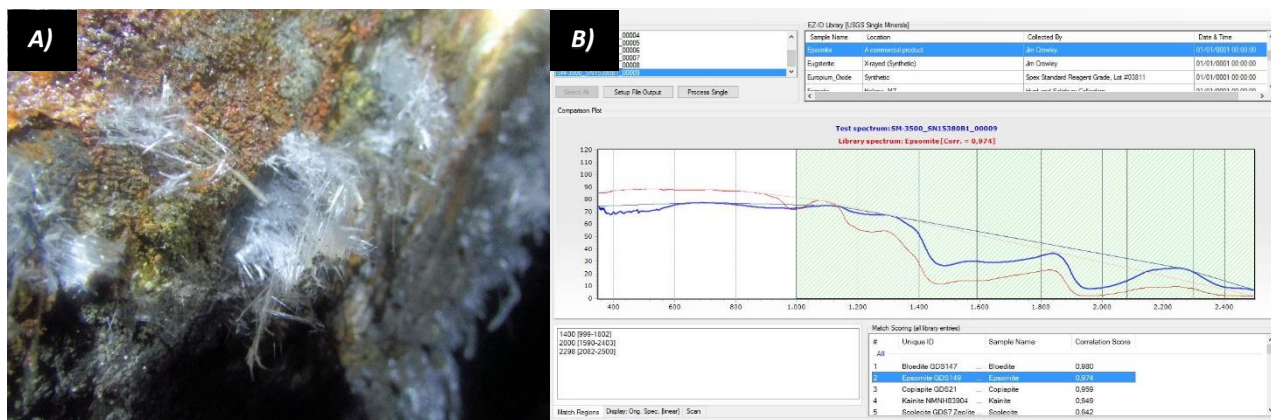


Figura IV.12. A) Epsomita como agregados fibrosos en el interior de la mina Vacas. B) Curva resultante comparada mediante análisis SWIR.

El método fue utilizado en primer lugar en una muestra de cristales desconocida obtenida del interior de la mina Vacas, el cual se identificó como un sulfato de magnesio heptahidratado o epsomita ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ), comúnmente depositado en zonas con abundante humedad (Figura IV.12) no relacionado a la mineralización. Su determinación se basa en la comparación de la curva obtenida, la base de datos del sistema y el contexto geológico de cristalización del mineral.

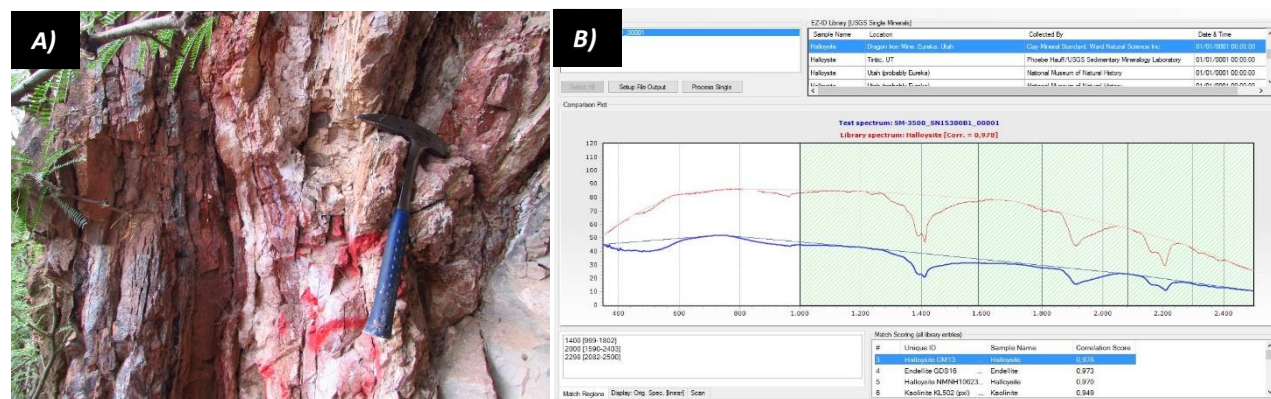


Figura IV.13. A) Muestras de alteración en la superficie Vacas tomadas en una obra antigua con montmorillonita, caolinita, halloysita y algunas arcillas amorfas. B) Curva resultante comparada mediante análisis SWIR de halloysita.

Se realizaron análisis similares en muestras en superficie y en interior mina identificándose la presencia en superficie de montmorillonita e illita, relacionado a esto en las muestras tomadas de obras antiguas se identificó mediante el mismo análisis la presencia caolinita y halloysita (Figura IV.13). En el caso de *Vacas* y *Quebradillas* superficialmente se puede denotar una alteración argílica representada por montmorillonita, distal a estratos que alojan la mena. Se observan distribuciones irregulares de caolinita, como guía de mineralización subsuperficial en ambas estructuras. Cabe mencionar que el desarrollo de estas alteraciones es mínimo (<20 cm) y poco perceptible en superficie.

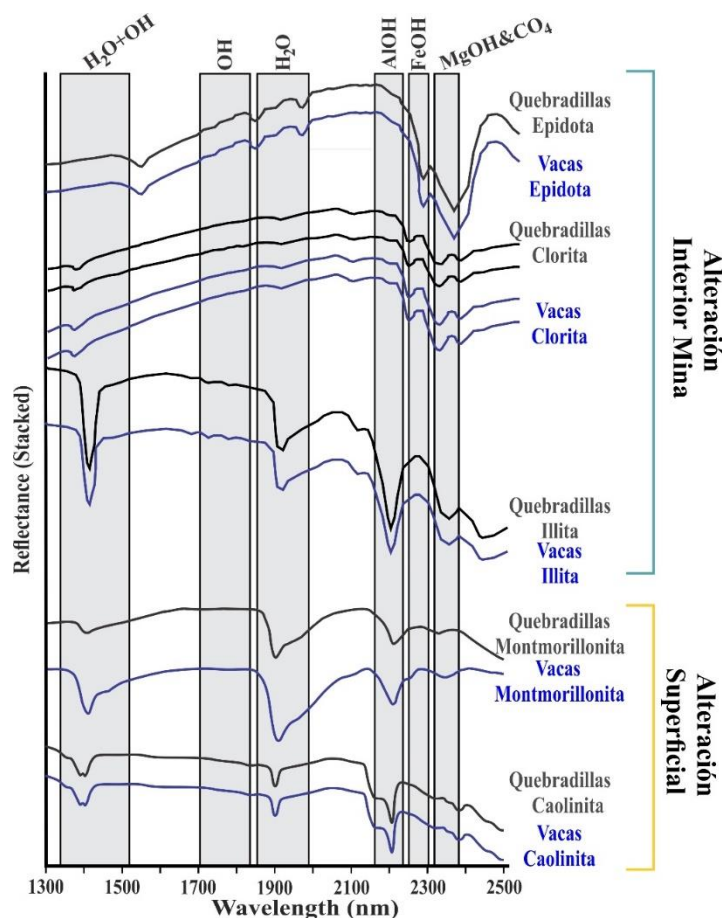


Figura IV.14. Cuadro comparativo de las curvas resultantes del método SWIR obtenidos para ambos yacimientos en interior mina y en la zona superficial.

En interior mina en niveles profundos a intermedios se puede identificar como parte de la alteración retrograda del skarn minerales como epidota, clorita e illita (Figura IV.14). La alteración en niveles intermedios a profundos grada de alteración subpropilítica a propilítica, siendo la de mayor extensión la subpropilítica representada por la asociación clorita e illita.

A niveles someros la alteración metasomática retrograda tiene amplia extensión lateral pudiendo sobrepasar la aureola metamórfica de contacto, mientras en profundidad tiene poco desarrollo comparado con la aureola de metamorfismo. La alteración retrógrada es más extensa a niveles más someros ya que está controlada por la circulación de fluidos y la participación de aguas meteóricas en la fase tardía del sistema.

#### IV.6. Estudio de granates y mena: Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Como complemento al estudio de minerografía y petrografía se empleó el microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM) con el cual se detalló aspectos microtexturales y se obtuvo la composición semicuantitativa de los elementos (EDS) presentes en distintos minerales presentes en las muestras estudiadas. Las sulfosales presentes en las muestras de barrenación fueron examinadas y con base en los resultados obtenidos se clasificaron en la serie tetraedrita argentífera ( $\text{Cu,Fe,Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  a freibergita  $\text{Ag}_6\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ . La freibergita forma una serie con la tetraedrita en la cual que se va sustituyendo la plata y el hierro por cobre, y, además de los elementos de su fórmula, suele llevar como impurezas: cinc, mercurio o bismuto (Mindat, 2019). En la zona mineralizada de la mina Vacas se encontró en la zona de mena media mayor contenido de plata. La presencia de la serie tetraedrita argentífera – freibergita se encuentra asociada con galena y calcopirita en la zona media, mientras que, hacia la zona profunda donde la ley de plata se reduce, se presenta la cristalización de sulfosales con presencia de impurezas de bismuto asociadas con marcasita y pirrotita (Figura IV.15).

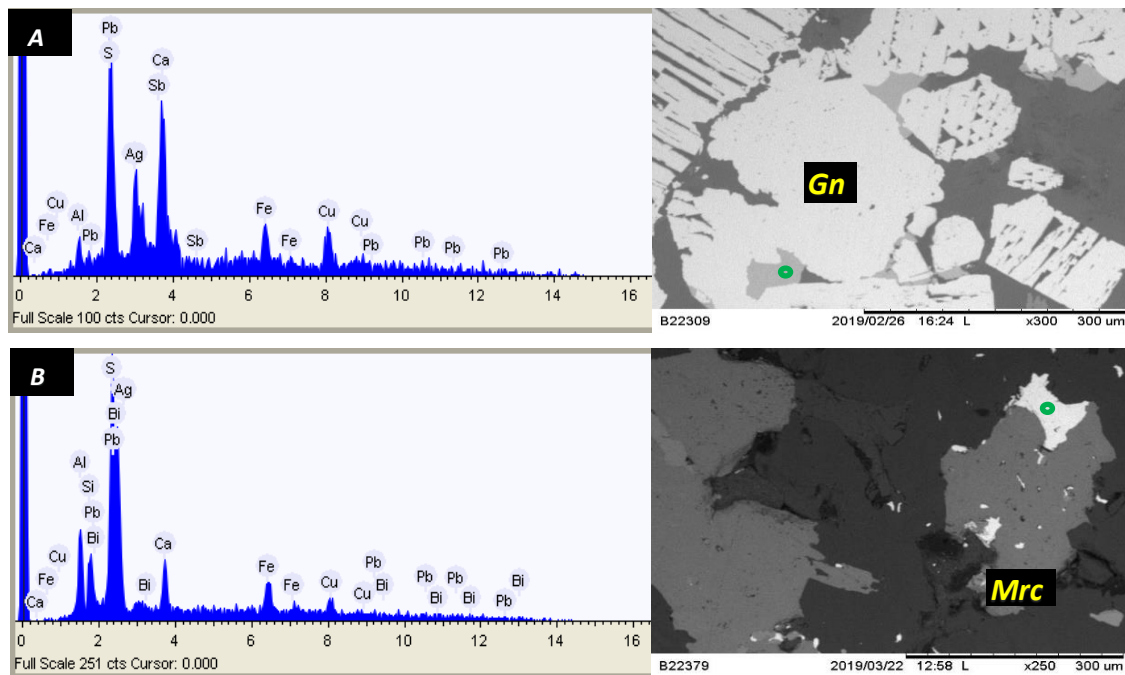


Figura IV.15. A) Imagen de SEM-BSE y análisis de EDS realizado a sulfosal asociada con galena en la zona de mena media. B) Imagen SEM-BSE y análisis de EDS realizado a sulfosal asociada a marcasita en zona de mena profunda presentando impurezas de bismuto. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde.

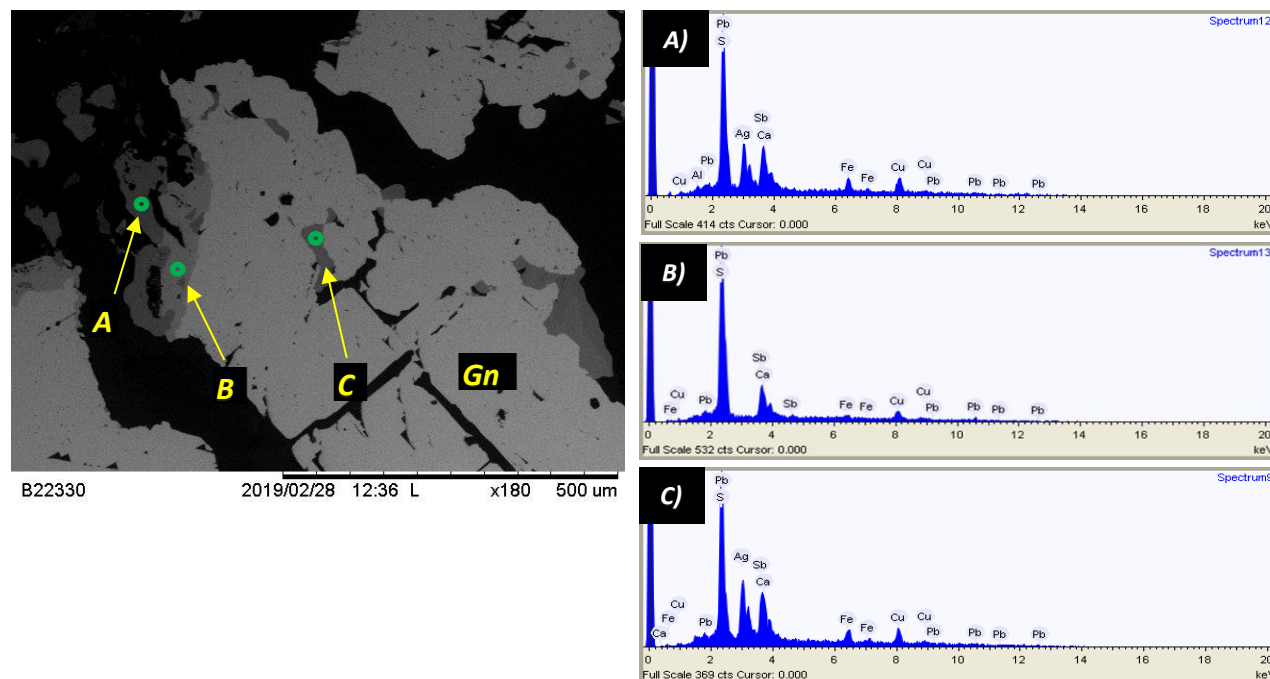


Figura IV.16. Imagen de SEM-BSE y análisis SEM de zona mineralizada media. A y C) Tetraedrita argentífera –freibergita. C) Tetraedrita sin plata. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde.

En la zona media se pudo identificar la cristalización de sulfosales ricas en plata y sulfosales sin plata, ambas asociadas a un evento de cristalización de galena (Figura IV.16). Dentro y en los bordes de los cristales de calcopirita también se realizó un análisis a microcristales de sulfosales presentes en la zona de mena media, arrojando de igual manera contenidos de plata como los observados en los cristales asociados a galena, pero con contenidos de cobre y hierro (Figura IV.17).

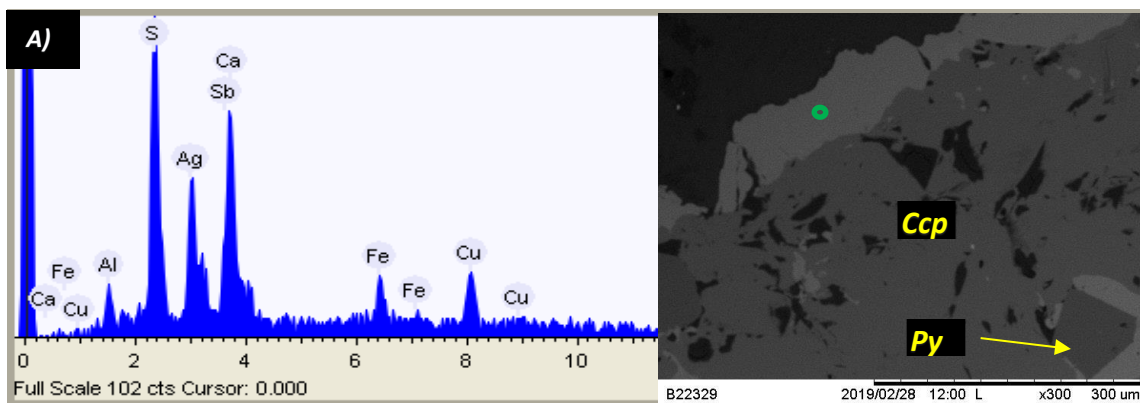


Figura IV.17. Imagen SEM-BSE y análisis EDS llevado a cabo en los cristales de sulfosales asociados a cristales de calcopirita. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde.

De igual manera se utilizó el SEM y análisis EDS con el fin de conocer textura y la composición del granate perteneciente a la zona profunda del yacimiento *Vacas* donde se encontró la asociación de éste con cristales de apatito de fase retrograda. El granate de la zona profunda del yacimiento presenta una zonación composicional solo apreciable mediante imágenes de SEM y verificada con análisis EDS, al realizar el análisis de las bandas de granate se encontró una variación alternada principalmente en el contenido de aluminio y hierro (Figura IV.18). El contenido de Ca, Fe y Si por análisis EDS hace suponer que el cristal pertenece a la serie Grosularia  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  - Andradita  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ , como andradita

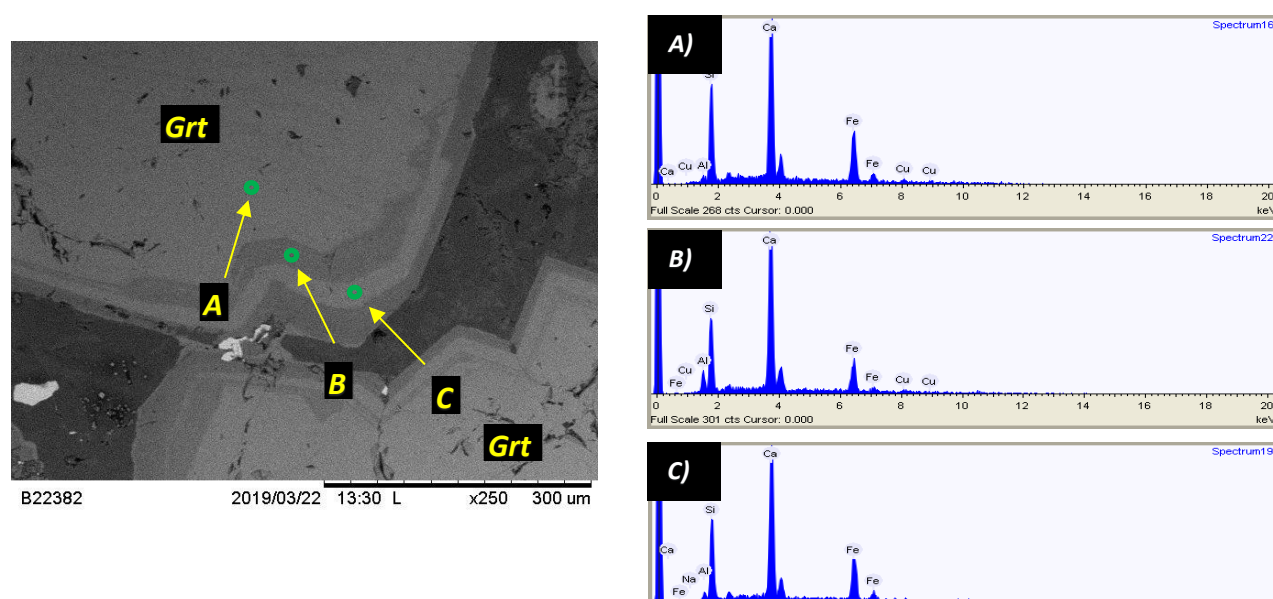


Figura IV.18. Imagen de SEM-BSE y análisis EDS llevado a cabo en los cristales de granate de la fase progradada de alteración. Nota: El análisis se llevó a cabo en el área del centro del círculo verde.

Además de realizar análisis semicuantitativos de química mineral con tiempo de ablación de 50 s (Anexo D), para aproximar a una composición realista (Tabla IV.2), se graficaron los valores composicionales obtenidos de EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) para ubicar sus valores en el diagrama ternario de granate para su discriminación del tipo de depósito de skarn (Meinert, 1983). En la Figura IV.19, se puede observar que los granates de *Vacas* corresponden a la serie de grosularia-andradita, con tendencia a andraditas, dentro de yacimientos de Zn y Cu.



Tabla IV.2. Análisis de química mineral EDS de bandas de granate zonado del yacimiento Vacas.

#	Muestra	Punto	SiO2	Al2O3	TiO2	CaO	Na2O	K2O	MnO	
1	Bx153C4	Centro1	34.95	1.8	0	30.43	0	0	0.96	
2	Bx153C4	Centro2	34.94	1.83	0	30.67	0	0	0	
3	Bx153C4	Banda1	35.49	6.47	0	32.49	0	0	0	
4	Bx153C4	Banda2	33.79	6.75	0	32.7	0	0	0	
5	Bx153C4	Banda3	33.21	2.02	0	32.5	0.43	0	0	
12	Bx153C4	Banda4	31.1	2.46	0	30.51	0	0.065	1.12	
14	Bx153C4	Banda5	31.91	6.75	0	36.3	0	0	0	
15	Bx153C4	Banda6	32.34	7.53	0	35.59	0	0	0	
Fe2O3 (Total)	MgO	Total						% Pyralspita	% Andradita	% Grosularia
31.85	0	99.786	Porcentaje final.				5.10	91.36	3.54	
32.57	0	99.733					5.95	90.23	3.82	
25.55	0	99.91					1.91	70.87	27.22	
26.76	0	100.17					0.00	72.89	27.11	
31.84	0	100.44					0.00	91.96	8.04	
33.97	0.18	99.872					0.00	90.93	9.07	
24.63	0.41	101.17					0.00	77.47	22.53	
24.54	0	100.77					0.00	73.22	26.78	

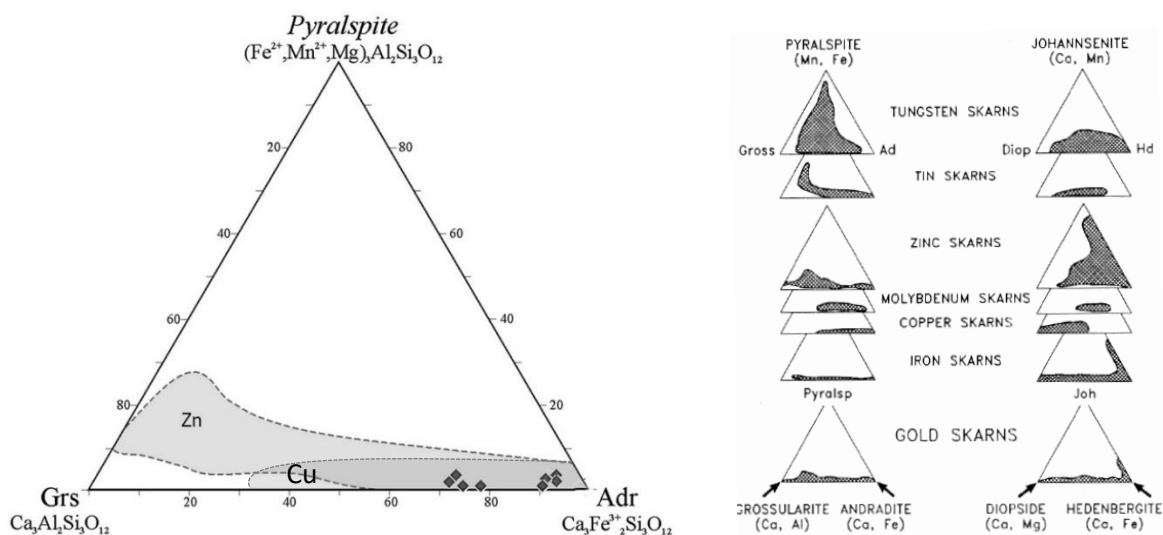


Figura IV.19. Diagrama ternario composicional de granates para discriminación de tipo de skarn. Nótese que los puntos de los granates de Vacas caen en el campo de los depósitos de Zn y Cu. Modificado de Meinert, 1983.

#### IV.7. Microtermometría

El análisis microtermométrico se realizó con el fin de identificar procesos de mineralización, salinidad y temperatura de homogenización (Th) del fluido hidrotermal que dio origen a los yacimientos *Vacas* y *Quebradillas*. Además, con los resultados obtenidos se generó un gráfico de temperatura de homogenización contra salinidad para compararlo con el gráfico de rangos genéricos de temperatura y salinidad de tipologías de depósitos minerales de Wilkinson (2001). También, se realizaron análisis estadísticos y distribuciones de poblaciones de datos de Th versus salinidad para denotar procesos mineralizantes, para el análisis se determinaron los procesos de ebullición, disolución y enfriamiento en ambos yacimientos.

En la mina *Vacas* se analizaron inclusiones fluidas contenidas en cristales semitraslucidos de esfalerita de la zona profunda, así como en cuarzo y calcita. Las asociaciones de inclusiones fluidas bifásicas (L+V) estudiadas corresponden a inclusiones primarias y pseudosecundarias regulares, irregulares, tabulares y ovoides, siendo las inclusiones irregulares las más abundantes. Las inclusiones presentan un rango de tamaños menores a 50  $\mu\text{m}$  y grados de relleno que van de 20%-95%, también siendo observadas inclusiones monofásicas L, V.

La zona profunda del yacimiento *Vacas* muestreada mediante el barreno VC-31 presentó una veta de calcita formada por fluidos a temperaturas alrededor de los 400°C y salinos (<16 % en peso de NaCl) (Anexo C). Esta fase se encuentra en la zona más profunda del yacimiento donde presumiblemente relacionado a la etapa inicial paragenética donde comenzó la precipitaron sulfuros de mena. El barreno VC-45 presenta la cristalización de esfalerita semitraslucida con inclusiones fluidas con temperaturas de homogenización, salinidad y grado de relleno variables de 70% - 90% y progresivamente decrecientes (Figura IV.20). La temperatura presentada por las inclusiones fluidas en esfalerita es de 170 - 320°C con salinidades de entre 15% y hasta 25% de NaCl equivalente.

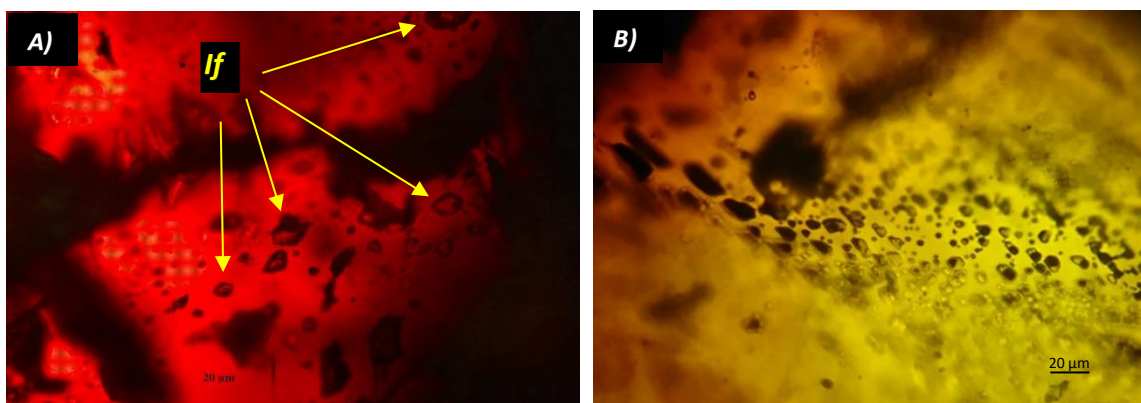


Figura IV.20. A) Inclusiones fluidas en esfalerita de la zona profunda. B) Inclusiones fluidas monofásicas y bifásicas en esfalerita de la zona profunda con grados de relleno muy variables.

Los resultados de salinidad y temperatura de homogenización de la esfalerita graficados (Figura IV.21), presentan un patrón de disminución de salinidad conforme disminuye la temperatura evidenciando un proceso de dilución.

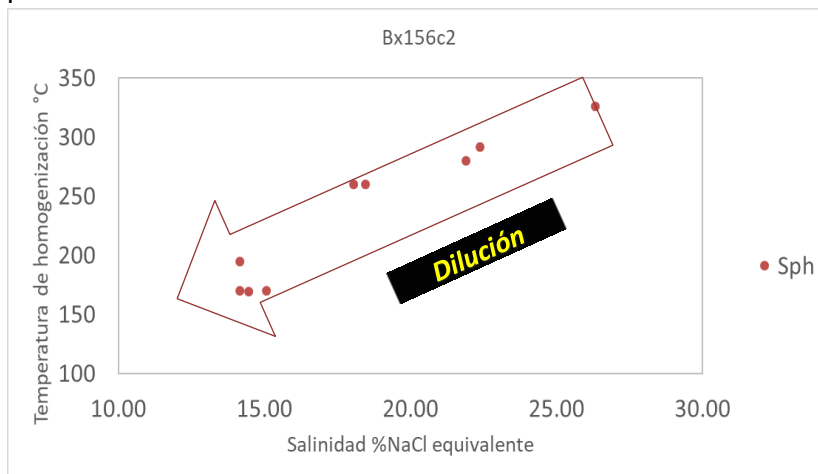


Figura IV.21. Gráfico de salinidad vs temperatura de homogenización de la muestra BX156C2.

En la zona mineralizada media representada principalmente por los barrenos VC-14 y VC-26 se presentaron inclusiones fluidas (Figura IV.22) con temperaturas de homogenización entre los 190°C y hasta los 250°C con salinidades desde 2% hasta 15% de NaCl equivalente con presencia de inclusiones fluidas con grado de relleno de 50% - 90%.

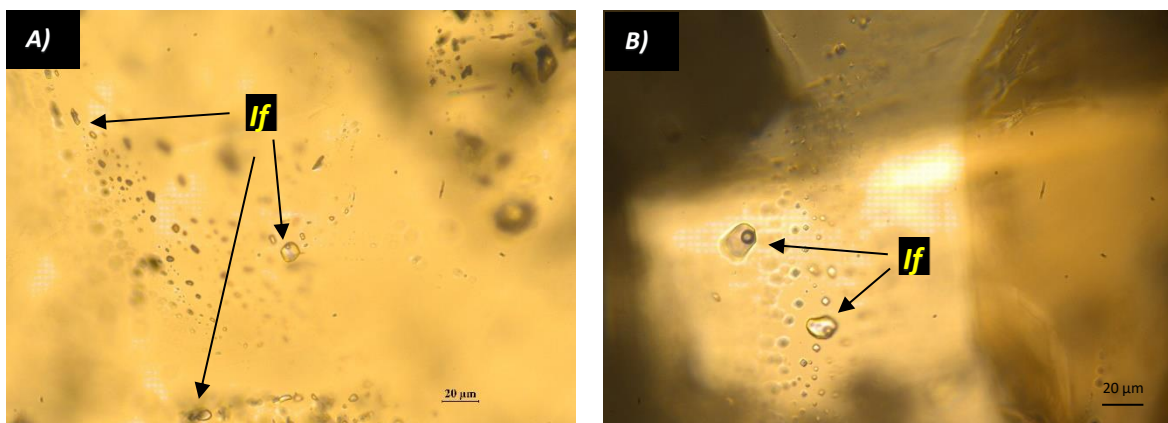


Figura IV.22. A y B) Inclusiones fluidas en calcita primarias y pseudosecundarias asociadas a la mineralización en la zona media del yacimiento Vacas.

Las inclusiones fluidas estudiadas en la zona superior mineralizada (Figura IV.23), principalmente en cristales de calcita del barreno VC-38, presentaron temperaturas variantes de 160°C -195°C con salinidades de 10%-15% de NaCl equivalente y contraste en los grados de atrapamiento 50% -90%, además de presentar inclusiones monofásicas de líquido y vapor, como evidencia de un proceso *boiling*.

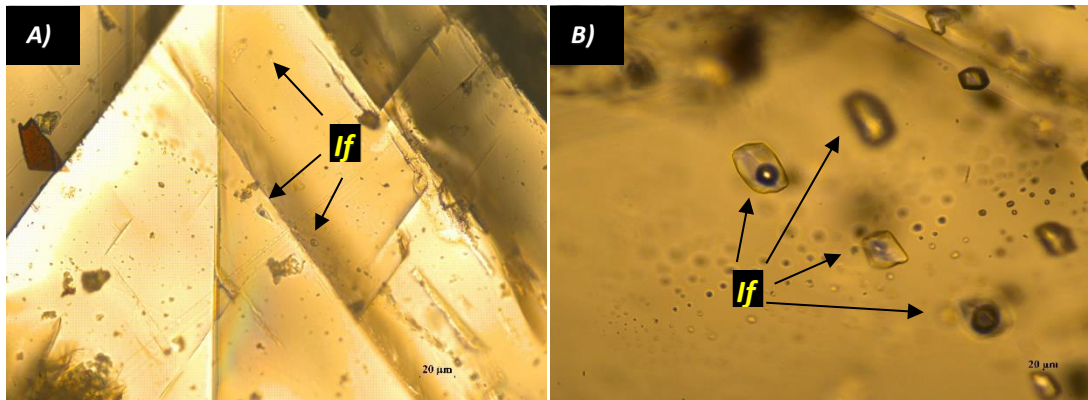


Figura IV.23. A) Inclusiones fluidas en calcita primarias y pseudosecundarias asociadas a la mineralización en la zona superior del yacimiento Vacas. B) Inclusiones fluidas primarias en calcita asociada a la mineralización en la zona superior del yacimiento Vacas. Nótese el grado de relleno diferente, sugiriendo un proceso de ebullición.

Tabla IV.3. Tabla resumen de los datos obtenidos en el estudio de microtermometría en los yacimientos Vacas y Quebradillas.

Muestra mineral	Th (°C)			Tfh (°C)			Salinidad (wt% NaCl equivalente)		
	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.
<b>Vacas</b>									
Bx86c3 VC-38 Cal	163.20	182.36	197.40	-16.20	-10.66	-6.50	9.86	14.28	19.60
Bx96c5 VC-26 Cal	169.20	209.71	284.30	-5.40	-2.32	-1.00	1.74	3.83	8.41
Bx116c4 VC-14 Qz 1	173.10	190.91	205.30	-22.10	-9.14	-2.40	4.03	12.02	23.76
Bx116c4 VC-14 Qz 2	339.10	358.70	380.20	-21.10	-13.85	-10.50	14.46	17.37	23.11
Bx119C1 VC-14 Cal 1	160.00	176.20	191.00	-2.90	-2.23	-1.50	2.57	3.75	4.80
Bx119C1 VC-14 Cal 2	200.70	227.18	280.30	-8.00	-6.35	-3.60	5.86	9.58	11.70
Bx119C1 VC-14 Qz	233.70	268.35	333.30	-21.10	-15.93	-7.60	11.22	19.02	23.11
Bx153c4 VC-31 Cal 1	199.80	213.66	235.60	-23.10	-18.76	-17.30	20.45	21.48	24.40
Bx153c4 VC-31 Cal 2	190.40	202.40	220.40	-2.90	-2.38	-2.00	3.39	3.99	4.80
Bx153c4 VC-31 Cal	155.60	173.55	202.80	-8.10	-4.12	-0.30	0.53	6.07	11.81
Bx161c2 VC-31 Cal	358.60	390.30	440.20	-12.10	-4.30	-1.20	2.07	6.44	16.05
Bx14c5 ILP-VC-15-11 Qz	200.20	276.13	329.50	-7.90	-4.77	-0.70	1.22	7.21	11.58
Bx14c5 ILP-VC-15-11 Cal	138.90	185.98	298.00	-0.30	-0.14	-0.10	0.18	0.25	0.53
Bx156c2 VC-45 Sp	169.70	235.93	326.40	-26.20	-15.18	-10.20	14.15	18.33	26.31
<b>Quebradillas</b>									
Bx32C3 b ILPQ-16-04 Cal	193.00	241.95	307.80	-22.80	-13.49	-7.20	10.73	17.07	24.21
Bx32C3 b ILPQ-16-04 Ep	270.10	279.90	294.30	-12.40	-12.27	-12.20	16.15	16.21	16.34
Bx32C3 b ILPQ-16-04 Qz	354.40	414.80	460.00	-22.10	-21.43	-20.80	22.91	23.33	23.76
BX29C5 LPQ-16-04 Qz	94.80	129.22	193.20	-18.10	-4.42	-1.20	2.07	6.41	21.04
BX29C5 LPQ-16-04 Cal	114.30	121.53	129.70	-3.10	-1.37	-0.90	1.57	2.35	5.11

El yacimiento *Vacas* presenta gran variación en la temperatura y salinidad de las inclusiones fluidas (Tabla IV.3), así como varias asociaciones de inclusiones fluidas siendo la moda de las inclusiones aquellas que presentan baja temperatura y baja salinidad (Figura IV.24). La primera asociación con inclusiones fluidas analizadas en la veta hidrotermal profunda de calcita con alta temperatura y baja salinidad. Seguido de las fases prograda y fase retrograda del yacimiento, presentando la fase retrograda dos eventos de depósito de mena reconocidos mineralógicamente por la asociación mineral y textural de cada evento. La fase de depósito de minerales de mena comienza con la cristalización de esfalerita a alrededor de 350°C y 25% de NaCl equivalente. Se asocia al proceso de enfriamiento-dilución-ebullición y finaliza en una temperatura y salinidad de alrededor de 200°C y 5% de NaCl equivalente. También se observa una asociación de inclusiones fluidas en calcita de eventos tardíos de baja salinidad y temperatura.

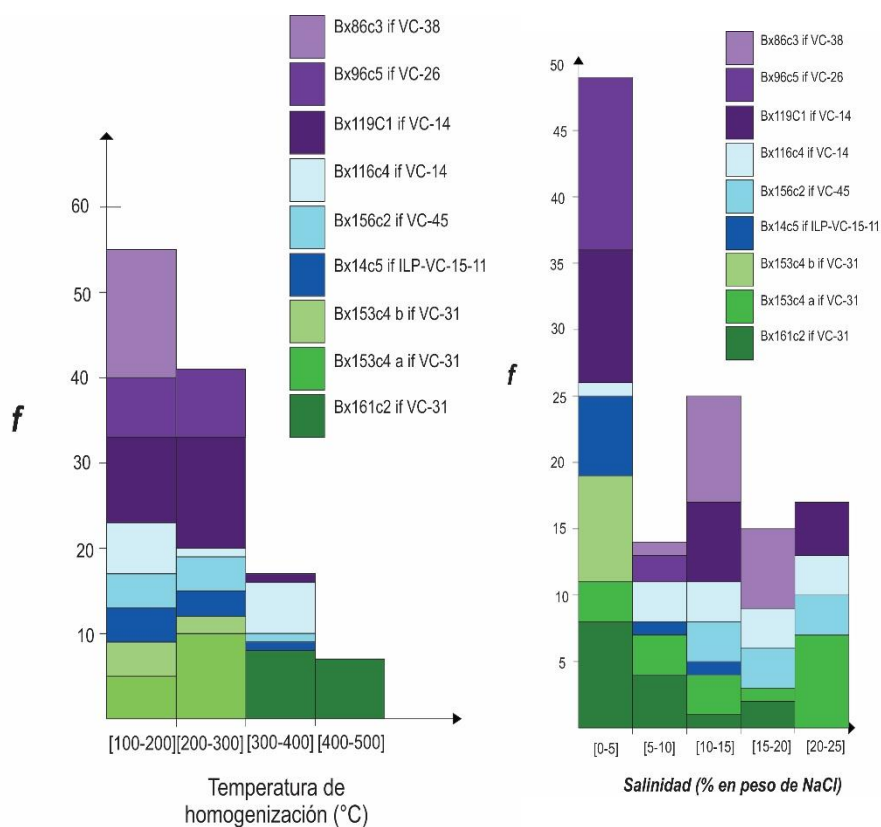


Figura IV.24. Histograma acumulativo de  $T_h$  y Salinidad del yacimiento *Vacas*.

En el grafico conjunto con el total de datos microtermométricos del yacimiento Vacas (Anexo C) se obtuvieron familias de alta temperatura (>300°C) que evidencian el proceso progrado y para el retrogrado (<250°C) con eventos de *boiling*, así como enfriamiento y dilución en la esfalerita (Figura IV.25). Estos eventos fueron evidenciados por presencia grados de relleno muy variables en una misma asociación de inclusiones fluidas, presentando además una tendencia al aumento de la salinidad conforme se disminuye la temperatura en la muestra Qz Alta Temperatura VC-14, estas inclusiones fueron estudiadas en la zona más profunda del yacimiento, además se tiene la presencia de evidencias texturales como la cristalización de cuarzo inequigranular (Anexo B).

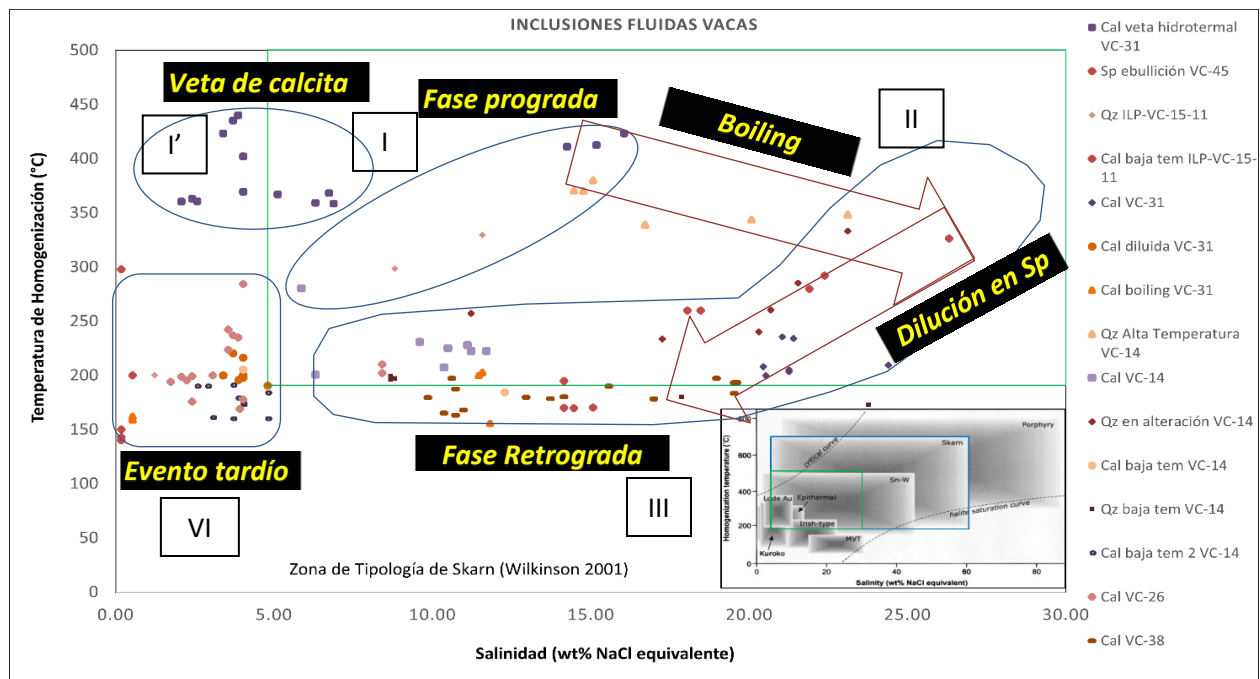


Figura IV.25. Resultados de microtermometría del yacimiento Vacas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes.

Las inclusiones fluidas analizadas en las muestras del yacimiento *Quebradillas* se encontraron alojadas en cristales de epidota, calcita y cuarzo del barreno ILPQ-16-04 (Figura IV.26). En los cristales se presentan inclusiones monofásicas y bifásicas de L, V y L-V de hasta 15  $\mu\text{m}$  en distintos planos. Presentan formas redondeadas y de cristal negativo en la calcita. El grado de relleno en las muestras varía desde 60% - 90%. Los datos microtermométricos se muestran en la Tabla IV.3, los datos extensos se encuentran en el Anexo C.

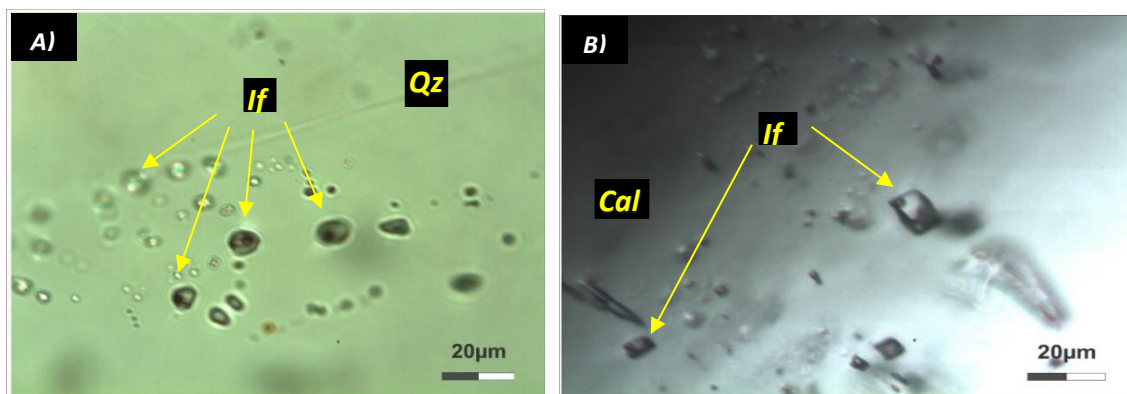


Figura IV.26. Inclusiones fluidas monofásicas y bifásicas en las muestras de *Quebradillas*. A) Inclusiones en cuarzo presentando distintos grados de relleno en plano vertical. B) Inclusiones fluidas en calcita.

Las temperaturas ( $T_h$ ) que se obtuvieron van de los 450°C en la zona de la alteración de mayor temperatura, hasta los 200°C con una moda en el intervalo de menor temperatura de 100°C - 200°C. Se tiene un evento tardío donde se encuentra la presencia de cuarzo calcedónico y calcita cortando la mineralización. El rango de salinidad observado en la zona estudiada va de 10% hasta 25% en peso de NaCl equivalente y la distribución de salinidad exhibe un patrón bimodal con en los rangos de 0 a 5% y 15 a 20 %, mientras que la temperatura presenta un patrón derecho sesgado hacia las temperaturas menores (Figura IV.27).

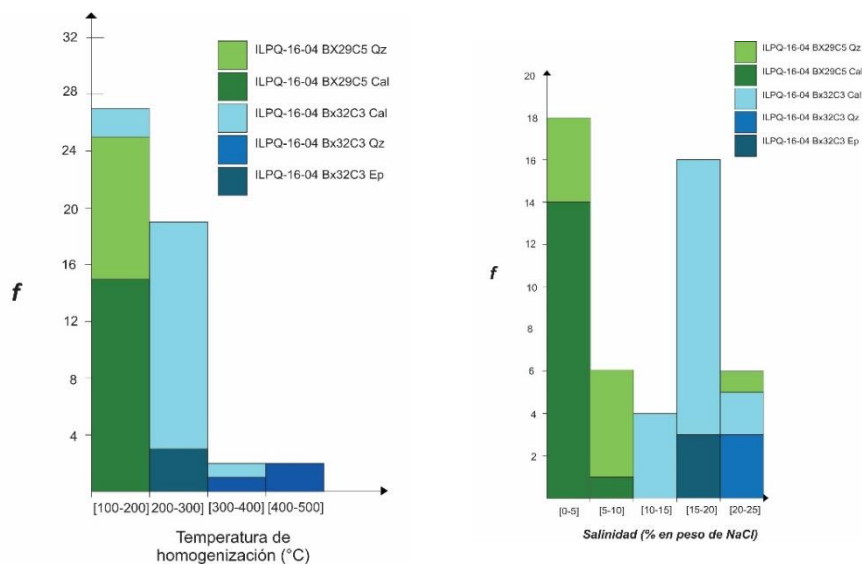


Figura IV.27. Histograma acumulativo de  $T_h$  y Salinidad del yacimiento *Quebradillas*.

La alteración progradada fue identificada en cristales de cuarzo de la muestra ILPQ-16-04 que muestran una temperatura de homogenización máxima de 300 - 450°C y salinidades entre 20 y 25 %wt. de NaCl equivalente.

La Fase retrógrada está dada por la muestra de Cal ILPQ-16-04 y la de Ep ILPQ-16-04, en esta zona es donde se encuentra la mena. En contraste una población de familias de inclusiones fluidas representadas por calcita y cuarzo denotan temperaturas de homogenización entre 100 y 150°C, con salinidades 1 y 7 %wt. de NaCl equivalente, siendo valores menores a los hallados en los datos de la alteración progradada (Figura IV.28). Esta familia se interpreta como un pulso hidrotermal, siendo petrográficamente correlacionables con una veta que corta a la mineralización retrograda.

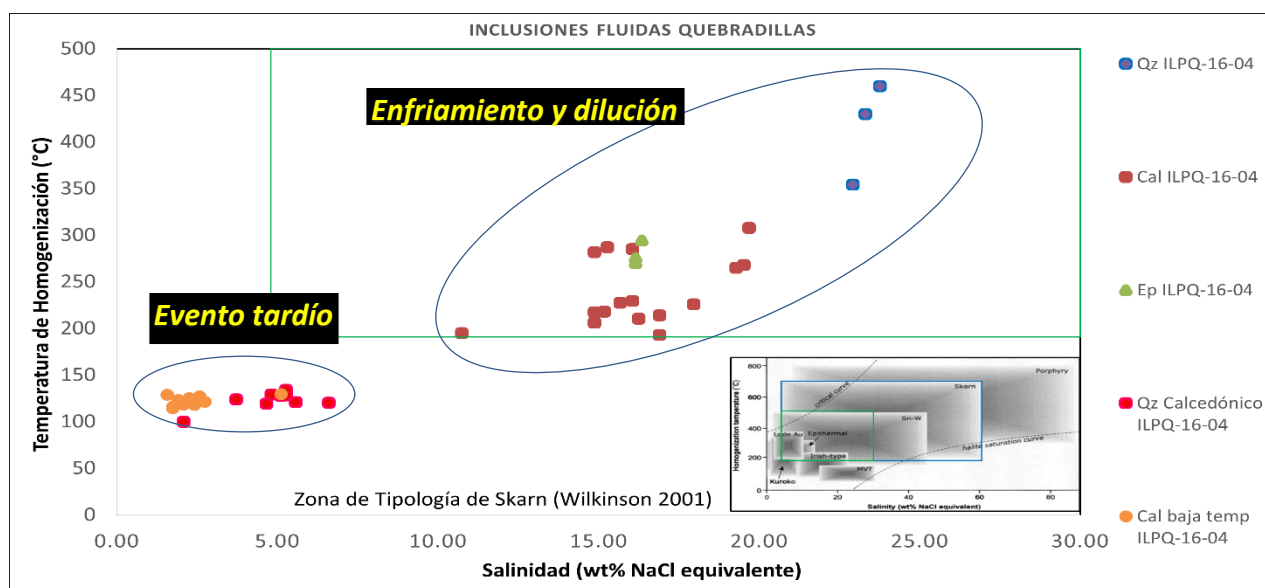


Figura IV.28. Resultados de microtermometría del yacimiento Quebradillas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes.



Los datos microtermométricos denotan familias de inclusiones fluidas que corresponden petrográficamente y representan valores de la alteración prograda con valores de temperatura de homogenización entre 450 y 350 °C, y valor modal de salinidad del fluido mineralizante de alrededor de 24% en peso de NaCl equivalente; con un proceso de enfriamiento asociado de hasta cerca de los 200 °C. Un evento retrogrado con precipitación de mena alrededor de los 320 y 200 °C, con disminución en la salinidad hasta 15% en peso de NaCl equivalente, interpretado como un proceso de dilución (Figura IV.29). Además, se tiene una población de datos microtermométricos que corresponden a un evento tardío hidrotermal, representado por cuarzo de tipo calcedónico que exhibe una temperatura alrededor de los 140 °C y salinidades por debajo de 6% en peso de NaCl, cuyo origen se presume a evento de carácter epitermal, posiblemente relacionado al sistema de vetas adyacente a las mineralizaciones de skarn, conocido como Vetas Cerro Santiago-Perros.

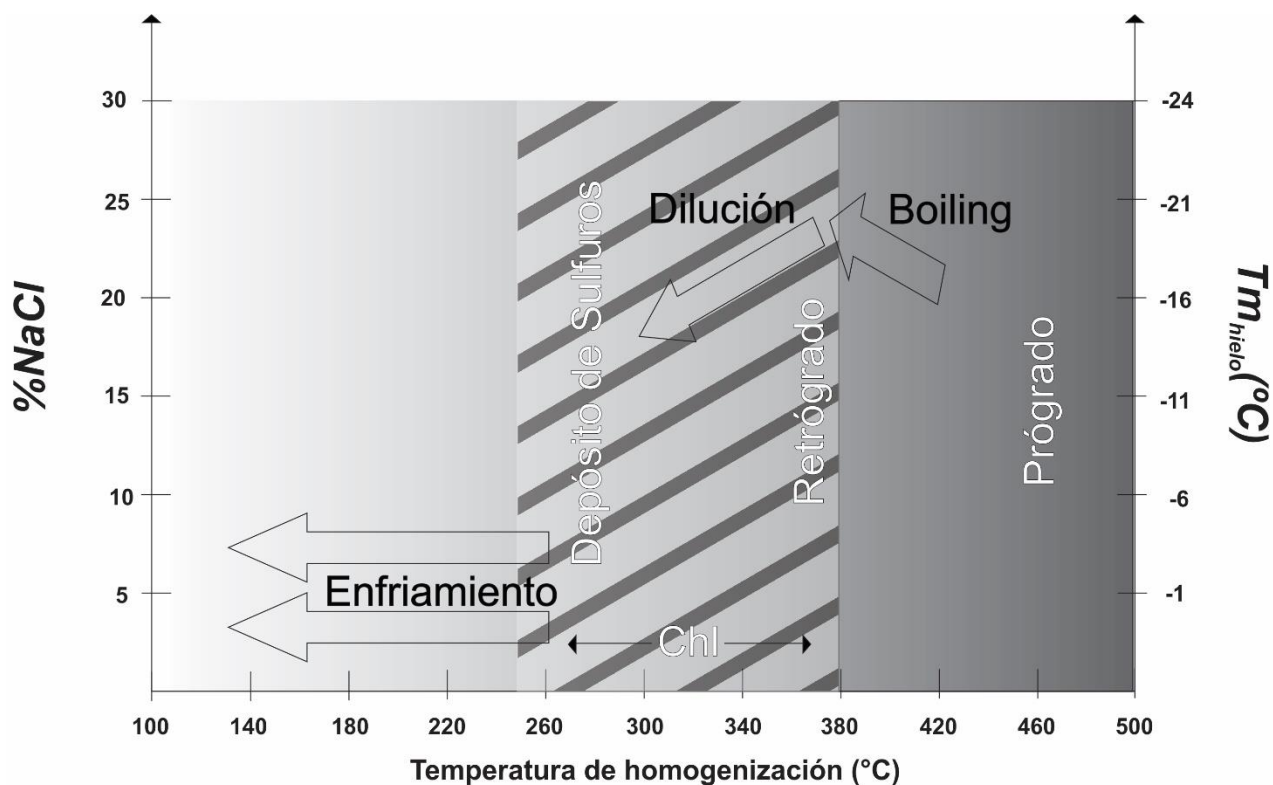


Figura IV.29. Evolución y rangos de temperatura-salinidad de los yacimientos Vacas y Quebradillas.

## V. Discusión

De acuerdo a las épocas metalogenéticas propuestas por Camprubí (2009), los tipos de depósitos que pueden atribuirse genéticamente a procesos magmáticos que tienen lugar principalmente en arcos continentales en el margen del Pacífico de México son principalmente; (1) yacimientos epitermales polimetálicos y/o Ag-Au, (2) pórfidos de Cu, Mo, Au, W, (3) skarns polimetálicos o de Au, (4) óxido de hierro magmático / hidrotermal (IOCG), (5) vetas de Sn o diseminaciones asociadas con granitos o riolitas y (6) vetas de U (-Au) en riolitas. Los tipos de depósitos anteriores se encuentran a lo largo de un amplio cinturón magmático distribuido NW-SE en todo el país que evolucionó desde el Cretácico tardío (Camprubí, 2009). Incluye la gran provincia ígnea silícea (SLIP) de la Sierra Madre Occidental (SMO) que consisten en ignimbritas silíceas y, en menor medida, domos riolíticos y lavas basálticas a andesíticas (el Supergrupo Volcánico Superior) que se han emplazado a principios del Oligoceno a lo largo de toda la Sierra Madre Occidental y a principios del Mioceno en el sur de la Sierra Madre Occidental (Camprubí et al., 2003). Entre otras características, pertenece a la provincia de plata más grande del mundo y aloja al distrito minero La Parrilla, hacia su límite con la provincia geológica de la Mesa Central (Nieto Samaniego et al., 2005).

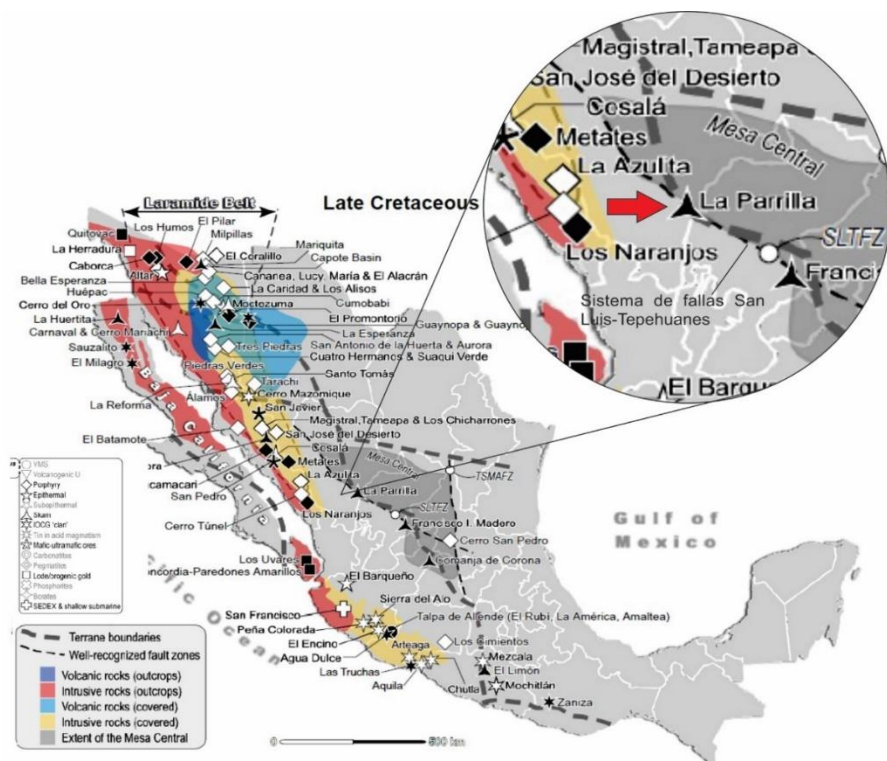


Figura V.1. Yacimientos minerales de la Época Cretácico-Paleoceno sobre el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, modificado de (Camprubí, 2013).

El distrito minero La Parrilla se encuentra en el límite tectónico-estructural de la SMO y la MC formando parte del borde sur de la Mesa Central (el sistema de fallas regionales San Luis-Tepehuanes), que se extiende a lo largo de la sección noreste de la zona de sutura entre el terreno compuesto Guerrero y el Paleocóntinente mexicano (Figura V.1). Los depósitos minerales del distrito minero La Parrilla se colocaron en esta sutura tras el cambio de los entornos tectonomagmáticos extensionales (relacionados al *basin and range*) a compresivos en el Cretácico Superior junto con otros depósitos de tipo skarn en la región centro-norte de México, se caracteriza por un trend NW-SE de intrusivos de composición granítica-diorítica-cuarzodiorita-granodiorítica (e.g. Comanja de Corona, Francisco I. Madero) (Camprubí, 2013).

En esta área se han observado dos generaciones de estrías en planos de fallas normales: la más antigua indicaría una extensión NW, mientras que la más reciente tiene dirección NE y hacia el poniente de Durango, el graben Río Chico-Otinapa es una estructura extensional de más de 160 km de largo y 20 km de ancho, con dirección N-S a NNW-SSE y un desplazamiento máximo de 900 m (Aranda-Gómez et al., 2003) concordante con la orientación exhibida por los cuerpos *Vacas* y *Quebradillas* de la unidad minera La Parrilla.

Las rocas descritas en el distrito minero La Parrilla son Formaciones sedimentarias del Cretácico Tardío y cuerpos intrusivos del Paleógeno, reportados por el SGM y el Consejo de Recursos Minerales, que albergan skarn circundando a un Plutón granodiorítico-diorítico, donde se encuentran los yacimientos *Vacas* y *Quebradillas*. Además, es distintivo el reconocimiento de lineamientos estructurales de preferencia NW-SE. Estas características permiten correlacionar a este distrito con una génesis de yacimientos relacionados a intrusivos en la época metalogenética del Cretácico-Paleoceno descrita por Camprubí en 2009.

En la mina *Vacas* la litología de la roca encajonante consiste en calizas del Cretácico Tardío tipo mudstone y wackstone con presencia de lentes y bandas delgadas de pedernal de hasta un centímetro y medio de espesor, donde además se presenta la intercalación de estratos delgados de limolitas color rosa y lutitas en la sucesión de calizas perteneciente a la Formación Cuesta del Cura en la zona superficial. Se presenta la Formación Mezcalera a profundidad como calizas mudstone, mudstone arcilloso y wackestone color gris oscuro y claro en capas delgadas y medias, estratos medianos a delgados de arenisca interestratificada con limolita, lutita.

Se presentan pliegues anticlinales y sinclinales hacia el sur - suroeste de la unidad minera La Parrilla y en la mina *Vacas* se tiene la presencia de fallamiento concordante con el rumbo de la estratificación, pero con menor inclinación, las fallas solo persisten por algunos metros. La orientación preferencial de la estratificación tiene rumbo N11°W y buzamiento al NE con ángulos de 60° - 75° (Figura V.2).

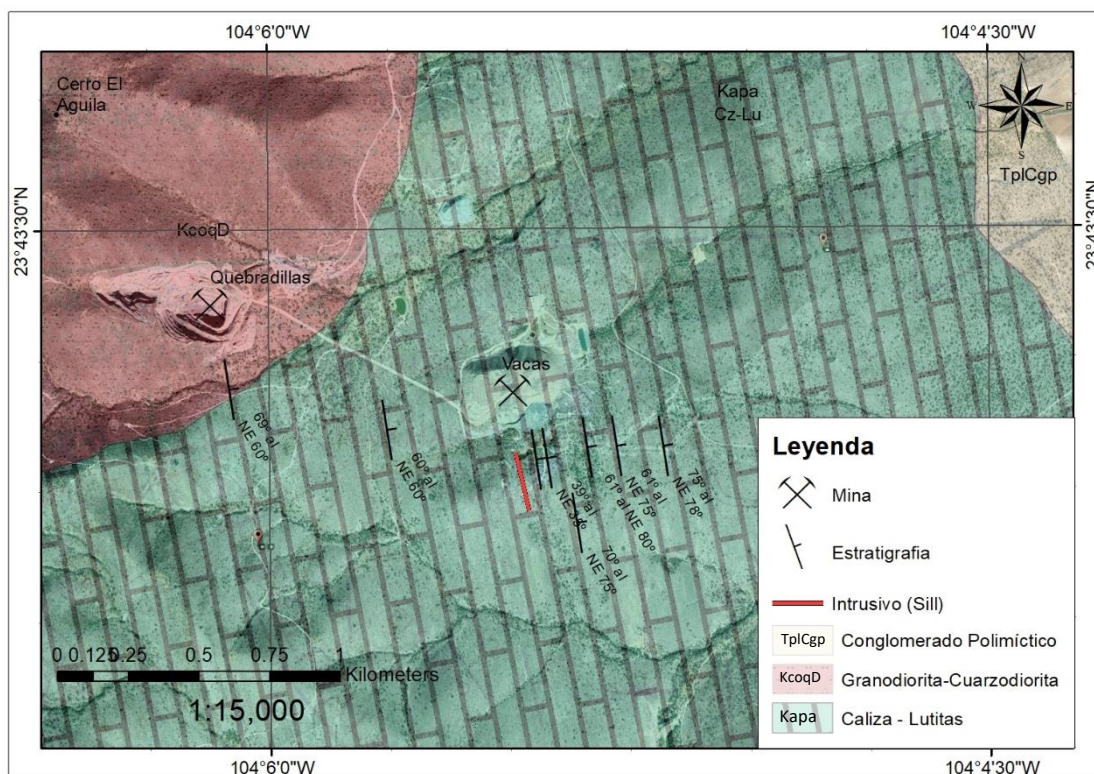


Figura V.2. Mapa geológico de la Unidad Minera La Parrilla mostrando como litologías principales, cuerpos intrusivos, secuencias de calizas - lutitas y conglomerados.

Las características litológicas observadas en la zona de la mina *Quebradillas* consisten en una alternancia de estratos de calizas negras, calizas arcillosas y lutitas de la Formación Indidura que se observan predominantemente deformadas y metamorfizadas a hornfels por la presencia de cuerpos intrusivos. Esta mina es un pliegue cortado por un intrusivo donde las rocas calizas pertenecen a la transición del flanco a la zona del eje del pliegue donde su estratificación es muy vertical, favoreciendo la presencia de intrusiones y mineralización dispuesta subvertical, tal como lo descrito en *Quebradillas* por Aguilar- Plascencia (2019).

La actividad magmática mesozoica-cenozoica en el margen del Pacífico se puede dividir en cinco episodios principales (Ferrari et al., 2005b, 2007; Morán-Zenteno et al., 2007; Centeno-García et al., 2008): (1) Jurásico a Cretácico Temprano, (2) Cretácico Tardío a Paleoceno, (3) Eoceno-Oligoceno, (4) Mioceno Temprano, y (5) Mioceno Medio para presentar en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (TMVB), que contiene volcanes activos.

El plutón en el Distrito La Parrilla es descrito por el SGM como una roca inequigranular a porfídica de composición granodiorítica, sin embargo, el plutón exhibe una variación composicional desde cuarzo-monzonita-granodiorita-diorita, siendo el norte del distrito la de composición más básica, al norte de la población La Parrilla (Aguilar Plascencia, 2019). Considerados por el SGM de edad

Paleógena, ubicando a esta serie de intrusivos en el magmatismo (2) Cretácico Tardío a Paleoceno (Ferrari et al., 2005b, 2007; Morán-Zenteno et al., 2007; Centeno-García et al., 2008).

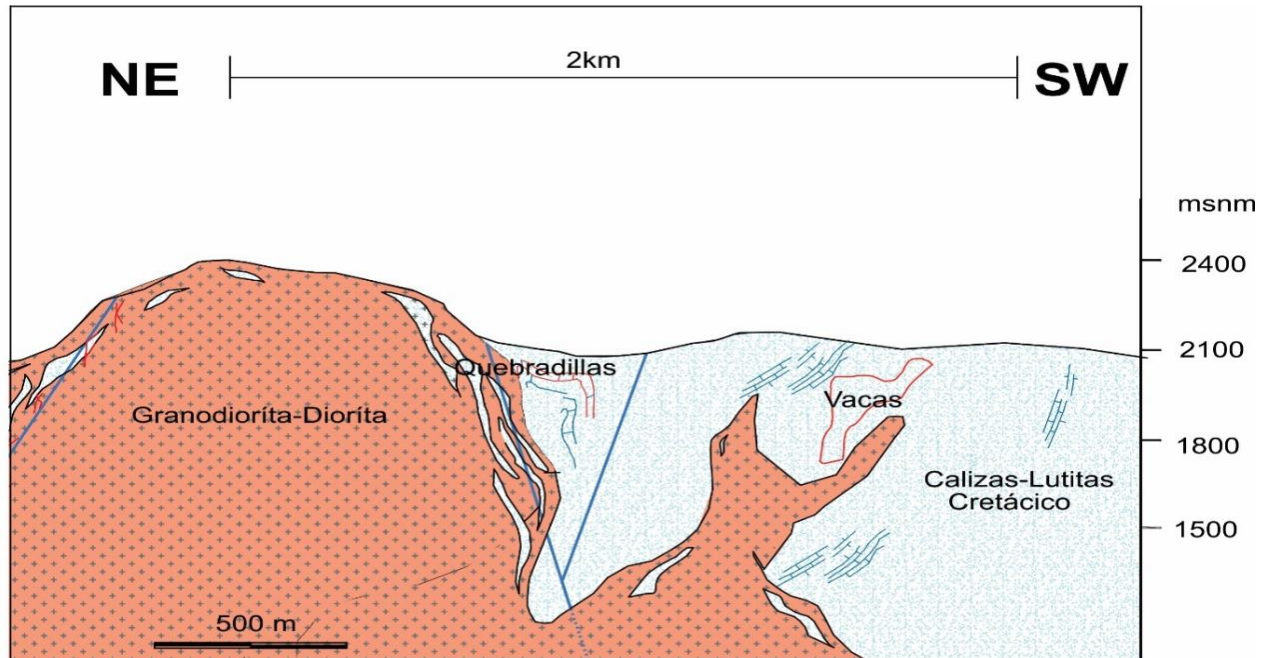


Figura V.3. Modelo geológico de los yacimientos Vacas y Quebradillas.

Los cuerpos intrusivos de la mina *Vacas* son de composición granodiorítica para los sills y monzonítica en los diques con textura porfídica principalmente. Se observa poca deformación en la roca encajonante de la Formación Cuesta del Cura por los cuerpos intrusivos del Coniaciano (SGM, 2001). Los cuerpos intrusivos presentan apófisis en el área. Los cuerpos subvolcánicos de tipo sill o manto son estructuras más fértiles para la generación de mineralizaciones de tipo skarn, en contraste con plutones (Figura V.3) (Meinert, 1983). La composición de la estructura intrusiva en un skarn está relacionada con el tipo de mineralización, por ejemplo, intrusivos de composición granodiorítica a cuarzo-monzonítica de afinidad calcoalcalina generalmente producen mineralizaciones de metales base y ocasionalmente de metales preciosos (Meinert, 1992). La composición de las estructuras de *Vacas* y *Quebradillas* se encuentran en ese tipo de rocas subvolcánicas.

En la mina *Quebradillas* se encontraron abundantes cuerpos intrusivos tipo dique y pocos de tipo sill de composición granodiorítica-diorítica predominantemente de textura fanerítica del Cretácico Tardío (SGM, 2001), afectando y metamorfizando de manera importante a las rocas calcáreas de la Formación Indidura.

En la mina *Quebradillas* estructuralmente se observan algunos plegamientos de las calizas del Cretácico originadas por los eventos tectónicos que afectaron la zona sur y centro de Durango y plegamientos causados por el emplazamiento de los cuerpos intrusivos de la zona. En la mina *Quebradillas* se presenta un rumbo de estratificación general NW-SE con echados muy pronunciados (de 70° a 90°) de calizas y lutitas de la formación Indidura (First Majestic Plata, 2007).

Se tiene un importante dominio de pliegues y convergencia de fallas normales de alto ángulo con rumbos muy variables, desde N-S hasta W-E, donde algunas estructuras como la falla *Víboras* son muy relevantes dado que controla la mineralización.

En esta zona los depósitos tipo skarn se presentan en estructuras como un manto subvertical o manto oblicuo en el caso de *Vacas*. En *Quebradillas* se presentan vetas, mantos y depósitos tipos bolsadas debido a la influencia del plegamiento y la convergencia de fallas.

La alteración de la fase prograda en la mina *Vacas* está marcada por la presencia de microcristales de granates de grosularia-andradita con mayor tendencia a andraditas de coloración oscura a marrón, diópsido, piritita, cuarzo y cacita en la zona más profunda y/o adyacente al intrusivo (endoskarn). La zona con fase prograda predominante se relaciona con la presencia de depósito de sulfuros de zinc, cobre, pirrotita y con muy bajos contenidos de plata.

La etapa prograda presente en *Quebradillas* presenta la cristalización de granates de la misma serie grosularia – andradita de hasta 7 mm en la zona profunda, con cuarzo, calcita y sulfuros como esfalerita, pirrotita y arsenopirita de la fase retrograda, se observa una mineralogía similar a *Vacas* a profundidades similares, pero mayor contenido de pirrotita y arsenopirita.

En los yacimientos *Vacas* y *Quebradillas* se presenta alteración retrograda con propilitización, espacialmente restringida y con gran desarrollo de cristales de clorita la subpropilítica. La fase retrograda en *Vacas* se caracteriza por la presencia de microcristales de epidota poco abundantes, apatito, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita, illita y clorita abundante asociados con sulfuros de mena como esfalerita rica en hierro la cual además está asociada con galena, calcopirita y sulfosales. Se identificó un segundo evento de la fase retrograda en la mina *Vacas*, causada por el comportamiento multipulsante de la fuente magmática, con mineralogía similar, pero sin epidota (<1% modal) y con cristalización de esfalerita con mayor contenido de zinc sin asociación con galena. Se presenta illita para fase retrograda, junto con clorita y montmorillonita como parte de la alteración subpropilítica. La presencia de clorita abundante se distingue por la presencia de mena económica y valores de plata, ello también es característico en otros yacimientos polimetálicos en México (e.g. Zacatepec, Oaxaca, Canet et al. 2011).

En *Quebradillas* se pudo diferenciar la superposición de eventos retrógrados, un primer evento con la cristalización microcristales de epidota asociada con pirita, cuarzo, calcita e illita, cortados por un segundo evento donde se cristalizó epidota columnar debido a un evento distensivo con depósito de algunos microcristales de pirita asociados, cuarzo y clorita.

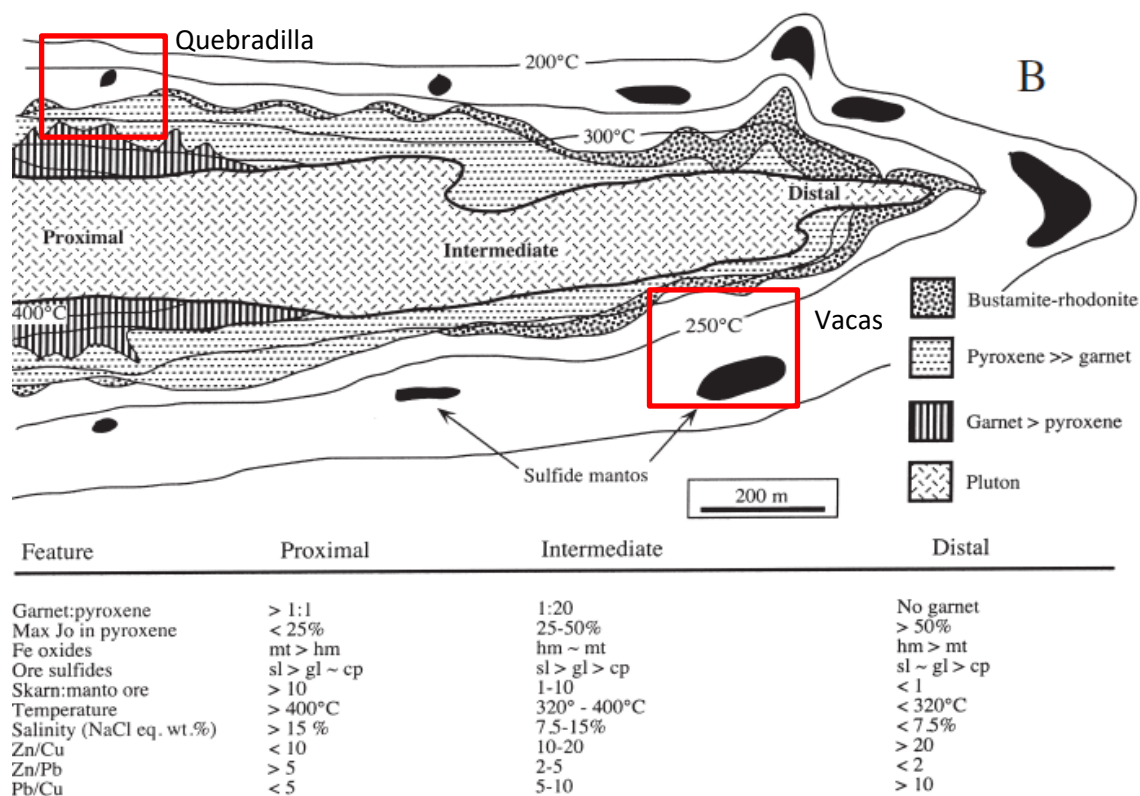


Figura V.4. Zonación mineralógica, de temperatura y de salinidad de depósitos de tipo skarn proximal, medio y distal. Tomado de (Meinert, 1992).

La asociación mineral encontrada en la mina *Vacas* corresponde con aquella descrita por (Meinert, 1992) (Figura V.4) asociada a un skarn distal, dado que no se presenta granate más que en la zona profunda, también en los sulfuros de mena de la zona de mena principal se presenta un dominio de galena sobre calcopirita en un enriquecimiento distal del cuerpo intrusivo. El rango de temperatura descrito para esta zona del yacimiento ronda los 150 -350 °C. En la mina *Quebradillas* la mineralogía presenta un contenido de granate mayor a aquel observado en *Vacas*, además del dominio de esfalerita hacia la zona de mena profunda sobre la galena, y un rango de temperatura de hasta 450 °C correspondiente con las características de un skarn intermedio.

De acuerdo a los estudios microtermométricos y de salinidad realizados en las inclusiones fluidas de la zona de mena rica en plata del yacimiento *Vacas*, esta zona corresponde a un skarn distal donde el rango de temperaturas de hasta 350 °C en la zona media con salinidades que van desde 5 hasta 15 % de NaCl equivalente. Esta zona está dominada principalmente por la presencia de

marcasita, pirita, cuarzo, epidota (microcristales), clorita, calcita y arcillas, correspondientes a la alteración propilítica en la fase retrograda del skarn, asociada a la mineralización de sulfuros como galena, calcopirita y sulfosales de plata. Se puede observar una cristalización abundante de clorita en esta zona con cuarzo plumoso y cuarzo zonado en contraste con la zona inferior donde no se presenta.

La zona mas profunda del yacimiento *Vacas* es la transición de las características del skarn distal observado en la zona más superficial hacia un skarn intermedio a proximal, dado que las temperaturas observadas en esta zona exceden los 350 °C y las salinidades presentes varían de 15 hasta 25 % NaCl equivalente. La asociación mineral presente consiste en granate del grupo grosularia-andradita, diópsido, cuarzo, calcita y pirita, correspondientes a una zona con alteración progradada (Figura V.5). A niveles someros la alteración metasomática retrograda tiene amplia extensión lateral pudiendo sobrepasar la aureola metamórfica de contacto, mientras en profundidad tiene poco desarrollo comparado con la aureola de metamorfismo. La alteración retrógrada es más extensa a niveles más someros ya que está controlada por la circulación de fluidos y la participación de aguas meteóricas en la fase tardía del sistema.

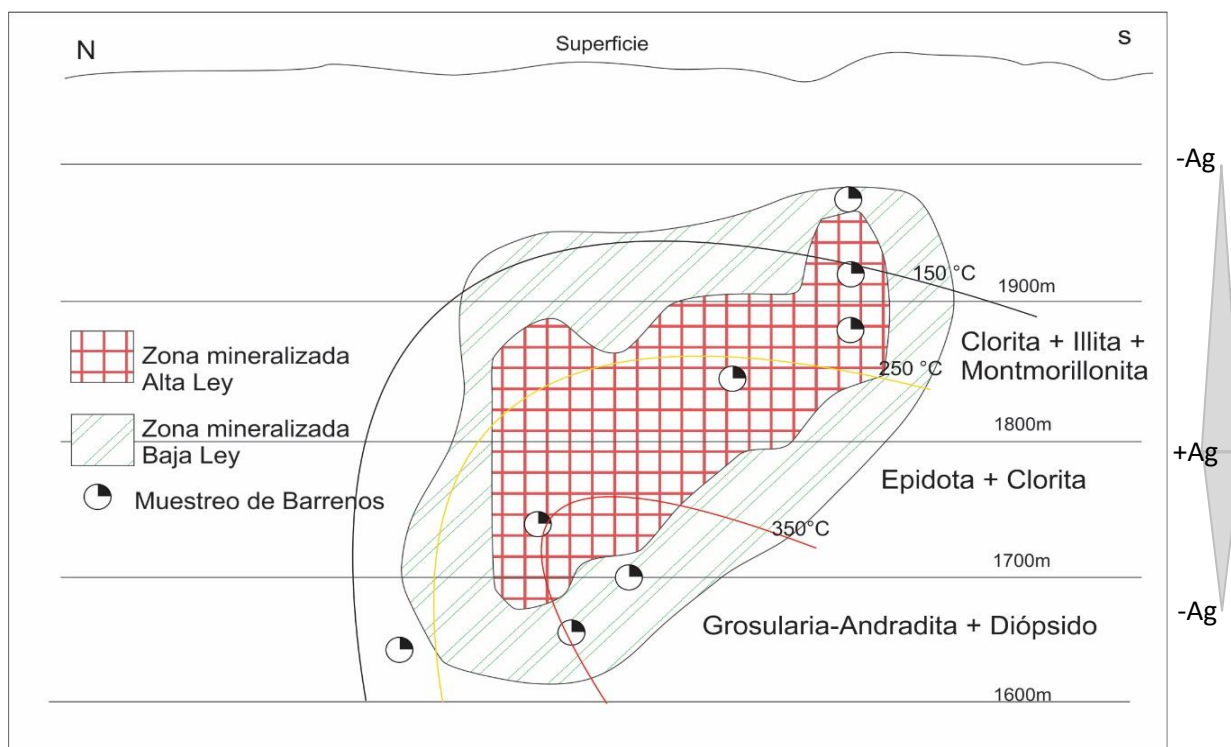


Figura V.5. Zonación mineral e isotermas en el yacimiento mineral Vacas.



Los sulfuros presentes son: esfalerita, calcopirita, pirita, arsenopirita y marcasita de alteración retrograda sin presencia significativa de mineralización de plata (Figura V.6). Acompañando a la mena se tiene una asociación de epidota, clorita, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita y apatito. El manto mineralizado presenta engrosamiento en la zona media del yacimiento y estrechamiento hacia la zona superficial, consiste con el nivel de ebullición identificado en la zona del nivel 1700.

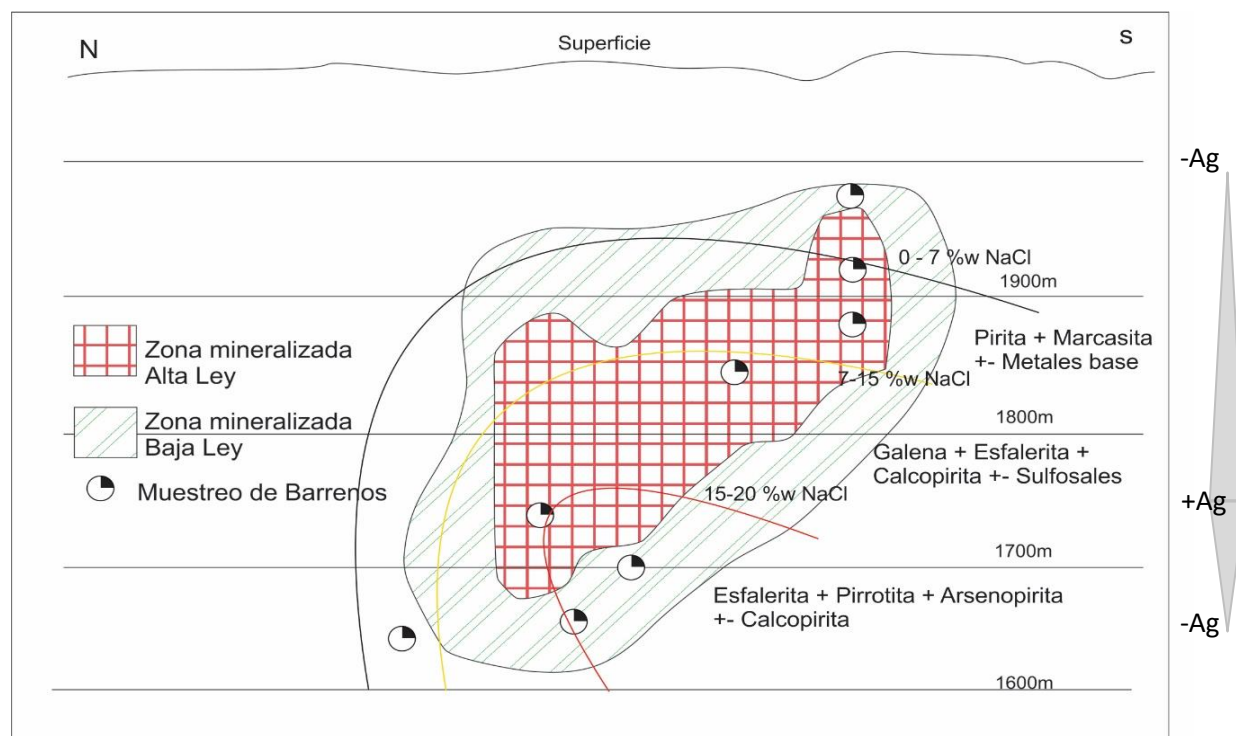


Figura V.6. Zonación mineral de sulfuros y salinidad en el yacimiento mineral Vacas.

El proceso de mineralización identificado por microtermometría en *Vacas* es el de ebullición, exhibido en la región con más enriquecimiento en plata, asociada por una zona rica en clorita o zona subpropilítica, correspondiente con la transición de la estructura de tipo manto a manto-oblicuo. Los rangos de temperatura de homogenización y salinidad en este evento son 350°C - 250°C y 15-25% NaCl equivalente.

En las muestras examinadas de la mina *Quebradillas* se obtuvo en las muestras de barreno un rango de temperatura de 200-450°C y salinidades por arriba del 10 y hasta el 25% NaCl equivalente. Con estos datos se ubica el yacimiento como un skarn intermedio. En la mina *Quebradillas* también se pudieron encontrar granates de la serie grosularia-andradita de manera abundante asociados con cuarzo, pirita y calcita de la fase progradada en el nivel 1800, además de epidota columnar indicando temperaturas de formación mayores a 220°C.

Se observó el depósito de sulfuros como esfalerita, pirrotita y pirita de manera abundante mientras que la calcopirita, galena y sulfosales de plata se presentan de manera muy escasa. Las características mineralógicas y microtermométricas presentes en esta zona concuerdan con las características descritas para un skarn intermedio.

Existen dos familias inclusiones fluidas que corresponden petrográficamente y representan valores de la alteración prograda con valores de temperatura de homogenización entre 450 y 350 °C, y valor modal de salinidad del fluido mineralizante de alrededor de 24% en peso de NaCl equivalente; con un proceso de enfriamiento asociado de hasta cerca de los 200 °C. Un evento retrogrado con precipitación de mena alrededor de los 320 y 200 °C, con disminución en la salinidad hasta 15% en peso de NaCl equivalente, interpretado como un proceso de dilución (Figura V.7).

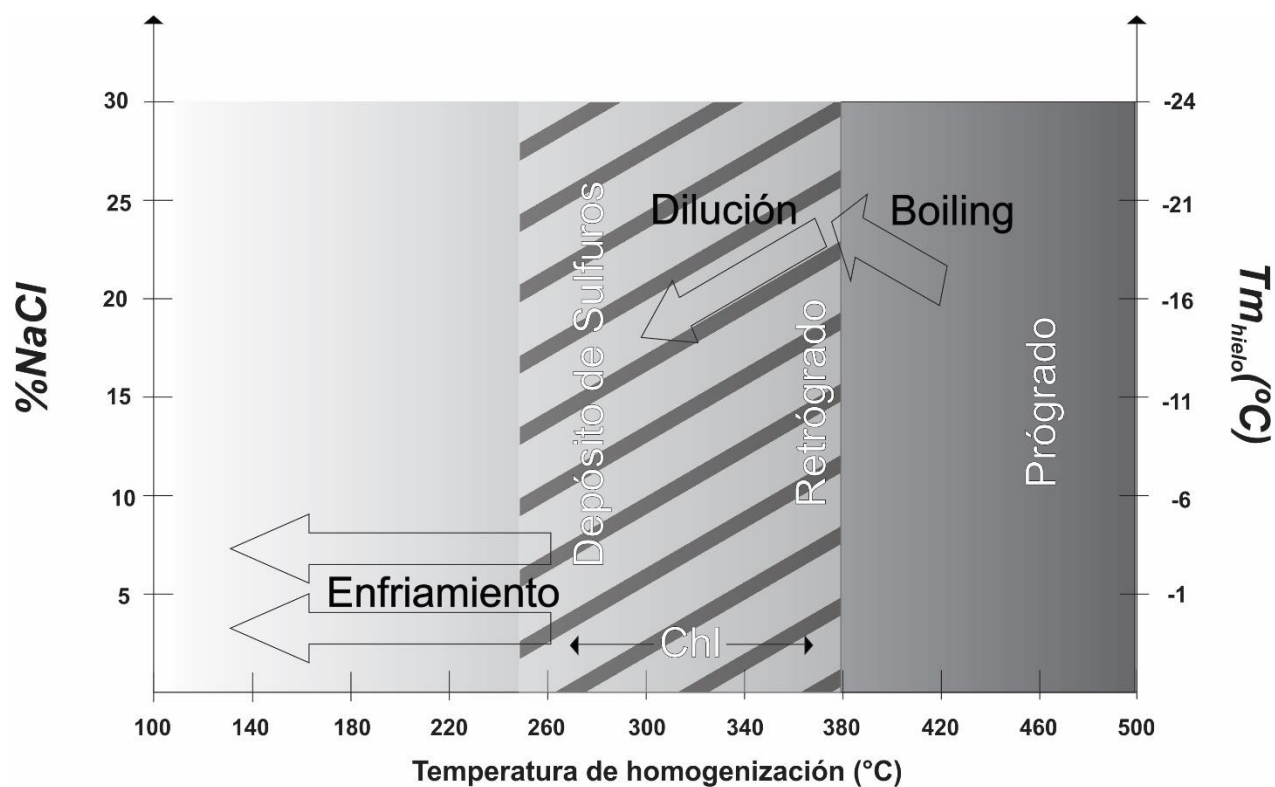


Figura V.7. Resultados de microtermometría del yacimiento y Quebradillas y asociaciones de inclusiones fluidas presentes.

Los datos microtermométricos obtenidos en las muestras de *Quebradillas* muestran un evento epitermal con vetas de cuarzo calcedónico, calcita y epidota, presentando un rango de temperaturas de 100 a 150 °C y salinidades de hasta 7% de NaCl equivalente. Las vetas son posteriores a la mineralización y se encuentran cortando los cuerpos mineralizados de la mina *Quebradillas* pueden tener relación con la zona noreste de la mina en el área de exploración de cerro Santiago.

Los resultados obtenidos y el contexto geológico del yacimiento *Vacas* permiten clasificar al cuerpo mineral en la tipología de skarn en la zona distante del cuerpo intrusivo mineralizante con mineralización de Zn-Cu-Pb-Ag en un manto depositado gracias a un estrato permeable dentro de la secuencia estratigráfica de las Formaciones Mezcalera y Cuesta del Cura. El yacimiento presenta una zona mineralizada evidenciada por una alteración retrograda abundante en clorita en una zona de alteración subpropilítica. También se tienen presentes diques y sills no mineralizantes.

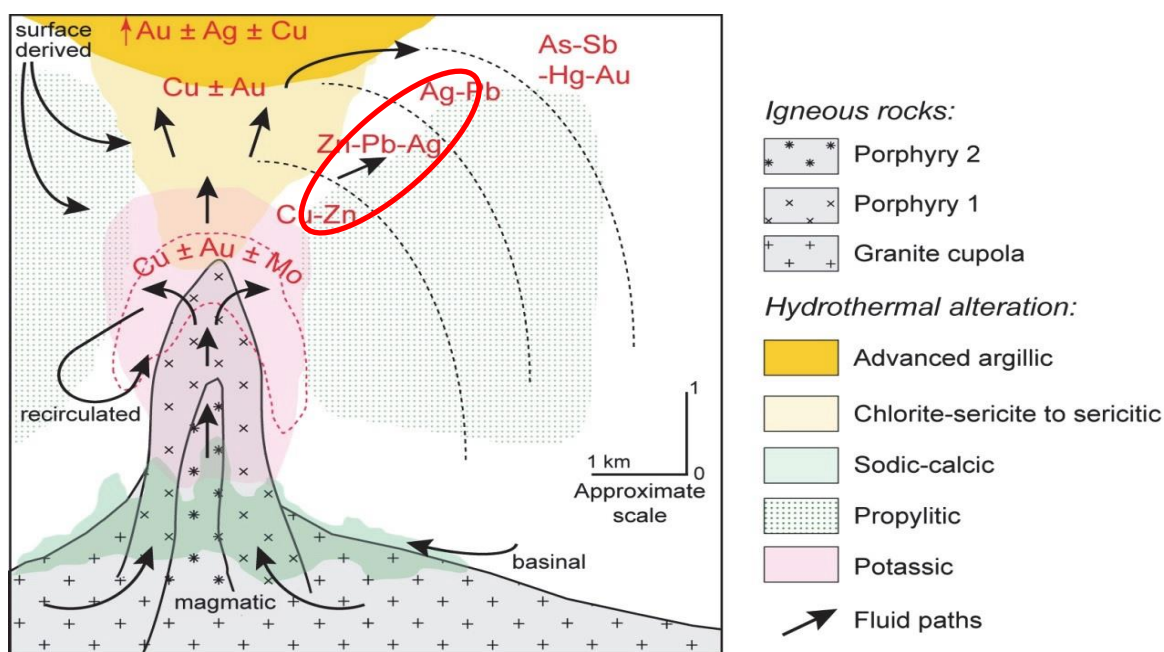


Figura V.8. Modelo general y zonación mineral de un yacimiento hidrotermal Kouszmanov & Pokrovski (2012).

La zonación mineral encontrada en el yacimiento *Vacas* corresponde a la descrita por Kouszmanov & Pokrovski (2012), donde se encuentra en la zona media y superficial un enriquecimiento en minerales de mena de plomo, cobre, zinc y plata (Figura V.8). Al acercarse a la zona profunda se empobrece el contenido de plata y empieza a predominar el contenido de zinc y cobre. El yacimiento *Vacas* de acuerdo al modelo propuesto aún se encuentra distante del cuerpo intrusivo mineralizante que transportó el fluido hidrotermal que generó el yacimiento.

El yacimiento *Vacas* presenta una mineralización económica relacionada con metamorfismo de contacto prácticamente ausente, una alteración progradada con muy poca extensión y una etapa retrograda de cristalización abundante de clorita con epidota, dónde generalmente se ubican cuerpos mineralizados de carácter económico (Cooke, 2019). Se evidencia el decrecimiento del contenido de ácido sulfhídrico en el fluido mineralizante generando las condiciones para el depósito de metales (Figura V.9) (Cooke, 2019). En algunos depósitos la clorita en zonas de alteración propilítica distal a subpropilítica, fungen como guías de mineralización económica, siendo los cuerpos de *Vacas* y *Quebradillas* un ejemplo de este contexto.

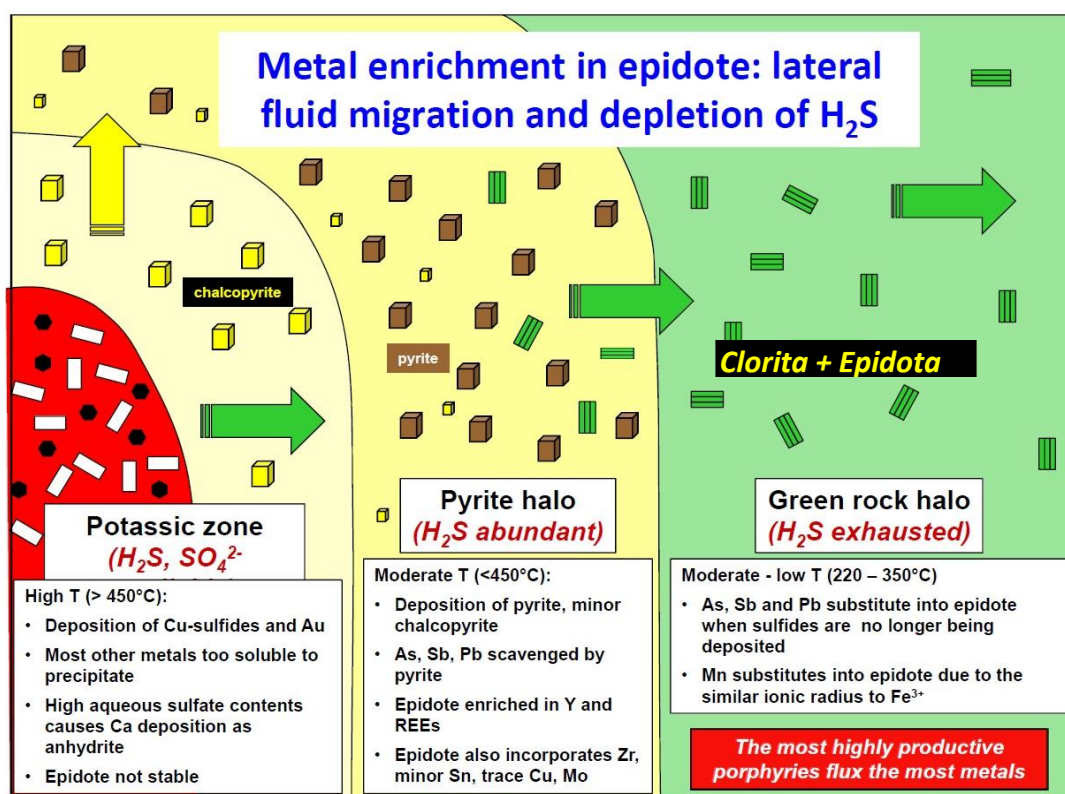


Figura V.9. Modelo de zonación mineral y de temperaturas en un yacimiento mineral. Tomado de (Cooke, 2019).

Las características de ambos yacimientos son similares en algunos aspectos pero se pueden denotar ciertas características en las que se diferencian los yacimiento tales como la composición de los cuerpos intrusivos, su textura, el tipo de estructura mineralizada que se generó, la roca encajonante que se tiene en el yacimiento, el tipo de alteración hidrotermal con las características mineralógicas que presenta, la asociación de minerales de mena que presenta cada yacimiento así como la zonación mineral de los cuerpos minerales y finalmente las características microtermométricas que tienen ambos yacimientos que diferencias sus procesos y condiciones de formación (Tabla V.1).

*Tabla V.1. Tabla comparativa yacimiento Vacas y Quebradillas.*

<b>Característica</b>	<b>Cuerpo</b>	
	<b>Vacas</b>	<b>Quebradillas</b>
<b>Intrusivo</b>	Composición con más sílice, granodiorítica - cuarzo monzonítica, feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa y minerales de alteración propilítica retrógrada como clorita, epidota, sericita, fluorita.	Composición con menos sílice, granodiorítica-diorítica, presenta textura fanerítica en cuerpos mesocráticos, relleno intercumulus de cuarzo y plagioclasa.
<b>Estructura Intrusiva</b>	Sill > Diques	Diques
<b>Estructura Mineralizada</b>	Manto	Vetas, Mantos y Bolsadas
<b>Roca caja</b>	Calizas con lentes de pedernal, Limolitas y Lutitas de La Formación Mezcalera y Cuesta del Cura	Calizas y Lutitas Formación Mezcalera
<b>Alteración Prograda</b>	Microcristales de granate, diópsido, pirita, cuarzo y cacita asociados, esta fase se distingue principalmente en la zona más profunda y se relaciona con el principio del depósito de sulfuros de zinc, cobre, hierro (pirrotita y marcasita) y con muy bajos contenidos de plata.	Fenocristales de granate de hasta 7 mm asociados con cuarzo y calcita, pero con alto contenido de pirrotita y esfalerita y arsenopirita, y bajos contenidos de plata.
<b>Alteración Retrograda</b>	Presencia de microcristales de epidota y poco abundantes, asociados con apatito, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita, illita y clorita abundante asociados con sulfuros de mena como esfalerita rica en hierro la cual además está asociada con galena, calcopirita y sulfosales de plata.	Epidota asociada con pirita, cuarzo, calcita e illita, cortados por un segundo evento donde, debido a un evento de extensión compresión, se cristalizó epidota columnar con depósito de algunos microcristales de pirita asociados, cuarzo y abundante clorita.
<b>Asociación de Mena</b>	Esfalerita, Calcopirita, Galena y sulfosales de plata de la serie tetraedrita argentífera – freibergita.	Esfalerita, Galena y Calcopirita.
<b>Zonación</b>	Zonación mineral semivertical, con mayor contenido de plata hacia la zona de temperatura y salinidad intermedia.	No reconocible.

## VI. Conclusiones

El yacimiento Vacas se encuentra emplazado en las Formaciones Mezcalera y Cuesta del Cura en forma de un manto depositado en dirección N11°W conforme a la estratificación, presenta un ensanchamiento en la zona donde se produjo un evento de *boiling* evidenciado por microtermometría. Dando como resultado un yacimiento de Zn-Cu-Pb-Ag con zonación mineralógica. El yacimiento Quebradillas es un conjunto de cuerpos emplazados en la Formación Indidura en forma de vetas, mantos y bolsadas con orientaciones NW-SE y rumbo variable desde 10°- 89°, el depósito el cual se encuentra dominado estructuralmente por los plegamientos de las rocas de la zona y por fallas convergentes.

Los cuerpos intrusivos presentes en ambos yacimientos son similares en composición mineralógica. Sin embargo, en la mina *Vacas* se encuentran cuerpos de composición granodiorítica – cuarzomonzonítica con textura porfídica, con cuerpos intrusivos tipo sill predominantes. Mientras que en la mina *Quebradillas* se presentan principalmente cuerpos intrusivos tipo dique de composición granodiorítica-diorítica con menos sílice, y presenta textura fanerítica.

Las mineralizaciones de *Vacas* y *Quebradillas* son de tipo skarn con una distintiva asociación prograda representada por granates-diópsida y retrograda con alteración propilítica y subpropilítica relacionadas con la mineralización económica de metales base rica en Ag, y distalmente argílica a silicificación. Las menas de plata comprenden sulfosales del tipo tetraedrita argentífera - freibergita.

El barreno VC-45 es una zona profunda de esfalerita-pirrotita más proximal al intrusivo de donde procede el fluido mineralizante y, debido a las características de temperatura y salinidad no es probable mineralización de plata a profundidad.

Los rangos microtermométricos del yacimiento *Vacas* van de 100 a 440 °C con salinidades de 0 hasta 26 % de NaCl equivalente, con el depósito de mayor contenido de plata en el rango de 250 – 350 °C y salinidad del 7 al 20% de NaCl equivalente. En *Quebradillas* se tiene un rango de 100 a 460 °C con salinidades de 0 hasta 24%, con el mayor depósito de minerales de mena entre 200 y 350 °C con 10 a 20 % de NaCl equivalente.

La alteración relacionada a la mineralización del cuerpo *Vacas* consiste en una alteración subpropilítica con la presencia de microcristales de epidota y poco abundantes, asociados con apatito, cuarzo, calcita, tremolita-actinolita, illita y clorita abundante asociados con sulfuros de mena como esfalerita rica en hierro. Mientras que *Quebradillas* presenta epidota asociada con pirita, cuarzo, calcita e illita, cortados por un segundo evento donde, debido a un evento de extensión compresión, se cristalizó epidota columnar con depósito de algunos microcristales de pirita asociados, cuarzo y abundante clorita.

Los datos obtenidos en este estudio pueden ser utilizados para el desarrollo económico y social de las poblaciones de Nombre de Dios y Vicente Guerrero cercanos a la unidad minera La Parrilla al contribuir con el desarrollo de métodos de exploración para las compañías mineras en la zona para el desarrollo de proyectos mineros.

Se recomienda para exploración en la unidad minera con barrenación en dirección  $S79^{\circ}W$  perpendicular a la estratificación  $N11^{\circ}W$  en las Formaciones Indidura, Cuesta del Cura y Mezcalera. Complementando con el reconocimiento de las zonas de alteración propilítica y subpropilítica a través de las asociaciones minerales descritas para la ubicación de nuevos yacimientos.

Al localizar nuevos cuerpos minerales se busca propiciar áreas de oportunidad para generar empleo a una comunidad dependiente de la actividad minera y que permita un avance local en el ámbito social y económico. Considerando que actualmente la unidad minera se encuentra en exploración sin actividad minera activa.

## Referencias

- Aguilar Plascencia J. (2019). Comparación en disposición, mineralógica y microtermométrica de estructuras del skarn Quebradillas para su ubicación temporal dentro de la mineralización de La Parrilla, Durango. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 128 p.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G. J., & Bellon, H. (2009). Syn-extensional intra-plate trachydacite-rhyolitic dome volcanism of the Mesa Central, southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 187(1-2), 33-52.
- Aguirre-Díaz, G. J., & McDOWELL, F. W. (1993). Nature and timing of faulting and synextensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 105(11), 1435-1444.
- Aguirre-Díaz, G. J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., & Gutiérrez-Palomares, I. (2008). The ignimbrite flare-up and graben calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Developments in Volcanology*, 10, 143-180.
- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D., & Luhr, J. F. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras. México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 59-71.
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G., & Chávez-Cabello, G. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187-225.
- Araujo-Mendieta, J., & Arenas-Partida, R. (1986). Estudio Tectónico-Sedimentario en el Mar Mexicano. Estados de Chihuahua y Durango: *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, 47, 43-71.
- Barboza Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez, M., & Martínez, P. R. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299-319.
- Bodnar, R. J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 57(3), 683-684.
- Bryan, S. E., & Ferrari, L. (2013). Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. *GSA Bulletin*, 125(7-8), 1053-1078.
- Bryan, S. E., Ferrari, L., Reiners, P. W., Allen, C. M., Petrone, C. M., Ramos-Rosique, A., & Campbell, I. H. (2007). New insights into crustal contributions to large-volume rhyolite generation in the mid-Tertiary Sierra Madre Occidental province, Mexico, revealed by U-Pb geochronology. *Journal of Petrology*, 49(1), 47-77.
- Burt, R. S. (1982). *Toward a structural theory of action: Network models of social structure, perception, and action*. Academic Pr.
- Cameron, K. L., Cameron, M., Bagby, W. C., Moll, E. J., & Drake, R. E. (1980). Petrologic characteristics of mid-Tertiary volcanic suites, Chihuahua, Mexico. *Geology*, 8(2), 87-91.



- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051.
- Camprubí, A. (2009). Major metallogenic provinces and epochs of Mexico. *SGA News*, 25, 1-20.
- Camprubí, A. (2013). Tectonic and metallogenetic history of Mexico. *Tectonics, metallogeny, and discovery: the North American Cordillera and similar accretionary settings*, 17, 201-243.
- Camprubí, A., Ferrari, L., Cosca, M. A., Cardellach, E., & Canals, À. (2003). Ages of epithermal deposits in Mexico: regional significance and links with the evolution of Tertiary volcanism. *Economic Geology*, 98(5), 1029-1037.
- Cárdenas, V. J., Carrasco, C. M. L., Sáenz, R. R., & Consejo de Recursos Minerales (Mexico). (1993). *Monografía geológico-minera del estado de Durango*. Pachuca, Hgo., México: Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas.
- Carrasco-Centeno, M. L. (1980). *Carta y provincias metalogenéticas del Estado de Durango: México, DF, Cons. Recursos Minerales, Pubi.*
- Carrillo-Bravo, J. (1971). La Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 23(1-6), 102.
- Centeno-García, E. (2008). The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 436, 279.
- Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., & Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Guerrero terrane of Mexico: Its role in the Southern, Cordillera from new geochemical data. *Geology*, 21(5), 419-422.
- Cochemé, J. J., & Demant, A. (1991). Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre occidental, Mexico. *Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper*, 254, 81-94.
- Cooke, D. R. (2019). Exploration for porphyry deposits. [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado 23 de mayo, 2019
- Doncel, R. L. (2003). La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1), 1-19.
- Eguiluz de Antuñano, S. (2011). Sinopsis geológica de la Cuenca de Burgos, noreste de México: producción y recursos petroleros. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 323-332.
- Enríquez, E., Rivera, R., (2001). Timing of magmatic and hydrothermal activity in the San Dimas District, Durango, Mexico. En *New Mines and Mineral Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists Special Publication, 8, 33-38.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., & Rosas-Elguera, J. (2002). Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4), 17-1.

- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., & Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2007). Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 1-39.
- First Majestic Silver. (2007). *Geología La Parrilla Silver Mine*. México: First Majestic.
- First Majestic Silver. (2019). *La Parrilla Silver Mine*. México: First Majestic. Recuperado de <https://www.firstmajestic.com/projects/producing-mines/la-parrilla/>
- Gastil, R. G. (1983). Mesozoic and Cenozoic granitic rocks of southern California and western Mexico. *Geological Society of America Memoir*, 159, 265-275.
- Goldstein, H. R. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM short course*, 31, 199.
- González Arroyo, A., Salas Vázquez, G., (1996). *Estudio Geológico Integral A Semidetalle De La Asignación Minera Santa Isabel Municipio De Mazapil, Estado De Zacatecas*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Consejo de Recursos Minerales, 15-16.
- Henry, C. D., & Aranda-Gomez, J. J. (2000). Plate interactions control middle–late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26.
- Henry, C. D., Fredrikson, G., & Ames, J. T. (1987). *Geologic Map of Part of Southern Sinaloa, Mexico, Adjacent to the Gulf of California*. Geological Society of America.
- Horner, J. T., & Enriquez, E. (1999). Epithermal precious metal mineralization in a strike-slip corridor; the San Dimas District, Durango, Mexico. *Economic Geology*, 94(8), 1375-1380.
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3), 501–513.
- Hunt, G. R., & Salisbury, J. W. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks — (Pt.) 1, silicate minerals. *Modern Geology*, 1(4), 283–300.
- Hunt, G. R., Salisbury, J. W., & Lenhoff, C. J. (1971). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates. *Modern Geology*, 3, 1–14.
- Huspeni, J. R., Kesler, S. E., Ruiz, J., Tuta, Z., Sutter, J. F., & Jones, L. M. (1984). Petrology and geochemistry of rhyolites associated with tin mineralization in northern Mexico. *Economic Geology*, 79(1), 87-105.

- Imlay, R. W. (1936). Part IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. *Bulletin of the Geological Society of America*, 47(7), 1091-1152.
- INEGI. (2019). Producción minero-metalúrgica. México: INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mineria/>
- Kouzmanov, K., & Pokrovski, G. S. (2012). Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems.
- Lee Moreno, J. L. (1972). Geological and geochemical exploration characteristics of Mexican tin deposits in rhyolitic rocks.
- Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2010). Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2011-2025.
- Martini, M., Solari, L., & Camprubí, A. (2013). Kinematics of the Guerrero terrane accretion in the Sierra de Guanajuato, central Mexico: new insights for the structural evolution of arc-continent collisional zones. *International Geology Review*, 55(5), 574-589.
- McDowell, F. W., & Clabaugh, S. E. (1979). Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. *Geological Society of America Special Paper*, 180, 113-124.
- McDowell, F. W., & Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88(10), 1479-1487.
- Meinert, L. D. (1983). Variability of skarn deposits: Guides to exploration. *Revolution in the earth sciences*, 301-16.
- Meinert, L. D. (1992). Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19(4).
- Meinert, L. D., Hefton, K. K., Mayes, D., & Tasiran, I. (1997). Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya. *Economic Geology*, 92(5), 509-534.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Mindat, (2019). Minerals. Freibergite. Mindat. Recuperado de <https://www.mindat.org/min-1605.html>
- Morán-Zenteno, D. J., Cerca, M., & Keppie, J. D. (2007). The Cenozoic tectonic and magmatic evolution of southwestern Mexico: Advances and problems of interpretation. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 71-91.
- Newberry, R. J., Einaudi, M. T., & Eastman, H. S. (1991). Zoning and genesis of the Darwin Pb-Zn-Ag skarn deposit, California; a reinterpretation based on new data. *Economic Geology*, 86(5), 960-982.
- Nieto-Samaniego, Á. 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(3), 285-318.

- Ramos Rosique, A. (2018). Introducción al estudio de inclusiones fluidas en minerales [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado 17 de marzo, 2019
- Roldán-Quintana, J. (1991). Geology and chemical composition of the Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora, México. *Studies of Sonoran Geology: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper*, 254, 69-80.
- Scheubel, F. R., Clark, K. F., & Porter, E. W. (1988). Geology, tectonic environment, structural controls in the San Martin de Bolanos District, Jalisco. *Economic Geology*, 83(8), 1703-1720.
- SGM. (2018). *Léxico Estratigráfico de México. Formación Cuesta del Cura*. México: Gobierno de México. Recuperado de [https://www.sgm.gob.mx/Lexico\\_Es/](https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/)
- SGM. (2018). *Léxico Estratigráfico de México. Formación Indidura*. México: Gobierno de México. Recuperado de [https://www.sgm.gob.mx/Lexico\\_Es/](https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/)
- SGM. (2018). *Léxico Estratigráfico de México. Formación Mezcalera*. México: Gobierno de México. Recuperado de [https://www.sgm.gob.mx/Lexico\\_Es/](https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/)
- SGM. (2018). *Panorama Minero del estado de Durango*. México: Gobierno de México. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/DURANGO.pdf>
- Siivola, J., & Schmid, R. (2007). List of mineral abbreviations. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks*, 93-110.
- Simpson, M. P., Mauk, J. L., & Kendrick, R. G. (2004). Telescoped porphyry-style and epithermal veins and alteration at the central Maratoto valley prospect, Hauraki Goldfield, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 47(1), 39-56.
- Spectral Evolution, (2019). *Field Portable Spectrometers for Mining*. OreExpress. Recuperado de <https://spectralevolution.com/products/hardware/field-portable-spectrometers-for-mining/>
- Staude, J. M. G., & Barton, M. D. (2001). Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(10), 1357-1374.
- Stewart, J. H., & Poole, F. G. (2002). *Inventory of Neoproterozoic and Paleozoic strata in Sonora, Mexico (No. 2002-97)*. US Geological Survey.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*, 12(1), 1-33.
- Tristán Capetillo, L.C., Enriquez Olmos, J., Cruz Piña M. de A., (2001). *Mapa Geológico-Minero San José de La Parrilla E. 1:50000 F13-B23. Segunda Edición*. INEGI. México.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M. D., Patchett, P. J., Zürcher, L., Hodkinson, D. G., & Roldán-Quintana, J. (2001). A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement. *Geological Society of America Bulletin*, 113(11), 1409-1422.

Webster, J. D., Burt, D. M., & Aguilon, R. A. (1996). Volatile and lithophile trace-element geochemistry of Mexican tin rhyolite magmas deduced from melt inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(17), 3267-3283.

Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272.

## Anexo A

### Descripción de lámina delgada

1 Muestra: Bx32c3 a Quebradillas: ILPQ-16-04 caja 32 carril 3, Barreno de 96.6 m a 96.85 m



Imagen 1 Barreno y sección utilizada.

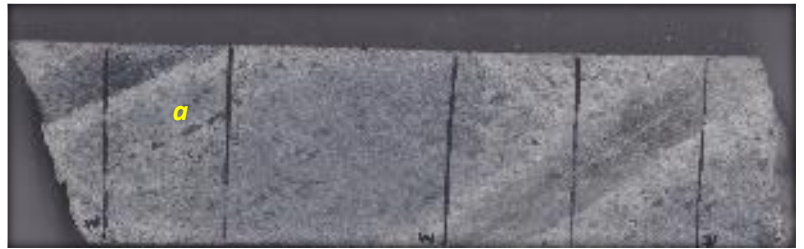


Imagen 2 Sección de corte de láminas.

Primarios:

Accesorios (6%):

Alteración (10%):

Plagioclasa Sódica (51%), Cuarzo (21%),  
Feldespato potásico (12%),

Hornblenda, Biotita, Zircón

Illita, Clorita (alteración selectiva de plagioclasa  
y hornblenda), Epidota (alteración de  
plagioclasa), Pirita, Cuarzo (recristalización y  
relleno intercumulus).

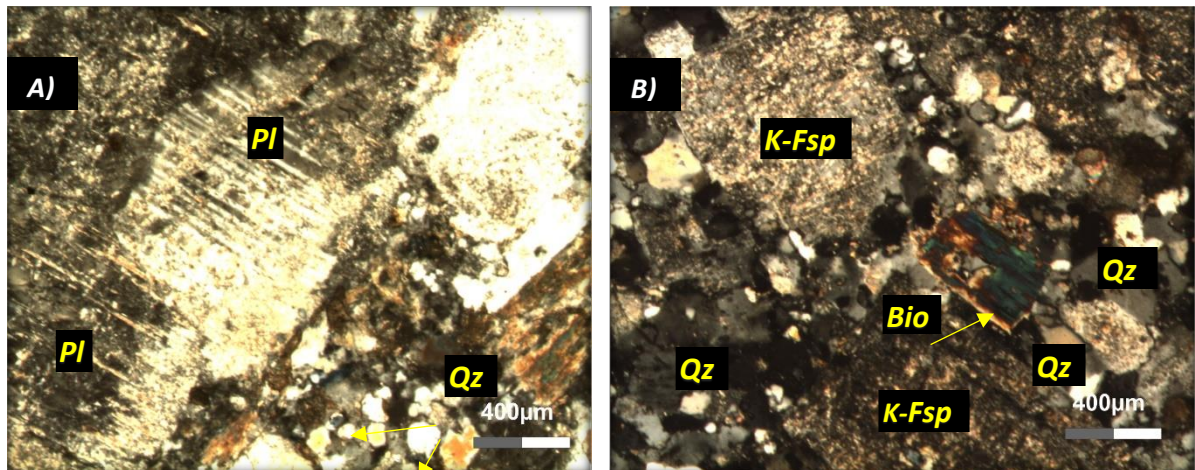


Imagen 3 A) Fotomicrografías de granodiorita con fenocristales de plagioclasa, principalmente (Pl) y cuarzo (Qz). B) feldespato potásico (K-Fsp), Cuarzo (Qz) intercumulus y biotita (Bio) como mineral accesorio.

## Granodiorita

Se presenta una textura holocristalina e inequigranular, con ocasionales plagioclasas zoneadas y cristales de cuarzo primario, también se observa cuarzo secundario que se encuentra con textura de mosaico y en vetillas bandeadas con microcristales de pirita.

La epidota se encuentra en microcristales dispuestos irregularmente y de forma escasa. Los cristales de biotita presentan alteración selectiva en parches irregulares y con halo de clorita. Los feldespatos evidencian una alteración selectiva con desarrollo en parches de arcillas, cuarzo y epidota. Se observa cuarzo recristalizado que aparece debido al metasomatismo y la inyección de sílice, así como cuarzo secundario cristalizado. La asociación de minerales encontrados en la muestra corresponden a una propilitización en la fase retrograda del skarn.

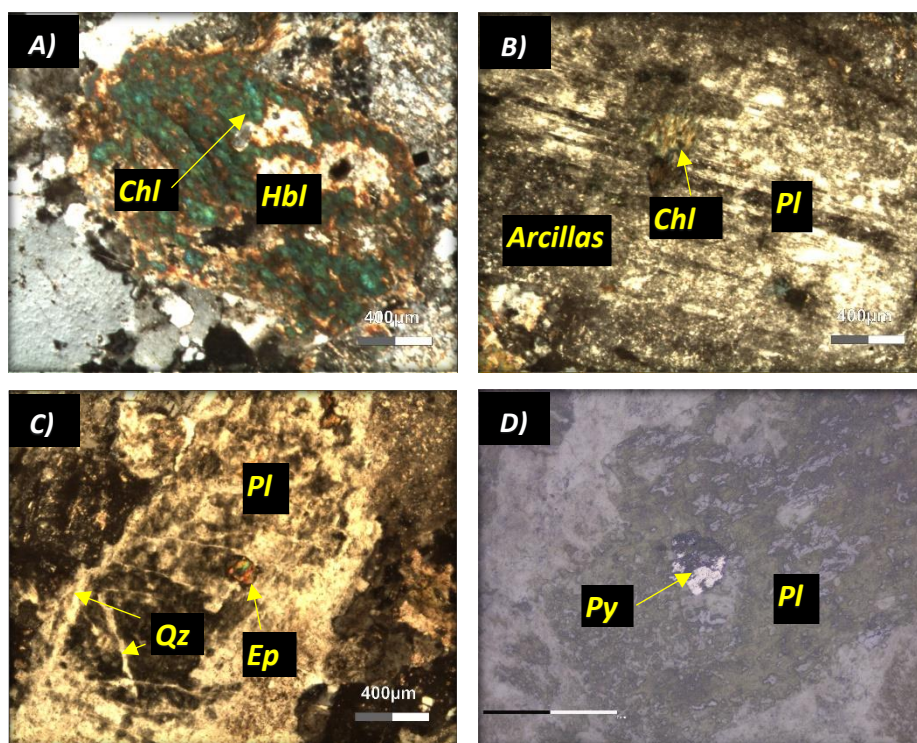


Imagen 4 Fotomicrografías de granodiorita, con nicols cruzados. A) Cristal hexagonal de hornblenda cloritizado. B) Reemplazamiento selectivo de sericita en plagioclasas. C) microcristales de epidota y cuarzo en betillas en plagioclasa. D) Microcristales de pirita diseminados, asociada con plagioclasa.

Paragénesis	Etapa Retrograda 1	Etapa Retrograda 2
Sericita		—————
Clorita	—————	
Epidota	----	
Pirita	—————	—————
Cuarzo	—————	—————

Descripción de lámina delgada

2 Muestra: Bx32c3 b

Quebradillas: ILPQ-16-04 caja 32 carril 3 de 96.6 m a 96.85 m



Imagen 5 Barreno y sección utilizada.

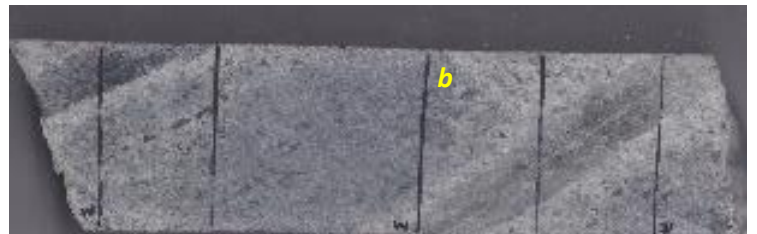


Imagen 6 Sección de corte de láminas.

Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Accesorios (2%):

Alteración (12%):

Plagioclasa Sódica (44%), Feldespato potásico (22%), Cuarzo (20%)

Ilmenita o Titanita Magnetita, Magnetita, Zircón

Apatito, Clorita (alteración de anfíboles), Calcita, Pirita, Hematita, Epidota, Diópsido, Illita.

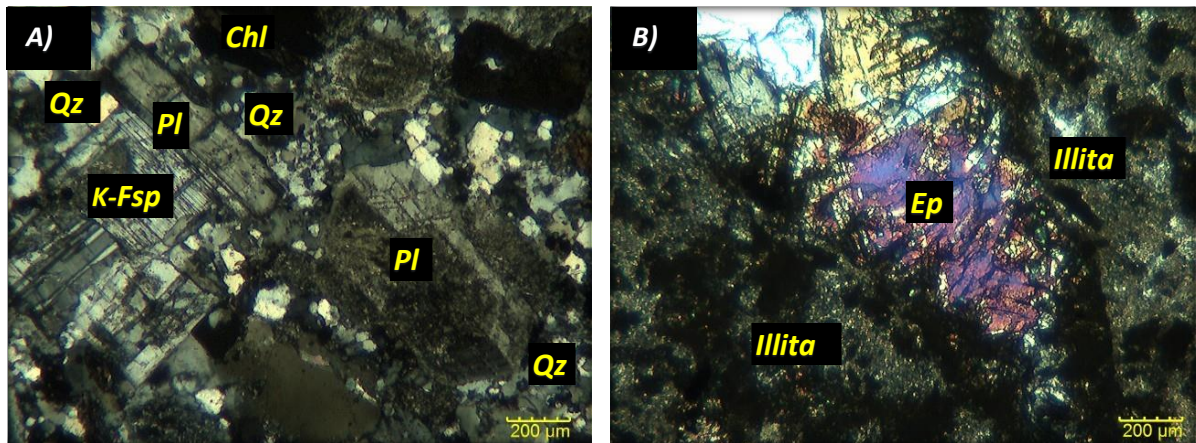


Imagen 7 Fotomicrografía luz transmitida. A) Cuarzo inequigranular con textura en mosaico, plagioclasa zoneada, feldespato potásico y hornblenda cloritizada. B) Epidota columnar en zona de alteración retrograda con Illita.



## Granodiorita

Intrusivo alterado. Se presenta textura holocristalina e inequigranular en la zona de intrusivo menos alterada, ocasionales plagioclasas zoneadas y feldespato potásico. La granodiorita tiene pirita diseminada y epidota en la zona alterada, se tienen microcristales de apatito remanente de la fase progradada, al igual que minerales de alteración propilítica en la fase retrogradada (clorita, epidota, illita). Se observan también cristales hexagonales de hornblenda y biotita cloritizados.

La epidota se encuentra dispuesta de manera columnar y en microcristales en la zona de alteración. Los feldespatos evidencian una alteración selectiva con desarrollo en parches por sericita. Se presenta diópsido en la zona de alteración de alta temperatura. Microcristales de feldespato potásico de alteración. Eventos dos de alteración de diferente temperatura sobrepuestos y se evidencia un evento de distensión por la cristalización columnar de epidota en la zona de abertura. Mena diseminada muy fina de esfalerita.

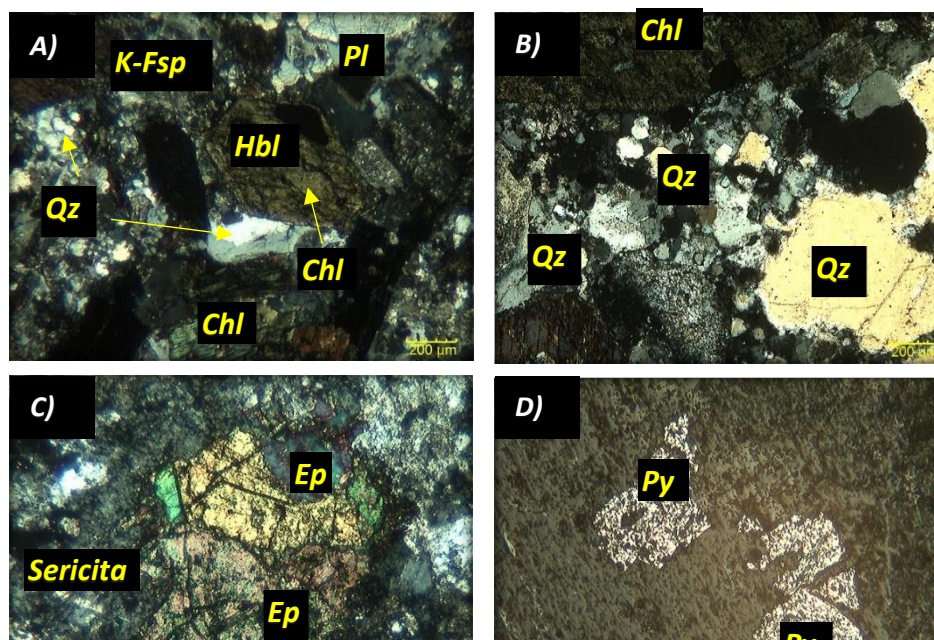


Imagen 8 Fotomicrografías lámina delgada con nicols cruzados. A) Hornblenda cloritizada, plagioclasa, pirita y cuarzo B) Cuarzo inequigranular en mosaico y hornblenda cloritizada. C) Microcristales de epidota. D) Fenocristales de pirita.

Paragénesis	Etapa Progradada	Etapa Retrograda 1	Etapa Retrograda 2
Diópsido	—————		
Illita			
Clorita		—————	
Epidota		—————	
Pirita		—————	—————
Esfalerita			-----
Cuarzo		—————	—————
Apatito		—————	
Sericita			—————

## Descripción de lámina delgada

3 Muestra: Bx116c4 Vacas: VC-14 Caja 116 Carril 4 de 343.05 m a 343.16 m



Imagen 10 Barreno y sección utilizada.



Imagen 9 Sección de corte de láminas.

Mineralización:

Mena:

Ganga:

Alteración (8%):

Calcita (10%), Cuarzo (8 %)

Esfalerita (20%), Galena (20%), Calcopirita (10%)

Pirita (20%), Marcasita (4%)

Ilita, Epidota, Clorita

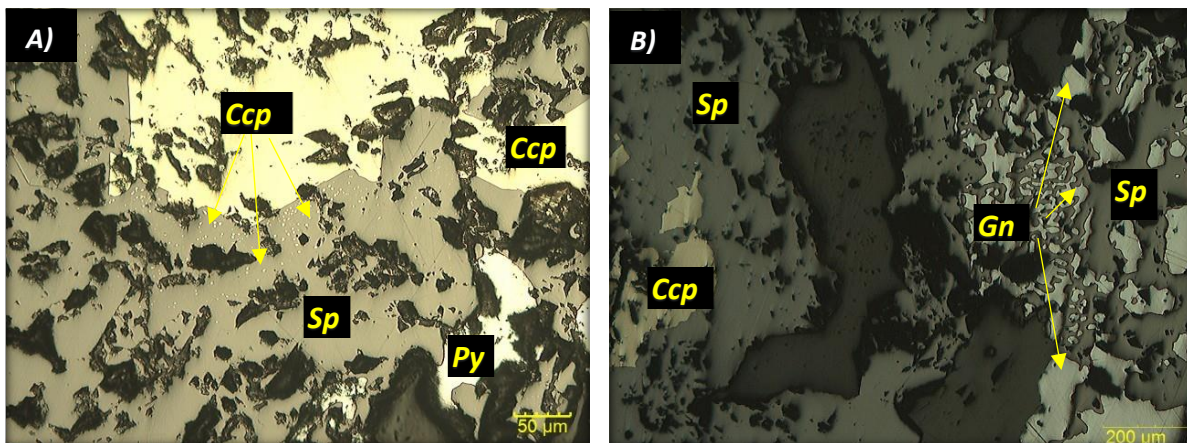


Imagen 11 Fotomicrografía de mena polimetálica de cuerpo Vacas. A) Texturas de la Calcopirita en microcristales "enfermedad de la esfalerita" y tardíamente como cristales anhedrales. B) Galena argentífera asociada con esfalerita, y calcopirita, la galena argentífera presenta una cristalización tipo "simplectítica" característica de este mineral.

### Mena polimetálica

Mineralización del yacimiento Vacas, agregado polimetálico de cristales de esfalerita, galena argentífera, calcopirita, pirita y marcasita. Se presentan dos pulsos de esfalerita, uno con cristales rojizos ricos en zinc y el segundo con cristales más oscuros debido a contenido de hierro. Se presentan dos eventos de cristales de calcopirita: (a) inclusiones dentro de la esfalerita (enfermedad de la esfalerita) y (b) calcopirita anhedral. El cuarzo tiene texturas mosaico, zonado y ocasional plumoso, debido a un cambio brusco de temperatura. Finalmente se tienen fenocristales de calcita tardía. La asociación mineral illita, clorita y epidota corresponden a una propilitización en la fase retrograda del skarn, se tiene plagioclasa seriticizada como heredado de roca caja.

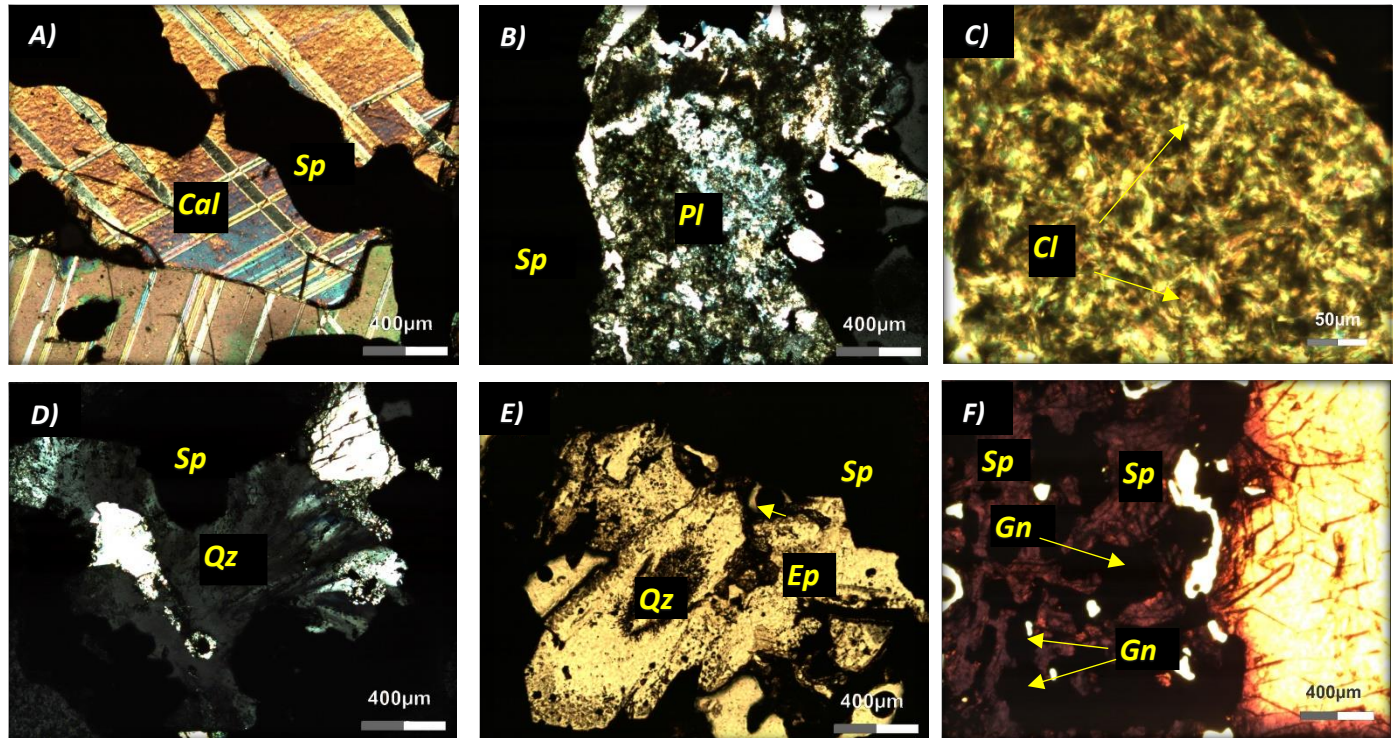


Imagen 12 Fotomicrografías de mena vacas de lámina delgada, luz transmitida con nicoles cruzados. A) Calcita tardía. B) Cristal reemplazado de plagioclasa por arcillas. C) Cuarzo plumoso. D) Cuarzo plumoso y microcristales de epidota. E) Clorita microcristalina F) Pulsos de esfalerita con Galena y esfalerita fenocristalina.

Paragénesis	Etapa Retrograda 1		Etapa Retrograda 2	
Illita	————			
Cuarzo	————			
Epidota	----			
Pirita	————			————
Esfalerita			————	————
Calcopirita			————	————
Galena				————
Marcasita	————			

## Descripción de lámina delgada

4 Muestra: Bx119c1 Vacas: VC-14 caja 119 carril 1 de 349.93 m a 350.2 m



Imagen 14 Barreno y sección utilizada.



Imagen 13 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Ganga:

Alteración (9%):

Esfalerita (15%), Calcopirita (10%)

Calcita (50%), Cuarzo (8%), Pirita (8%)

Clorita (alteración de anfíboles), Cuarzo (relleno intercumulus), Ilita, Tremolita – Actinolita

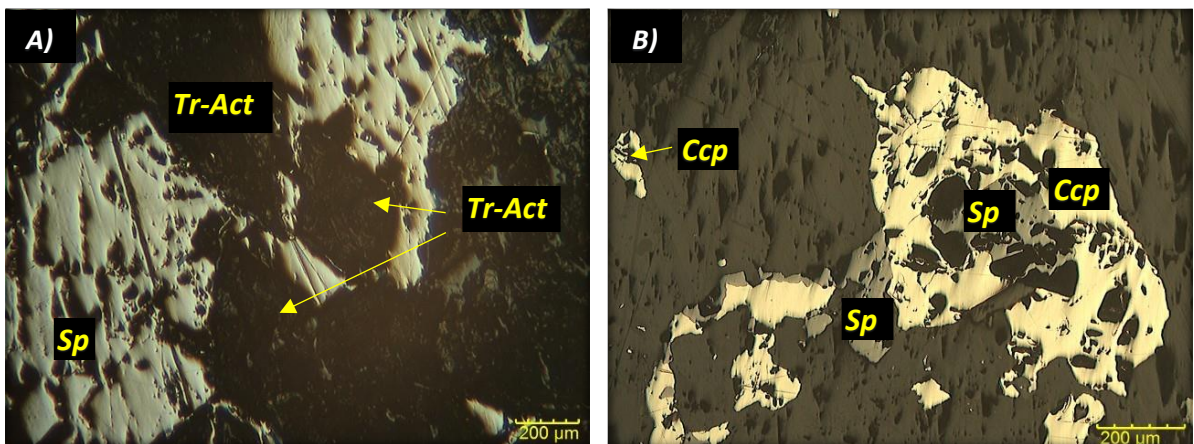


Imagen 15 Fotomicrografía de caliza skarnificada con luz reflejada. A) Esfalerita con formas remanentes de cristales de tremolita – Actinolita. B) Esfalerita asociada con calcopirita.

## Skarn

Caliza metamorfizada con presencia de sulfuros. Se observan puntos triples, así como una marcada textura inequigranular de los cristales de calcita.

Se tienen fantasmas de cristales de tremolita - actinolita, con abundancia minoritaria (~3%), reemplazado por microcristales clorita y arcillas. La clorita se encuentra mayoritariamente en los bordes de los cristales de esfalerita. Se presentan dos eventos de alteraciones de fase retrograda, una evidenciada con tremolita – actinolita la cual ya se encuentra totalmente alterada, pirita y cuarzo, y una segunda con clorita, calcita, cuarzo, pirita y arcillas, posiblemente illita, siendo la segunda donde se encuentra la mena de esfalerita y calcopirita cristalizadas sucesivamente.

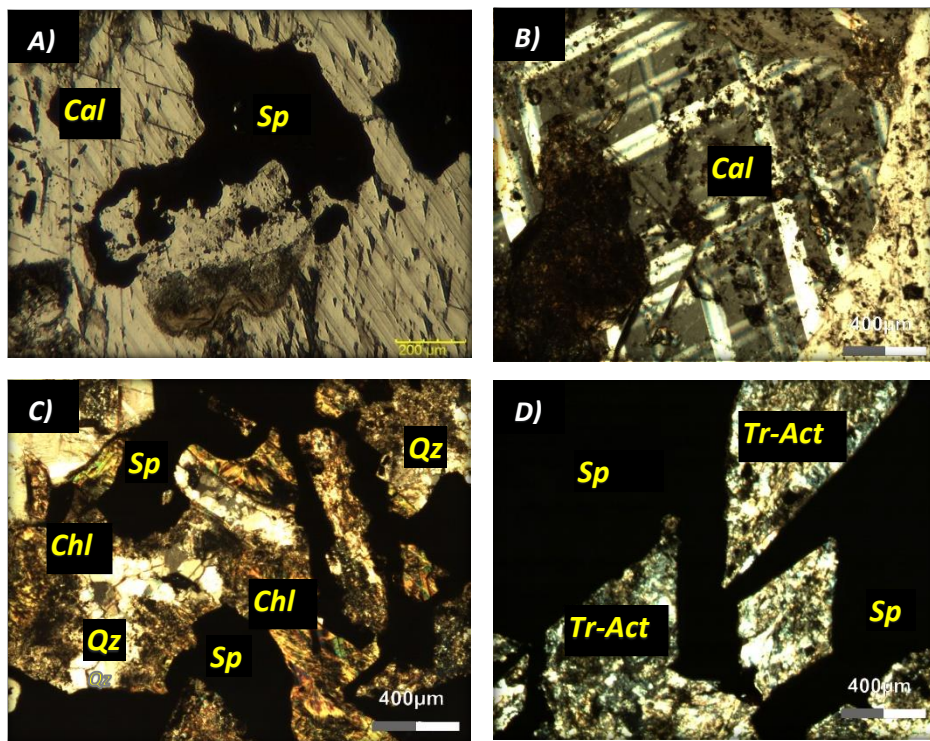


Imagen 16 Fotomicrografías lámina delgada de muestra de zona de caliza skarnificada, con nicoles cruzados. A) esfalerita en calcita, sin nicoles cruzados. B) Calcita tardía. C) Cristales de clorita y en la periferia de esfalerita, con cuarzo de relleno. D) Fantasmas de tremolita - actinolita dentro de esfalerita.

Paragénesis	Etapa Retrograda de mayor temperatura		Etapa Retrograda de menor temperatura	
Tr-Ac	—————			
Pirita		—————		
Esfalerita			—————	
Calcopirita			—————	
Cuarzo	—————		—————	
Clorita			—————	
Ilita			—————	

## Descripción de lámina delgada

5 Muestra: Bx153c4 Vacas: VC-31 caja 153 carril 4 de 467.7 m a 468 m



Imagen 17 Barreno y sección utilizada.



Imagen 18 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena (1%):

Ganga:

Alteración (31%):

Calcopirita, Marcasita, Esfalerita, Galena  
Calcita (37%), Cuarzo (15%), Granates (10%),  
Arsenopirita (5%), Zircón (<1%), Pirita (1%)  
Apatito, Sericita, Illita, Epidota, Clorita,  
Feldespato potásico (alt. propilítica)

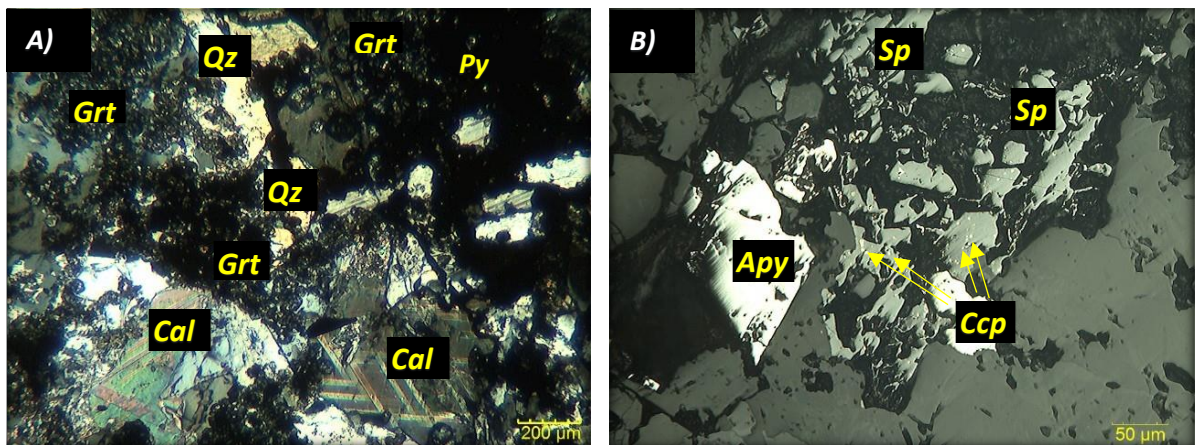


Imagen 19 Fotomicrografía luz transmitida. A) Microcristales de cuarzo, calcita y vetillo de pirita con Illita y granate. B) Microcristales de arsenopirita y calcopirita dentro de cristales de esfalerita (enfermedad de la esfalerita).

## Skarnoide

Contacto de caliza con cuerpo intrusivo. Zona de alteración propilítica, se presenta cuarzo en mosaico y se observan microcristales de sulfuros como calcopirita, pirita, marcasita y esfalerita. Se presenta vetilleo de calcita y pirita que corta cristales de esfalerita debido a un evento hidrotermal tardío no mineralizante. Se observa la cristalización de granate como evidencia de la alteración progradada.

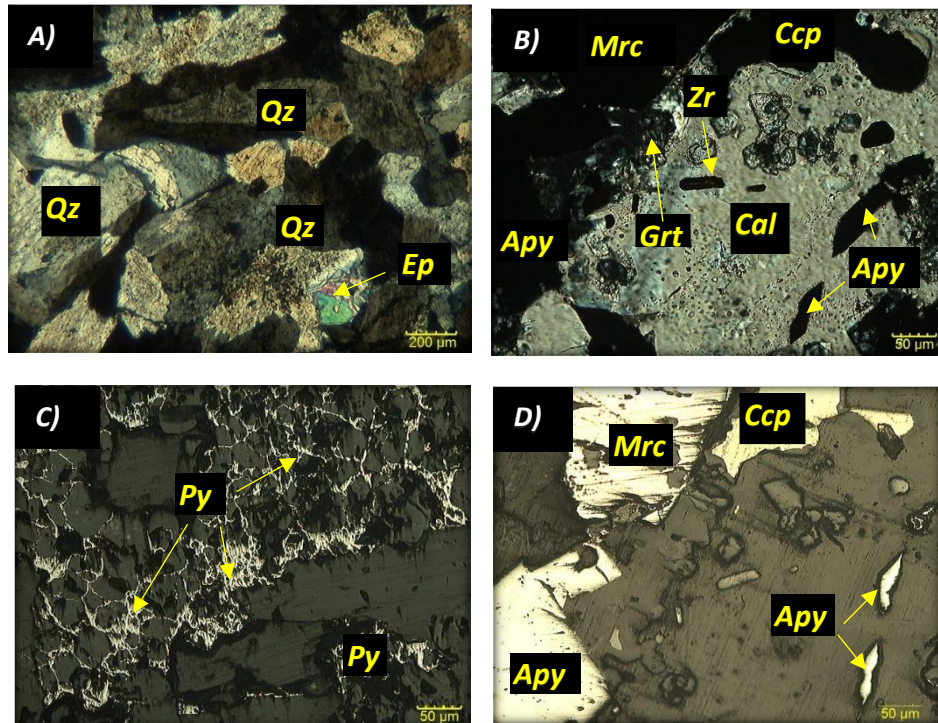


Imagen 20 Fotomicrografías lámina delgada con nicols cruzados. A) Cuarzo en mosaico y microcristal de epidota. B) Microcristal de zircón en fenocristal de calcita con sulfuros asociados. C) Vetilleo de calcita relleno microcristales brechados de calcita y arcillas. D) Fenocristales de pirita siendo remplazados por marcasita y asociados con calcopirita y arsenopirita.

Paragénesis	Etapa Progradada	Etapa Retrogradada
Granate	—————	
Marcasita		—————
Pirita		—————
Arsenopirita		—————
Esfalerita		—————
Calcopirita		—————
Epidota		—————
Ilita		—————
Sericita		—————

## Descripción de lámina delgada

### 6 Muestra: Int vaca 01 Vacas: Nivel 6



Imagen 21 Estructura muestreada.



Imagen 2 Muestra y sección utilizada.

#### Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Plagioclasa (17%), Cuarzo (9%), Feldespato Potásico (5%)

Accesorios:

Hornblenda (2%), Ilmenita (2%), Titanomagnetita (2%), Magnetita (1%), Marcasita (1%), Pirita (1%)

Alteración y matriz (60%):

Clorita, Illita, Calcita

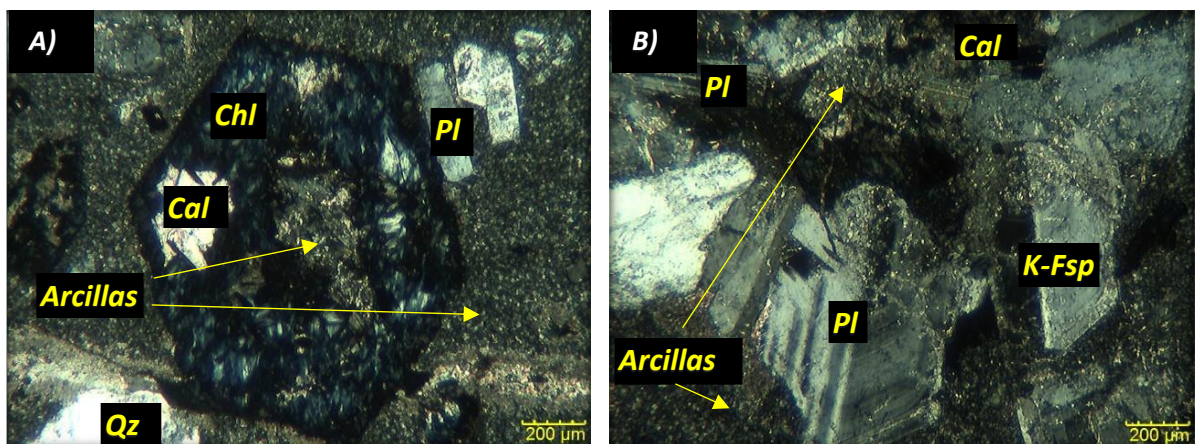


Imagen 22 Fotomicrografía Transmitida. A) Hornblenda reemplazada selectivamente por calcita y clorita. B) Glomerocrystal de plagioclasas con cristales de calcita y alteración selectiva a arcillas.



### Intrusivo granodiorítico

Dique de composición granodiorítica con textura porfídica. Se presentan plagioclasas zoneadas ocasionales, recristalización de plagioclasas y alteración selectiva a arcillas y calcita, textura porfídica está compuesta de fenocristales de plagioclasa y cuarzo, en algunas zonas presenta vetillo de calcita, se observan cristales hexagonales de hornblenda siendo remplazados selectivamente por calcita y clorita. La muestra se encuentra compuesta principalmente por una matriz de microcristales de arcillas y plagioclasa, presentando una alteración subpropilítica. Se pudo encontrar de igual forma el remplazamiento de plagioclasas por cristales de titanomagnetita e ilmenita.

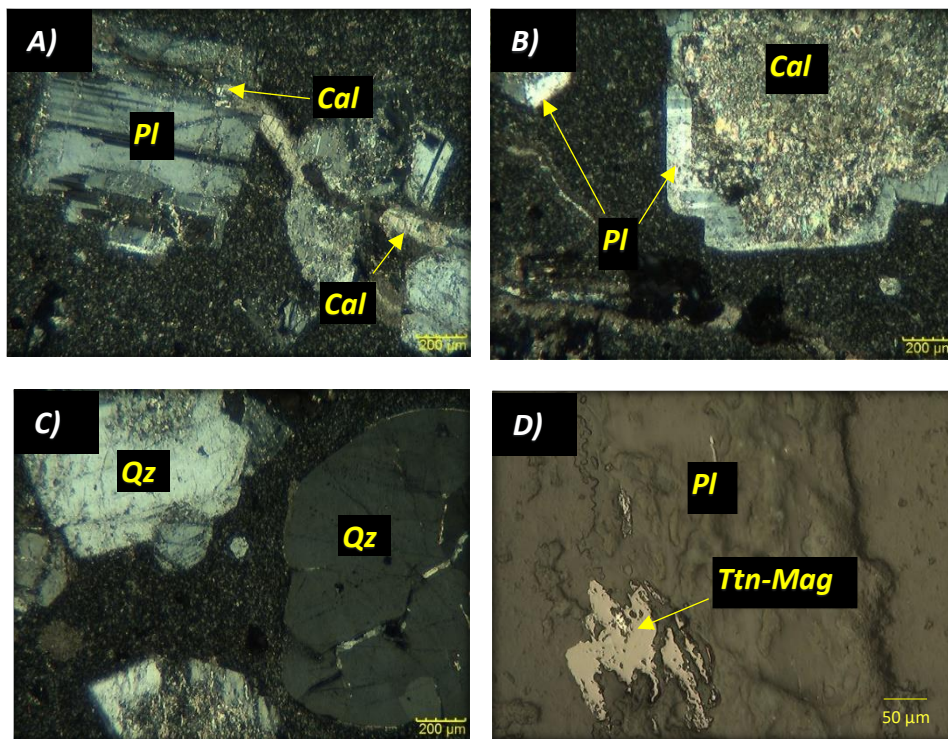


Imagen 23 Fotomicrografías lámina delgada con nicols cruzados. A) Fenocristales de plagioclasa y calcita en matriz de microcristales. B) Fenocristales de plagioclasa siendo alterados selectivamente a calcita en microcristales. C) Fenocristales de cuarzo y feldespato potásico en matriz de microcristales. D) Ilmenita y titanomagnetita en un cristal de plagioclasa.

Paragénesis	Etapa Retrograda	
Calcita		—————
Clorita	—————	—————
Arcillas		—————

## Descripción de lámina delgada

7 Muestra: BX96c4 Vacas: VC-26 de 292.52 m a 292.6 m



Imagen 24 Barreno y sección utilizada.



Imagen 25 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Calcopirita (20%), Galena (15%), Esfalerita (10%), Sulfosales (5%)

Accesorios:

Calcita (25%), Marcasita (8%)

Alteración (17%):

Illita, Epidota, Clorita

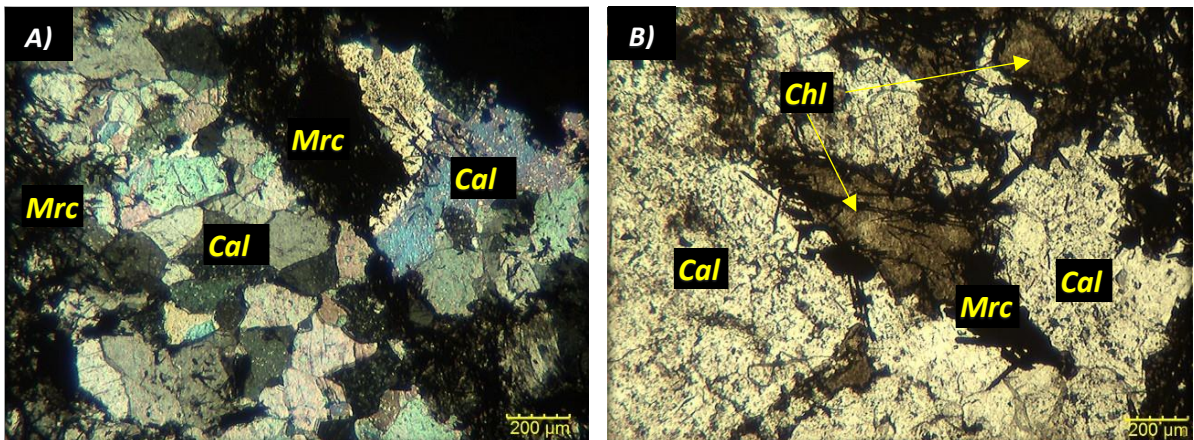


Imagen 26 Fotomicrografía Transmitida. A) Cristales de calcita equigranular con cristales de marcasita acicular. B) Cristales de calcita con clorita y marcasita acicular.

## Mena

Zona mineralizada con calcopirita, galena, esfalerita y sulfosales de plata como minerales de mena y marcasita. Asociado a fases metálicas está la epidota, clorita y arcillas como evidencia de una alteración propilitica en la fase retrógrada de alteración hidrotermal.

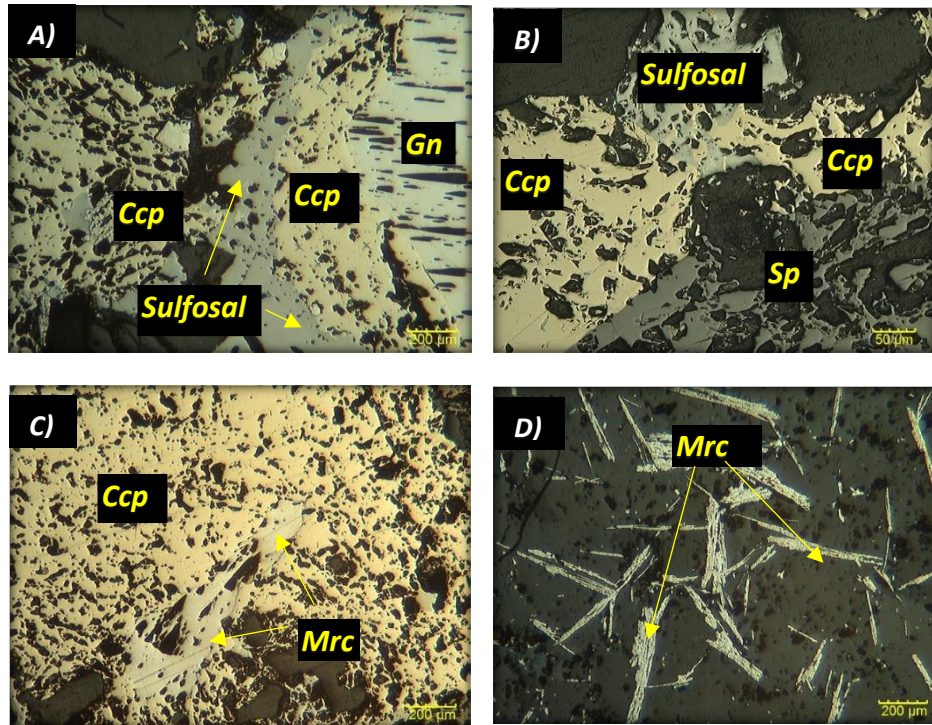


Imagen 27 Fotomicrografías lámina delgada con nicoles cruzados. A) Minerales de mena cristales de galena, calcopirita y sulfosales de plata. B) Cristales de sulfosales de plata asociados a calcopirita y esfalerita. C) Cristales de marcasita dentro de calcopirita. D) Cristalización acicular de marcasita.

Paragénesis	Etapa Retrograda de mayor temperatura		Etapa Retrograda de menor temperatura	
Galena			—	
Marcasita	—			
Esfalerita		—		
Sulfosal de Plata			—	
Calcopirita	—	—		
Epidota			—	
Clorita				—
Illita				—

## Descripción de lámina delgada

8 Muestra: Bx115c2 Vacas: VC-14 caja 115 carril 2 de 338.95 m a 339.09 m



Imagen 28 Barreno y sección utilizada.



Imagen 29 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Esfalerita (17%), Calcopirita (8%), Galena (4%)

Ganga:

Calcita (36%), Pirrotina (9%), Arsenopirita (8%), Pirita (5%), Marcasita (1%)

Alteración (18%):

Sericita, Clorita

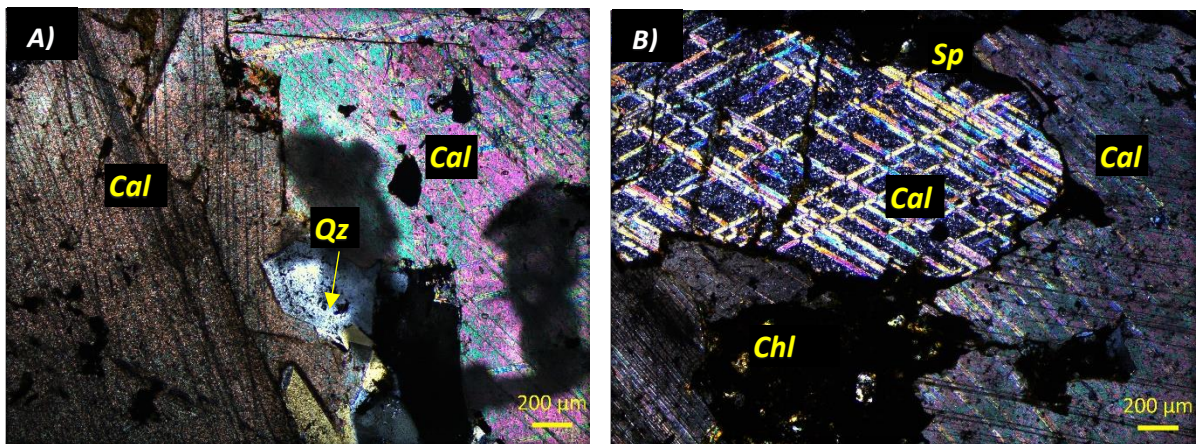


Imagen 30 Fotomicrografía Transmitida. A) Fenocristales de cuarzo, y calcita de dos generaciones. B) Cristales de calcita con clorita y esfalerita.

### Skarn mineralizado

Dos eventos de mineralización de calcita con mena y el segundo como evento tardío. La mena de calcopirita, galena y esfalerita están asociadas con la alteración subpropilítica en la fase retrógrada, conformada por arcilla y clorita. La arsenopirita está asociada a esfalerita cortándola. La clorita se encuentra en los bordes de los cristales de esfalerita.

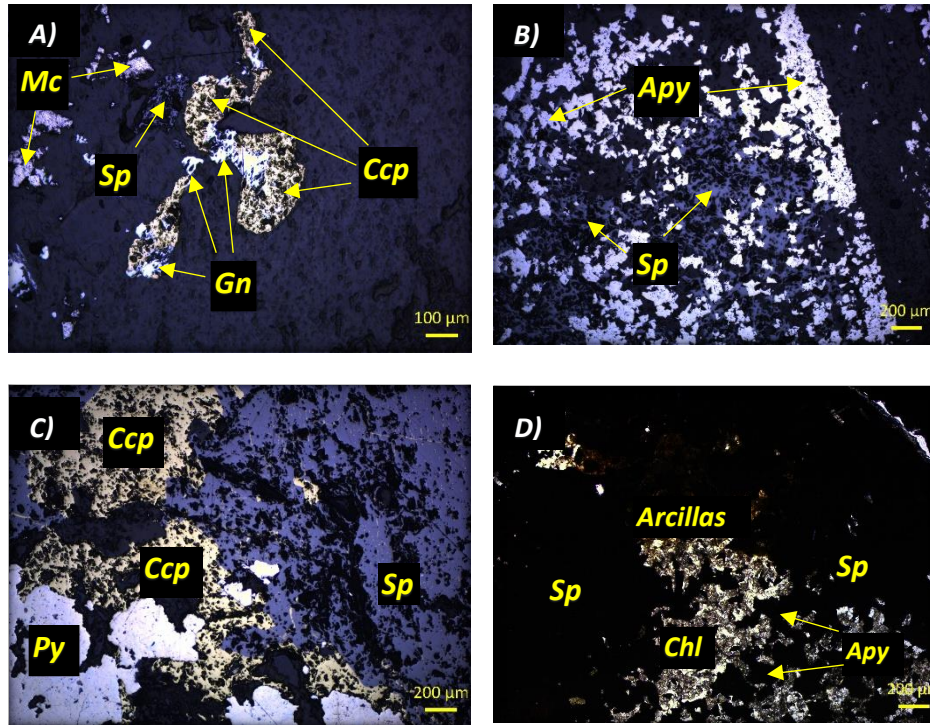


Imagen 31 Fotomicrografías lámina delgada con nicols cruzados. A) Cristales de galena asociados con calcopirita y esfalerita, se presenta también marcasita B) Esfalerita rodeada de cristales de arsenopirita C) Cristales de calcopirita, piritita y esfalerita asociados, se presenta enfermedad de la esfalerita con microcristales de calcopirita. D) Esfalerita con arsenopirita asociadas a sericita y cristales de clorita.

Paragénesis	Etapa Retrograda de mayor temperatura	
Arsenopirita		—————
Esfalerita	—————	—————
Pirita	—————	
Galena		—————
Calcopirita	—————	—————
Pirrotina	—————	
Marcasita	—————	
Arcillas	—————	
Clorita	—————	

## Descripción de lámina delgada

9 Muestra: Bx121c5 Vacas: VC-14 caja 121 carril 5 de 358 m a 358.2 m



Imagen 32 Barreno y sección utilizada.

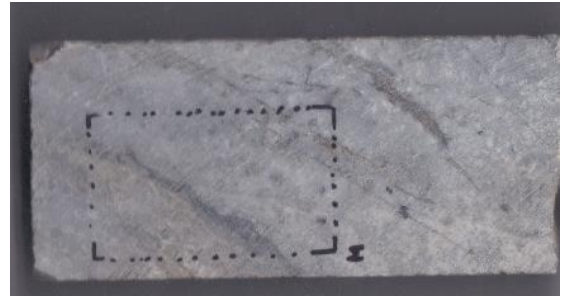


Imagen 33 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Plagioclasa (20%), Feldespato potásico (17%), Cuarzo (8%)

Accesorios:

Hornblenda (3%), Pirita (3%), Pirrotina (1%)

Alteración y matriz (48%):

Epidota, Calcita, Clorita, Sericita, Illita, Tremolita-Actinolita

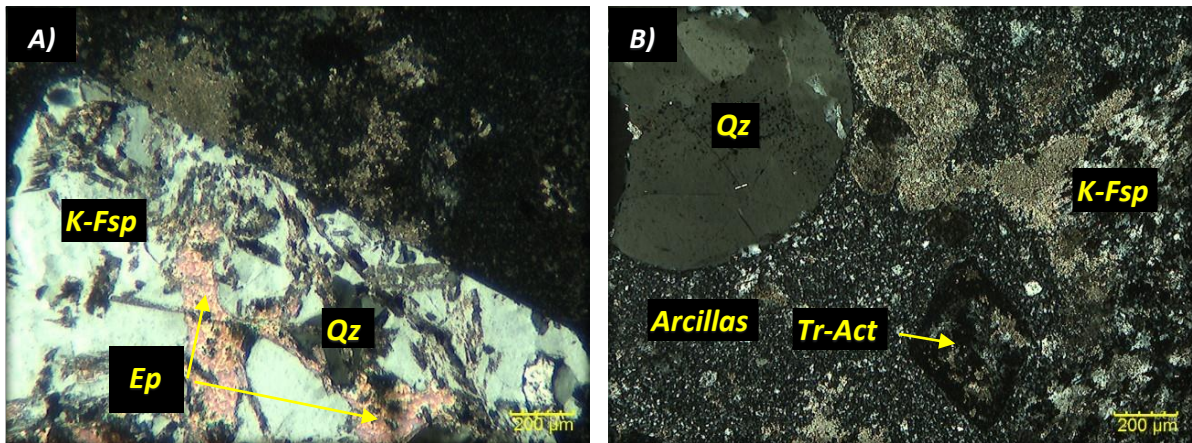


Imagen 34 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Feldespato potásico con alteración selectiva epidota en matriz de microcristales no observables en microscopio. B) Fenocristales de cuarzo, feldespato potásico siendo alterado selectivamente a sericita y cristales de Tremolita-Actinolita siendo reemplazados por clorita.

### Cuarzomonzonita

Cuerpo intrusivo de composición granodiorítica y textura porfídica con propilitización, se presenta fenocristales de feldespato, hornblenda y cuarzo, los feldespatos tienen zoneamiento y alteración selectiva, la alteración en la roca es pervasiva y no pervasiva, presenta minerales como sericita, illita, clorita, microcristales de epidota de forma escasa, presenta en algunas zonas vetilleo de cuarzo en mosaico y cristalización de cuarzo tardío de textura inequigranular. Se encuentran minerales metálicos como piritita y pirrotina diseminados.

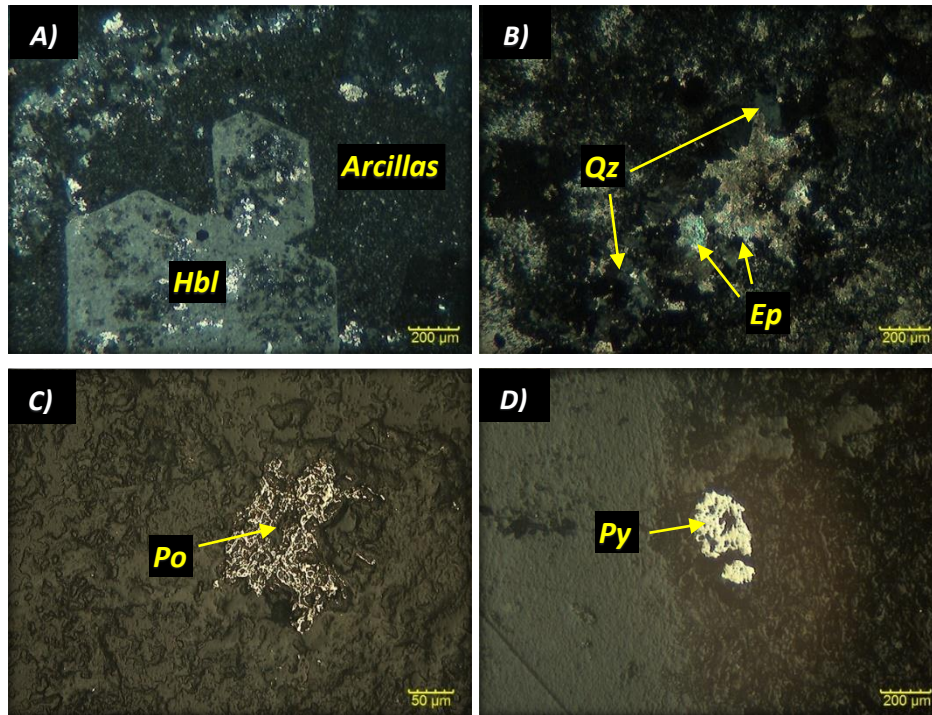


Imagen 35 Fotomicrografías lámina delgada. A) Hornblenda cloritzada, en matriz afanítica alterada hidrotermalmente. B) Cuarzo inequigranular y cristales de epidota. C) Microcristal de pirrotina. D) Cristales de piritita diseminados.

Paragénesis	Etapa Retrograda	
Cuarzo	—————	—————
Sericita		—————
Clorita		—————
Illita		—————
Calcita	—————	
Epidota	----	
Piritita	—————	
Pirrotina	----	

## Descripción de lámina delgada

10 Muestra: Bx24c1 Vacas: Vc-40 caja 24 carril 1 de 74.13 m a 74.2 m



Imagen 36 Barreno y sección utilizada.

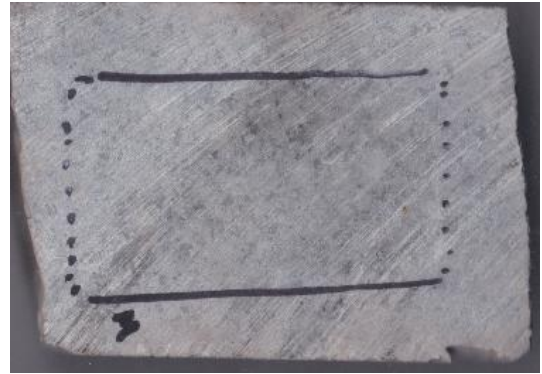


Imagen 37 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Feldespatos potásico (20%), Plagioclasa (20%), Cuarzo (6%)

Accesorios:

Calcita (2%), Pirita (2%)

Alteración:

Sericita (20%), Clorita (15%), Fluorita (12%), Epidota (3%)

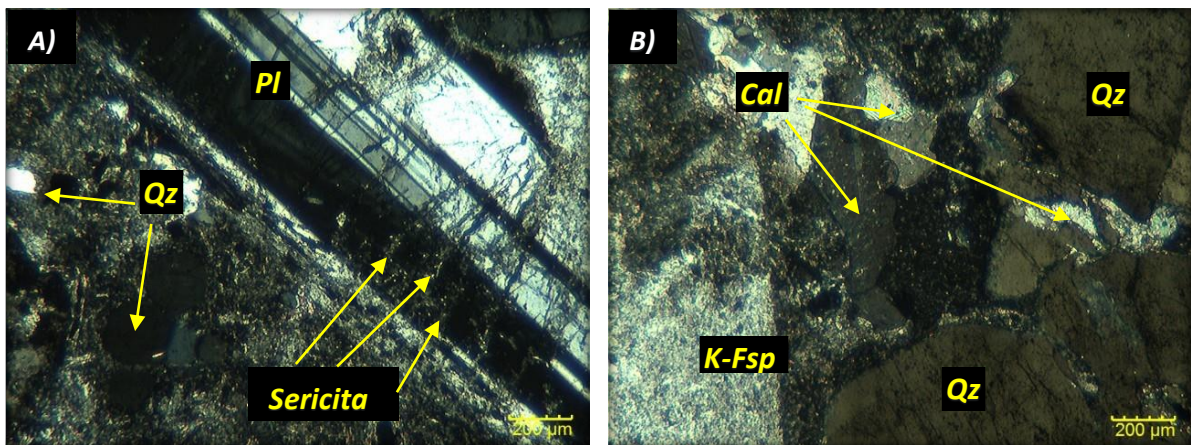


Imagen 38 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Fenocristales de plagioclasa con alteración a sericita y cuarzo inequigranular. B) Cristales de cuarzo y feldespato potásico con vetileo de calcita.



### Cuarzomonzonita

Intrusivo de composición cuarzomonzonítica de textura porfídica que presenta fenocristales principalmente de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, con minerales de alteración propilítica retrógrada como clorita, epidota, sericita, fluorita y calcita tanto de alteración como en vetilleo de calcita posterior al emplazamiento, la calcita de baja temperatura se encuentra asociada con la fluorita.

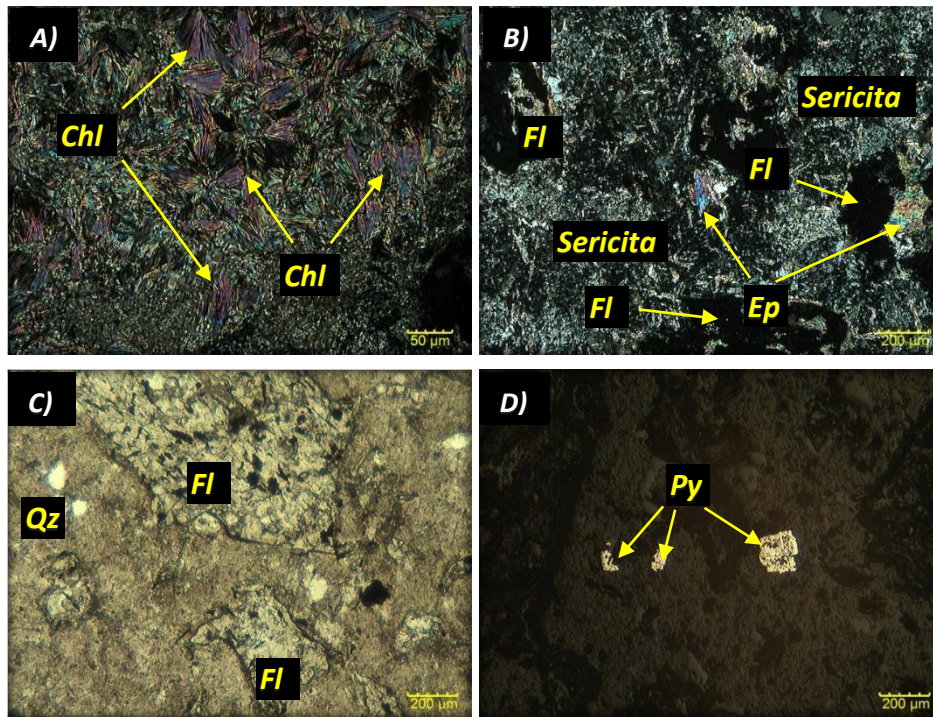


Imagen 39 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Hornblenda cloritizada, en matriz afanítica alterada hidrotermalmente. B) Cuarzo inequigranular y cristales de epidota. C) Microcristal de pirrotina. D) Cristales de pirita diseminados.

Paragénesis	Etapa Retrograda	
Cuarzo	—————	
Sericita		—————
Clorita		—————
Illita		—————
Calcita	—————	—————
Fluorita		—————
Epidota	----	
Pirita	—————	
Pirrotina	----	

## Descripción de lámina delgada

11 Muestra: Bx15c3 Vacas: ILP-VC-15-11 caja 15 carril 3 de 43.55 m a 43.68 m



Imagen 40 Barreno y sección utilizada.



Imagen 41 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Ganga:

Alteración:

Esfalerita (6%), Galena (5%), Calcopirita (3%)

Pirrotina (70%), Cuarzo (5%), Marcasita (3%)

Calcita (5%), Illita (3%),

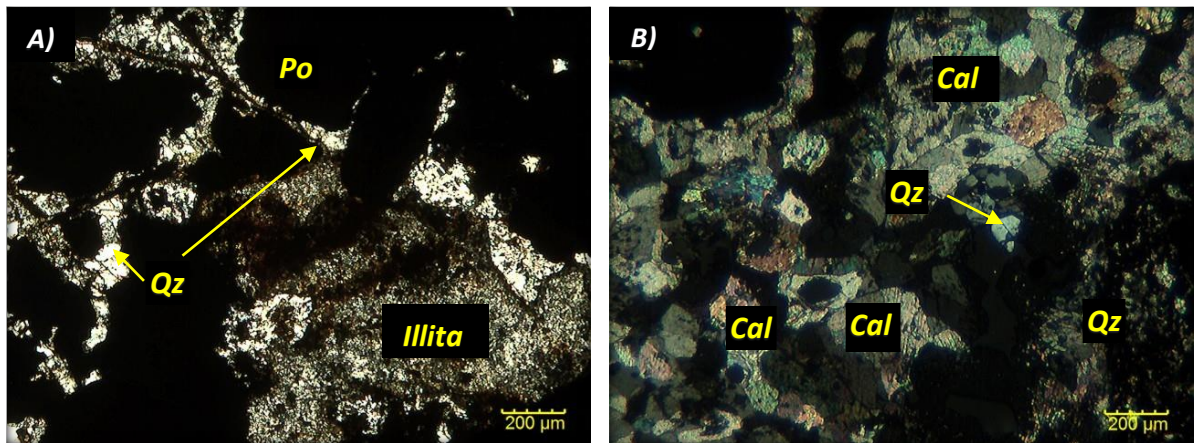


Imagen 42 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Microcristales de cuarzo asociado con illita y sericita entre los cristales de pirrotina. B) Cristales equigranulares de calcita y cristales de cuarzo.

## Mena profunda

Zona profunda mineralizada del yacimiento con predominante presencia de pirrotina en la cual se encuentran algunos cristales de minerales de mena como galena, esfalerita y calcopirita, pero de manera muy escasa. Se presentan cristales de marcasita con habito radial y asociados con microcristales de galena, también observan minerales de alteración como sericita e illita además de cristales equigranulares de calcita y cuarzo.

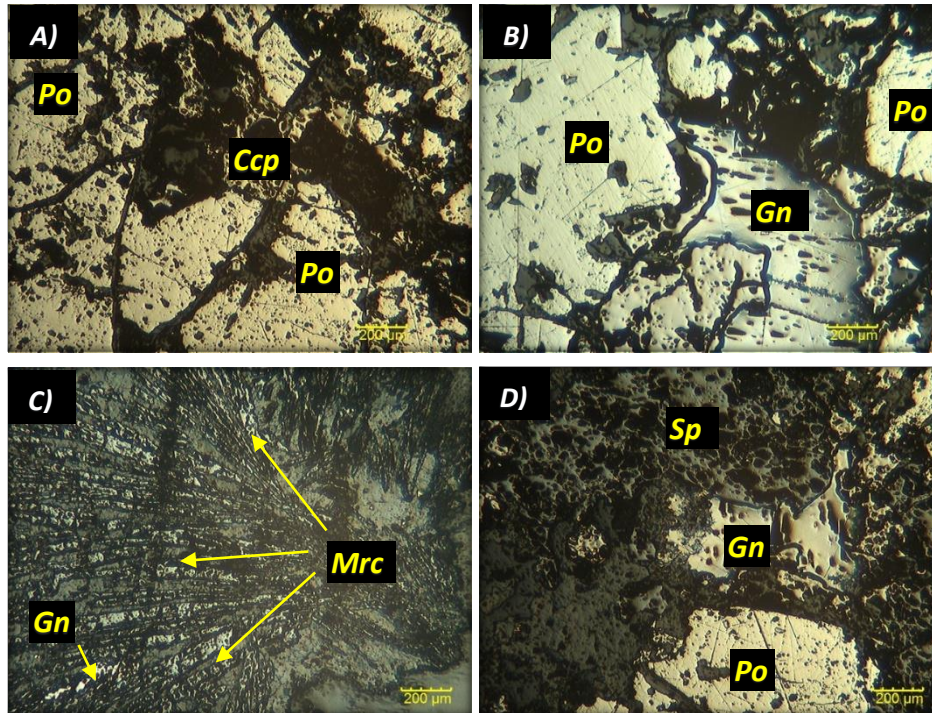


Imagen 43 Micrografías de lámina delgada. A) Microcristal de calcopirita dentro de fenocristal de pirrotina. B) Microcristal de galena dentro de fenocristal de pirrotina. C) Marcasita radial con microcristal de galena. D) Cristales de esfalerita, galena y pirrotina.

Paragénesis	Etapas Retrogradadas	Etapas Retrogradadas
	Etapa Retrograda 1	Etapa Retrograda 2
Cuarzo	—————	
Sericita		—————
Calcita	—————	
Illita		—————
Galena		----
Esfalerita		—
Calcopirita		----
Marcasita		—————
Pirrotina		—————

## Descripción de lámina delgada

12 Muestra: Bx85c4 Vacas: VC-38 caja 85 carril 4 de 255.65 m a 255.85 m



Imagen 45 Barreno y sección utilizada.

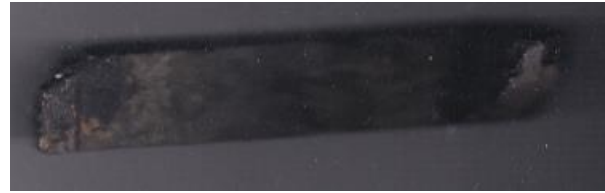


Imagen 44 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Accesorios:

Alteración (39%):

Galena (1%), Calcopirita (1%), Esfalerita (1%)

Pirita (30%), Marcasita (15%), Cuarzo (8%),  
Calcita (3%), Óxidos (2%)

Clorita, Sericita, Illita

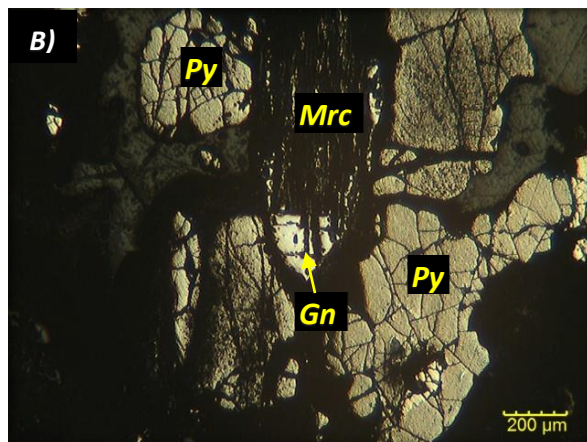
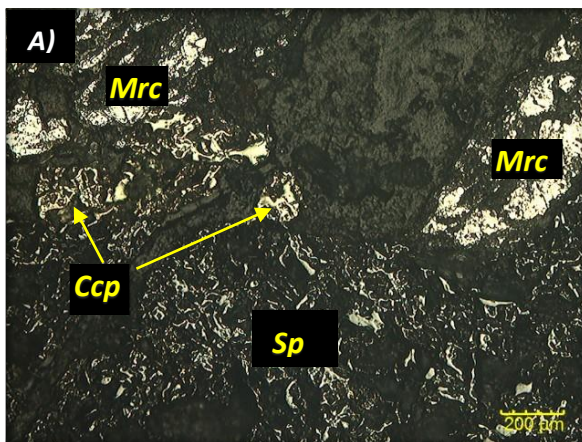


Imagen 46 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Cristales de esfalerita calcopirita y marcasita. B) Microcristal de galena asociado con pirita y marcasita.

### Mena superficial

Muestra obtenida de barreno de la zona mineralizada superficial, con presencia escasa de minerales de mena como galena, esfalerita y calcopirita asociados a abundante pirita y marcasita. Se observa la cristalización de cuarzo hidrotermal con minerales de alteración retrograda, clorita, sericita, illita calcita y cuarzo radial con cristales inequigranulares. También se pudo encontrar escasa cristalización de óxidos como intercrecimiento entre cristales de sulfuros.

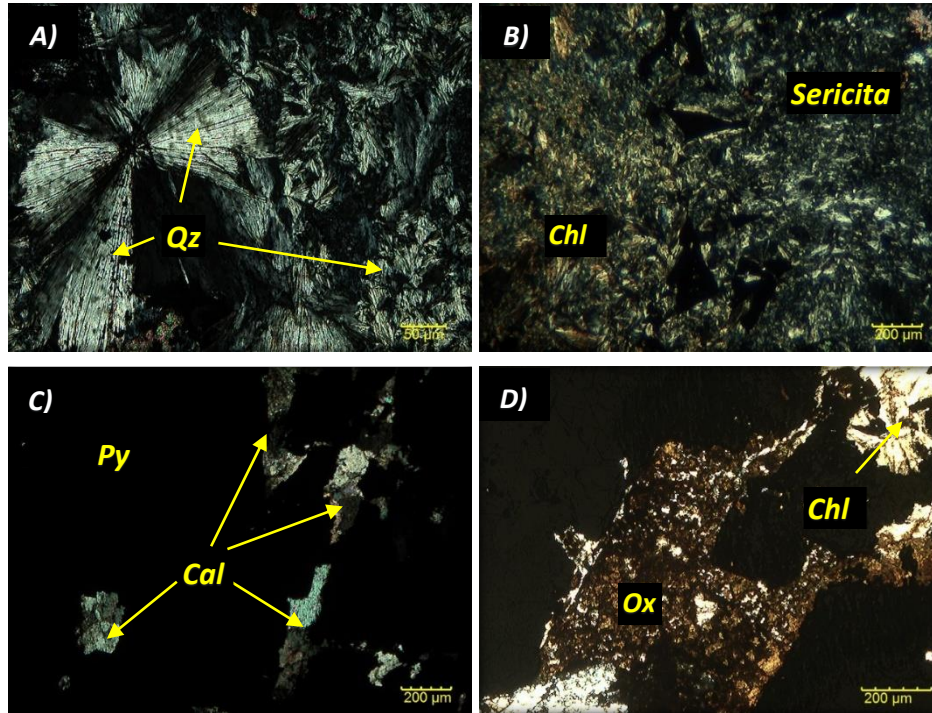


Imagen 47 Fotomicrografías lámina delgada. A) Microcristales de cuarzo radial y cuarzo en mosaico. B) Cristales de clorita y sericita. C) Cristales de carbonatos en fenocristales de pirita. D) Óxidos y cristales de clorita.

Paragénesis	Etapa Retrograda		Etapa retrograda de menor temperatura
Cuarzo	————		————
Sericita			————
Clorita			————
Illita			————
Calcita		————	
Pirita	————		
Marcasita		————	
Calcopirita	----		
Esfalerita	----		
Galena	----		
Rutilo			----

## Descripción de lámina delgada

13 Muestra: Bx21c2 Vacas: VC-40 caja 21 carril 2 de 65.25 m a 65.34 m



Imagen 48 Barreno y sección utilizada.

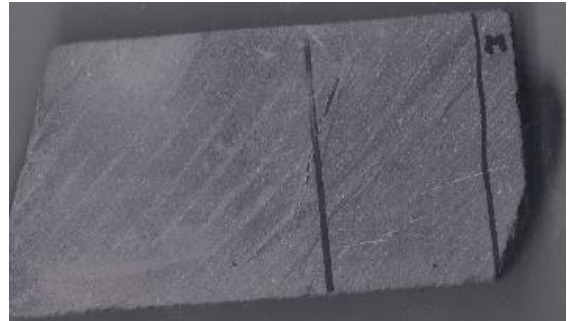


Imagen 49 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Accesorios:

Matriz (38%)

Calcita (30%) Cuarzo (20%), Feldespatos 10%

Pirita (2%)

Cristales finos

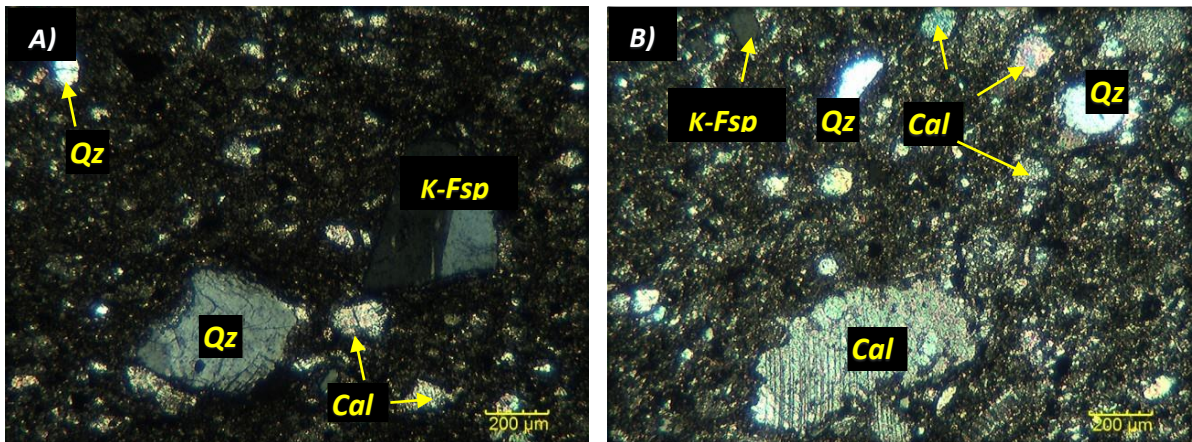
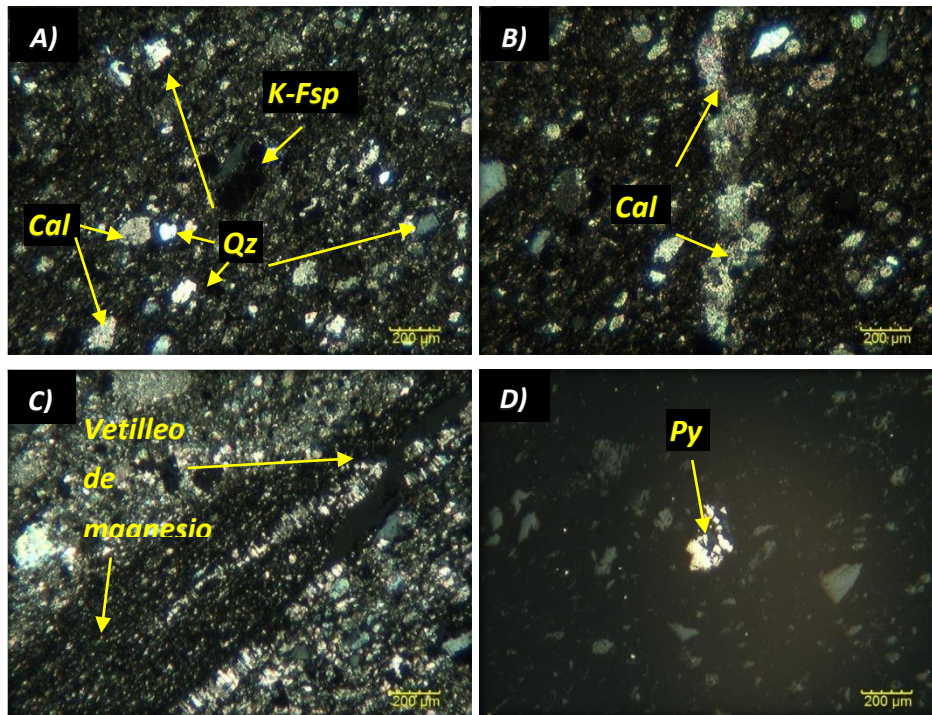


Imagen 50 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Fenocristales de feldespato potásico y cuarzo en matriz fina. B) Fenocristal de calcita y cuarzo en matriz fina.

### **Caliza Wackstone**

Muestra de la roca encajonante en la zona superficial donde se puede observar una roca caliza con matriz soportada con cristales de cuarzo y feldespato mayores al 10%, la muestra también se encuentra cortada por vetillas de calcita de un evento tardío y presenta vetilleo de magnesio que se observa con tonalidad más oscuras. También se pudo identificar la presencia de microcristales de pirita diseminada. Esta caliza corresponde a las calizas wackestone de La Formación Mezcalera.



*Imagen 51 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Cristales equigranulares de calcita, cuarzo y feldespato potásico. B) Veta de calcita tardía cortando a la muestra. C) Veta de magnesio. D) Cristales de pirita diseminados.*

## Anexo B

### Descripción de lámina delgada

1 Muestra: Bx119c1 IF Vacas: VC-14 de 349.93 m a 350.2 m



Imagen 53 Barreno y sección utilizada.



Imagen 52 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Esfalerita (15%), Calcopirita (10%)

Ganga:

Calcita (40%), Cuarzo (10%), Pirita (7%),  
Marcasita (7%), Arsenopirita (1%)

Alteración (10%):

Clorita (alteración de anfíboles), Cuarzo, Illita,  
Tremolita – Actinolita

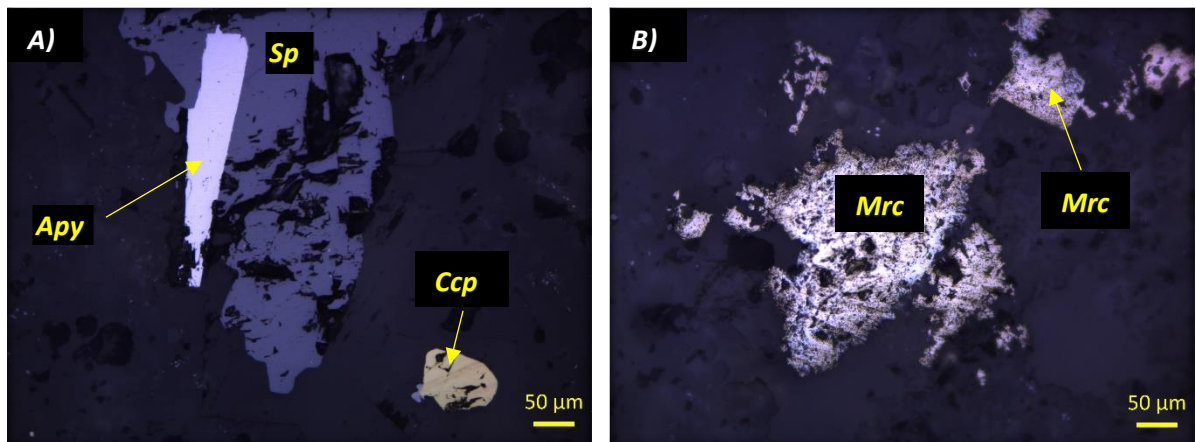


Imagen 54 Fotomicrografía de caliza skarnificada con luz reflejada. A) Esfalerita con arsenopirita y calcopirita B) Microcristales de marcasita



## Skarn

La muestra presenta un sector con alteración de alta temperatura, alto contenido de arcillas con microcristales de calcita y cuarzo, seguido de una sucesión de menor temperatura con presencia de cuarzo y fenocristales de calcita, finalmente se observa calcita retrograda de primera generación. Se presentan cristales de arsenopirita, calcopirita y marcasita en el límite entre de los dos últimos eventos. Las inclusiones primarias y pseudosecundarias observadas en la calcita retrograda (A), presentan un grado de relleno que varía de 60% hasta 85% con temperatura menor a 200°C y salinidades menores a 5% en el caso de inclusiones bifásicas, mientras que se tiene presencia poco frecuente de inclusiones monofásicas de líquido y vapor. En la zona de cuarzo y calcita (B) se realizó microtermometría en cristales de calcita, donde se presentó un grado de relleno y tamaño más variado de 70% a 75% con presencia de inclusiones de vapor y presentando temperaturas de 200°C -250°C y salinidades mayores a 10%. La zona con arcillas se caracterizó con un grado de relleno alrededor de 80% y la mayor temperatura y salinidad con un rango de 250°C - 350°C y salinidades mayores de 25%.

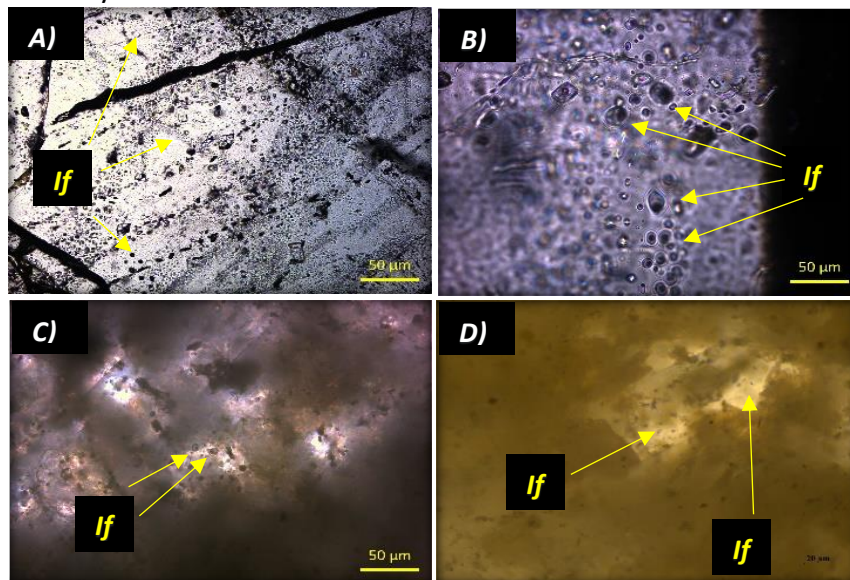
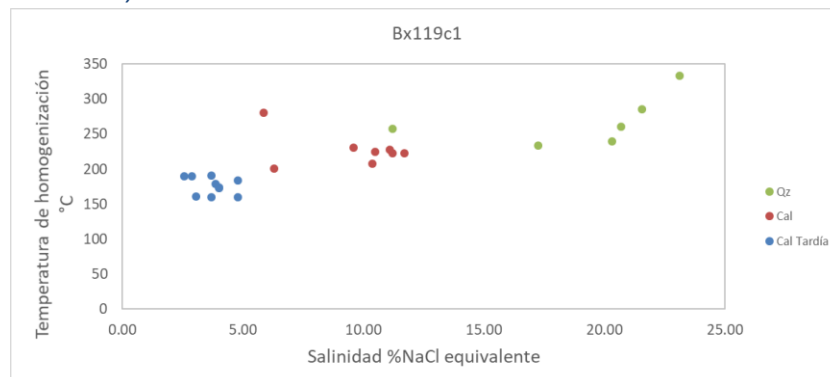


Imagen 55 Micrografías de lámina delgada. A) Inclusiones en calcita de la zona de menor temperatura. B) Inclusiones en calcita de la zona intermedia temperatura. C) Zona de alteración de mayor temperatura con inclusiones en calcita. D) Zona de alteración de mayor temperatura con inclusiones en cuarzo y calcita.



## Descripción de lámina delgada

2 Muestra: Bx32c3 b IF Quebradillas: ILPQ-16-04 caja 32 carril 3 de 96.6 m a 96.85 m



Imagen 56 Barreno y sección utilizada.

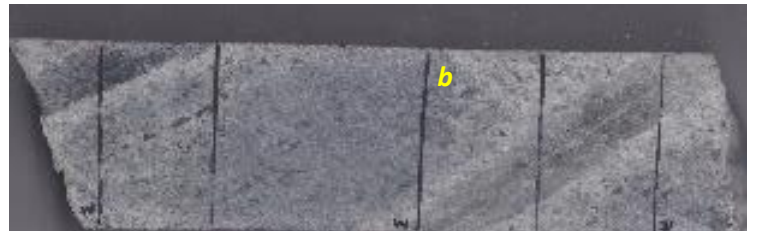


Imagen 57 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Minerales esenciales:

Plagioclasa Sódica (34%), Feldespato Potásico (22%), Cuarzo (20%), Calcita (10%)

Mena y Accesorios (15%):

Galena, Pirita, Hematita, Ilmenita, Titano Magnetita

Alteración (12%):

Clorita (alteración de anfíboles), Epidota, Sericita, Illita

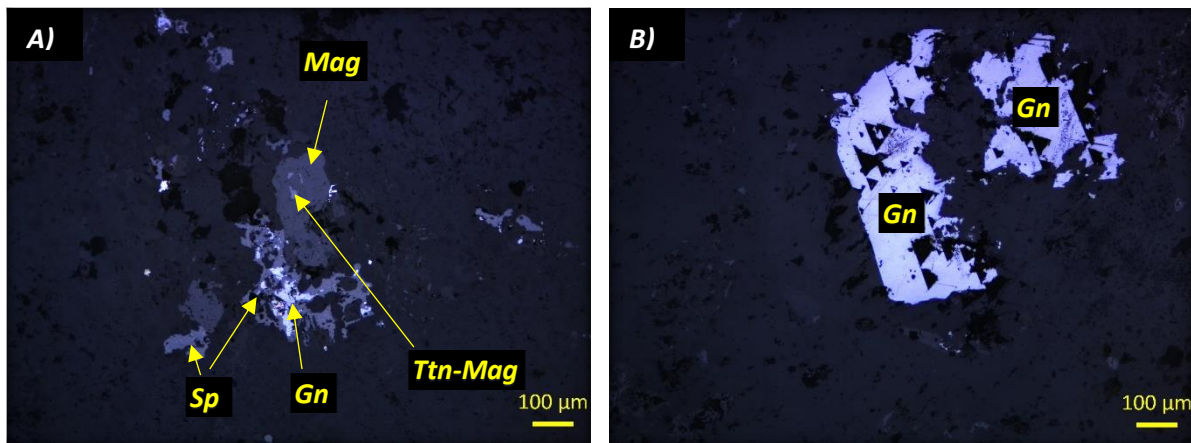


Imagen 58 Fotomicrografía con luz reflejada. A) Microcristales de magnetita, titanomagnetita, galena y esfalerita. B) Microcristales de galena.

## Granodiorita

La muestra representa un cuerpo intrusivo granodiorítico cortando un evento de relleno de cavidad con epidota debido a extensión, la epidota se manifiesta con una cristalización columnar y un halo de alteración. Se presenta galena, esfalerita, titanomagnetita, pirita, ilmenita y magnetita.

Las inclusiones fluidas bifásicas estudiadas en la muestra se tomaron en tres sectores, el sector del cuerpo intrusivo alterado, la zona próxima al vetilleo de epidota y en los cristales columnares de epidota. En las tres zonas el grado de relleno de las inclusiones no presento una variación significativa oscilando de entre el 70% al 90%. La zona alejada de la vetilla de epidota se midió con principalmente cristales de calcita dando como resultado bajos niveles de temperatura de homogenización de 200°C - 300°C y salinidad ente 15%-20%. Los cristales de epidota arrojaron temperaturas cercanas a los 300°C y salinidad del 16%. Finalmente, la zona de alteración medida en cuarzos dio como resultado las mayores temperaturas y salinidad.

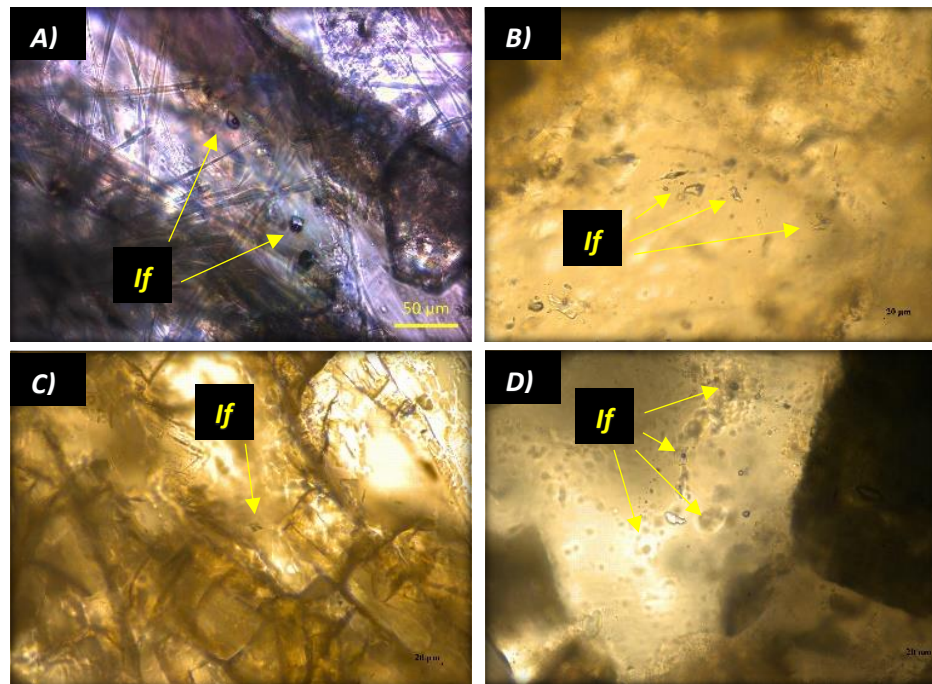
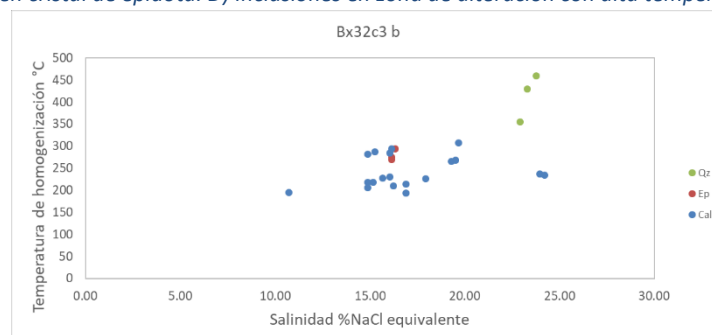


Imagen 59 Fotomicrografías lámina delgada con nicoles cruzados. A y B) Inclusiones en cristales de calcita de la zona de menor temperatura. C) Inclusión en cristal de epidota. D) Inclusiones en zona de alteración con alta temperatura.



## Descripción de lámina delgada

3 Muestra: Bx29c5 lf Quebradillas: ILPQ-16-04 caja 29 de 89.1 m a 89.25 m



Imagen 60 Barreno y sección utilizada.



Imagen 61 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Minerales de ganga:

Cuarzo (45%), Calcita (35%), Óxidos (10%),  
Arsenopirita (5%)

Alteración (5%):

Epidota, Arcillas

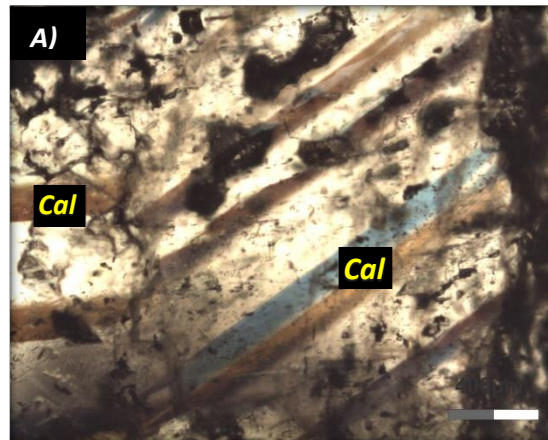
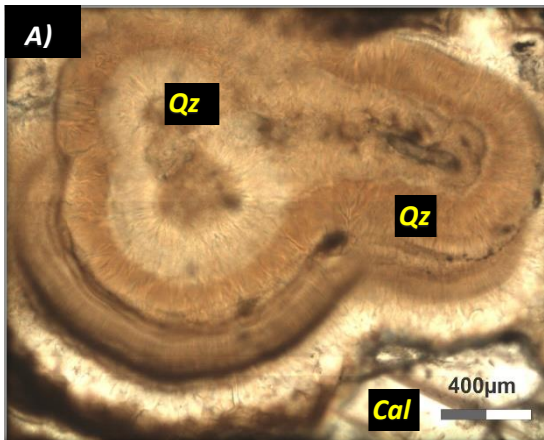


Imagen 62 Fotomicrografía con luz transmitida. A) Cuarzo criptocristalino, calcedonia. B) Fenocristales de calcita inequigranulares.

### Veta hidrotermal tardía

La muestra se compone principalmente de cuarzo calcedónico en hasta 30% de la lámina y fenocristales de calcita, además presenta microcristales opacos de óxidos de hierro, arsenopirita, epidota y arcillas.

Las inclusiones fluidas estudiadas pertenecen a dos zonas en contacto, una primera zona con abundante cuarzo inequigranular y cuarzo calcedónico, mientras que la segunda presenta predominantemente fenocristales de calcita. En la primera zona se encuentra una menor cantidad de inclusiones fluidas las cuales presentan temperaturas de 100°C-130°C y salinidad de 3%-7%, con grados de relleno variables de 60% a 90% incluyendo inclusiones monofásicas solamente de fluido o vapor. La zona de calcita presenta mayor abundancia de inclusiones fluidas con grado de relleno de 75% a 90% presentando temperaturas similares, pero con salinidades de 2%-3%.

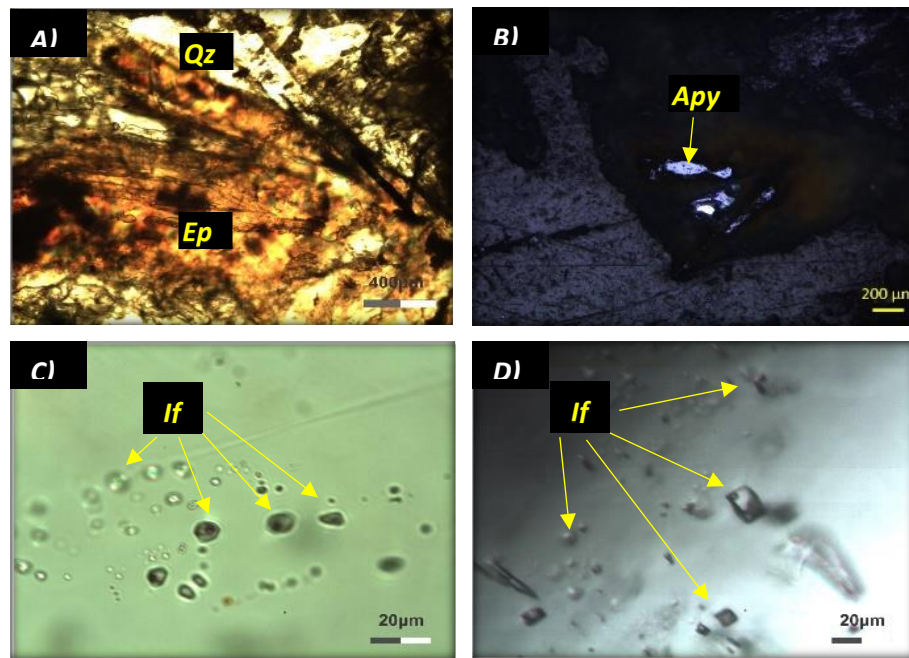
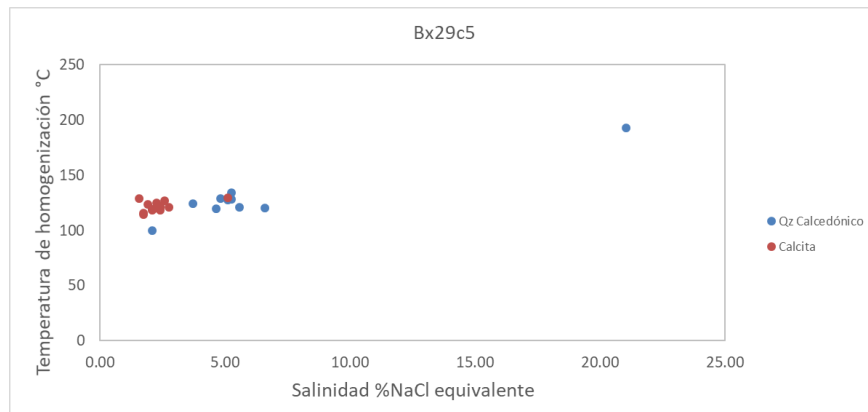


Imagen 63 Fotomicrografías lámina delgada. A) Cuarzo radial y epidota. B) Microcristales de arsenopirita. C) Inclusiones fluidas en fenocristal de cuarzo. D) Inclusiones fluidas en fenocristal de calcita.



## Descripción de lámina delgada

4 Muestra: Bx153c4 if a Vacas: VC-31 de 467.7 m a 468 m



Imagen 64 Barreno y sección utilizada.



Imagen 65 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:	Calcopirita (6%), Marcasita (3%), Esfalerita (2%), Galena (1%), Sulfosales (<1%)
Ganga:	Calcita (49%), Cuarzo (8%), Granates (6%), Arsenopirita (5%), Pirita (1%), Ilmenita-Titanomagnetita (1%),
Alteración (17%):	Apatito, Sericita, Illita, Epidota, Clorita

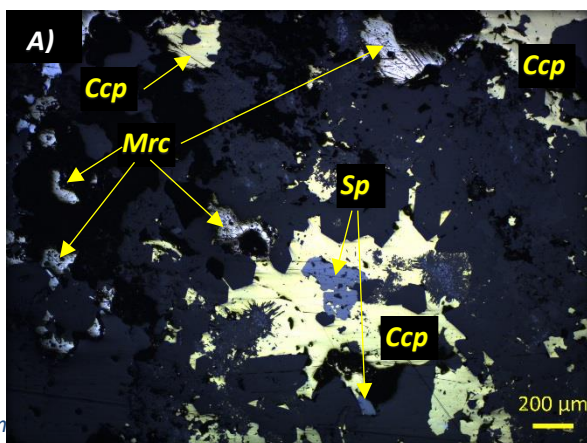
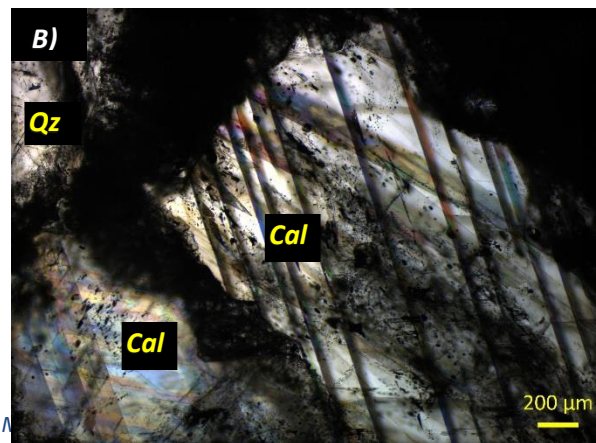


Imagen A) Fenocristales de calcita y cuarzo.



## Skarnoide

La muestra presenta un alto grado de alteración a arcillas, se presenta cuarzo en mosaico y microcristales de sulfuros como calcopirita, pirita, arsenopirita, galena, marcasita y esfalerita. Se tiene un evento de alteración prograda con apatito, sericita, illita, epidota y clorita, además de cristalización de calcita tardía. Las inclusiones fluidas se estudiaron en cristales de calcita de la fase retrógrada asociada con granate y en calcita de la fase tardía. El grado de relleno observado en las inclusiones fluidas bifásicas varía de 80%-95%, para la calcita de la fase retrograda de alta temperatura se obtuvo un rango de 190°C -230°C y salinidades de 20%-25%. La calcita tardía presenta un rango de temperatura similar a la anterior, con salinidad de 3%-5%.

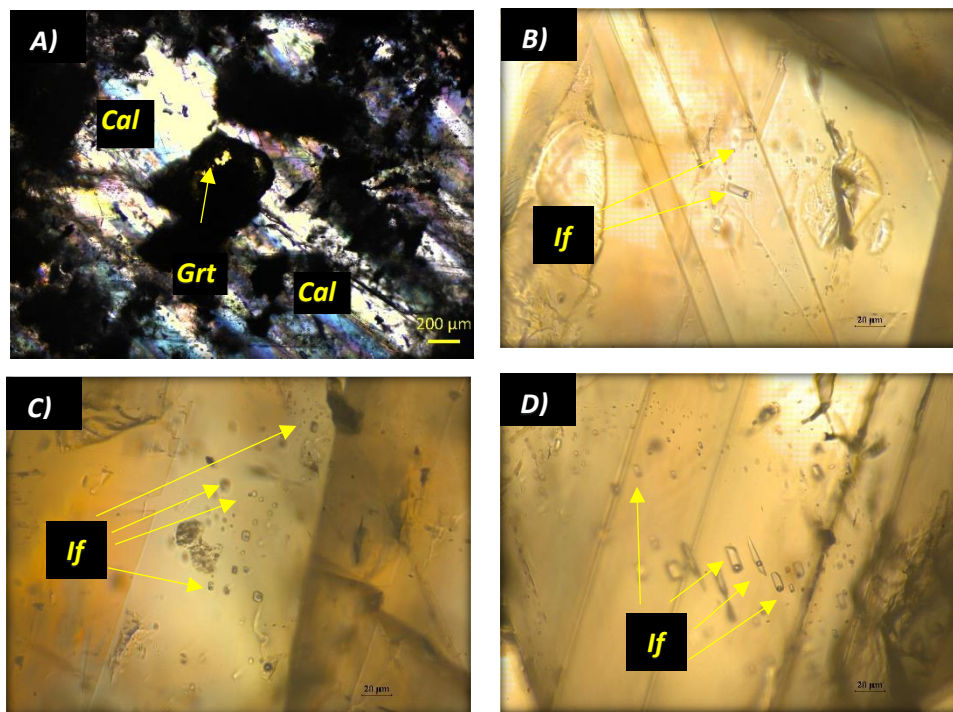
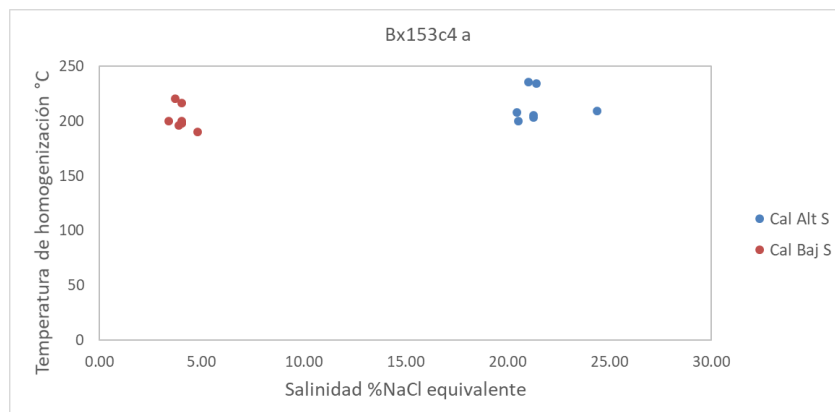


Imagen 67 Fotomicrografías lámina delgada con nicols cruzados. A) Cuarzo en mosaico y microcristal de epidota. B) Microcristal de zircón en fenocristal de calcita con sulfuros asociados. C) Vetillo de calcita relleno microcristales brechados de calcita y arcillas. D) Fenocristales de pirita siendo remplazados por marcasita y asociados con calcopirita y arsenopirita.



## Descripción de lámina delgada

5 Muestra: Bx153c4 If b Vacas: VC-31 de 467.7 m a 468 m



Imagen 68 Barreno y sección utilizada.



Imagen 69 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena (1%):

Calcopirita (5%), Marcasita (3%), Esfalerita (2%),

Ganga:

Calcita (30%), Cuarzo (5%), Granate (8%), Arsenopirita (5%), Pirita (1%), Ilmenita-Titanomagnetita (<1%)

Alteración (40%):

Apatito, Sericita, illita, Epidota, clorita

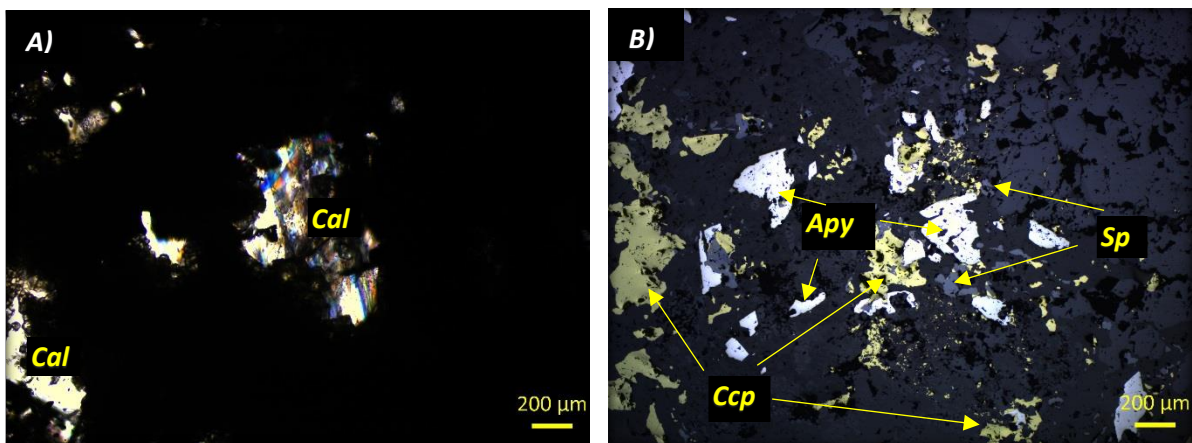


Imagen 70 Fotomicrografía luz transmitida. A) Fenocristales de calcita. B) Microcristales de arsenopirita y calcopirita dentro de cristales de esfalerita, se presenta enfermedad de la esfalerita.



## Skarnoide

La muestra presenta un alto grado de alteración a arcillas, en esta zona se presenta una abundancia de granate mayor que en la muestra a, se presentan sulfuros como calcopirita, pirita, arsenopirita, galena, marcasita y esfalerita. Se tiene un evento de alteración progradada con apatito, sericita, illita, epidota y clorita. Las inclusiones fluidas se estudiaron en cristales de calcita asociada con granate y en calcita de la fase tardía. El grado de relleno observado en las inclusiones fluidas tiene un rango de 80%-90%, para la calcita asociada con granate se obtuvo un rango de 160°C -210°C y salinidades de 12%. La calcita tardía presenta un rango de temperatura de alrededor de 160°C y salinidad menor al 1%.

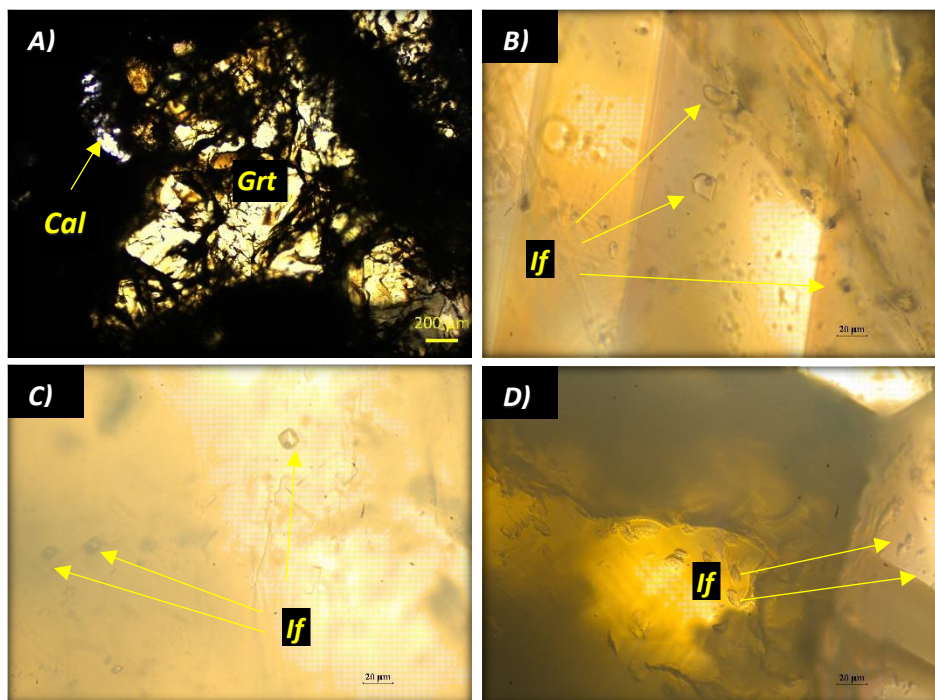
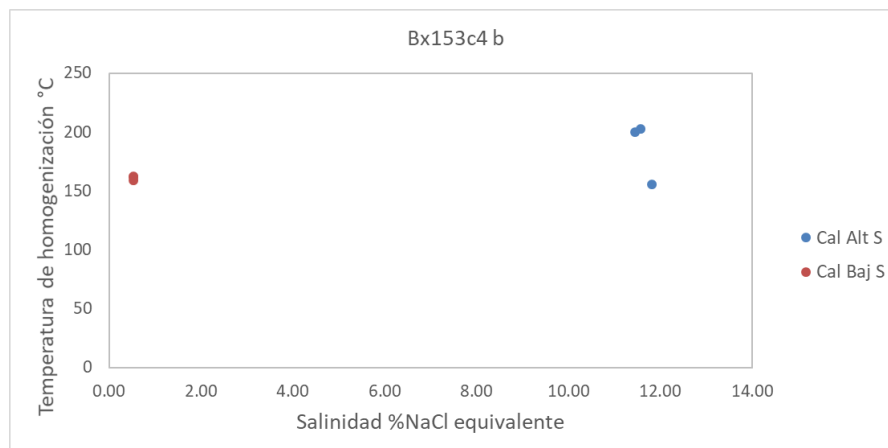


Imagen 71 Fotomicrografías lámina delgada con nicoles cruzados. A) Fenocristales de granate y microcristales de calcita. B y C) Inclusiones fluidas en fenocristal de calcita. D) Cristal de granate asociado con calcita.



## Descripción de lámina delgada

6 Muestra: BX96c5 If Vacas: VC-26 caja 96 carril 5 de 292.6 m a 292.7 m



Imagen 72 Barreno y sección utilizada.



Imagen 73 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:	Galena (8%)
Ganga:	Cuarzo (20%), Calcita (10%), Pirita (5%), Arsenopirita (3%)
Alteración (46%):	Clorita, Illita

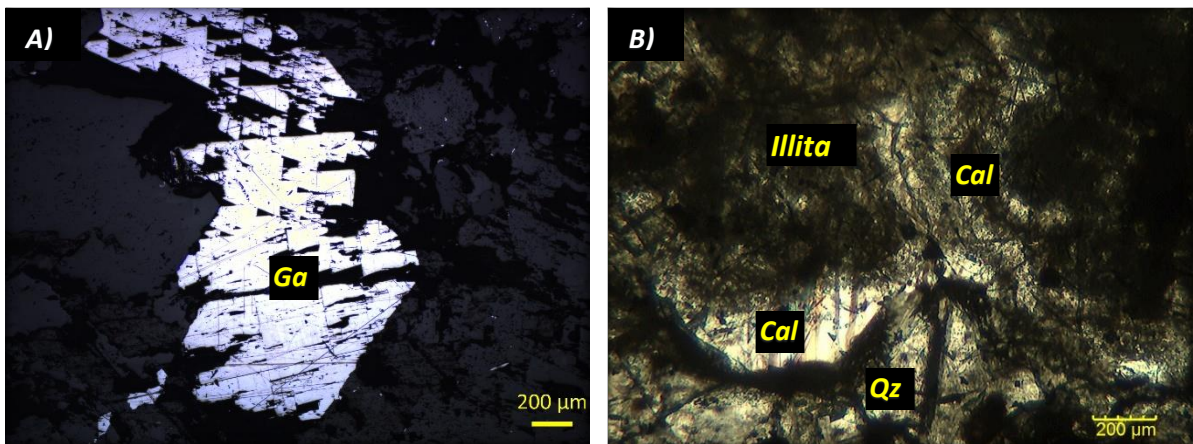


Imagen 74 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Cristales de galena. B) Cristales de calcita y cuarzo con illita.

### Mena- Zona media

Se presentan en la muestra cristales de galena, arsenopirita y pirita asociados con cristales de cuarzo, calcita, clorita e illita de la alteración propilítica en la fase retrograda, también se puede observar vetilleo de cuarzo.

Las inclusiones fluidas en esta muestra se analizaron en cristales de calcita, el grado de relleno de estas inclusiones varía de 75%-95% en las inclusiones bifásicas y con presencia de inclusiones monofásicas de fluido o vapor, el rango de temperatura de homogenización obtenido va de 160-290 y con salinidades que van desde el 1.5%-4%, las inclusiones que presentan la mayor temperatura de homogenización también son las que presentan mayor salinidad y ambas características decrecen progresivamente.

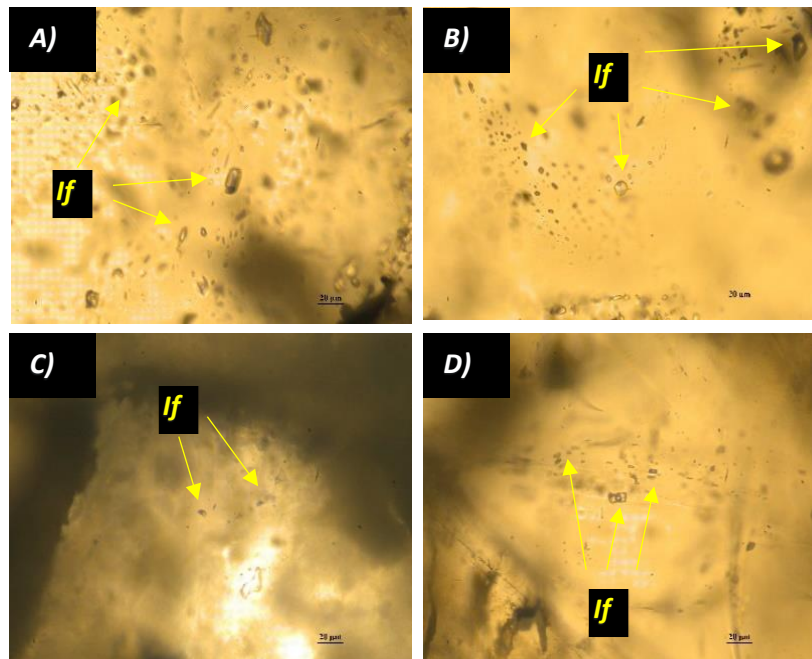
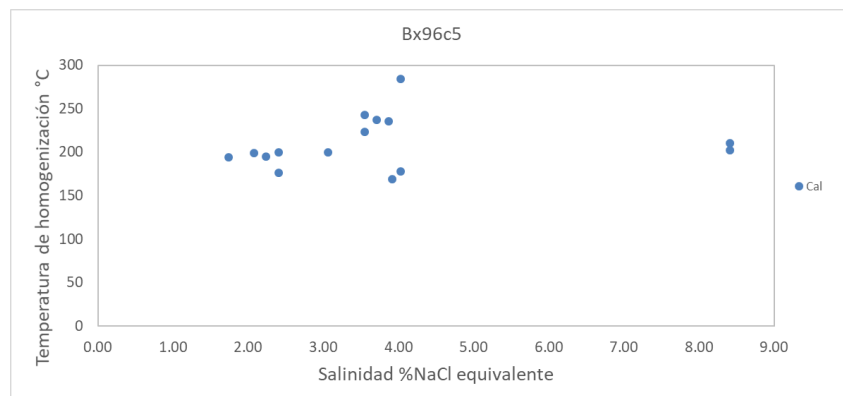


Imagen 75 Micrografías de lámina delgada. A y B) Inclusiones fluidas en cristales de calcita con distinto grado de relleno. C) Inclusiones fluidas en calcita de zona de mayor alteración. D) Inclusiones de mayor temperatura en calcita.



## Descripción de lámina delgada

7 Muestra: BX116c4 if Vacas: VC- 14 caja 116 carril 4 343.05 m a 343.16 m



Imagen 76 Barreno y sección utilizada.



Imagen 77 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena: Esfalerita (26%), Galena (21%), Calcopirita (10%)  
Ganga: Calcita (20%), Cuarzo (5%), Marcasita (5%), Arsenopirita (4%), Pirita (4%)  
Alteración (5%): Clorita, illita

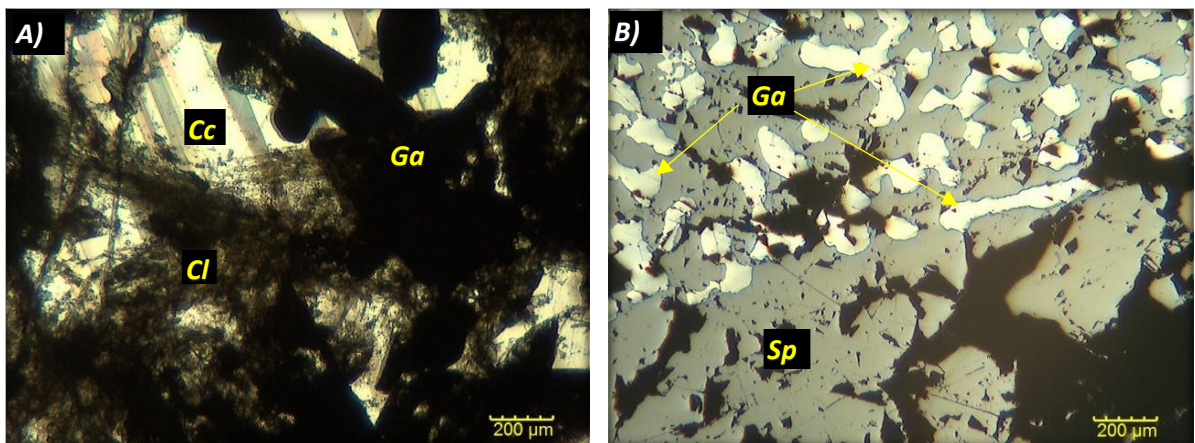


Imagen 78 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Fenocristales de calcita con clorita asociados a galena argentífera. B) Límite de evento de esfalerita asociada con galena argentífera y esfalerita sin galena.

## Mena - Zona media

Se observan dos eventos de esfalerita en la muestra, una rojiza clara rica en hierro y otra oscura asociada con galena argentífera, también se presentan sulfuros como calcopirita, marcasita, arsenopirita y pirita. Se presenta enfermedad de la esfalerita con microcristales de calcopirita dentro de la esfalerita y la mineralización se encuentra asociada con minerales de la fase retrograda, calcita, clorita e illita.

Las inclusiones fluidas fueron estudiadas en cristales de calcita y cuarzo, en la calcita el grado de relleno varía de 60% hasta el 80% mientras que en el cuarzo el rango del grado de relleno es similar oscilando entre 50% hasta 80%. La temperatura de homogenización obtenida en la calcita ronda los 200°C con salinidades que varían de 4%-24% mientras que en el cuarzo la temperatura varía de 340°C -360°C con salinidades de 15% a 23%.

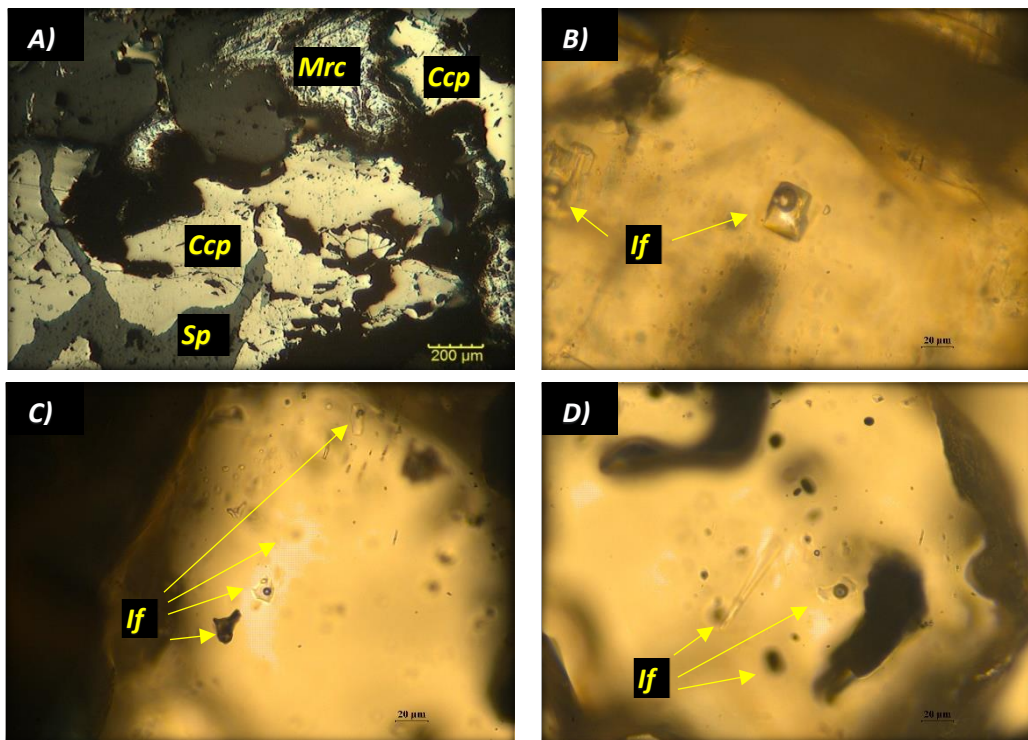
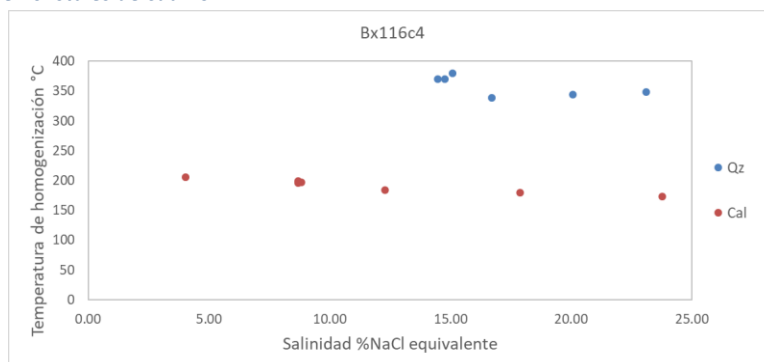


Imagen 79 Micrografías de lámina delgada. A) Asociación de esfalerita, calcopirita y marcasita. B) Inclusiones fluidas en calcita. C y D) Inclusiones fluidas en cristales de cuarzo.



## Descripción de lámina delgada

8 Muestra: BX14c5 if Vacas: ILP-VC-15-11 caja 14 carril 5 de 41.75 m a 41.85 m



Imagen 80 Barreno y sección utilizada.



Imagen 81 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Ganga:

Alteración (8%):

Esfalerita (43%), Galena 5%, Calcopirita (3%), Cuarzo (35%), Marcasita (5%), Pirrotita (1%)  
illita, Sericita

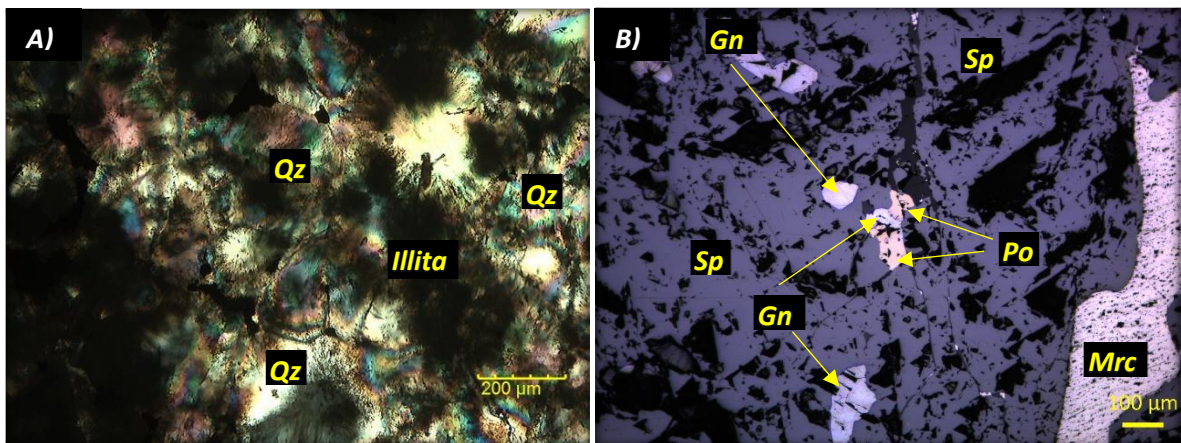


Imagen 82 Fotomicrografía Transmitida. A) Cristales de cuarzo criptocristalino inequigranular con illita. B) Asociación de marcasita, pirrotina y galena dentro de cristales de esfalerita.

## Mena – Zona profunda

En esta zona de mena polimetálica se observa la presencia de sulfuros como calcopirita, esfalerita, galena, marcasita, pirrotita y piritita.

Las inclusiones en esta muestra se estudiaron en cristales de cuarzo y calcita, en ambos casos las inclusiones fluidas se encontraban de manera muy escasa y presentaban grados de relleno de 80%-90%, los rangos de temperatura de homogenización para las inclusiones en cuarzo se presentó desde 200°C -330°C con salinidades muy variables 1%-12%. Las inclusiones en calcita presentaron un rango de temperatura de 140°C -300°C y una salinidad menor al 1%.

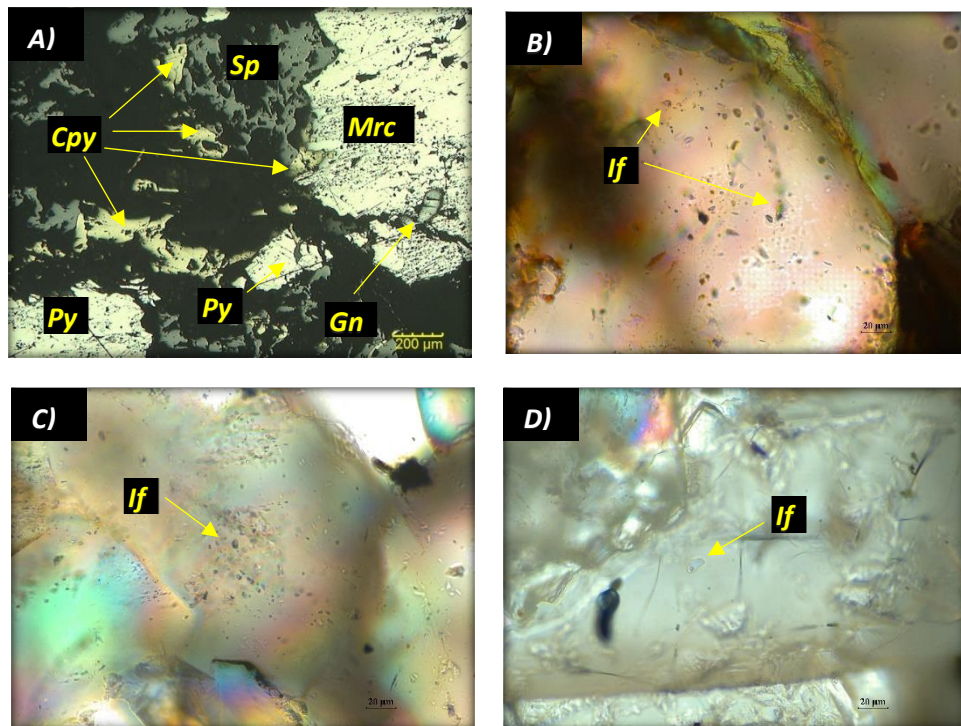
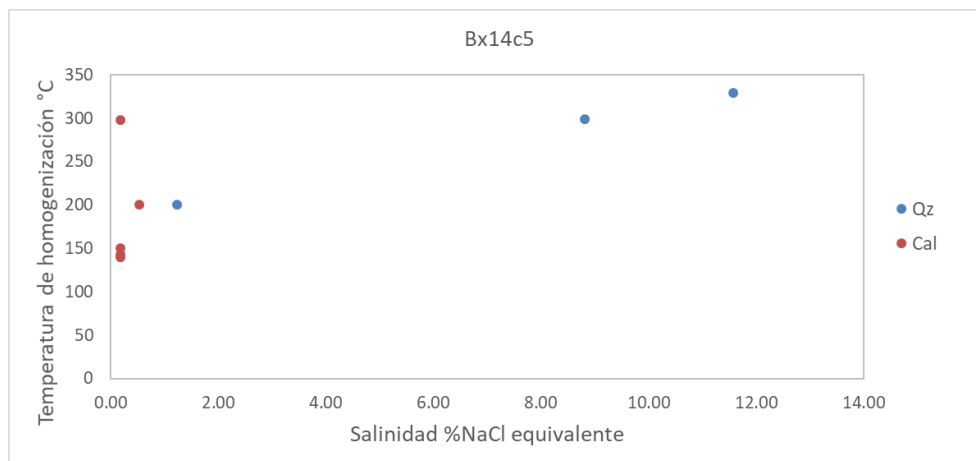


Imagen 83 Micrografías de lámina delgada. A) Asociación de marcasita, esfalerita y piritita con microcristales de galena y calcopirita. B y C) Inclusiones fluidas en cristales de cuarzo. D) Inclusiones fluidas en calcita.



## Descripción de lámina delgada

9 Muestra: BX86c3 if

Vacas: VC- 38 caja 86 carril 3 de 257.9 m a 258 m



Imagen 84 Barreno y sección utilizada.



Imagen 85 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Esfalerita (50%), Galena (10%), Calcopirita (1%)

Ganga:

Calcita (20%), Marcasita (3%)

Alteración (16%):

Clorita, Epidota

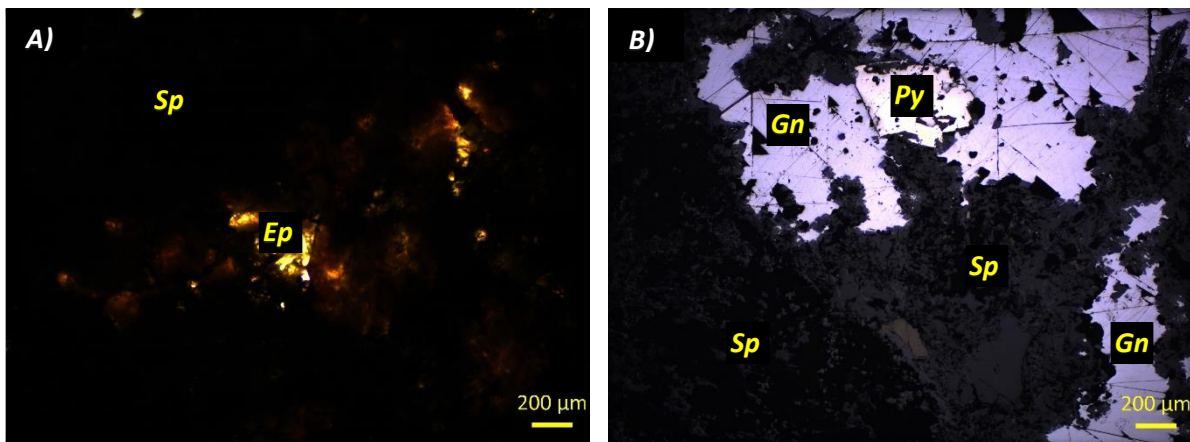


Imagen 86 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Cristales de epidota asociados con esfalerita. B) Asociación de pirita, galena y esfalerita.



## Mena

Zona de mena con cristales principalmente de esfalerita y falena con presencia de marcasita y pirita. Se la muestra presenta Epidota clarita illita y calcitas provenientes de una alteración propilítica retrograda.

Las inclusiones fluidas estudiadas en esta muestra presentan un grado de relleno de entre 70%-90%, el rango de la temperatura de homogenización presente en las inclusiones es de 160-200 con salinidades de entre 10%-20%, en esta muestra el aumento de la temperatura de homogenización está relacionado directamente con el aumento de la salinidad. En la muestra se presenta una disminución progresiva de la temperatura y la salinidad.

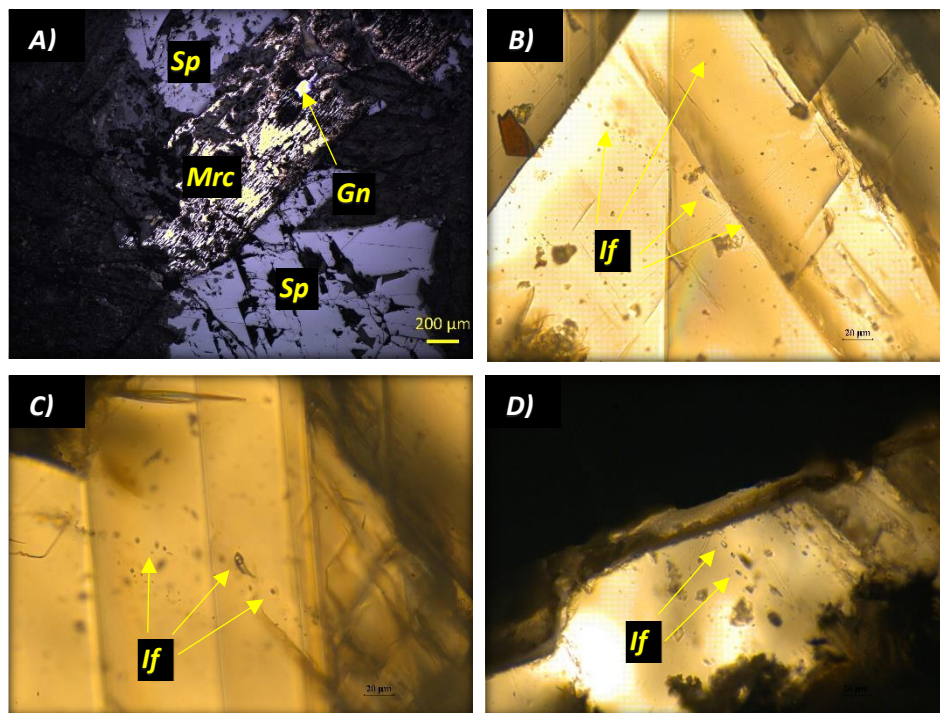
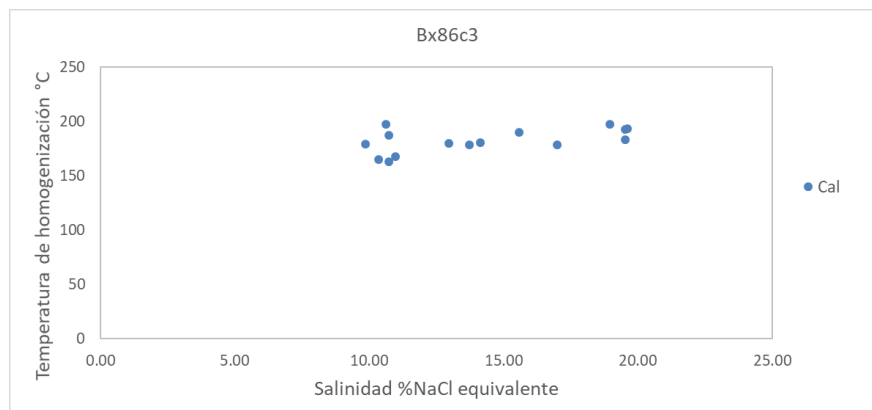


Imagen 87 Fotomicrografías de lámina delgada. A) Asociación de glena, marcasita y esfalerita. B y C) Inclusiones fluidas en calcita con baja salinidad y temperatura de homogenización. D) Inclusiones en cristal de calcita con alta salinidad y temperatura de homogenización.



## Descripción de lámina delgada

10 Muestra: BX156c2 Vacas: VC- 45 caja 156 carril 2 de 474.25 m a 474.4 m



Imagen 88 Barreno y sección utilizada.



Imagen 89 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena:

Esfalerita (70%), Galena (5%)

Ganga:

Pirita (5%), Marcasita (5%), Calcita (%)

Alteración (8%):

Clorita, Illita

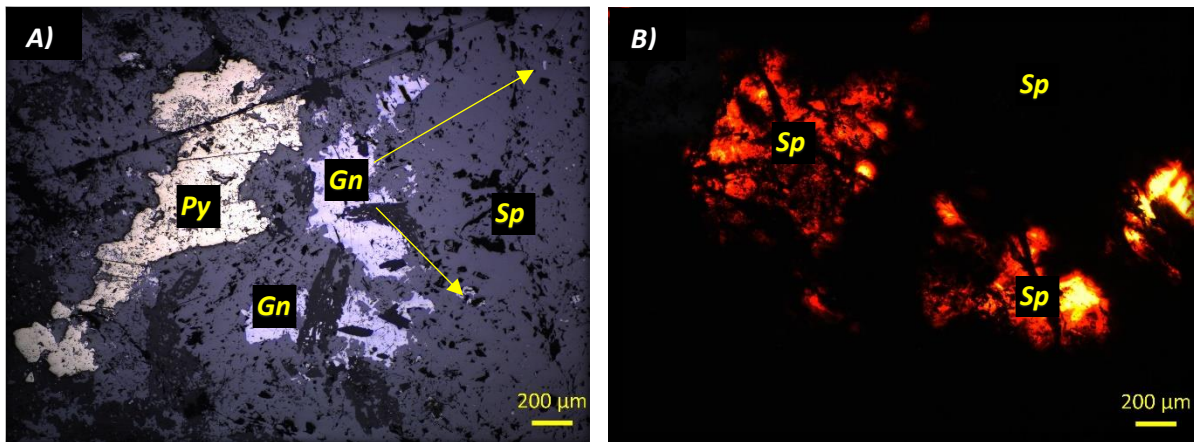


Imagen 90 Fotomicrografía de lámina delgada A) Cristales de galena y pirita y microcristales de galena dentro de esfalerita. B) Esfalerita traslucida y esfalerita opaca.

## Mena – Zona profunda

En la muestra se puede observar la cristalización de cristales de galena y pirita dentro de los cristales de esfalerita, asociados con calcita, illita y clorita como alteración propilítica de la fase retrograda del skarn. Se puede observar la cristalización de esfalerita traslucida con mayor contenido de zinc y esfalerita opaca con alto contenido de hierro. Las inclusiones fluidas en esta muestra se estudiaron solamente en los cristales de esfalerita traslucida, se obtuvo un grado de relleno que abarca desde el 70%-90% presentándose inclusiones bifásicas y monofásicas de vapor o líquido. El rango de temperatura de homogenización obtenida en estos cristales va de 160°C - 320°C, con una salinidad variable de 15%-26%, en esta muestra se observa que en un mismo cristal se tiene una variación muy marcada de la temperatura de homogenización y la salinidad, pero ambas se encuentran directamente relacionadas dado que a medida que aumenta la salinidad aumenta la temperatura de homogenización. En esta muestra se tiene una tendencia muy marcada de la disminución de la temperatura y la salinidad.

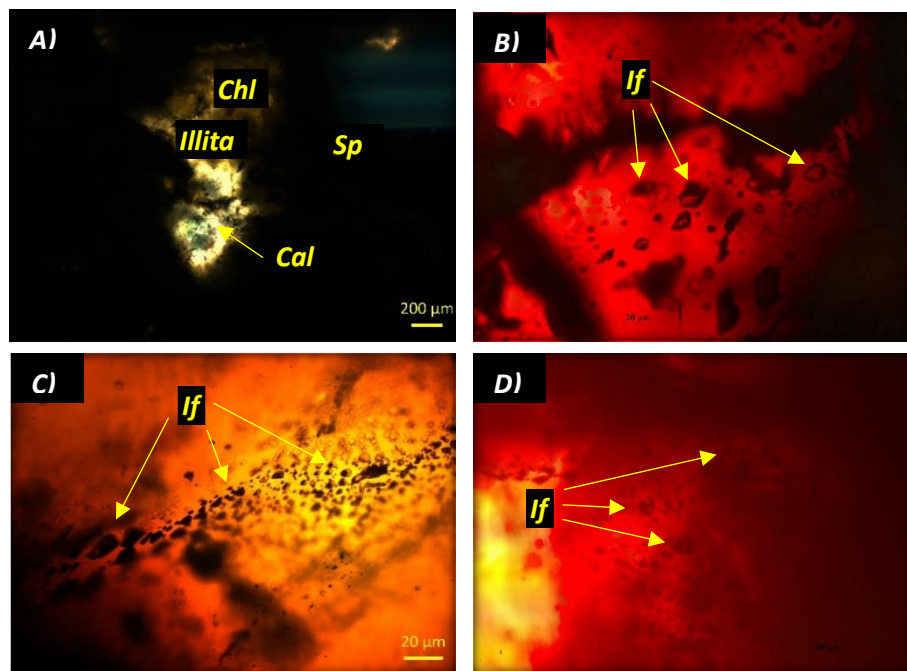
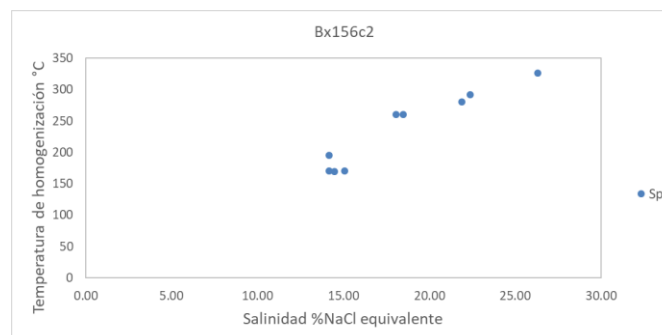


Imagen 91 Micrografías de lámina delgada. A) Asociación de calcita, clorita e illita con esfalerita. B) Inclusiones fluidas en esfalerita traslucida. C) Inclusiones fluidas monofásicas y bifásicas con grados de relleno muy variables. D) Inclusiones fluidas en esfalerita.



## Descripción de lámina delgada

11 Muestra: BX161c2 Vacas: VC- 31 caja 161 carril 2 de 492.05 m a 492.15 m



Imagen 92 Barreno y sección utilizada.



Imagen 93 Sección de corte de láminas.

### Asociación mineral:

Mena: -  
Ganga: Calcita (99%), Pirita (1%)  
Alteración: -

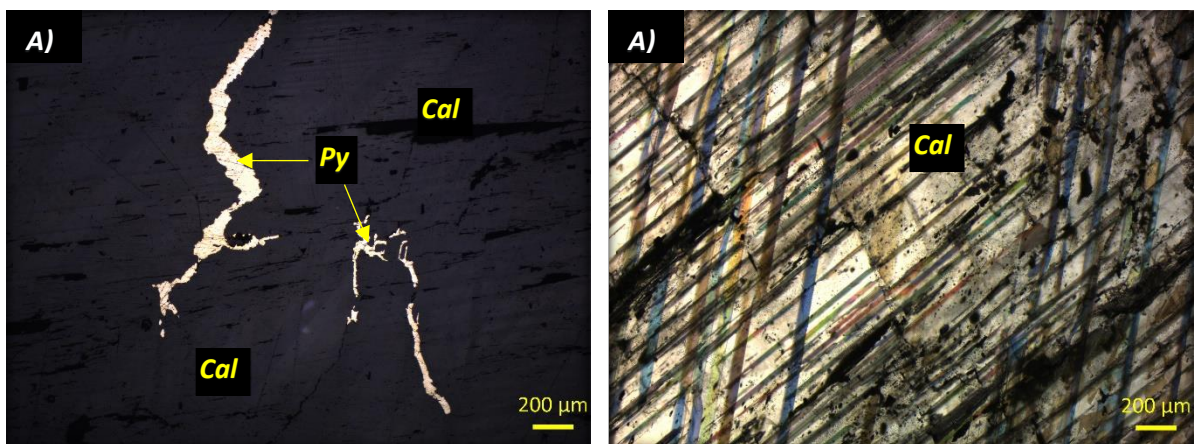


Imagen 94 Fotomicrografía de lámina delgada. A) Micro vetillas de pirita. B) Cristales de calcita.

## Mena – Zona profunda

Esta muestra está compuesta casi en su totalidad por cristales de calcita la cual presenta la cristalización de sulfuros esporádicamente, mostrando en esta muestra únicamente la presencia de vetilleo de pirita.

Las inclusiones fluidas de esta muestra se estudiaron en cristales de calcita donde se pudieron encontrar grados de relleno de 20%-70%, los resultados obtenidos evidenciaron una asociación de inclusiones fluidas con temperatura de homogenización de alrededor de 400°C -420°C y salinidades de 14%-16%. Además, se encontró un grupo de inclusiones fluidas con temperatura de homogenización de 350°C -450°C y salinidades de 2%-7%.

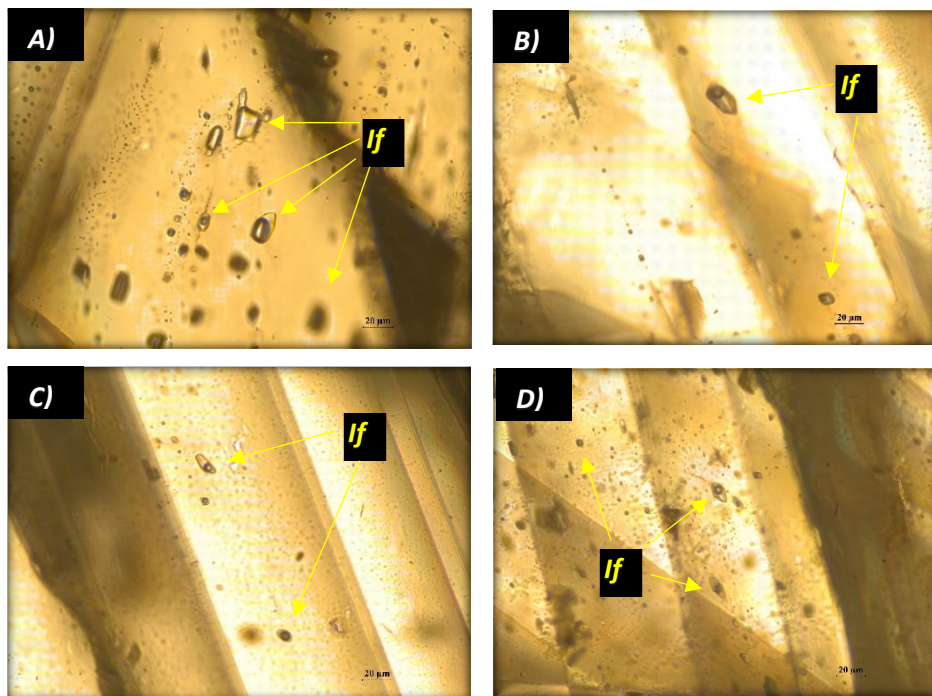
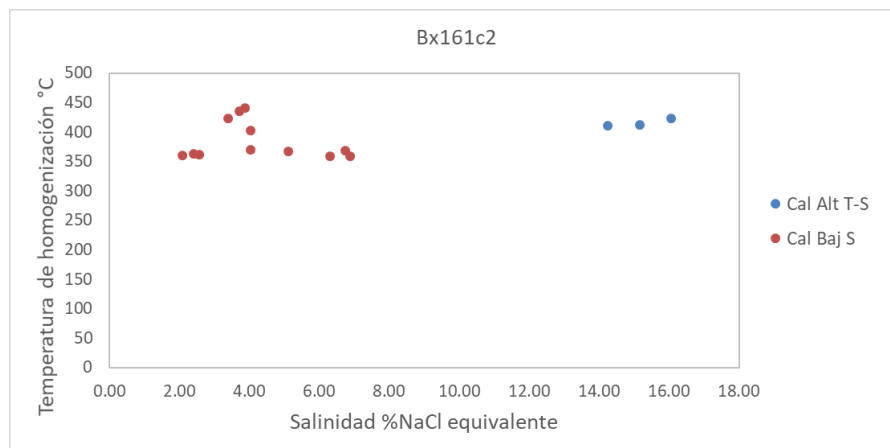


Imagen 95 Fotomicrografías de lámina delgada. A) Inclusiones en calcita con grado de relleno bajo. B, C y D) Inclusiones fluidas con grado de relleno de medio a alto.



## Anexo C

Muestra	Th (°C)	Tfh (°C)	Salinidad (Sistema NaCl + H2O)	Fases en la IF	F
Bx116c4 if VC-14 Qz	173.1	-22.1	23.76	L+V	50
Bx116c4 if VC-14 Qz	348.3	-21.1	23.11	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 Qz	343.7	-16.8	20.07	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 Qz	180.2	-14.1	17.87	L+V	60
Bx116c4 if VC-14 Qz	339.1	-12.8	16.71	L+V	70
Bx116c4 if VC-14 Qz	380.2	-11.1	15.07	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 Qz	370.2	-10.8	14.77	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 Qz	370.7	-10.5	14.46	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 cc	184.5	-8.5	12.28	L+V	70
Bx116c4 if VC-14 cc	197.3	-5.7	8.81	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 cc	199.6	-5.6	8.68	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 cc	196.4	-5.6	8.68	L+V	80
Bx116c4 if VC-14 cc	205.3	-2.4	4.03	L+V	60
Bx119C1 VC-14 Cal	222.5	-8.0	11.70	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	222.4	-7.6	11.22	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	228.1	-7.5	11.10	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	225.1	-7	10.49	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	207.4	-6.9	10.36	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	230.9	-6.3	9.60	L+V	75
Bx119C1 VC-14 Cal	200.7	-3.9	6.30	L+V	75
Bx119C1 VC-14 Cal	280.3	-3.6	5.86	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	184	-2.90	4.80	L+V	60
Bx119C1 VC-14 Cal	160	-2.9	4.80	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	174	-2.4	4.03	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Cal	173	-2.4	4.03	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Cal	179	-2.30	3.87	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	191	-2.20	3.71	L+V	70
Bx119C1 VC-14 Cal	160	-2.20	3.71	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Cal	161	-1.8	3.06	L+V	85
Bx119C1 VC-14 Cal	190	-1.70	2.90	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Cal	190	-1.5	2.57	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Qz	333.3	-21.1	23.11	L+V	85
Bx119C1 VC-14 Qz	285.3	-18.8	21.54	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Qz	260.4	-17.6	20.67	L+V	85
Bx119C1 VC-14 Qz	240.1	-17.1	20.30	L+V	85
Bx119C1 VC-14 Qz	233.7	-13.4	17.26	L+V	80
Bx119C1 VC-14 Qz	257.3	-7.6	11.22	L+V	80
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 cc	200	-0.3	0.53	L+V	90
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 cc	150	-0.1	0.18	L+V	80
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 cc	143	-0.1	0.18	L+V	80
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 cc	140	-0.1	0.18	L+V	80
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 cc	298	-0.1	0.18	L+V	80
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 qz	329.5	-7.9	11.58	L+V	90
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 qz	298.7	-5.7	8.81	L+V	90
Bx14c5 if ILP-VC-15-11 qz	200.2	-0.7	1.22	L+V	90
Bx153c4 b if VC-31	155.6	-8.1	11.81	L+V	80

*Establecimiento de guías de exploración de estructuras del skarn La Parrilla, Durango, a través del estudio geológico de los cuerpos mineralizados Quebradillas y Vacas*

Bx153c4 b if VC-31	202.8	-7.9	11.58	L+V	90
Bx153c4 b if VC-31	200.1	-7.8	11.46	L+V	80
Bx153c4 b if VC-31	161.7	-0.3	0.53	L+V	80
Bx153c4 b if VC-31	158.9	-0.3	0.53	L+V	85
Bx153c4 b if VC-31	162.2	-0.3	0.53	L+V	90
Bx153c4 if VC-31 Cal	209.4	-23.1	24.40	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	234.2	-18.6	21.40	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	205.1	-18.4	21.26	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	203.4	-18.4	21.26	L+V	85
Bx153c4 if VC-31 Cal	235.6	-18.1	21.04	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	199.8	-17.4	20.52	L+V	95
Bx153c4 if VC-31 Cal	208.1	-17.3	20.45	L+V	90
Bx153c4 if VC-31 Cal	190.4	-2.9	4.80	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	200.2	-2.4	4.03	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	198.1	-2.4	4.03	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	197.9	-2.4	4.03	L+V	80
Bx153c4 if VC-31 Cal	216.3	-2.4	4.03	L+V	95
Bx153c4 if VC-31 Cal	195.8	-2.31	3.88	L+V	90
Bx153c4 if VC-31 Cal	220.4	-2.2	3.71	L+V	90
Bx153c4 if VC-31 Cal	200.1	-2	3.39	L+V	90
Bx156c2 if VC-45 Sph	292	-20	22.38	L+V	85
Bx156c2 if VC-45 Sph	280	-19.3	21.89	L+V	80
Bx156c2 if VC-45 Sph	260	-14.8	18.47	L+V	70
Bx156c2 if VC-45 Sph	260	-14.3	18.04	L+V	90
Bx156c2 if VC-45 Sph	170.3	-11.1	15.07	L+V	90
Bx156c2 if VC-45 Sph	169.7	-10.5	14.46	L+V	70
Bx156c2 if VC-45 Sph	195	-10.2	14.15	L+V	80
Bx156c2 if VC-45 Sph	326.4	-26.2	26.31	L+V	80
Bx156c2 if VC-45 Sph	170	-10.2	14.15	L+V	90
Bx161c2 IF VC-31 Cal	423.2	-12.1	16.05	L+V	50
Bx161c2 IF VC-31 Cal	412.6	-11.2	15.17	L+V	30
Bx161c2 IF VC-31 Cal	411.1	-10.3	14.25	L+V	20
Bx161c2 IF VC-31 Cal	358.6	-4.3	6.88	L+V	30
Bx161c2 IF VC-31 Cal	368.3	-4.2	6.74	L+V	20
Bx161c2 IF VC-31 Cal	359.2	-3.9	6.30	L+V	60
Bx161c2 IF VC-31 Cal	367.1	-3.1	5.11	L+V	30
Bx161c2 IF VC-31 Cal	402.1	-2.4	4.03	L+V	30
Bx161c2 IF VC-31 Cal	369.4	-2.4	4.03	L+V	60
Bx161c2 IF VC-31 Cal	440.2	-2.3	3.87	L+V	80
Bx161c2 IF VC-31 Cal	435.2	-2.2	3.71	L+V	50
Bx161c2 IF VC-31 Cal	423.2	-2	3.39	L+V	70
Bx161c2 IF VC-31 Cal	360.8	-1.5	2.57	L+V	60
Bx161c2 IF VC-31 Cal	363.1	-1.4	2.41	L+V	60
Bx161c2 IF VC-31 Cal	360.4	-1.2	2.07	L+V	60
Bx86c3 VC-38 Cal	193.4	-16.2	19.60	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	193.1	-16.1	19.53	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	183.4	-16.1	19.53	L+V	70
Bx86c3 VC-38 Cal	197.4	-15.4	18.96	L+V	85
Bx86c3 VC-38 Cal	178.4	-13.1	16.99	L+V	70

Bx86c3 VC-38 Cal	190.1	-11.6	15.57	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	180.4	-10.2	14.15	L+V	90
Bx86c3 VC-38 Cal	178.5	-9.8	13.72	L+V	85
Bx86c3 VC-38 Cal	179.9	-9.1	12.96	L+V	85
Bx86c3 VC-38 Cal	168.1	-7.4	10.98	L+V	70
Bx86c3 VC-38 Cal	187.4	-7.2	10.73	L+V	90
Bx86c3 VC-38 Cal	163.2	-7.2	10.73	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	197.4	-7.1	10.61	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	165.1	-6.9	10.36	L+V	80
Bx86c3 VC-38 Cal	179.6	-6.5	9.86	L+V	85
Bx96c5 VC-26 Cal	210.2	-5.4	8.41	L+V	75
Bx96c5 VC-26 Cal	202.2	-5.4	8.41	L+V	90
Bx96c5 VC-26 Cal	284.3	-2.4	4.03	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	177.9	-2.4	4.03	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	169.2	-2.33	3.91	L+V	75
Bx96c5 VC-26 Cal	235.1	-2.3	3.87	L+V	90
Bx96c5 VC-26 Cal	237.1	-2.2	3.71	L+V	95
Bx96c5 VC-26 Cal	223.7	-2.1	3.55	L+V	90
Bx96c5 VC-26 Cal	242.4	-2.1	3.55	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	200.1	-1.8	3.06	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	199.4	-1.4	2.41	L+V	90
Bx96c5 VC-26 Cal	175.9	-1.4	2.41	L+V	95
Bx96c5 VC-26 Cal	195.3	-1.3	2.24	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	198.7	-1.2	2.07	L+V	80
Bx96c5 VC-26 Cal	194.1	-1	1.74	L+V	80

<b>Muestra</b>	<b>Th (°C)</b>	<b>Tfh (°C)</b>	<b>Salinidad (Sistema NaCl + H2O)</b>	<b>Fases en la IF</b>	<b>F</b>
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	265	-15.8	19.29	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	226	-14.2	17.96	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	193	-13.0	16.89	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	214	-13.0	16.89	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	268	-16.1	19.53	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	227.5	-11.7	15.67	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	210.4	-12.3	16.24	L+V	85
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	229.7	-12.1	16.05	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	218.2	-11.2	15.17	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	217.3	-10.9	14.87	L+V	85
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	206.1	-10.9	14.87	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	307.8	-16.3	19.68	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	287	-11.3	15.27	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	282	-10.9	14.87	L+V	70
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	285	-12.1	16.05	L+V	75
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	195	-7.2	10.73	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	234.2	-22.8	24.21	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	236.4	-22.4	23.95	L+V	80
Bx32C3 b cc ILPQ-16-04	294.4	-12.2	16.15	L+V	80
Bx32C3 b ep ILPQ-16-04	270.1	-12.2	16.15	L+V	80
Bx32C3 b ep ILPQ-16-04	275.3	-12.2	16.15	L+V	80



Bx32C3 b ep ILPQ-16-04	294.3	-12.4	16.34	L+V	80
Bx32C3 b qz ILPQ-16-05	354.4	-20.8	22.91	L+V	85
Bx32C3 b qz ILPQ-16-06	430	-21.4	23.31	L+V	90
Bx32C3 b qz ILPQ-16-07	460	-22.1	23.76	L+V	90
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	193.2	-18.1	21.04	L+V	80
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	128.3	-3.2	5.26	L+V	70
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	134.3	-3.2	5.26	L+V	80
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	127.5	-3.1	5.11	L+V	70
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	100	-1.2	2.07	L+V	80
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	120.2	-4.1	6.59	L+V	90
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	119.5	-2.8	4.65	L+V	70
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	124.1	-2.2	3.71	L+V	70
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	129.2	-2.9	4.80	L+V	90
BX29C5 IF qz LPQ-16-04	121.1	-3.4	5.56	L+V	90
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	121.3	-1.4	2.41	L+V	80
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	125.2	-1.3	2.24	L+V	85
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	128.8	-0.9	1.57	L+V	70
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	127.2	-1.5	2.57	L+V	70
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	123.3	-1.1	1.91	L+V	60
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	129.7	-3.1	5.11	L+V	70
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	118.1	-1.4	2.41	L+V	70
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	121.2	-1.4	2.41	L+V	90
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	119.2	-1.2	2.07	L+V	80
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	120.4	-1.3	2.24	L+V	60
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	118.3	-1.2	2.07	L+V	70
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	115.9	-1.0	1.74	L+V	80
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	121.2	-1.6	2.74	L+V	80
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	114.3	-1.0	1.74	L+V	80
BX29C5 IF cc LPQ-16-04	118.8	-1.2	2.07	L+V	70

## Anexo D

<b>Muestra</b>	<b>Punto</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Total)</b>
<i>Bx153C4</i>	<i>Centro1</i>	34.950	1.800	30.430	0.000	0.000	0.960	31.850
<i>Bx153C4</i>	<i>Centro2</i>	34.940	1.830	30.670	0.000	0.000	0.000	32.570
	<i>Primer</i>							
<i>Bx153C4</i>	<i>banda</i>	35.490	6.470	32.490	0.000	0.000	0.000	25.550
<i>Bx153C4</i>	<i>Banda</i>	33.790	6.750	32.700	0.000	0.000	0.000	26.760
<i>Bx153C4</i>	<i>Bamda</i>	33.210	2.020	32.500	0.430	0.000	0.000	31.840
<i>Bx153C4</i>	<i>Banda</i>	31.100	2.460	30.510	0.000	0.065	1.120	33.970
<i>Bx153C4</i>	<i>Banda</i>	31.910	6.750	36.300	0.000	0.000	0.000	24.630
<i>Bx153C4</i>	<i>Banda</i>	32.340	7.530	35.590	0.000	0.000	0.000	24.540
	<b>Max.</b>	35.490	7.530	36.300	0.430	0.065	1.120	33.970
	<b>Min.</b>	31.100	1.800	30.430	0.000	0.000	0.000	24.540
	<b>Aver.</b>	33.466	4.451	32.649	0.054	0.008	0.260	28.964
	<b>no. data</b>	-	-	-	-	-	-	-

<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MgO</b>	<b>Total</b>
29.814	1.832	0.000	99.79
29.808	2.485	0.000	99.73
24.649	0.811	0.000	99.91
28.417	-1.491	0.000	100.17
36.199	-3.922	0.000	100.44
38.634	-4.197	0.180	99.87
	-		
36.347	10.543	0.410	101.17
32.238	-6.927	0.000	100.77
38.634	2.485	0.410	
	-		
24.649	10.543	0.000	
32.013	-2.744	0.074	
-	-	-	

**Peso Molecular**

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MgO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99
60.08	101.96	79.87	56.08	61.98	94.20	70.94	159.69	71.84	40.30	151.99

**Moles proporcionales**

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(total)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MgO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
0.582	0.018	0.000	0.543	0.000	0.000	0.014	0.199	0.187	0.026	0.000	0.000
0.582	0.018	0.000	0.547	0.000	0.000	0.000	0.204	0.187	0.035	0.000	0.000
0.591	0.063	0.000	0.579	0.000	0.000	0.000	0.160	0.154	0.011	0.000	0.000
0.562	0.066	0.000	0.583	0.000	0.000	0.000	0.168	0.178	-	0.000	0.000
0.553	0.020	0.000	0.580	0.007	0.000	0.000	0.199	0.227	0.055	0.000	0.000
0.518	0.024	0.000	0.544	0.000	0.001	0.016	0.213	0.242	0.058	0.004	0.000
0.531	0.066	0.000	0.647	0.000	0.000	0.000	0.154	0.228	0.147	0.010	0.000
0.538	0.074	0.000	0.635	0.000	0.000	0.000	0.154	0.202	0.096	0.000	0.000

Átomos proporcionales

Si	Al	Ti	Ca	Na	K	Mn	Fe <sub>(total)</sub>	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mg	Cr	O prop	Σ cationes
0.582	0.035	0.000	0.543	0.000	0.000	0.014	0.399	0.373	0.026	0.000	0.000	2.971	1.572
0.582	0.036	0.000	0.547	0.000	0.000	0.000	0.408	0.373	0.035	0.000	0.000	2.972	1.572
0.591	0.127	0.000	0.579	0.000	0.000	0.000	0.320	0.309	0.011	0.000	0.000	3.079	1.617
0.562	0.132	0.000	0.583	0.000	0.000	0.000	0.335	0.356	0.021	0.000	0.000	3.152	1.613
0.553	0.040	0.000	0.580	0.014	0.000	0.000	0.399	0.453	0.055	0.000	0.000	3.116	1.585
0.518	0.048	0.000	0.544	0.000	0.001	0.016	0.425	0.484	0.058	0.004	0.000	3.138	1.557
0.531	0.132	0.000	0.647	0.000	0.000	0.000	0.308	0.455	0.147	0.010	0.000	3.336	1.629
0.538	0.148	0.000	0.635	0.000	0.000	0.000	0.307	0.404	0.096	0.000	0.000	3.269	1.628







Átomos normalizados a 8 cationes

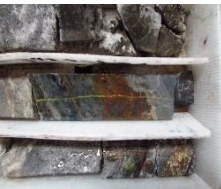




Si	Al	Ti	Ca	Na	K	Mn	Fe <sub>(total)</sub>	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mg	Cr	Σ cationes	O
2.96	0.18	0.00	2.76	0.00	0.00	0.07	2.03	1.9	0.13	0.00	0.00	8.00	12
2.96	0.18	0.00	2.78	0.00	0.00	0.00	2.08	1.9	0.18	0.00	0.00	8.00	12
2.92	0.63	0.00	2.87	0.00	0.00	0.00	1.58	1.527	0.06	0.00	0.00	8.00	12
2.79	0.66	0.00	2.89	0.00	0.00	0.00	1.66	1.765	-0.10	0.00	0.00	8.00	12
2.79	0.20	0.00	2.93	0.07	0.00	0.00	2.01	2.289	-0.28	0.00	0.00	8.00	12
2.66	0.25	0.00	2.80	0.00	0.01	0.08	2.19	2.486	-0.30	0.02	0.00	8.00	12
2.61	0.65	0.00	3.18	0.00	0.00	0.00	1.51	2.235	-0.72	0.05	0.00	8.00	12
2.64	0.73	0.00	3.12	0.00	0.00	0.00	1.51	1.984	-0.47	0.00	0.00	8.00	12

Cat. 3+	Cat. 2+
2.1	3.0
2.1	3.0
2.2	2.9
2.4	2.8
2.5	2.7
2.7	2.6
2.9	2.5
2.7	2.6









%		
%Pyralspita	Andradita	%Grosularia
6.71	91.36	8.64
5.95	91.23	8.77
1.91	70.87	29.13
0	72.89	27.11
0	91.96	8.04
0	90.93	9.07
0	77.47	22.53
0	73.22	26.78

## Anexo E



Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
VC-14	114	BX114C1	335.4	335.6		Todo tramo de carril superior
VC-14	115	BX115C1	338.45	338.55		Pedazo carril inferior, parte blanca de carril intermedio y control litológico carril superior
VC-14	115	BX115C2	338.95	339.09		Carril inferior e intermedio, skarn, retrograda, mena e IF.
VC-14	115	BX115C3	339.25	339.3		Carril de en medio para Mena e IF
VC-14	115	BX115C5	340.3	340.4		Carril inferior skarn y retrogrado, y carril de en medio mena y quizás IF en esfalerita café rojiza
VC-14	115	BX115C5	340.55	340.7		-








<b>VC-14</b>	116	BX116C1	341.1	341.25		Alteración
<b>VC-14</b>	116	BX116C3	342.58	342.62		Carril de en medio, skarn, retrogrado, mena y supergénico
<b>VC-14</b>	116	BX116C4	343.05	343.16		Supergénico carril superior
<b>VC-14</b>	117	BX117C3	345.44	345.58		Mineralización e IF
<b>VC-14</b>	117	BX117C5	346.12	346.32		Mineralización e IF
<b>VC-14</b>	118	BX118C1	346.75	346.9		Mineralización
<b>VC-14</b>	118	BX118C2	347.55	347.65		Alteraciones







<b>VC-14</b>	119	BX119C1	349.93	350.2		Alteraciones
<b>VC-14</b>	119	BX119C4	351.7	351.8		Alteraciones, mena e IF
<b>VC-14</b>	121	BX121C2	346.75	346.9		Alteraciones y posible IF
<b>VC-14</b>	121	BX121C4	357.25	357.35		Alteraciones
<b>VC-14</b>	121	BX121C5	358	358.2		Intrusivo alterado
<b>VC-14</b>	121	BX121C5	358.2	358.3		Carril en medio y superior para alteraciones

Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
ILP-VC-15-11	14	BX14C3	40.40	40.45		Alteraciones y litología
ILP-VC-15-11	14	BX14C5	41.75	41.85		Skarn y retrogrado IF
ILP-VC-15-11	15	BX15C3	43.55	43.68		Supergénico
ILP-VC-15-11	16	BX16C3	46.5	46.65		IF
ILP-VC-15-11	17	BX17C5	50.3	50.45		Alteraciones
ILP-VC-15-11	18	BX18C5	53.2	53.4		Mineralización e IF
ILP-VC-15-11	19	BX19C3	55.25	55.38		Retrogrado
ILP-VC-15-11	22	BX22C5	64.7	64.95		Skarn y retrogrado
ILP-VC-15-11	24	BX24C2	68.83	69		Skarn y retrogrado



ILP-VC-15-11	25	BX25C2	71.95	72.1		Skarn, retrogrado y mineralización, posible IF
ILP-VC-15-11	28	BX28C3	81.7	81.8		Roca caja
Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Fotos	Notas
VC-26	92	BX92C1	277.8	277.9		Intrusivo
VC-26	92	BX92C2	278.45	278.55		Intrusivo alterado
VC-26	92	BX92C3	278.9	279.01		Alteraciones
VC-26	92	BX92C5	279.38	280.46		litología
VC-26	96	BX96C4	292.45	292.52		Skarn y retrogrado


<b>VC-26</b>	96	BX96C4	292.52	292.6		Retrogrado con mena, hay Qz, Cc o Sph para IF
<b>VC-26</b>	96	BX96C5	292.6	292.7		Mena IF
<b>VC-26</b>	97	BX97C1	292.9	293.03		IF
<b>VC-26</b>	99	BX99C1	299.5	299.53		Alteración proximal
<b>VC-26</b>	99	BX99C2	299.83	299.93		Litología Roca caja
<b>VC-26</b>	100	BX100C2	302.99	303.1		Litología Roca caja
<b>VC-26</b>	100	BX100C5	304.69	304.75		Litología Roca Caja






Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
VC-31	153	BX153C3	468.6	468.8		Mineralogía
VC-31	153	BX153C4	469.3	469.6		Tercer carril de arriba hacia abajo Mena e IF, segundo carril Alteraciones
VC-31	156	BX156C1	476.6	476.8		Carril de en medio Alteraciones y mineralización, Tiene esfalerita el intervalo negro
VC-31	156	BX156C5	478.45	478.6		Roca caja
VC-31	161	BX161C2	492.05	492.15		IF
VC-31	161	BX161C3	492.35	492.52		Todo carril de en medio donde está la A para IF, de la vetilla blanca de arriba es Cc o Qz, trae un pedacito si se puede

<b>VC-31</b>	161	BX161C5	493.97	494.05		Mineralización e IF, mitad donde venga más de lo blanco que presumo es Cc
--------------	-----	---------	--------	--------	--	---

<b>VC-31</b>	161	BX161C4	493.4	493.55		Toda mitad AB y BB
--------------	-----	---------	-------	--------	--	--------------------






Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
<b>VC-37</b>	66	BX66C3	198.7	198.85		Supergénico
<b>VC-38</b>	83	BX83C1	248	248.1		Intrusivo alterado
<b>VC-38</b>	84	BX84C2	251.65	251.75		Litología
<b>VC-38</b>	85	BX85C4	255.65	255.85		Skarn y retrogrado
<b>VC-38</b>	86	BX86C3	257.9	258		Mena y supergénico

<b>VC-38</b>	86	BX86C4	258.4	258.55		Skarn y retrogrado
<b>VC-38</b>	87	BX87C1	259.7	259.8		Retrogrado y posible IF

Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
<b>VC-45</b>	147	BX147C1	446.55	446.65		Intrusivo
<b>VC-45</b>	147	BX147C3	447.8	447.9		Intrusivo
<b>VC-45</b>	150	BX150C3	456.9	457		Alteración proximal
<b>VC-45</b>	156	BX156C1	473.65	473.85		Mena e IF, si puedes de la mitad de abajo sólo el pedacito de cristal claro
<b>VC-45</b>	156	BX156C2	474.25	474.4		alteración

VC-45	159	BX159C1	482.1	482.25		Litología
-------	-----	---------	-------	--------	--	-----------

### Cuerpo Quebradillas

Barreno	Caja	Clave	De:	A:	Foto	Notas
ILPQ-16-04	06	BX06C4	16.54	16.7		Intrusivo alterado
ILPQ-16-04	22	BX22C2	63.6	63.82		Intrusivo alterado
ILPQ-16-04	22	BX22C3	64.2	64.3		Alteración
ILPQ-16-04	22	BX22C5	65.66	65.75		Intrusivo alterado
ILPQ-16-04	25	BX25C3	74	74.3		Intrusivo alterado

ILPQ-16-04	26	BX26C4	77.57	77.75		Mena
ILPQ-16-04	28	BX28C3	83.2	83.3		Mena
ILPQ-16-04	28	BX28C4	83.85	83.95		Mena
ILPQ-16-04	29	BX29C5	89.1	89.25		If
ILPQ-16-04	32	BX32C3	96.6	96.85		Intrusivo alterado
ILPQ-16-04	33	BX33C3	99.3	99.45		Intrusivo alterado