



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**MINERALIZACIÓN E INCLUSIONES FLUIDAS DE LA VETA
SAN CARLOS (FRESNILLO, ZACATECAS)**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

LUIS FELIPE MITRE DEL MORAL

TUTOR:

Dr. Antoni Camprubí Cano (Instituto de Geología, UNAM)

COMITÉ TUTOR:

Dr. Antoni Camprubí Cano (Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Eduardo González Partida (Centro de Geociencias, UNAM)

Dr. Aldo Ramos Rosique (Facultad de Ingeniería, UNAM)

Dr. Vanessa Colás Ginés (Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Lisard Torro I Abat (Pontificia Universidad Católica del Perú)

Ciudad Universitaria, CD. MX, Febrero 2023.



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.

DECLARATORIA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría.

Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparece debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales.

Luis Felipe Mitre del Moral

Febrero 2023

RESUMEN

Al igual que la mayoría de las vetas epitermales en el distrito minero de Fresnillo, la veta San Carlos posee una gran extensión y contenido en minerales económicos, principalmente en sulfuros y sulfosales de plata. La estructura actual de la veta habría fungido en un inicio como el conducto para el flujo de los fluidos mineralizantes a partir del sistema hidrotermal a profundidad. De manera similar, el continuo fracturamiento y apertura de la veta permitieron que se formaran las tres etapas de mineralización.

La veta puede dividirse, de manera similar a la veta Santo Niño, en tres zonas estructurales principales. En cuanto a la mineralización, ésta se presenta distribuida a lo largo de las tres etapas y se puede observar de manera diseminada o en bandas acompañando a los bandeamientos o brechamientos de cuarzo y calcedonia que conforman la ganga de éste yacimiento. En general, la etapa I consiste en su mayoría de bandeamientos coliformes y crustiformes, mientras que las etapas posteriores (II y III) se encuentran asociadas a brechamientos y escasos bandeamientos.

Los minerales de mena presentes en la veta San Carlos son sulfuros de metales base y sulfosales de plata. Los minerales que se han podido identificar en la veta son pirita, esfalerita, galena, calcopirita, arsenopirita, tetraedrita, pirargirita, argentita. También se observa a presencia de óxidos como la hematita. El mineral de ganga principal y más abundante es el cuarzo y en segundo término la calcedonia. El depósito mineral se divide en tres fases principales: 1) pirita, pirita-arsenopirita (SN200 principalmente), 2) metales base, 3) sulfosales y sulfuros de plata. La presencia de hematita se podría asociar a una última fase supergénica.

El análisis de los fluidos atrapados en las inclusiones contenidas en los cristales de cuarzo arroja valores con un rango entre los 140° y 270°C y presentan presiones calculadas entre los 10 y 50 bars. Los valores obtenidos para los isótopos de azufre muestran una similitud con composiciones de rocas basálticas, graníticas y en menor medida con rocas sedimentarias.

Finalmente, se infiere que la precipitación de los bandeamientos y la mineralización que contienen habrían estado relacionadas a procesos de ebullición y muy posiblemente a la mezcla de agua meteórica de circulación profunda.

ABSTRACT

Like most of the epithermal veins in the Fresnillo mining district, the San Carlos vein is extensive and contains cheap minerals, mainly silver sulfides and sulfosalts. The current structure of the vein would have served initially as the conduit for the flow of mineralizing fluids from the hydrothermal system at depth. Similarly, continued fracturing and opening of the vein allowed all three stages of mineralization to form.

The vein can be divided, similar to the Santo Niño vein, into three main structural zones. As for mineralization, it is distributed throughout the three stages and can be observed in a scattered manner or in bands accompanying the quartz and chalcedony bands or breccias that make up the gangue of this deposit. In general, stage I consists mostly of coliform and crustiform banding, while later stages (II and III) are associated with breccias and few banding.

The ore minerals present in the San Carlos vein are base metal sulfides and silver sulfosalts. The minerals that have been identified in the vein are pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite, tetrahedrite, pyrargyrite, and argentite. The presence of oxides such as hematite is also observed. The main and most abundant gangue mineral is quartz and secondly chalcedony. The mineral deposit is divided into three main phases: 1) pyrite, pyrite-arsenopyrite (SN200 mainly), 2) base metals, 3) sulfosalts and silver sulfides. The presence of hematite could be associated with a last supergenic phase.

The analysis of the fluids trapped in the inclusions contained in the quartz crystals yields values with a range between 140 ° and 270 ° C and presents calculated pressures between 10 and 50 bars. The values obtained for sulfur isotopes show a similarity with compositions of basaltic and granitic rocks and to a lesser extent with sedimentary rocks.

Finally, it is inferred that the precipitation of the bands and the mineralization that they contain would have been related to boiling processes and very possibly to the mixture of meteoric water with deep circulation.

Agradecimientos

Agradezco al Posgrado de Ciencias de la Tierra y al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Gracias al proyecto CONACYT 155662 y PAPIIT 100116 a cargo del Dr. Antoni Camprubí, el cuál financió los análisis de microsonda electrónica, isótopos estables, láminas delgadas e inclusiones fluidas.

Agradezco a mi tutor y profesor, el Dr. Antoni Camprubí, por su gran apoyo, tiempo, paciencia, enseñanza y participación en cada etapa del presente trabajo.

Agradezco al jurado evaluador integrado por el Dr. Eduardo González Partida, Dr. Aldo Ramos Rosique, Dra. Vanessa Colás Ginés y Dr. Lisard Torró i Abat.

Agradezco al Dr. Augusto Rodríguez del Instituto de Geofísica por su apoyo y sugerencias durante los análisis de SEM y SWIR. A Marcela Erasti por el uso del laboratorio de SWIR del Instituto de Geofísica y a la Dra. Rosa María Prol Ledesma del Instituto de Geofísica por su apoyo y préstamo del tanque de nitrógeno utilizado para el análisis de inclusiones fluidas.

A la M. en C. Edith Fuentes Guzmán, laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del Departamento de Procesos Litosféricos del Instituto de Geología por el uso de sus instalaciones y por su gran apoyo durante todo el proceso de este trabajo.

Gracias a Juan Vázquez del taller de laminación del Centro de Geociencias por la realización de las láminas doblemente pulidas y secciones pulidas. A Joaquín Aparicio del taller de laminación del Instituto de Geología por su asesoramiento durante el corte de muestras para láminas.

Agradezco el apoyo del Dr. Fernando Nuñez por el uso del laboratorio de microscopios Francisco Fabregat y por todo el conocimiento y apoyo compartido y dado durante el proceso de análisis petrográfico y minerográfico.

Al Ing. Carlos Linares por su apoyo y conocimiento compartido durante el análisis de elementos traza y mayores en el laboratorio de EPMA del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Agradezco a la Dra. Elisa Fitz por apoyarme con el uso del laboratorio de arcillas para la preparación de muestras de isótopos estables.

A la Dra. Pura Alfonso de la Umniversitat Politècnica de Catalunya, por el apoyo, trabajo y comentarios en los análisis de isótopos de azufre realizados en los Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona..

Agradezco al personal administrativo del Instituto de Geología, en especial a las secretarías María Luisa Reyes Ochoa y Gloria Alba, del programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra por el apoyo en los trámites de documentos desde antes de mi ingreso al posgrado y hasta la culminación del mismo. Agradezco de igual forma a Araceli Chamán y a la Dra. Elizabeth Solleiro del Instituto de Geología por todo el apoyo brindado al inicio de mis estudios de maestría.

Contenido

RESUMEN

ABSTRACT

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO

CAPÍTULO 4. ESTRATIGRAFÍA DE VETA

CAPÍTULO 5. TEXTURAS DE CUARZO

CAPÍTULO 6. MINERALIZACIÓN

CAPÍTULO 7. PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

CAPÍTULO 8. QUÍMICA MINERAL DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y GEOBARÓMETROS DE ESFALERITA

CAPÍTULO 9. ISÓTOPOS DE AZUFRE

DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

Referencias bibliográficas

**Anexo A. Texturas de cuarzo y mineralización asociada.

**Anexo B. Mineralización (Láminas doblemente pulidas y en secciones pulidas) y Alteración Hidrotermal

**Anexo C. Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas

**Anexo D. Química mineral de elementos (EPMA y SEM)

**Anexo E. Isótopos de azufre

****Electrónicamente**

<https://drive.google.com/file/d/1GP0qHVuH9tEbv3EA7xIbL2Y5HWiwHEf4/view?usp=sharing>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema geológico de México que muestra la localización de la Mesa Central y del Distrito Minero de Fresnillo.....	2
Figura 2. Configuración geológica de México.....	6
Figura 3. Distribución geográfica de la Mesa Central.....	7
Figura 4. Límites estructurales de la Mesa Central.....	8
Figura 5. Mapa Geológico y columna estratigráfica del área de Fresnillo, Zacatecas.....	9-10
Figura 6. Mapa geológico del distrito minero de Fresnillo con fallas locales Laguna Blanca y Fresnillo.....	11
Figura 7. Distribución de las diferentes etapas de la estratigrafía de la veta (veta San Carlos).....	14
Figura 8. Etapas de la estratigrafía de la veta San Carlos.....	15
Figura 9. Texturas presentes en las muestras de las distintas etapas de la veta San Carlos.....	18
Figura 10. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN200, 300 y 340 de la zona poniente de la veta San Carlos.....	20
Figura 11. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN270 y 340 de la zona central de la veta San Carlos.....	21
Figura 12. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN200 y 340 de la zona oriente de la veta San Carlos.....	21
Figura 13. Fotomicrografía de las texturas minerales más comunes en la veta San Carlos.....	22
Figura 14. Zonificación mineral a lo largo de la extensión vertical de la veta San Carlos.....	23
Figura 15. Características de las asociaciones fluidas de la Veta San Carlos (SN270 y SN340).....	25
Figura 16. Resultados de microtermometría de las asociaciones de inclusiones fluidas.	29
Figura 17. Diagrama de valores de densidad para soluciones en el sistema H ₂ O-NaCl junto con los valores de Salinidad wt% NaCl equiv. (eje x) vs Th (°C) (eje y) de los grupos de inclusiones fluidas de las muestras de la veta San Carlos.	33
Figura 18. Correlación entre los resultados obtenidos para las temperaturas de homogenización [Th °C (eje x)] y las salinidades [wt% NaCl equiv. (eje y)] de las muestras de las tres etapas de mineralización vs los subniveles muestreados en la Veta San Carlos (Fresnillo, Zacatecas). Modificada de Haas, 1971.....	35
Figura 19. Salinidades wt% NaCl equiv. (eje x) vs Th °C (eje y). Señalando los procesos asociados con la mineralización.....	37
Figura 20. Contenido de Fe (wt%) en las diferentes etapas de mineralización de la Veta San Carlos.....	41
Figura 21. Calculo de temperaturas de formación de esfaleritas con base en su tasa Ga/Ge. Modificada de Kant et al. (2012).....	43
Figura 22. Temperaturas de formación de esfaleritas calculadas con base en la tasa Ga/Ge [según lo propuesto por Möller (1987)] para cada subnivel en la zona poniente de las muestras de la veta San Carlos. A = Zona poniente; B = Zona Central.....	45
Figura 23. Rango de valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sistemas geológicos (Modificado de Hoefs, 1980).....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedio de temperaturas (T_h , T_m) y salinidades obtenidas de las FIA's analizadas en las muestras de la Veta San Carlos.....28

Tabla 2. Valores Isotópicos de $\delta^{34}S$ obtenidos de muestras de sulfuros y sulfosales en los subniveles 200 y 340 (zona poniente) y subnivel 270 (zona central) de la veta San Carlos.48

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El distrito minero de Fresnillo (DMF) se localiza en la parte centro-norte de México en el estado de Zacatecas, inmediatamente al sur de la ciudad de Fresnillo. Se ubica aproximadamente a una distancia de 750km al noroeste de la Ciudad de México.

En el paisaje destacan la presencia de colinas pequeñas como Loma Fortuna, Cerro Proaño, Cerro del Fierro y Cerro Pópulo, presentando relieves menores a los 300m. Autores como (Ruvalcaba-Ruiz *et al.*, 1998; Eckberg, 1999; Hughey, 1999) señalan la relación entre estos rasgos topográficos con la presencia de diferentes cuerpos intrusivos emplazados en el subsuelo y con los primeros distritos mineros. Fuera de la presencia de éstos pequeños cerros, predominan las zonas llanas y extensas.

Las actividades mineras dentro del distrito han producido, a lo largo de su historia, cerca de 320, 000 toneladas métricas de Ag desde 1521, representando un aproximado del 25% de toda la plata que se ha minado en la historia de la humanidad (Velador, 2010; Megaw, 2010).

Las tipologías de los yacimientos dentro del distrito minero de Fresnillo son variadas e incluyen vetas, mantos, chimeneas, skarn, entre otros (Camprubí *et al.*, 2009). Económicamente hablando los yacimientos asociados a cuerpos vetiformes (Ej. Veta Santo Niño, Santa Eulalia, San Carlos, etc.) son los que presentan mayor importancia dentro del distrito (Gemmell *et al.*, 1988). Estos yacimientos se encuentran emplazados sobre lineamientos de fallas con direcciones preferenciales E-W (Megaw, 2010; Pérez, 2015).

El distrito minero de Fresnillo se divide en cuatro zonas principales que incluyen los diferentes yacimientos de la zona emplazados en su mayoría en rocas sedimentarias marinas y metasedimentarias del Mesozoico (Camprubí *et al.*, 2009).

La Veta San Carlos es un yacimiento de tipo epitermal de sulfuración intermedia (SI) que

contiene mineralización de Ag (Pirargirita, Argentita), Zn (Esfalerita), Pb (Galena) y Cu (Tetraedrita) presentando una zonación vertical composicional de sulfuros pesados (Pb-Zn) en su base y Ag en su cima (Buchanan, 1981; Camprubí, 2001). En general los minerales metálicos se encuentran dispuestos en bandeamientos o diseminados, alternando con bandas y breccias compuestas en su mayoría por cuarzo y calcita (Camprubí *et al.*, 2009).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de la información disponible acerca del distrito minero de Fresnillo trata de temas muy generales, siendo pocos los trabajos enfocados a describir las características principales de los yacimientos, en particular aquellos realizados por Gemmell *et al.* (1988) y Simmons *et al.* (1988) acerca de la Veta Santo Niño.

Entre los trabajos más recientes enfocados en el estudio de las características de la mineralización y de los fluidos mineralizantes asociados al yacimiento epitermal de la Veta San Carlos se encuentra el de Camprubí *et al.* (2009); sin embargo, este trabajo es solamente un breve resumen que presenta información muy general e inconclusa.

OBJETIVO

El trabajo de investigación que se presenta fue auspiciado por el CONACYT mediante el proyecto PAPIIT-IG100116 y ha sido elaborado bajo la supervisión del Dr. Antoni Camprubí Cano con el apoyo del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El objetivo general del presente trabajo se enfoca en determinar las propiedades asociadas con los procesos que dieron origen a la mineralización en la Veta San Carlos, presentando con mayor detalle información sobre la mineralogía de la veta, la cronología de los bandeamientos presentes para establecer de la manera más precisa la secuencia paragenética, las asociaciones minerales y las características de los fluidos mineralizantes (P, T, X)

para cada evento o fase identificada en particular y para la veta en general.

LOCALIZACIÓN

El distrito minero de Fresnillo se encuentra dentro de provincia fisiológica de la Mesa Central, en la

porción central de la franja NNW de (Ag-Pb-Zn) de México que se extiende a lo largo de 800km y que incluye a distritos mineros como Taxco, Guanajuato, Zacatecas y Sombrerete (Clark *et al.*, 1982; Gemmell *et al.*, 1988; Camprubí *et al.*, 1999). Las coordenadas geográficas de la zona de estudio son 23°10'29" latitud norte y 102°52'39" longitud oeste (Figura 1).

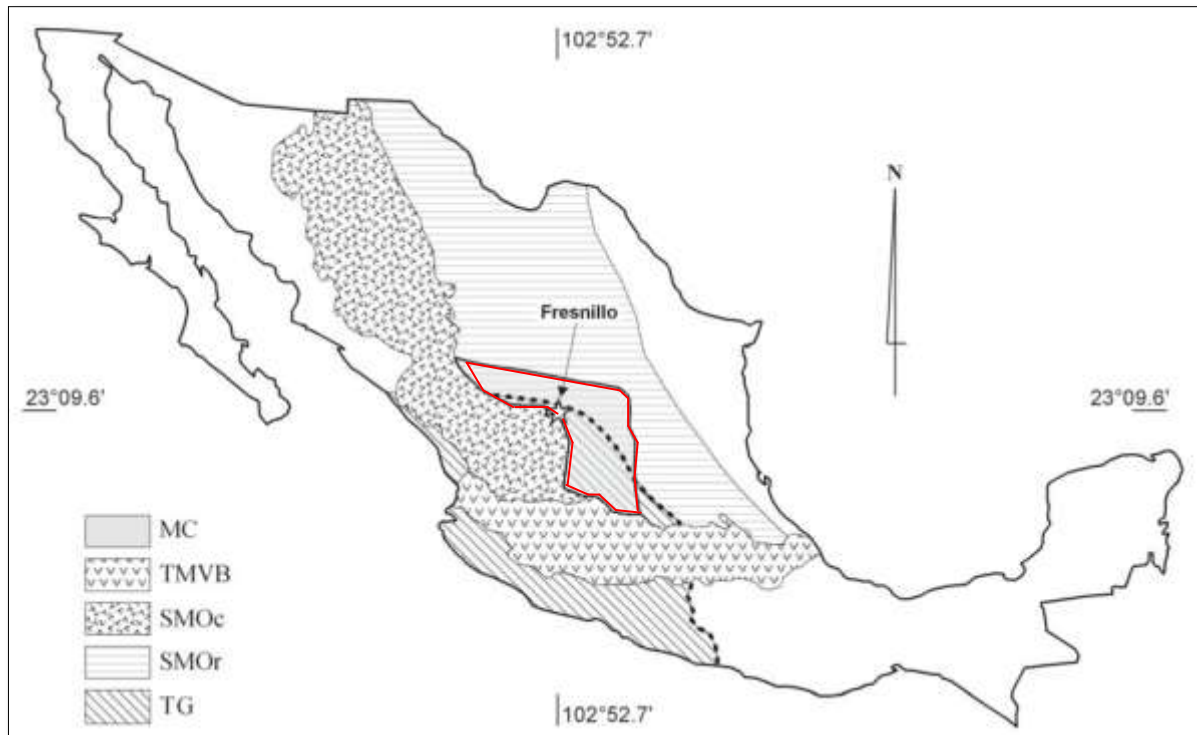


Figura 1. Esquema geológico de México que muestra la localización de la Mesa Central y del Distrito Minero de Fresnillo. Abreviaciones: (SMOc) = Sierra Madre Occidental, (SMOr) = Sierra Madre Oriental, (TMVB) = Cinturón Volcánico TransMexicano, (TG) = Terreno Guerrero y la Mesa Central (MC). Tomado de Velador *et al.*, 2010.

2. METODOLOGÍA

Los análisis de la mineralogía, geoquímica e inclusiones fluidas presentes en las muestras pertenecientes a la Veta San Carlos (Distrito Minero de Fresnillo, Zacatecas) se llevaron a cabo utilizando diferentes técnicas microscópicas y analíticas descritas a continuación.

TRABAJO DE CAMPO

La información acerca de los diferentes rasgos geológicos (Ej. límites entre contactos, unidades estratigráficas, composición litológica, rasgos estructurales, yacimientos o zonas mineralizadas, etc.) presentes en la zona de estudio se incluye de manera modificada con base en información disponible en trabajos previos (DeCserna, 1976, MacDonald *et al.*, 1986, Querol y Palacios, 1990, Trejo, 2001, Ruvalcaba Ruiz y Thompson, 2010, entre otros).

El muestreo dentro del desarrollo minero y en los afloramientos en superficie se llevó a cabo durante el año 2009 y fue realizado por un equipo de investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México integrado por el Dr. Antoni Camprubí Cano (Instituto de Geología), Dr. Carles Canet (Instituto de Geofísica) y el Dr. Eduardo González Partida (Centro de Geociencias), así como por el Ing. Daniel Saldivar (Minera Proaño).

Durante esta etapa se recolectaron muestras representativas de los bandeamientos de origen epitermal (principalmente compuestos de cuarzo y en menor medida por calcita), de la mineralización contenida en éstos y de las rocas encajonantes para cada subnivel (200, 270, 300, 340) y cada zona (Poniente-Centro-Oriente) a la que se tuvo acceso. La distribución de las muestras permitió observar los cambios (mineralógicos, texturales, en las propiedades asociadas al origen de los fluidos, etc.) y la evolución espacio-temporal (horizontal y

vertical) de la Veta San Carlos una vez concluidos los análisis correspondientes (Petrografía-Minerografía, Petrografía-Microtermometría en inclusiones fluidas, Análisis MEB-EPMA, etc.).

NOMENCLATURA Y DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Se seleccionaron 16 muestras obtenidas en campo las cuales pertenecen a la zona central y occidental de la veta San Carlos y que fueron nombradas utilizando como referencia la zona (Ej. C o W para centro u oeste respectivamente), seguida por el subnivel del cual fueron extraídas (Ej. 300, 340, 200, etc.) y por último la numeración de la muestra en dicho subnivel y zona (Ej. M1, M2, M3, etc.). ANEXO A.

A partir de las 16 muestras, se obtuvieron y separaron cerca de 160 bandeamientos. De cada una de éstas bandas se realizó la descripción textural y composicional y se obtuvo la paragénesis mineral.

La descripción macroscópica en muestras de mano fue fundamental para definir (de manera inicial) la composición, paragénesis, texturas y etapas de mineralización presentes en la zona de estudio y asociadas con el origen y evolución de la Veta San Carlos.

Cada muestra fue marcada y preparada para su laminación y así poder realizar los estudios petrográficos correspondientes.

PETROGRAFÍA

Entre las técnicas microscópicas que se llevaron a cabo se encuentra la petrografía convencional mediante luz transmitida en láminas delgadas (28 láminas) con el propósito de identificar con mayor detalle la mineralización, texturas, paragénesis, etc. presente (Mackenzie, 1994). De igual manera, el análisis minerográfico mediante luz reflejada en secciones pulidas (13 muestras) y láminas

doblemente pulidas (26 láminas) permitió distinguir la composición mineral, texturas, paragénesis, asociaciones minerales y etapas principales de mineralización (Bastin, 1950; Craig y Vaughan, 1994 y Taylor, 2010; entre otros)..

Se llevó a cabo utilizando láminas doblemente pulidas (26 muestras) y fragmentos (alrededor de 150) pertenecientes a los bandeamientos de origen epidermal de la zona de estudio (Veta San Carlos), según lo establecido principalmente por autores como Roedder (1984), Van den Kerkhof (1999) y Camprubí (2010).

Las muestras fueron preparadas en el taller de laminación del Centro de Geociencias de la UNAM y analizadas en el laboratorio de microscopía Francisco J. Fabregat del Instituto de Geología de la UNAM con un microscopio petrográfico de luz polarizada marca Olympus modelos B50 y B60.

ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES FLUIDAS

En total se analizaron alrededor de 107 FIA's y 824 inclusiones fluidas primarias mediante el análisis microtermométrico en muestras y fragmentos (56 muestras) pertenecientes a los diferentes bandeamientos epidermales y que se ubican en las zonas oriente, centro y poniente, así como en los subniveles 200, 270 y 340 de la Veta San Carlos.

El análisis se llevó a cabo según lo especificado en trabajos como los de Roedder (1984) y Goldstein y Reynolds (1994) utilizando un microscopio petrográfico marca Olympus modelo BX60 junto con una platina térmica Linkam THMSG 600 y un objetivo de 50x de ultra-larga distancia de trabajo, pertenecientes al Instituto de Geología de la UNAM. La salinidad fue calculada mediante las ecuaciones de estado de Bodnar y Vityk (1994) para el sistema H₂O-NaCl.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ANÁLISIS POR MICROSONDA ELECTRÓNICA (EPMA)

De manera complementaria al análisis EPMA, con el objetivo de conocer de manera más certera la composición y clasificación de algunos minerales (sulfuros, óxidos) que no se lograron definir mediante la petrografía-minerografía, se decidió analizar muestras pertenecientes a las zonas oriente y central (C270,C340,W200,W300) mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB). Se llevó a cabo en el laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se obtuvieron resultados con imágenes WDS (Wavelength dispersive Spectrometry) y valores semi-cuantitativos acerca de la composición de los minerales para cada punto analizado

El análisis por microsonda electrónica (EPMA) se llevó a cabo en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica de la UNAM, utilizando un equipo de alto grado de automatización compuesto por una microsonda electrónica de barrido JEOL JXA-8900R con dos espectrómetros WDS y EDS bajo unas condiciones analíticas de 20 KeV y 20nA de corriente de sonda, diámetro de haz de 1micra y un tiempo de conteo de entre 30-40s. Se analizaron alrededor de 20 muestras (secciones pulidas) con el objetivo de obtener información cuantitativa acerca de la variación de Fe y Zn en esfaleritas y del contenido en elementos mayores (Fe, Zn, Pb, Ag, S) y elementos traza (Na, Sb, Ge, Ar, Cd, Te, Cu, Se, Ag, Ni, Ga, Mo, Mn) en sulfuros como esfalerita, galena y pirita para calcular geotermómetros (Skinner y Barton, 1979; Shimizu y Shimazaki, 1981; Balabin y Sack, 2000). Al igual que durante análisis por MEB, este análisis fue de utilidad para distinguir y definir la composición de las sulfosales de plata presentes (Ej. Pirargirita, Argentita) y otros sulfuros y sulfosales que no se lograron definir mediante el

estudio de minerografía (Ej. Arsenopirita, Tetraedrita).

laboratorio de Separación de Minerales del Instituto de Geología de la UNAM.

ANÁLISIS DE MINERALES DE ALTERACIÓN MEDIANTE SWIR

Utilizando un equipo ASD-Lab Spec Pro perteneciente al laboratorio Petrografía y Microtermometría del Instituto de Geofísica de la UNAM, se realizó el análisis por infrarojo de onda corta (SWIR por sus siglas en inglés) en aprox. 10 muestras para obtener los espectros asociados a la composición de los minerales de alteración hidrotermal (Ej. esmectita, Illmenita-esmectita, kaolinita, etc.) Presentes en las muestras de las rocas encajonantes de la Veta San Carlos. Los resultados (procesados con el software Indico Pro) se compararon con estándares (Clark *et al.*,1993) utilizando el programa de cómputo Excel 2006 para definir la composición mineral (pertenecientes o asociados con la alteración hidrotermal) de los puntos analizados.

ANÁLISIS ISOTÓPICO DE AZUFRE

Se llevó a cabo en el Serveis Científic-Tècnics de la Universidad Politècnica de Catalunya. Se analizaron alrededor de 50 muestras de sulfosales y sulfuros separados individualmente para obtener valores independientes asociados al posible origen del azufre en éstos.

Se utilizó un aparato de combustión equipado con Delta C Finnigan MAT, flujo continuo, espectrómetro de masas con ratio isotópico y un analizador elemental TC-EA, siguiendo el método de Giesemann *et al.* (1994). Los resultados se dieron como valores de $\delta^{34}\text{S}$ relativos al standard CDT (Cañón del Diablo Triolite). La precisión analítica es de 2 sigma entre $\pm 0.2\text{‰}$.

Las muestras que se enviaron para el análisis fueron cristales de pirita, esfalerita, galena, proustita y tetraedrita. Estas muestras fueron separadas en el

3. MARCO GEOLÓGICO

La configuración geológica de México puede representarse como una agrupación de terrenos tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983), los cuales presentan una gran variedad de series volcanosedimentarias asociadas a diferentes arcos magmáticos del Mesozoico y Cenozoico. Estos se han acrecionado y separado de los continentes

durante la compleja evolución de la margen pacífica de México (Centeno *et al.*, 2008; 2011; Camprubí, 2009). El paleocontinente que fungió como núcleo para la unión de éstos terrenos se ha denominado Oaxaquia (Ortega- Gutiérrez *et al.*, 1995) y se ha inferido que se extiende desde Coahuila hasta Oaxaca con una orientación NNW-SSE (Figura 2).

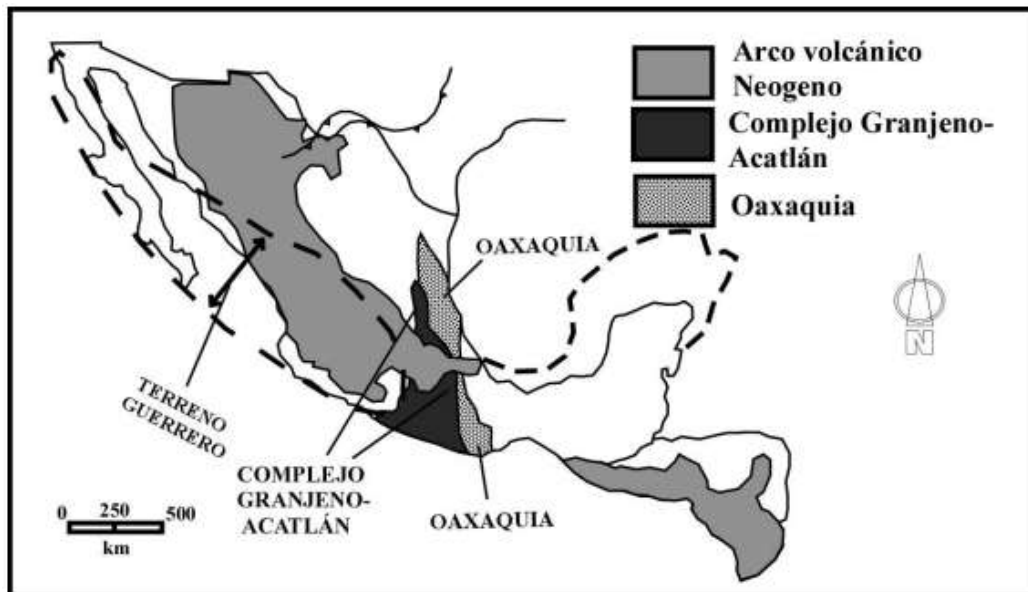


Figura 2. Configuración geológica de México dónde se busca señalar la distribución del bloque de Oaxaquia sobre el cual acrecieron los terrenos Guerrero y Sierra Madre. Nótese los límites de los terrenos señalados con líneas punteadas. Tomado de Nance *et al.*, 2006.

El arreglo estructural de México determinó la existencia de fallas o zonas de discontinuidad en diferentes escalas corticales que esporádicamente actuaron como canales que favorecieron el ascenso de magmas y de fluidos acuosos durante un largo periodo de tiempo (Camprubí y Albinson, 2007; Camprubí, 2009). De igual forma, la acumulación preferencial que demuestran ciertos tipos de yacimientos minerales alrededor de éstas zonas de falla mayores sugiere que estas estructuras regularon en gran medida el ascenso de magmas y fluidos y el emplazamiento de la mineralización, influyendo de ésta manera en su distribución geográfica actual (Camprubí, 2009).

El Distrito Minero de Fresnillo se localiza dentro de la provincia fisiográfica de la Mesa Central (MC) descrita por Raisz (1959) como una plataforma elevada compuesta por rocas marinas sedimentarias provenientes del Terreno de la Sierra Madre Oriental (TSM) al este y noreste, presentando una secuencia de rocas volcanosedimentarias del Terreno Guerrero (TCG) al suroeste. Ambos terrenos son parcialmente sobreyacidos de manera disconforme por rocas volcánicas (ignimbritas, riolitas) de la Sierra Madre Occidental (SMO) al oeste. (Velador, 2010).

Dentro de la Mesa Central se reconocen dos regiones (Sur y Norte), separadas entre sí por un grupo de fallas asociadas con el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes. La región sur está caracterizada por elevaciones mayores que la región norte (con excepción del graben de Aguascalientes) con magnitudes por encima de los

2000 msnm. Se encuentra cubierta por rocas volcánicas del Cenozoico, presenta poca erosión y presencia de fallas normales. La región norte cuenta con elevaciones menores a los 2000 msnm y erosión más intensa (Figura 3; Nieto-Samaniego *et al.*, 2007).

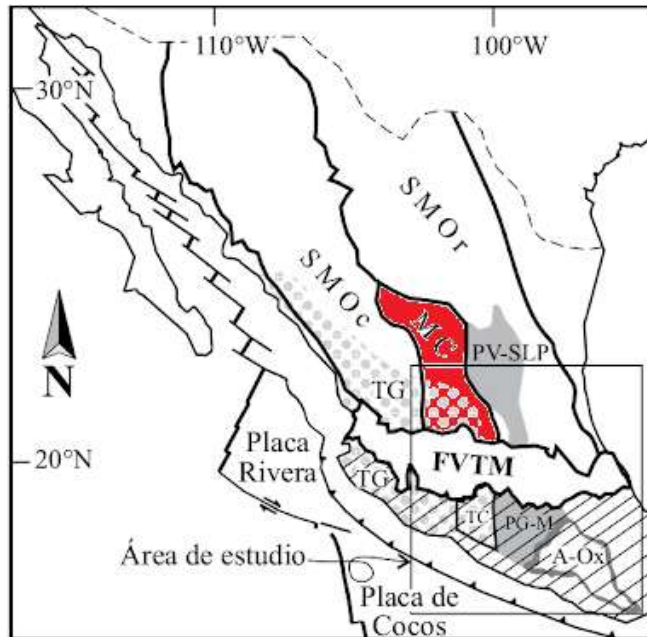


Figura 3. Distribución geográfica de la Mesa Central. Se muestran sus límites fisiográficos al este (SMOr), al oeste (SMOc) y al sur (Cuenca El Bajío y Franja Volcánica Trans Mexicana FVTM). Se encuentra dividida en dos sectores norte (azul) y sur (verde) debido a la presencia de diversas fallas normales pertenecientes al Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT). Tomado y modificado de Alaniz-Álvarez 2005

Los límites fisiográficos de la Mesa Central son la Sierra Madre Occidental (Oeste), la Sierra Madre Oriental (N y E) y la Cuenca del Bajío (Sur). La porción norte de la Mesa Central está delimitada por el Sector Transversal de Parras. (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Velador, 2010).

Los límites estructurales de la provincia de la Mesa Central están determinados por fallas mayores

normales. Al sur por la Falla del Bajío, al este por la porción norte del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende y al occidente por el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (Figura 4; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

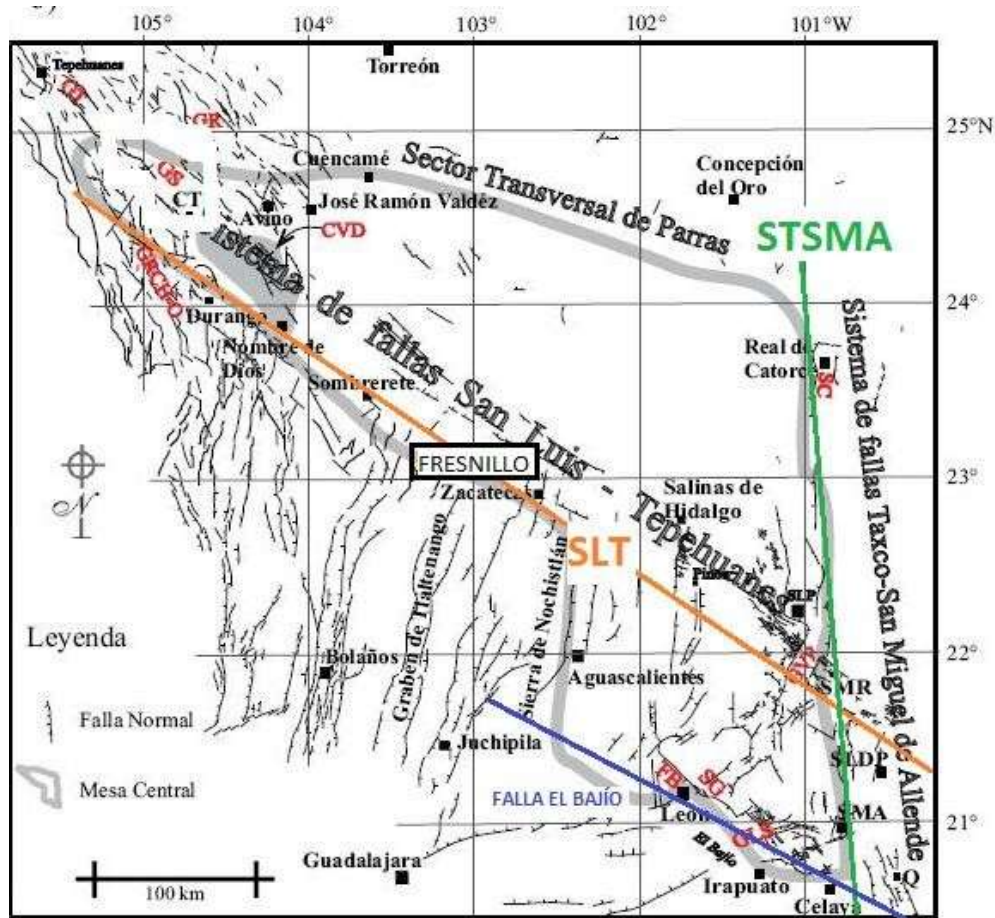


Figura 4. Límites estructurales de la Mesa Central. Se muestran los sistemas de fallas principales al oeste (SFL), al este (STMA) y al sur (El Bajío). Tomado y modificado de Nieto-Samaniego et al., 2005.

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

En el distrito de Fresnillo rocas de composición félsica pertenecientes al Terciario se encuentran sobreyaciendo a sedimentos marinos deformados y a rocas volcánicas máficas de edad Mesozoica (Gemmell et al., 1988). Las rocas más antiguas expuestas en la Mesa Central pertenecen a dos provincias paleogeográficas conocidas como Terreno Guerrero o Terreno Compuesto Guerrero (Centeno et al., 2008, 2011) y Terreno Sierra Madre (Centeno- García y Silva-Romo, 1997).

El terreno Guerrero es una secuencia volcanosedimentaria compuesta por sedimentos de flysch interestratificados con basaltos almohadillados. Presenta un grado bajo de

metamorfismo y una deformación compresional severa (Nieto-Samaniego et al., 1999). Su rango de edades va desde el Titoniano (Jurásico Superior) hasta el Cenomaniano (Cretácico Superior) (Centeno et al., 2008).

El Terreno Sierra Madre está compuesto por unidades del Triásico al Cretácico. En general consiste de depósitos siliciclásticos que incluyen lutitas, areniscas ricas en cuarzo y algunos conglomerados (Centeno-García y Silva-Romo, 1997). Por otra parte, Tristán-González et al. (2015) menciona que las unidades correspondientes al Jurásico Medio están compuestas por rocas volcánicas y volcanoclásticas, mientras que aquellas de edad Cretácica se componen por caliza-arenisca-lutita.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

El mapa geológico presentado por De Cserna (1976; Figura 5) ha sido modificado para el área de Fresnillo principalmente en base a estudios paleontológicos (Dávila-Alcocer, 1981) llevando al reacomodo de la Formación Chilitos pasando de ocupar una edad del Triásico Superior a ocupar una posición superior dentro del Valanginiano Tardío-Hauteriviano Temprano (Cretácico Temprano) en base a radiolarios bien conservados extraídos de una caliza negra de grano fino silicificada perteneciente a la parte superior de la Formación Plateros (Cantú-Chapa, 1974; Dávila-Álcoer, 1981; Velador, 2010)

En la zona de Fresnillo y Saucito, las vetas epitermales SE y SW se encuentran emplazadas casi en su totalidad sobre sedimentos marinos Cretácicos (Earthman, 2010). Estos sedimentos constituyen las unidades más bajas en la estratigrafía local y han sido integrados como formaciones dentro del Grupo Proaño (De Cserna, 1976; Querol y Palacios, 1990; Earthman, 2010).

De manera local, el Terreno Guerrero puede ser separado en dos dominios conformados por las

Formaciones Valdecañas (grauvacas interestratificadas con capas de lutitas calcáreas) y Plateros (lutitas calcáreas y carbonosas con interestratificaciones de grauvaca y caliza), y por otro lado por la Formación Chilitos (lavas almohadilladas y flujos de lava basálticos-andesíticos) (Stone y McCarthy, 1942; MacDonald *et al.*, 1986).

Las unidades Terciarias consisten en los conglomerados de la Formación Fresnillo en su base (De Cserna, 1976; Ruvalcaba-Ruíz y Thompson, 1988), sobreyacidos por rocas piroclásticas de composición riolítica (McDowell y Keizer, 1977) y terminando con unidades más jóvenes de flujos de basaltos de olivino que representarían el último pulso volcánico en la región (De Cserna, 1976) (Figura 5).

De los cuerpos intrusivos identificados en el área de estudio, el Stock *Cuarzo-Monzonítico* Fortuna (Oligoceno) se encuentra espacialmente asociado a la mineralización en las zonas de Fortuna y Proaño y ha sido propuesto por autores como De Cserna (1977) y Eckberg (1999) como responsable de la generación de la mineralización en yacimientos de tipo skarn, chimenea y vetas.



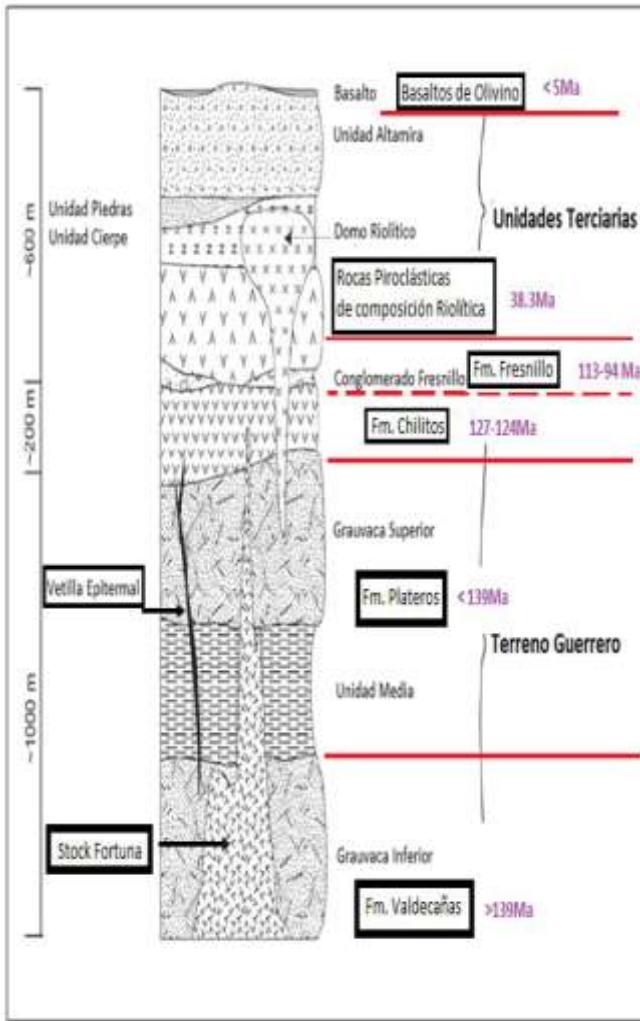


Figura 5. Mapa Geológica y columna estratigráfica del área de Fresnillo y columna estratigráfica del área de Fresnillo, Zacatecas. Nótese que no se incluye la Fm. Caliza Fortuna.. Zacatecas. Tomado de Velador, 2010.

3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Existen dos eventos deformacionales definidos en el distrito de Fresnillo. El primero es evidenciado por plegamientos y cabalgaduras sucedidos durante el Cretácico superior y que se encuentran marcados por la presencia de un anticlinal con orientación NE el cual engloba en su flanco sur al área de Fresnillo-SE en el que se encuentran las vetas epitermales más importantes del distrito (Querol y Palacios, 1990). El segundo evento se generó durante el Terciario y es evidenciado por dos grupos de fallas N45°W y E-W que emplazan a la mayoría de las vetas en el distrito y a gran parte de las vetas del área del Tiro San Luis, respectivamente.

Estas estructuras fueron activadas durante el evento hidrotermal que participó en la inyección de fluidos mineralizantes al distrito a través de las fracturas y fallas previamente establecidas. (Querol y Palacios, 1990)

En la zona existe la presencia de fallas locales que presentan un paralelismo con los diques riolíticos observados en la zona, éstas fallas son Laguna Blanca y Fresnillo (Figura 6). Algunas de las vetas en la región también presentan cierto paralelismo con las fallas, mientras que otras son totalmente oblicuas y algunas incluso cortan a las fallas (De Cserna, 1976).

La edad de las fallas se ha establecido en base a relaciones de corte y se ha inferido como posteriores a la actividad intrusiva en Fresnillo y podrían deber su origen a eventos de extensión horizontal NE-SW activos mucho antes del depósito de la Formación Fresnillo. Según De Cserna (1976), el movimiento hacia arriba de las cámaras magmáticas en la región previó a la intrusión, pudo haber contribuido con el desarrollo de extensión regional a causa de un incremento de compresión vertical, permitiendo el desarrollo de las vetas en Plateros y en Fresnillo.

Todo el sistema de vetas en Fresnillo parece estar controlado por una gran zona de dilatación de esfuerzos desarrollada durante eventos extensivos oblicuos y la reactivación de una falla de escala regional con rumbo al NW previa a la mineralización. Por otra parte, el emplazamiento de los cuerpos intrusivos parece haber estado controlado por la zona de falla regional NW o Falla de Fresnillo (Trejo, 2001).

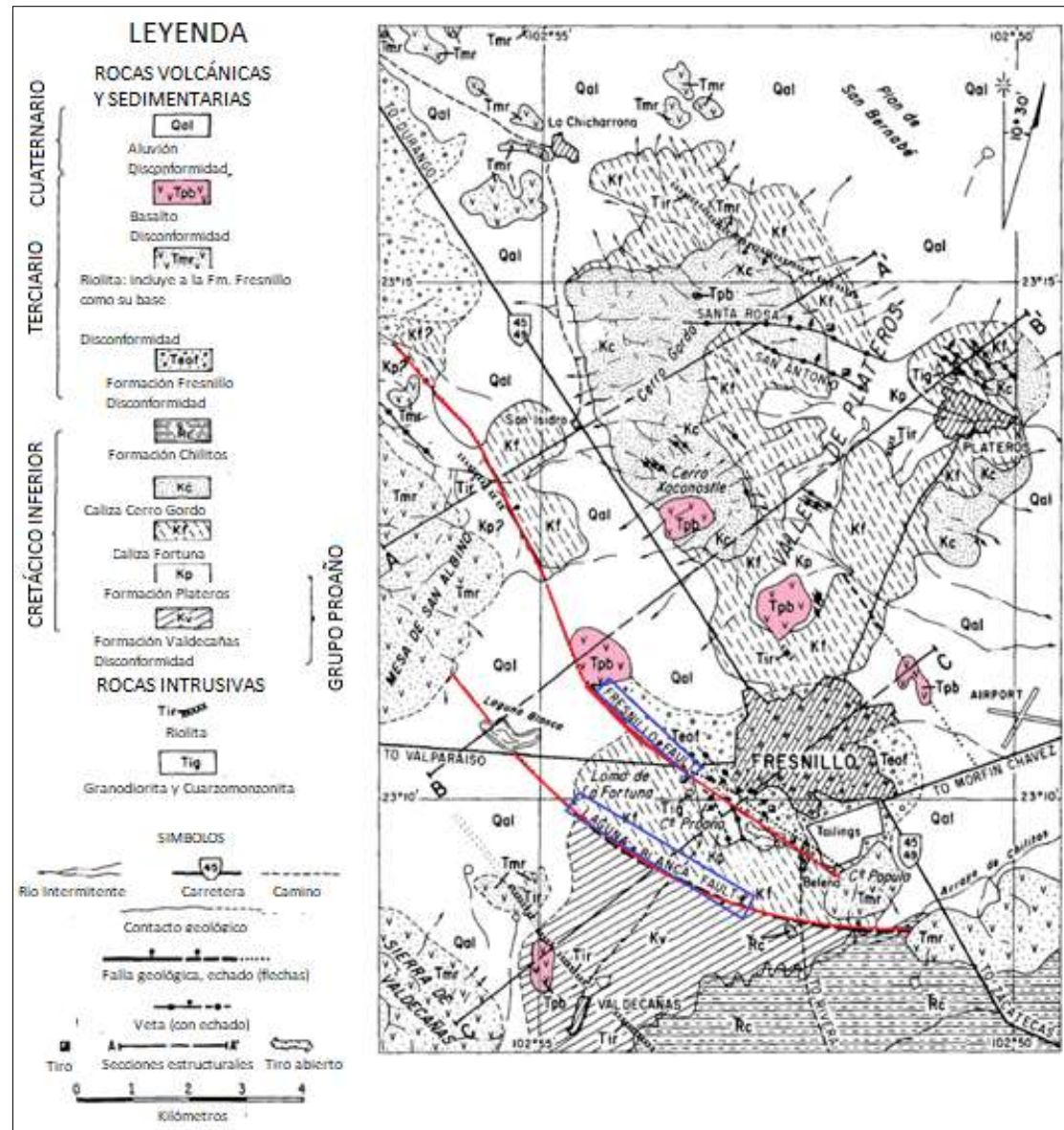


Figura 6. Mapa geológico del distrito minero de Fresnillo dónde se remarcan las fallas locales Laguna Blanca y Fresnillo (líneas rojas). Tomada y modificada de DeCserna, 1976.

3.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

La historia geológica de Fresnillo se encuentra ligada íntimamente con la evolución de la margen occidental de México y los procesos que sucedieron en la porción noroeste y central de la costa del Pacífico desde el Triásico hasta el reciente (Ferrari *et al.*, 2007; Nieto-Samaniego, 2007; Camprubí, 2009, 2013).

Los yacimientos de plata en México están en su mayoría relacionados con la presencia de vetas epitermales (IS- LS) (Camprubí y Albinson, 2007) y depósitos de reemplazamiento en carbonatos, los cuales se distribuyen a lo largo de un área alargada con tendencia NW-SE y que ha sido denominada en muchas publicaciones como Cinturón Mexicano de Plata (Clark *et al.*, 1982).

Es importante notar que la configuración que muestra el cinturón es en cierta forma paralela a la zona de subducción activa durante el Cretácico Tardío, cuyo magmatismo presentó migración hacia el continente y retroceso hacia la paleotrinchera terminando su actividad durante el Terciario Medio (Figura 32; Damon *et al.*, 1981; Sedlock *et al.*, 1993; Camprubí, 2009, 2013; Clark y Fitch, 2013; Megaw, 2010).

Como se ha mencionado en trabajos anteriores (Nieto-Samaniego *et al.*, 2007; Camprubí, 2009, 2013) la presencia de fallas habría sido uno de los factores más importantes en la distribución de la mineralización a lo largo del Cinturón de Plata y de manera local dentro del distrito de Fresnillo.

El emplazamiento de calderas y stocks de composición silícica durante el Terciario Medio, junto con flujos riolíticos evidenciados en el distrito, jugaron otro de los papeles fundamentales en la mineralización a lo largo de estos lineamientos. La mineralización en vetas epitermales y los depósitos de reemplazamiento en carbonatos muestran una asociación espacial muy marcada *con los cuerpos intrusivos*, relación que no es del todo convincente entre la mineralización y la litología o las rocas

encajonantes en el distrito. Además la mayoría de los yacimientos se presentan con orientaciones NW similares a las obtenidas para la el Sistema de Fallas San Luis- Tepehuanes y otros en asociación con la orientación de fallas locales como la de Fresnillo o fallamientos normales derivados de extensión NNE-SSW (Megaw, 2010).

McDowell y Clabaugh (1981) describen lo que ellos consideran los dos eventos principales de actividad ígnea asociada a la Sierra Madre Occidental en los últimos cien millones de años (102-45Ma y 45-27Ma, respectivamente). El segundo evento engloba a la mayoría de yacimientos epitermales en México, dentro de un cinturón NW-SW que va desde Chihuahua hasta el estado de Guerrero; su origen se asocia con el episodio principal de flujos ignimbríticos de la Sierra Madre Occidental (36-27Ma). Presenta una gran área de extensión y pulsos poco pronunciados.

Damon *et al.* (1981) señalan la presencia de minerales específicos asociados con las etapas de migración magmática, siendo la etapa de regresión magmática (Post 40Ma) hacia el oeste representada por Sn, Pb-Zn-Ag en la porción más oriental y Fe, Ag y Au en la porción más al poniente cuando la actividad magmática estaba ya retraída en la paleotrinchera. Damon *et al.* (1981) sugirieron que uno de los factores dominantes para el emplazamiento de la mineralización asociada a actividad magmática sería la profundidad del foco de fusión y la distancia con la trinchera, que a su vez influyen en el tipo de vulcanismo y por ende en la composición de las rocas ígneas.

4. ESTRATIGRAFÍA DE LA VETA

La importancia de diferenciar y caracterizar los diferentes eventos que dieron origen a la veta consiste en establecer las relaciones espacio temporales durante los pulsos que dieron lugar a la mineralización, con el objetivo de alcanzar una correcta interpretación sobre la evolución

hidrotermal en el sistema asociado a la Veta San Carlos.

Después de analizar las muestras en el área de estudio, se puede inferir que la Veta San Carlos se formó durante al menos tres etapas que consisten principalmente en bandeamientos coloformes-crustiformes y brechamientos asociados a los múltiples eventos de apertura de fisuras y permitiendo el flujo de los fluidos hidrotermales que dieron origen a la mineralización. De acuerdo con lo observado y según lo descrito por Sibson (1987), la presencia de múltiples episodios de brechamiento se asocia con vetas con historias de apertura incremental-extensional.

La composición de las brechas es variable a lo largo de las tres etapas y se observan fragmentos de etapas previas con texturas de cuarzo bandeado o fragmentos de cuarzo zonal entre otros, además de sulfuros de metales base y sulfosales. En cuanto a los bandeamientos, son generalmente coloformes y en algunas etapas también crustiformes con composiciones de sulfuros, cuarzo y calcedonia con diferentes texturas.

Tomando en cuenta la composición de las diferentes bandas y brechamientos analizados, la composición de los fragmentos dentro de los brechamientos, la secuencia de crecimiento de las bandas y las diferentes relaciones entre los elementos que conforman la veta, se llevó a cabo la interpretación de la secuencia paragenética mineral y la determinación de las etapas asociadas a las fases de mineralización.

Etapa I. Como primer evento asociado al fracturamiento inicial de la roca huésped de la veta San Carlos, se llevó a cabo el depósito de la etapa I, donde la precipitación de las asociaciones minerales habría iniciado gracias a aperturas en las zonas poniente, central y oriental. Junto con la segunda etapa, la etapa I abarca la mayor cantidad de bandas dentro de las muestras colectadas en la veta (Figura 7).

Los bandeamientos asociados con la etapa I son en su mayoría coloformes con algunas bandas crustiformes, distribuyéndose principalmente en la zona poniente. Su composición general es de cuarzo cristalino y calcedonia. Las texturas más abundantes y representativas de ésta etapa para las bandas de cuarzo son comb y zonal (en todos los subniveles) y de tipo flamboyante y plumosa para las bandas de calcedonia. Su contenido en sulfuros es constante en todos los subniveles y zonas. Ésta etapa presenta solamente una banda con brechamiento compuesto por fragmentos de calcedonia con textura flamboyante, matriz de cuarzo masivo y sulfuros diseminados (Figura 8.A).

Etapa II. Esta etapa se originó debido a un segundo evento de apertura en la veta San Carlos. Su desarrollo se dio en todos los subniveles y zonas, de manera similar a la etapa I (Figura 8.B). Se distingue de la etapa I ya que la presencia de brechamiento es mucho mayor, predominando en las fases iniciales de la etapa.

La composición general de los brechamientos durante la etapa II es de cuarzo y calcedonia, con texturas como zonal/comb y flamboyante/cockade, respectivamente. La presencia de texturas tipo lattice bladed o enrejado es mayor durante ésta etapa que en la etapa anterior ya que se puede observar en los primeros tres subniveles (SN200, SN270 y SN300) y en la zona poniente y central. Estas muestras contienen principalmente sulfuros de metales base de manera diseminada. La matriz de los brechamientos consiste mayormente de cuarzo masivo, al igual que en todas las etapas identificadas.

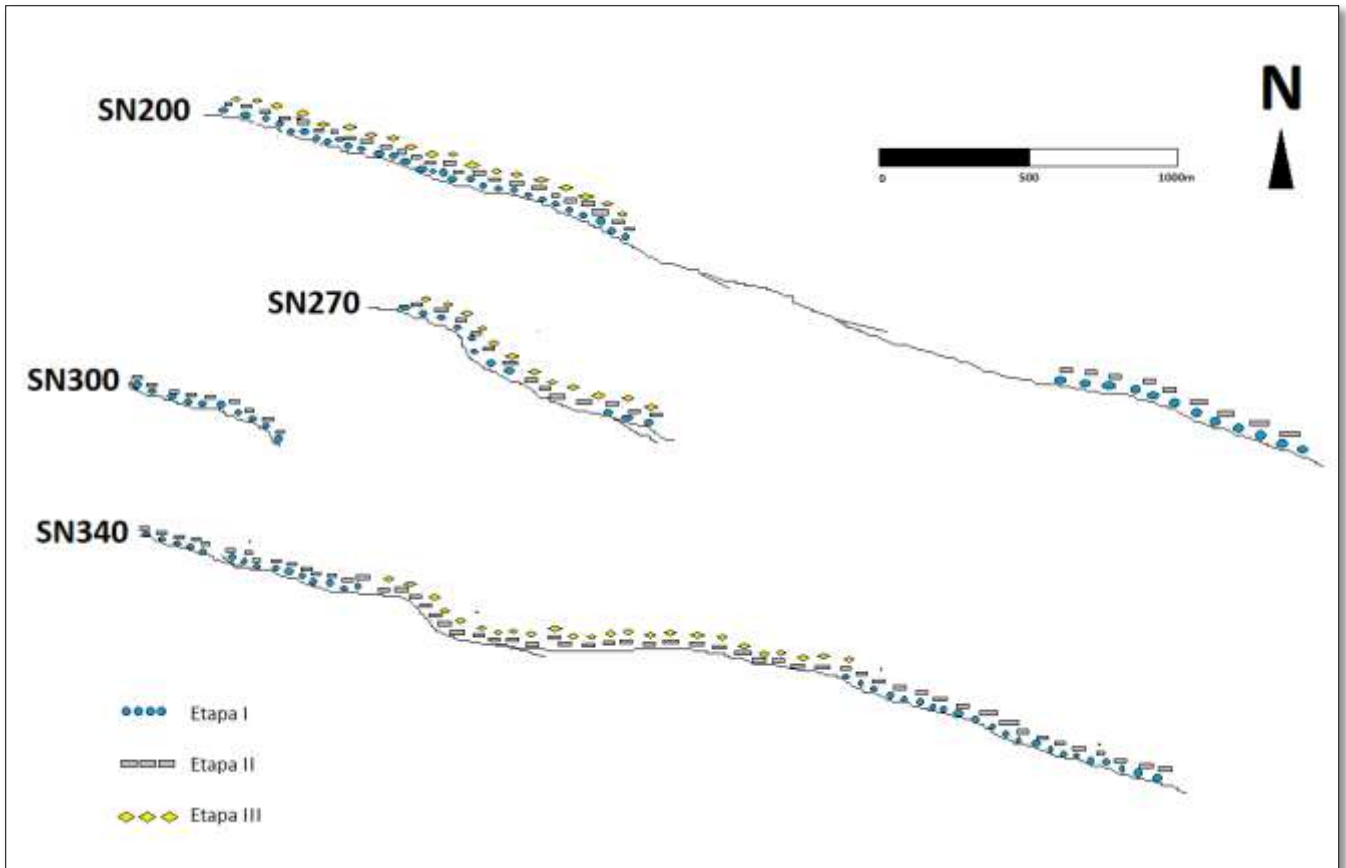


Figura 7. Distribución de las diferentes etapas de la estratigrafía de la veta (veta San Carlos). Cada línea corresponde a los subniveles en los que se obtuvieron muestras. Vista en planta proyectada al SN200.

La etapa II presenta también bandeamientos de cuarzo y calcedonia con texturas muy similares a las de la etapa I (mayormente comb y flamboyante). Su contenido en sulfuros es muy bajo y la mayor concentración de éstos se da en el SN300 (zona poniente) y SN340 (zona central), asociado a la presencia de texturas de tipo lattice bladed. Este tipo de asociación se puede observar también en los bandeamientos de la etapa I y los brechamientos de la etapa II (relación entre la presencia de cuarzo con textura lattice bladed e incremento en mineralización de sulfuros y sulfosales).

Etapa III. Este es el último evento de fracturamiento identificado en las muestras de la veta. Consiste principalmente en bandeamientos muy similares a los de las etapas anteriores, antecedido (al igual que la etapa II) por la

presencia de brechamientos. En estas muestras no se observa la presencia de texturas lattice bladed (salvo en la zona poniente y SN200). Esto podría coincidir con el decremento en el contenido de sulfuros. Esta etapa no se observó en todos los subniveles y zonas.

Los brechamientos se componen de fragmentos de cuarzo y calcedonia que presentan texturas tipo comb/zonal y plumosa/cockade, respectivamente. El contenido de sulfuros aumenta en las zonas y niveles en que se observa la presencia de textura tipo lattice bladed (SN200, zona poniente) (Figura 8.C).

En esta etapa se logra distinguir la presencia de Arsenopirita en conjunto con minerales como pirargirita, argentita y sulfuros de metales base como esfalerita, galena, calcopirita y pirita.

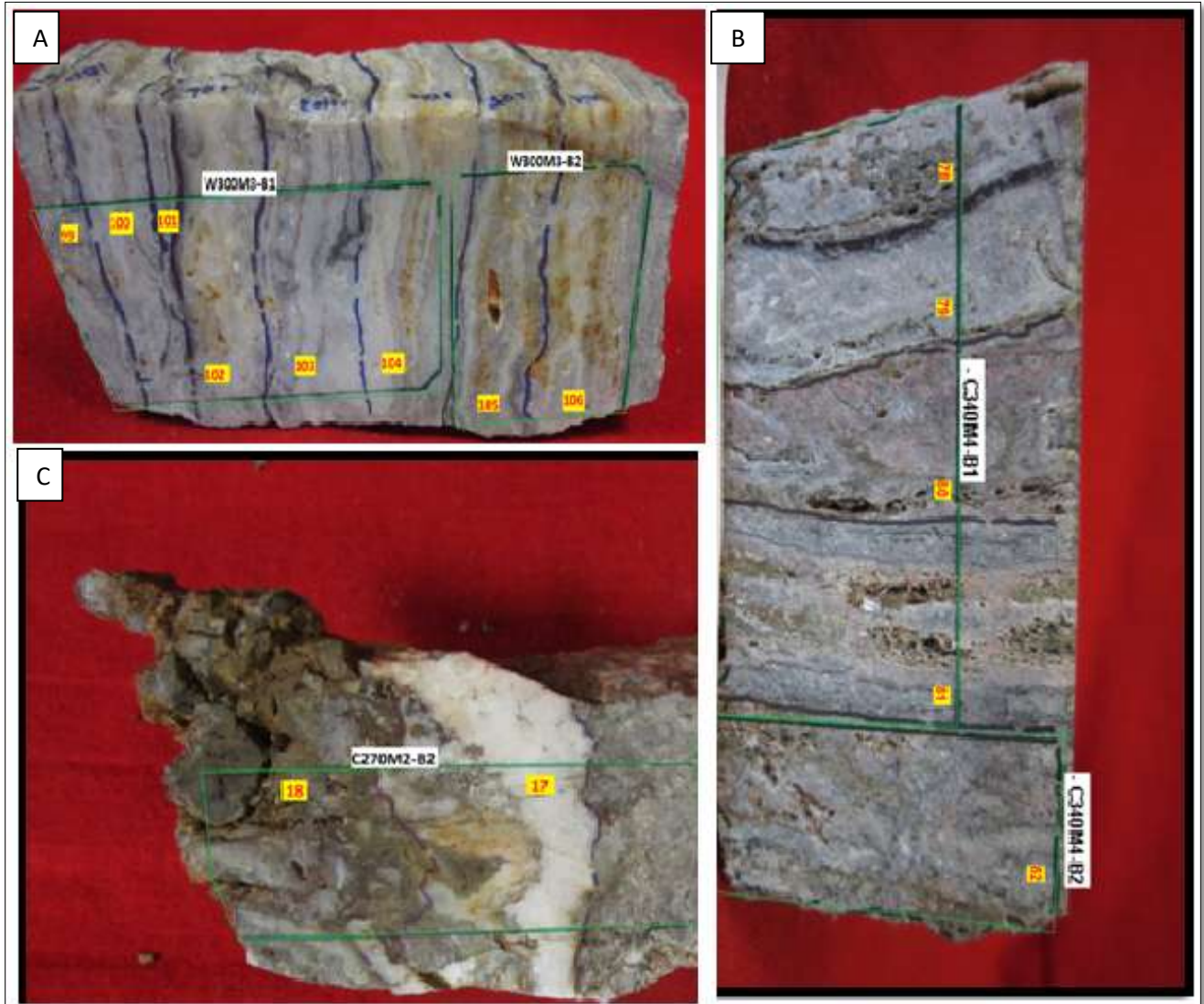


Figura 8. Etapas de la estratigrafía de la veta San Carlos. A. Bandeamientos coloformes – crustiformes de cuarzo y calcedonia pertenecientes a la etapa I. B. Bandeamientos y brechamientos con fragmentos de cuarzo y calcedonia en matriz de cuarzo masivo, con zonas que presentan texturas de ebullición (tipo lattice bladed) para la etapa II. C. Brechamiento de la etapa III con composición de fragmentos de cuarzo con diferentes texturas.

5. TEXTURAS DE CUARZO

Las texturas minerales primarias sobresalientes entre un total de 196 muestras analizadas de la Veta San Carlos (zonas poniente, centro y oriente; subniveles 200, 270, 300 y 340) son masiva, coliforme, comb y zonal. De igual forma sobresale la presencia de texturas asociadas a procesos de recristalización como mosaico y flamboyante así como texturas de reemplazamiento (lattice bladed y ghost-bladed)(Dong *et al.*, 1995).

Texturas primarias

En las muestras pertenecientes a la etapa I y III en la zona poniente (SN340, SN300 y SN200) y zona centro (SN340 y SN270), asociadas a minerales de cuarzo de la Veta San Carlos es donde se observa la mayor abundancia de texturas de tipo **coliforme** (Figura 9.A). Estas muestras no suelen contener inclusiones fluidas que sean de utilidad para analizarse mediante microtermometría (Bodnar *et al.*, 1985). Bodnar *et al.* (1985), Fournier (1985) y Roedder (1984) entre otros, han descrito este tipo de textura como indicativa del rápido depósito de cuarzo de calcedonia dentro de espacios abiertos como consecuencia de la apertura de fracturas y el descenso rápido de la presión y temperatura (enfriamiento) como consecuencia de la ebullición (Henley y Hughes (2000). Se asocia con sistemas epitermales someros y con un bandeamiento rítmico.

La textura de cuarzo **masivo** hace referencia a aquellas zonas o bandas en las que el cuarzo muestra una cierta homogeneidad en su textura, sin presentar rasgos de deformación alguna (Dong *et al.*, 1995) (Figura 9.B). Este tipo de textura es la más frecuente y abundante en la Veta San Carlos y se encontró dentro de las muestras pertenecientes a todas las etapas, especialmente en la etapa I en el subnivel 340 (zona poniente y centro) y en la etapa III zona poniente (SN300). Esta textura es predominante en las muestras que presentan brechamiento en las etapas II y III ya

que representa la matriz que soporta a los fragmentos. La presencia de ésta textura es característica de etapas de crecimiento primario del cristal analizado (p.e. cuarzo masivo) y se forma como consecuencia de una lenta precipitación dentro de espacios vacíos sin estar asociada a procesos de ebullición.

La mayoría de las inclusiones fluidas analizadas (FIA's con inclusiones primarias; L+V) fueron observadas dentro de muestras y etapas que presentaban cuarzo con textura **zonal** (Etapa I, principalmente en la zona central subnivel 340 y subnivel 270 y zona poniente en el subnivel 300). Este tipo de textura primaria es similar a la "comb" (Moncada *et al.*, 2012), con la diferencia de que el cuarzo zonal presenta una forma más eudral. Los cristales de cuarzo "**comb**" se caracterizan por un crecimiento dentro de espacios vacíos (perpendicular a las paredes de la veta) y por presentar formas menos eudrales que el cuarzo zonal (Adams, 1920). En conjunto con el cuarzo zonal, el cuarzo con textura comb es uno de los más abundantes en la mayoría de las etapas, zonas y niveles en la veta. (Figura 9.C, 9.D)

Bodnar *et al.* (1985) y Dong *et al.* (1995), entre otros autores, han descrito la textura **crustiforme** como una textura de tipo primario resultado de un proceso de ebullición en el que ocurren cambios repentinos en las condiciones del fluido (fluctuaciones rápidas y episódicas en la temperatura y presión). Dentro de la Veta San Carlos este tipo de textura en cuarzo ha sido observada de manera abundante en los subniveles más profundos (SN300 y SN340) para la etapa I y (SN200) para la etapa III, aunque en general está presente en todas las etapas de la veta (Figura 9.E)

La textura **cockade**, cuya abundancia es mayor durante la etapa I en la zona central (SN270), y de acuerdo con lo descrito por Adams (1920) y Dong *et al.* (1994), es una textura primaria que se encuentra ligada a zonas de brecha en las que los fragmentos de roca se encuentran rodeados por

capas concéntricas de cuarzo. Esta textura se asocia a los bandeamientos o fragmentos compuestos por calcedonia en todas las etapas de mineralización.

Texturas de recristalización

La presencia de texturas como la de tipo **mosaico** (jigsaw) ha sido interpretada por Camprubí y Albinson (2007) y Dong *et al.* (1995) como resultado de la recristalización de calcedonia masiva. En el presente trabajo no se identificaron muestras con ésta textura.

Los cristales de cuarzo con textura **plumosa** (Sander y Black, 1988) muestran extinción variable al observarse en el microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Camprubí y Albinson (2007) mencionan que éste tipo de sílice es una fase transicional dentro del ciclo de precipitación del sílice y que precipita después de la fase de sílice amorfo y previo a la fase tardía de cuarzo cristalino. Este tipo de textura fue observada principalmente en la etapa I en los niveles más profundos (SN270, 300 y 340) y en algunos fragmentos de los brechamientos de la etapa II y III (Figura 9.F, 9.G).

Texturas de reemplazamiento

La textura tipo “**lattice bladed**” se observó principalmente en las muestras pertenecientes a la etapa I y II. Esta textura se presenta en su mayoría como calcita reemplazada por cuarzo (Figura 9.H). La presencia de calcita laminada y el proceso de ebullición ha sido descrita por Simmons y Christenson (1994) como característica de sistemas hidrotermales, atribuyendo su forma a la velocidad de crecimiento de la calcita y a la pérdida de dióxido de carbono hacia la fase de vapor durante la ebullición. De acuerdo con Camprubí y Albinson (2007) éste tipo de textura (calcita laminada) es relativamente común en los depósitos epitermales de baja sulfuración en México, aunque según los autores no presenta

una relación directa con la presencia de menas minerales. En los niveles y zonas en que se presenta suele coincidir con la precipitación de sulfosales y sulfuros de plata.

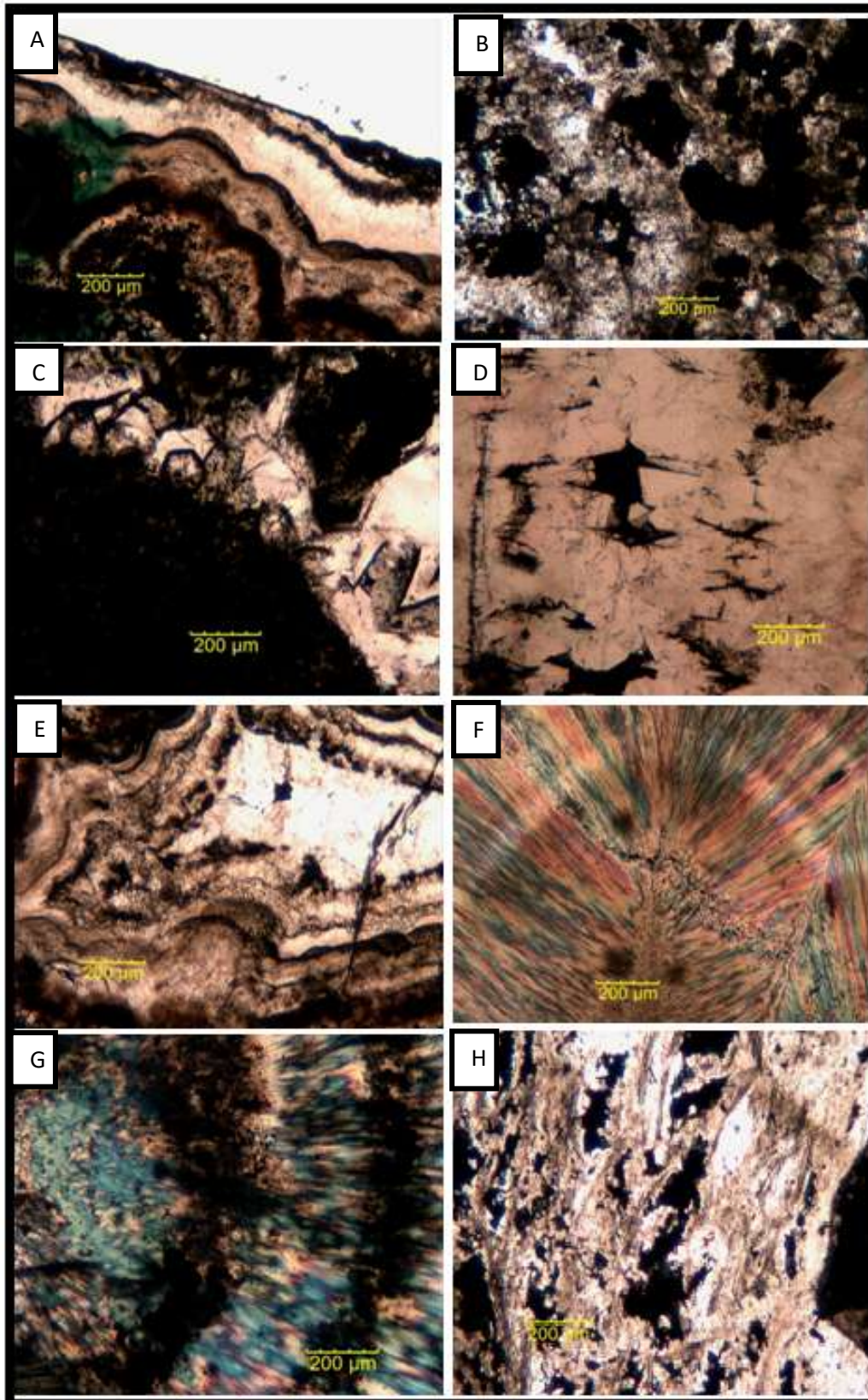


Figura 9. Texturas presentes en las muestras de las distintas etapas de la veta San Carlos. A. Calcedonia y cuarzo microcristalino con textura coloforme. B. Textura masiva en cuarzo. Esta textura se observa por lo general como matriz en los brechamientos de las etapas II y III. C. Cuarzo zonal. D. Cuarzo con textura tipo comb. (En éstas últimas texturas se localizaron la mayoría de las inclusiones fluidas para analizar por microtermometría). E. Calcedonia con textura coloforme-crustiforme. F. Calcedonio con textura flamboyante. G. Textura plumosa. H. Textura tipo lattice bladed (evidencia de procesos de ebullición) de cuarzo reemplazando calcita laminada.

6. MINERALIZACIÓN

Los minerales de la Veta San Carlos consisten en sulfuros y sulfosales con forma principalmente subedral. El tamaño de estos minerales es variable pero en general son de tamaño medio y se encuentran distribuidos en las bandas y brechamientos en la etapa I y en menor medida en la etapa II y III, siendo la distribución en las últimas dos etapas mayormente como disseminaciones en cuarzo y calcedonia. Los sulfuros y sulfosales hipogénicos que se identificaron en las muestras analizadas, en orden de abundancia, son: pirita, esfalerita, galena, pirargirita, argentita, tetraedrita, calcopirita, arsenopirita. En la fase supergénica se identificó la presencia de hematita.

Paragénesis

La secuencia paragenética de los minerales de mena y ganga es muy similar en las tres etapas (Figuras 10-12).

La etapa I contiene tres fases hipogénicas distintas de sulfuros y sulfosales en los diferentes bandeamientos y brechamientos que la componen. La primera fase se encuentra compuesta por pirita eudral en forma de bandas y en menor medida como disseminaciones (Figura 13.A). La segunda fase de precipitación mineral de la etapa I consiste en sulfuros de metales base, así como sulfosales de plata. Esta fase presenta esfalerita subedral reemplazando pirita y como intercrecimiento con ésta, además de que se observa arsenopirita asociada a esfalerita y pirita en el SN200. De igual forma, la presencia de galena se observa reemplazando a la pirita y en algunas muestras de manera inversa. La mineralización de calcopirita se observa en esfalerita como inclusiones (Figura 13.B, 13.C). En la tercera fase se observa la presencia de sulfuros y sulfosales de plata, como argentita, tetraedrita y pirargirita en todos los subniveles (en menor medida en el SN300 y solo en la zona poniente). Estas últimas se localizan como inclusiones dentro de galena principalmente y en algunas zonas asociadas a pirita (Figura 13.D, 13.E).

La última fase que se observa en la etapa I se encuentra compuesta por hematita disseminada reemplazando a pirita en el SN270 (zona central) y SN 200 (zona poniente) (Figura 13. F).

La etapa II contiene mineralización muy similar a la de la etapa I distribuida en tres fases. La presencia de pirita eudral disseminada compone la etapa inicial de mineralización de ésta etapa. La segunda fase es muy similar a la de la etapa I ya que contiene de igual forma esfalerita, galena, arsenopirita (en brechamientos del SN200 – zona poniente) y en menor medida calcopirita. La esfalerita es reemplazada principalmente por pirita y galena y presenta inclusiones de calcopirita en el SN200 y SN300 (zona poniente). La mineralización de galena también es reemplazada por esfalerita y pirita en las muestras del SN270 (zona central). La última fase de la etapa II se destaca por presentar sulfosales y sulfuros de plata como tetraedrita, pirargirita y argentita (respectivamente). Estas se presentan como inclusiones principalmente en galena.

La etapa III no presenta la misma abundancia de la primera fase de las etapas I y II. La fase inicial incluye pirita eudral en forma de bandas y en mayor medida disseminada, además de arsenopirita en las muestras del SN200. La fase siguiente se compone por sulfuros de metales base como esfalerita, calcopirita y galena; los cuales se encuentran distribuidos en bandas y disseminaciones. La esfalerita muestra reemplazamiento por galena y pirita y algunas veces intercrecimiento con pirita; presenta calcopirita como inclusiones. La galena es reemplazada en algunas zonas por pirita y por sulfosales de la siguiente fase. La tercera fase se compone por sulfosales de plata (pirargirita) y sulfuros de plata (argentita). La última fase se compone por hematita en forma de espada (textura de exfoliación), de manera similar a las primeras dos etapas oxidada a la mineralización de pirita en la primera fase.

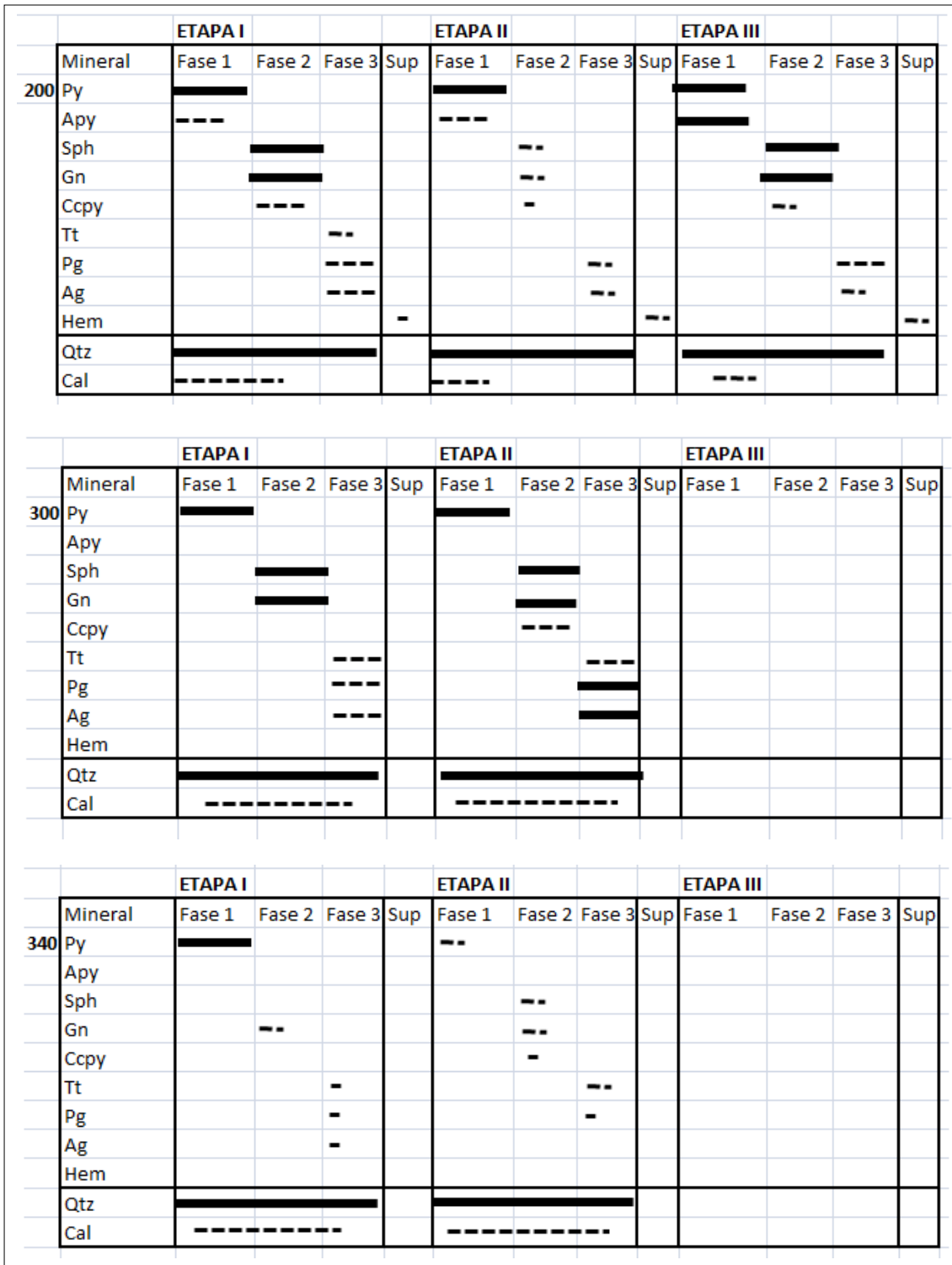


Figura 10. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN200, 300 y 340 de la zona poniente de la veta San Carlos. *Py=Pirita, Apy=Arsenopirita, Sph=Esfalerita, Gn=Galena, Ccpy=Calcopirita, Tt=Tetraedrita, Pg=Pirargirita, Ag=Argentita, Hem=Hematita, Qtz=Cuarzo, Cal=Calcedonia.

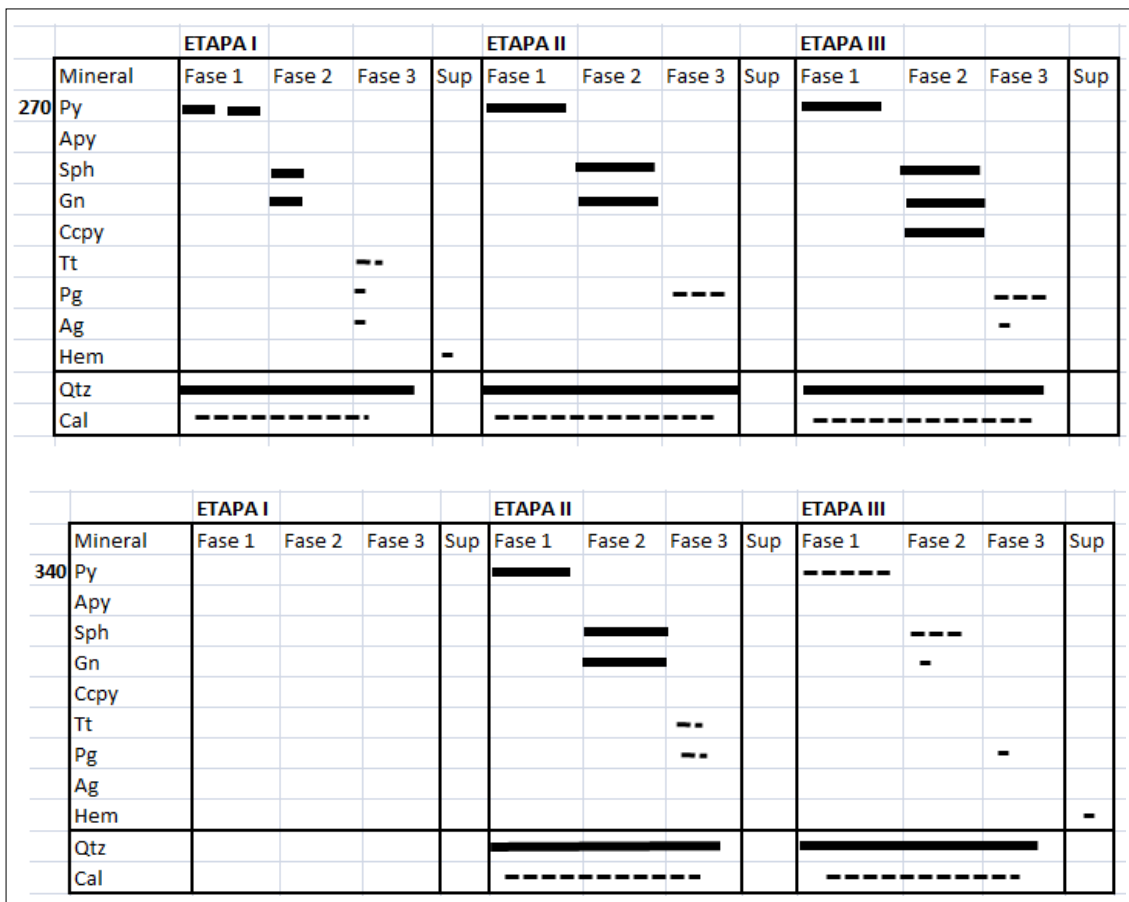


Figura 11. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN270 y 340 de la zona central de la veta San Carlos.
 *Py=Pirita, Apy=Arsenopirita, Sph=Esfalerita, Gn=Galena, Ccpy=Calcopirita, Tt=Tetraedrita, Pg=Pirargirita, Ag=Argentita, Hem=Hematita, Qtz=Cuarzo, Cal=Calcedonia.

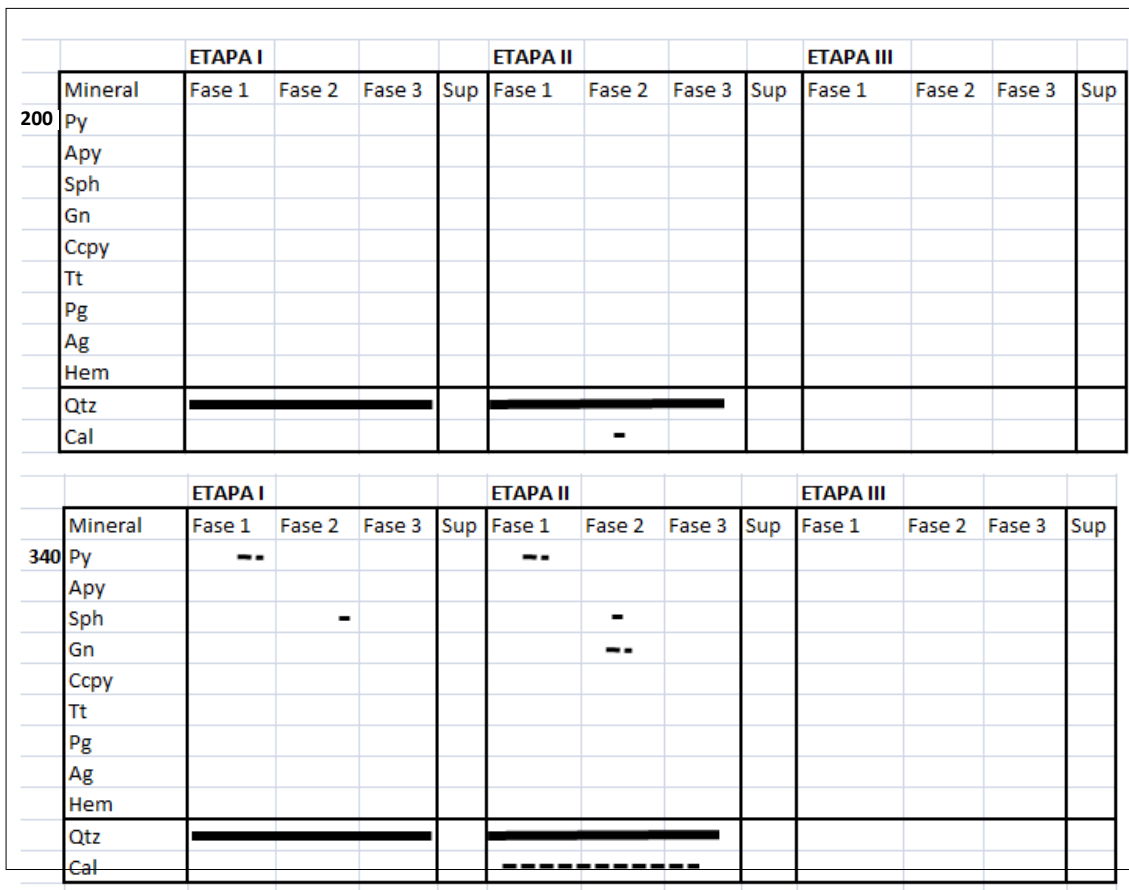


Figura 12. Paragénesis mineral que muestra las fases correspondientes a las etapas I, II y III en los SN200 y 340 de la zona oriente de la veta San Carlos.
 *Py=Pirita, Apy=Arsenopirita, Sph=Esfalerita, Gn=Galena, Ccpy=Calcopirita, Tt=Tetraedrita, Pg=Pirargirita, Ag=Argentita, Hem=Hematita, Qtz=Cuarzo, Cal=Calcedonia.

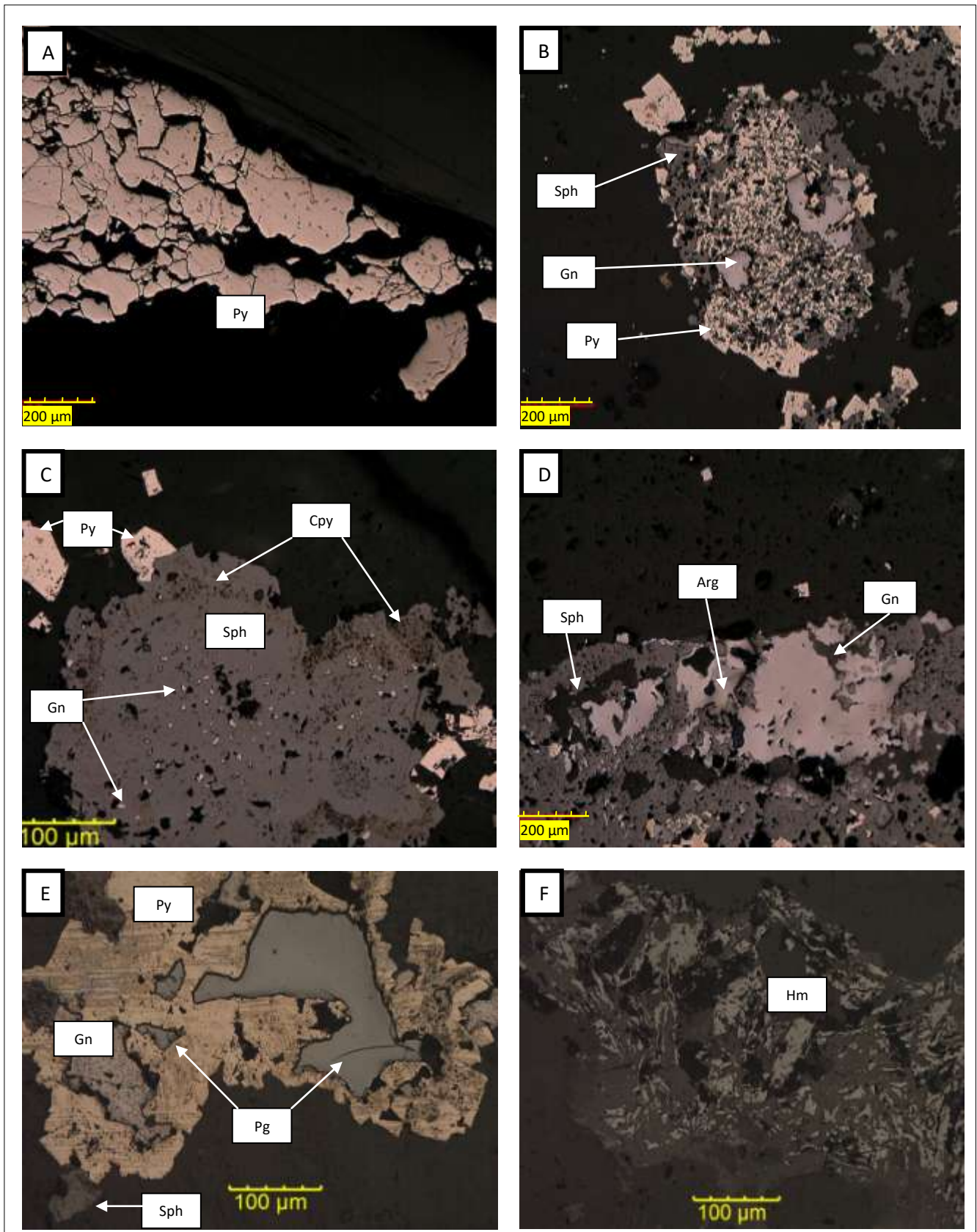


Figura 13. Fotomicrografía de las texturas minerales más comunes en la veta San Carlos. A. Brechamiento de pirita (Py) perteneciente a la fase 1 en ganga de cuarzo. Etapa II (SN300 – zona poniente). B. Granos de pirita (Py) y galena (Gn) reemplazando a esfalerita (Sph) en la fase 2. Etapa I (SN200 – zona poniente). C. Esfalerita (Sph) de la fase 2 con inclusiones de galena (Gn) y calcopirita (Cpy). Se observan algunos cristales euhedrales de pirita (Py) en los bordes de la esfalerita. Etapa II (SN300 – zona poniente). D. Esfalerita y la fase 3 con reemplazamiento de galena. Dentro de la galena se observan inclusiones de argentita (Arg). Etapa III (SN340 – zona central). E. Grano de pirita eudral con reemplazamiento de galena y pirargirita. Rodeado por granos de esfalerita. Fase 3. Etapa II (SN200 – zona poniente). F. Fase supergénica. Mineralización de hematita (Hm) con forma de espada (textura de exfoliación). Etapa III (SN340 – zona central). Py= pirita, Sph = esfalerita, Gn = galena, Cpy = calcopirita, Arg = argentita, Pg = pirargirita, Hm = hematita.

Zonación mineral

La abundancia mineral a lo largo de la veta es muy similar en todos los niveles y zonas estudiadas, sin embargo existen algunas diferencias que muestran una tendencia a presentar mayor concentración de sulfosales y sulfuros de plata en los subniveles 200, 270 y 300, así como en la zona poniente. Para el caso de la arsenopirita, se observa casi en su totalidad en los subniveles más someros SN200 (zona poniente). En cuanto a su distribución, si existe un cierto favoritismo de parte de las sulfosales y sulfuros de plata por la mineralización de galena y pirita. En todos los niveles y zonas se puede observar que la galena presenta en ciertas áreas inclusiones de tetraedrita, pirargirita y argentita; en algunas otras zonas estos minerales de plata se encuentran asociados a pirita. (Figura 14)

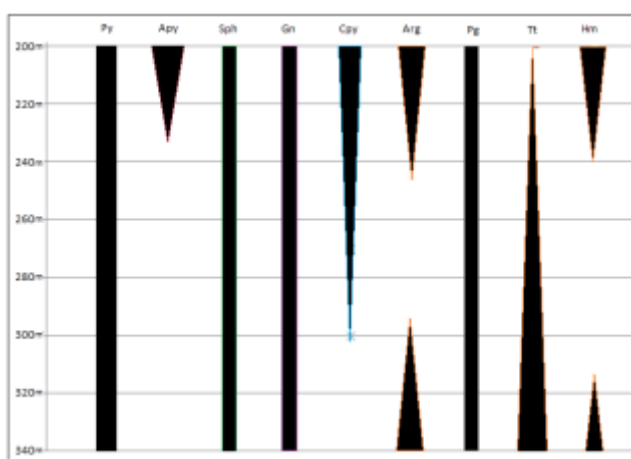


Figura 14. Zonificación mineral a lo largo de la extensión vertical de la veta San Carlos. El espesor de las líneas marca la abundancia relativa de los minerales. Py= pirita, Apy = arsenopirita, Sph = esfalerita, Gn = galena, Cpy = calcopirita, Arg = argentita, Pg = pirargirita, Tt = tetraedrita, Hm = hematita.

Alteración Hidrotermal– Patrones de Alteración

Las asociaciones de alteración identificadas en las muestras colectadas del yacimiento epitermal de la Veta San Carlos son principalmente fílica y argílica, las cuales se encuentran distribuidas espacialmente de manera vertical dentro de la roca encajonante (Fm. Plateros y Fm. Chilitos).

Alteración fílica. Se encuentra en todos los subniveles analizados dentro de la roca encajonante

(en menor medida en el SN300-zona poniente) y en las zonas central y poniente. Se caracteriza por illita e illita-smectica. Este tipo de alteración se asocia con fluidos con un pH con un rango de 4-6 y temperaturas entre 100 – 250°C (incrementándose el contenido de illita a mayor temperatura). (Stoffregen, 1987; Reyes, 1990; White y Hedenquist, 1995). ANEXO B

Alteración argílica. Esta se identificó en el subnivel más profundo con respecto a la superficie (SN340), en la roca encajonante de las zonas central y poniente, formando caolinita y calcedonia. Ambos minerales derivan de la acción de fluidos con pH moderadamente bajo (pH entre 4-5 para caolinita y pH<2 para calcedonia) (Stoffregen, 1987; Reyes, 1990; White y Hedenquist, 1995) y condiciones de baja temperatura (<150-200°C para caolinita y 100-200°C para calcedonia). ANEXO B

Alteración supergénica. Se distingue por la presencia de óxidos de hierro representados por hematita. En las rocas encajonantes se presenta en los subniveles 200 y 300 (zona poniente) y SN340 (zona central). Su origen en la zona de estudio (veta epitermal San Carlos) podría deberse a la liberación de hierro por la disolución de sulfuros (Ej. pirita o esfalerita).

Las asociaciones de alteración hidrotermal identificadas en las rocas encajonantes de la zona de estudio son el resultado de diferentes procesos y propiedades tanto de los fluidos como de las rocas que encajonan al yacimiento epitermal de la Veta San Carlos. La variación mineral de ambos tipos de asociaciones y su distribución entre los diferentes subniveles depende en gran medida de las propiedades y composición de la roca (Fm. Plateros y Fm. Chilitos). La temperatura y composición de los fluidos hidrotermales juega también un papel de vital importancia en el desarrollo de las asociaciones de alteración previamente descritas, y derivado de esto se puede inferir un cambio en las propiedades de los fluidos que dieron origen a los minerales de alteración de las asociaciones fílica y argílica. ANEXO B

7. PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

En el presente estudio se analizaron 16 láminas doblemente pulidas y alrededor de 180 fragmentos de muestras de cristales de cuarzo, calcita y esfalerita representativos de los bandeamientos que conforman las tres etapas de mineralización identificadas.

Las inclusiones fluidas que se tomaron en cuenta para el análisis microtermométrico presentan tamaños entre 5 y 20 micras (Figura 15.A). Se distinguió entre inclusiones primarias, secundarias y pseudosecundarias utilizando el criterio de Roedder (1984). Con base en esto, el análisis se llevó a cabo solo en inclusiones primarias o pseudosecundarias, aunque gran parte de la información se obtuvo de inclusiones pseudosecundarias. Las inclusiones identificadas como primarias fueron aquellas en las que su distribución se observó a lo largo de zonas de crecimiento en cuarzo zonal o hexagonal (Figura 15.A).

En cuanto a los tipos de inclusiones que se analizaron fueron bifásicas (ricas en líquido o L+V) con grados de relleno promedio de 0.80 a 0.85 (80%-85% líquido y 20%-15% vapor) e inclusiones ricas en vapor, en las que no se logró distinguir el porcentaje de líquido contenido en éstas (Figura 15.C). Se localizan dentro de las bandas o brechamientos de cuarzo en su mayoría y en menor medida se observaron en cristales de calcita y esfalerita. En algunas zonas se logró identificar la presencia de ambos tipos de inclusiones (ricas en líquido y ricas en vapor), demostrando la ocurrencia del proceso de ebullición durante la formación de las inclusiones y probablemente de la formación de las bandas de cuarzo y la mineralización (Bodnar *et al.*, 1985) (Figura 15.C).

En algunas muestras se observó una gran variación en los grados de relleno dentro de las inclusiones fluidas (no asociado a atrapamiento heterogéneo), lo que significaría que habrían estado expuestas a procesos de cambio post-atrapamiento o

estrangulación. Estas muestras no se tomaron en cuenta para el análisis ya que su contenido no es representativo de las condiciones de los fluidos de formación (Figura 15.E).

Inclusiones fluidas en cuarzo

Como se mencionó anteriormente, esta fase mineral es la que contiene la mayor cantidad de inclusiones fluidas y de la que se obtuvieron la mayoría de los valores durante el análisis microtermométrico. La forma de las inclusiones fluidas identificadas en cuarzo son en general sub-redondeadas a irregulares las cuales representarían temperaturas de homogenización entre los 230°C y 250°C de acuerdo con Bodnar *et al.* (1985) y Simmons *et al.* (1988). Otra forma que se observó en estos bandeamientos de cuarzo es la de cristal negativo (Figura 15.D).

La abundante presencia de calcedonia en los bandeamientos, al igual que en las muestras de la veta Santo Niño (Simmons *et al.*, 1988) provocó que la búsqueda de inclusiones fluidas apropiadas para el análisis microtermométrico fuera extensiva. Sin embargo, se logró identificar una gran cantidad de inclusiones medibles dentro de diferentes cristales de cuarzo en los bandeamientos con textura tipo “comb” y zonal principalmente. No se lograron identificar las temperaturas eutécticas (Te) durante el análisis microtermométrico en las muestras de cuarzo.

Inclusiones en esfalerita

Al igual que las inclusiones fluidas identificadas en los cristales de calcita, en la esfalerita se observan claramente muy pocas inclusiones fluidas. En general las inclusiones que se presentan son muy oscuras o muy pequeñas para ser medidas. A pesar de esta situación se pudieron analizar algunas inclusiones fluidas y se pudieron obtener datos de temperaturas de homogenización (Th) y de temperaturas de fusión del hielo (Tmi). La forma de estas inclusiones son en general subredondeadas y son de tipo pseudosecundarias (PS) y bifásicas (ricas en líquido) (Figura 15.F).

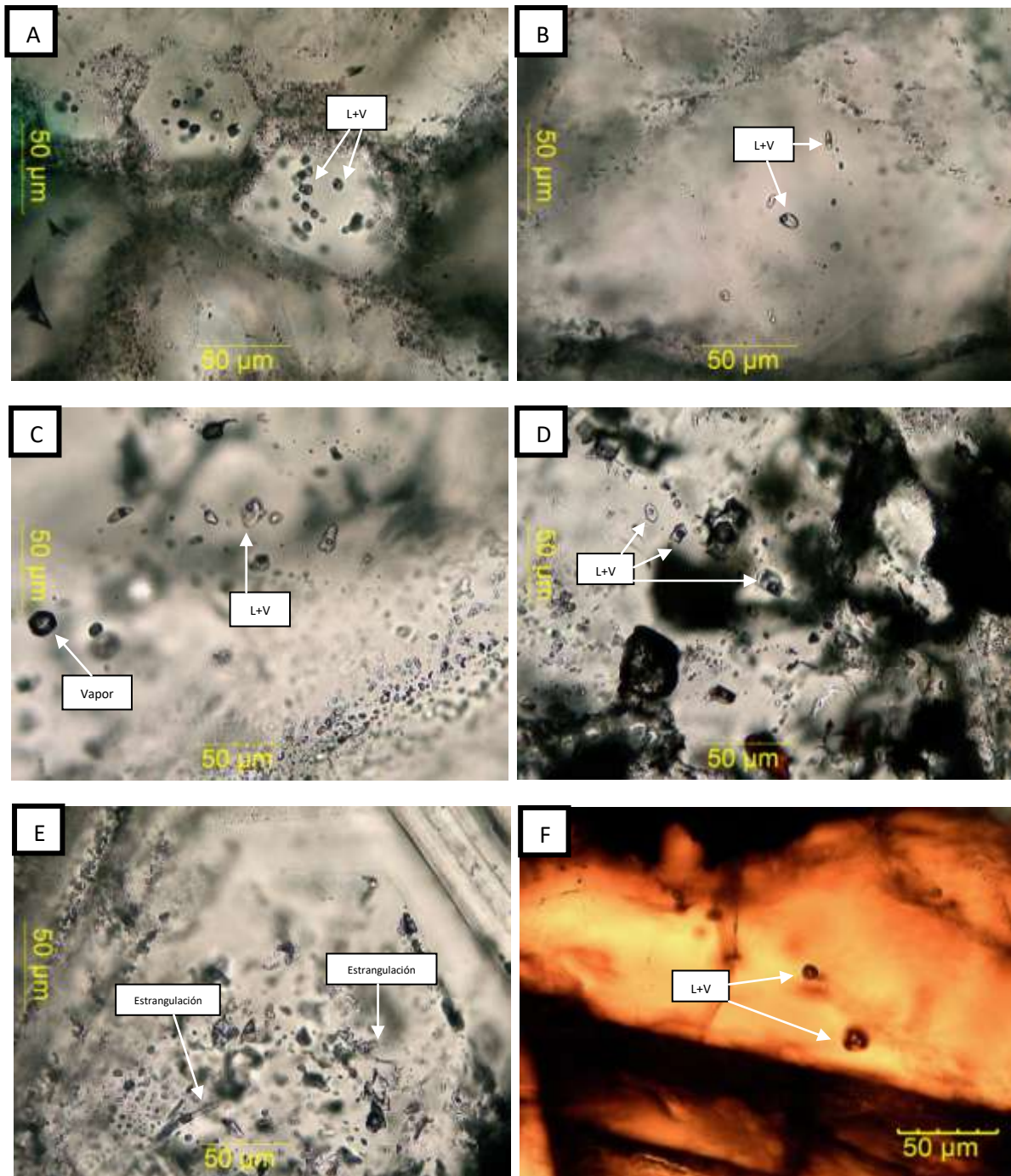


Figura 15. A. Inclusiones fluidas bifásicas (L+V) con forma subredondeada dentro de cuarzo hexagonal (SN270-zona central. Etapa I). B. Inclusiones fluidas subredondeadas (SN270 – zona central. Etapa III). C. Asociación de Inclusiones Fluidas con atrapamiento heterogéneo (bifásicas L+V y solo vapor) (SN270 – zona central. Etapa III). D. Inclusiones fluidas bifásicas con forma de cristal negativo (SN340 - zona central. Etapa II). E. Inclusiones fluidas primarias con cambios post-atrapamiento (p.e. estrangulación) y con inclusiones en las zonas de crecimiento de un cristal de cuarzo hexagonal (SN340 – zona poniente. Etapa I). F. Inclusiones fluidas bifásicas con forma subredondeada dentro de un cristal de esfalerita (SN340 – zona central. Etapa III). *L=Líquido, V=Vapor.

Temperaturas de homogenización

Las temperaturas de homogenización que se obtuvieron de las muestras analizadas en cuarzo presentan un rango entre los 140° y los 270°C, siendo el nivel intermedio (SN270 zona central) y el SN340 (zona poniente) los que presentan un incremento con respecto a los niveles más someros y profundos (Tabla 1).

En general la variación de temperatura entre los distintos subniveles y zonas no es muy notoria, aunque se observa que las muestras de la zona poniente y central presentan valores máximos promedio de 250°C y los de la zona oriente muestran temperaturas promedio máximas de homogenización de 220°C (con excepciones que alcanzan los 250°C o más) (Figuras 16.A -D).

Temperaturas de fusión del hielo (T_{mi})

Los valores obtenidos para las temperaturas de fusión del hielo (T_{mi}) presentan un rango promedio entre -0.3° y -10 °C; con un promedio de -2.3°C. Las temperaturas T_{mi} en esfaleritas son en promedio de -0.5°C (Figuras 16.A-D). Es importante señalar que en ninguna de las mediciones realizadas se observaron caltratos (Collins, 1979)

Composición de las inclusiones fluidas

Con base en las ecuaciones de estado para el sistema H₂O – NaCl presentadas por Bodnar (1993) se calcularon las salinidades de los fluidos atrapados. En general los valores de salinidad para todas las muestras presentan un promedio de 3.8 wt% NaCl equiv. Con un rango entre 0 y 18 wt% NaCl equiv (Tabla 1).

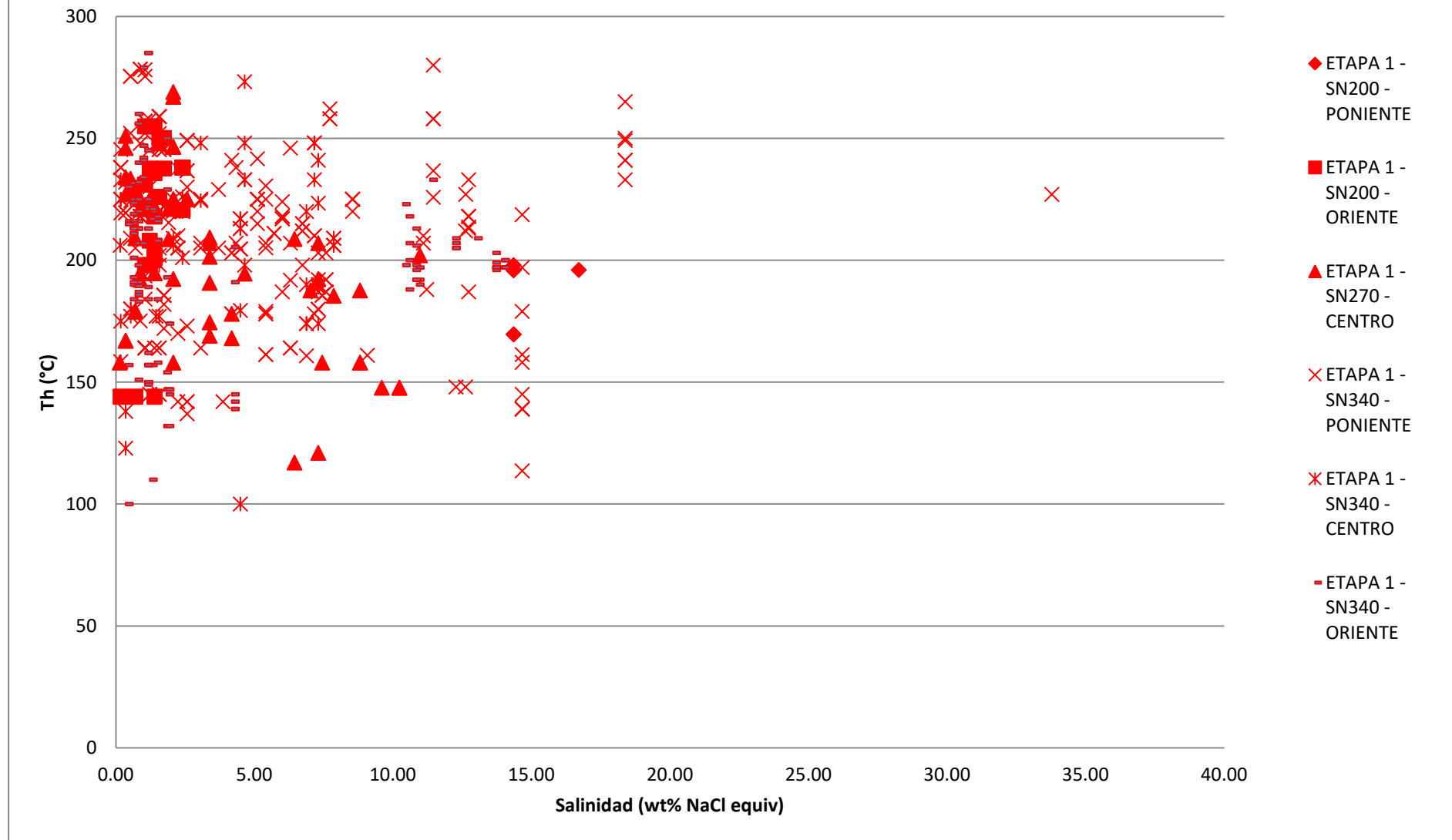
La densidad (Con un rango entre 0.7 y 1.1 g cm⁻³) de los fluidos atrapados se calculo comparando los resultados de Th vs salinidad junto con un diagrama de valores de densidad para soluciones en el sistema H₂O-NaCl presentado por Wilkinson (2001) (Figura 17).

Tabla 1. Valores promedio de temperaturas (Th, Tm) y salinidades obtenidas de las FIA's analizadas en las muestras de la Veta San Carlos.

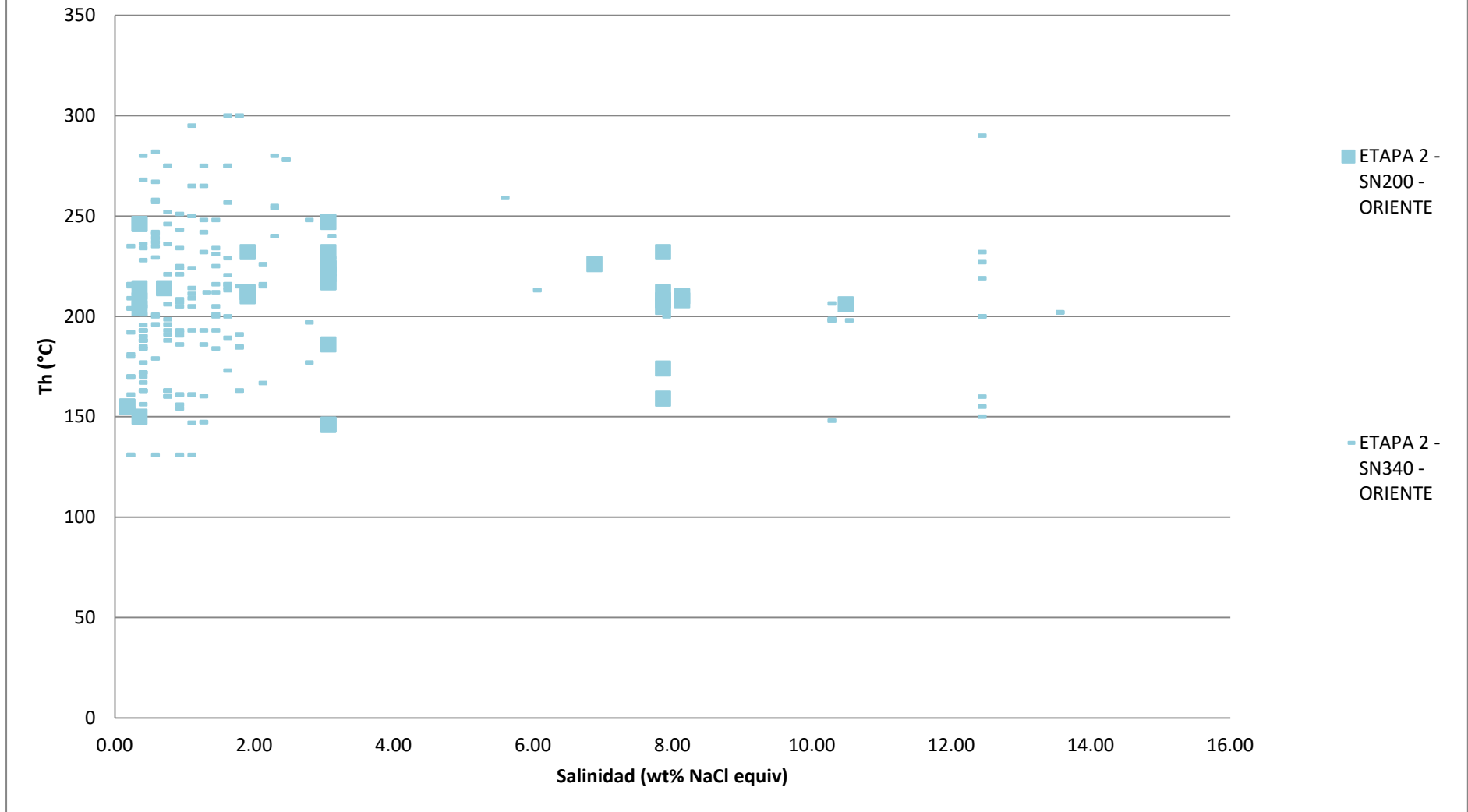
ETAPA	BANDA	MUESTRA	MINERAL	FIA#	ORIGEN DE IF	TIPO DE IF	Th rangos	Th promedio	Tm rangos	Tm promedio	Salinidad rangos (wt%NaCl)	Salinidad promedio (wt%NaCl)	Nivel de muestreo
1	26	W200M1B1	CUARZO	2	P-PS	L+V	202 a 215	208.5	-2 a -.37	-.28	.35 a .66	.51	200
1	28	W200M1B1	CUARZO	2	P-PS	L+V	190.92	190	-9.5 a -10.6	-10	13.4 a 14.6	14	200
2	31	W200M1B1	CUARZO	1	P	L+V	200	200	-3.31	-3.31	5.4	5.4	200
2	33	W200M2B2	CUARZO	1	P-PS	L+V	200.6	200	-4.78	-4.78	7.56	7.56	200
1	142	142-E	CUARZO	2	P, P-PS	L+V	211.2 a 236.2	223.7	-.9 a -.64	-.77	1.12 a 1.156	1.14	200
1	143	143-E	CUARZO	1	P-PS	L+V	203.98	203.98	-.8	-.8	1.39	1.39	200
2	145	145-E	CUARZO	1	P-PS	L+V	144	144	-.43	-.43	.75	.75	200
2	147	147-E	CUARZO	2	P	L+V	232.2 a 235.73	233.9	-1.4 a -.73	-1.07	1.27 a 2.4	1.84	200
2	23	C270M3B2	CUARZO	3	P	L+V	191.98 a 257.33	224.65	-1.15 a -2	-1.575	1.99 a 3.38	2.68	270
1	109	W340M1B1	CUARZO	1	P, P-PS	L+V	209.25	209.25	-6	-6	9.13	9.13	340
1	111	W340M1B1	CUARZO	2	P	L+V	187.1 a 212.28	199.69	-4.05 a -8.58	-5.63	6.52 a 12.36	9.44	340
1	139	W340M3B2	CUARZO	2	P-PS	L+V	241 a 249.1	245	-.67 a -1.44	-1.05	1.17 a 2.4	1.78	340
2	59	C340M1B2	CUARZO	1	P-PS	L+V	207.39	207.39	-3.15	-3.15	5.02	5.02	340
1	158	158-E	CUARZO	5	P-PS	L+V	165.7 a 211.8	188.7	0 a -9.85	-4.9	.04 a 13.7	6.8	340
1	164	164-E	CUARZO	4	P	L+V	140.1 a 233	186.55	-.47 a -2.5	3.6	.08 a 4.18	2.5	340
1	177	177-E	CUARZO	2	P-PS	L+V	201.3 a 212.03	207	-.33 a -.38	-.35	.58 a .67	.625	340
1	178	178-E	CUARZO	2	P-PS	L+V	185.16 a 214.2	199	-.37 a -.44	-.4	.64 a .77	.705	340
1	179	179-E	CUARZO	2	P-PS	L+V	215.6	215.6	-.7 a -.8	-.75	1.22 a 1.39	1.305	340
2	151	151-E	CUARZO	1	P-PS	L+V	204.46	204.46	-1.99	-1.99	3.35	3.35	200
2	152	152-E	CUARZO	3	P-PS	L+V	190.13 a 210.57	200.2	-1.17 a -3.94	-2.55	1.8 a 6.24	4.02	200
3	18	C270M2B2	CUARZO	2	P, P-PS	L+V	206.4 a 225.4	215.9	-2.86 a -3.34	-3.1	4.75 a 5.42	5.08	270
3	17	C270M2B3	CUARZO	2	P	L+V	206.34 a 209.56	207.9	-.74 a -.8	-.77	1.29 a 1.39	1.34	270
2	135	W340M3B1	CUARZO	2	P-PS	L+V	167.79 a 250	209.2	-1.54 a -10.7	-6.12	2.62 a 14.66	8.64	340
2	136	W340M3B1	CUARZO	1	P	L+V	185.6	185.6	-7.8	-7.8	11.45	11.45	340
1	138	W340M3B2	CUARZO	5	P, P-PS	L+V	143.8 a	176.15	-2.86 a -	-8.78	4.72 a	11.55	340

							208.5		14.7		18.38		
3	65	C340M2B1	CUARZO	1	P-PS	L+V	178.2	178.2	0.4	0.4	0.72	0.72	340
3	66	C340M2B2	CUARZO	2	P-PS	L+V	200.6 a 230.56	215.58	-2.91 a - 4.49	-3.37	4.77 a 7.15	5.96	340
3	67	C340M2B2	CUARZO	2	P-PS	L+V	215.23 a 217.8	216.515	-1.1 a -1.33	-1.18	0.18 a 2.3	1.24	340
3	69	C340M2B2	CUARZO	2	P-PS	L+V	148.23 a 202.4	175.32	-.43 a -2.7	-1.57	0.74 a 4.49	2.62	340
2	167	167-E	CUARZO	2	P, P-PS	L+V	203.9 a 238.8	221.35	-.26 a -.54	-.4	.45 a .94	.7	340
2	170	170-E	CUARZO	5	P-PS	L+V	204.4 a 268.3	236.35	-.29 a -.83	-.28	.5 a 1.45	.98	340
2	175	175-E	CUARZO	3	P-PS	L+V	190.5 a 219.6	204.8	-.9 a -1.05	-.98	1.56 a 1.82	1.7	340
1	176	176-E	CUARZO	3	P-PS	L+V	183.7 a 210.7	197.2	-.36 a -1.83	-1.09	.629 a 3.05	1.84	340
2	149	149-E	CUARZO	1	P-PS	L+V	196.6	196.6	-.875	-875	1.523	1.523	200
1	05	C270M1B2	CUARZO	3	P-PS	L+V	163.93 a 178.21	171.07	-3.9 a -4.61	-4.25	6.12 a 7.18	6.65	200
2	15	C270M2B1	CUARZO	1	P-PS	L+V	190.66	190.66	-.44	-.44	.76	.76	200
1	117	W340M1B2	CUARZO	5	P, P-PS	L+V	218 a 255.4	236.7	-.3 a -.65	-.47	.52 a 1.13	.82	340
2	119	W340M1B2	CUARZO	2	P	L+V	219.7	219.7	-.9 a -2.2	-1.55	1.56 a 3.66	2.61	340
2	120	W340M1B2	CUARZO	1	P	L+V	255.71	255.7	-.6	-.6	1.05	1.05	340
2	124	W340M2B1	CUARZO	2	P-PS	L+V	169.94 a 209.9	189	-1.15 a - 2.63	-1.89	1.98 a 4.32	3.15	340
2	131	W340M2B2	CUARZO	1	P	L+V	187.78	187.78	-4.82	-4.82	7.61	7.61	340
2	173	173-E	CUARZO	2	P-PS	L+V	191.18 a 205.82	198.49	-.02 a -6.83	-3.18	1.8 a 10.27	6.04	340
2	174	174-E	CUARZO	5	P, P-PS	L+V	141.4 a 188.53	164.9	-.2 a 2.95	-1.58	.35 a .96	.66	340

ETAPA 1 - SN200/270/340 / PONIENTE/CENTRO/ORIENTE

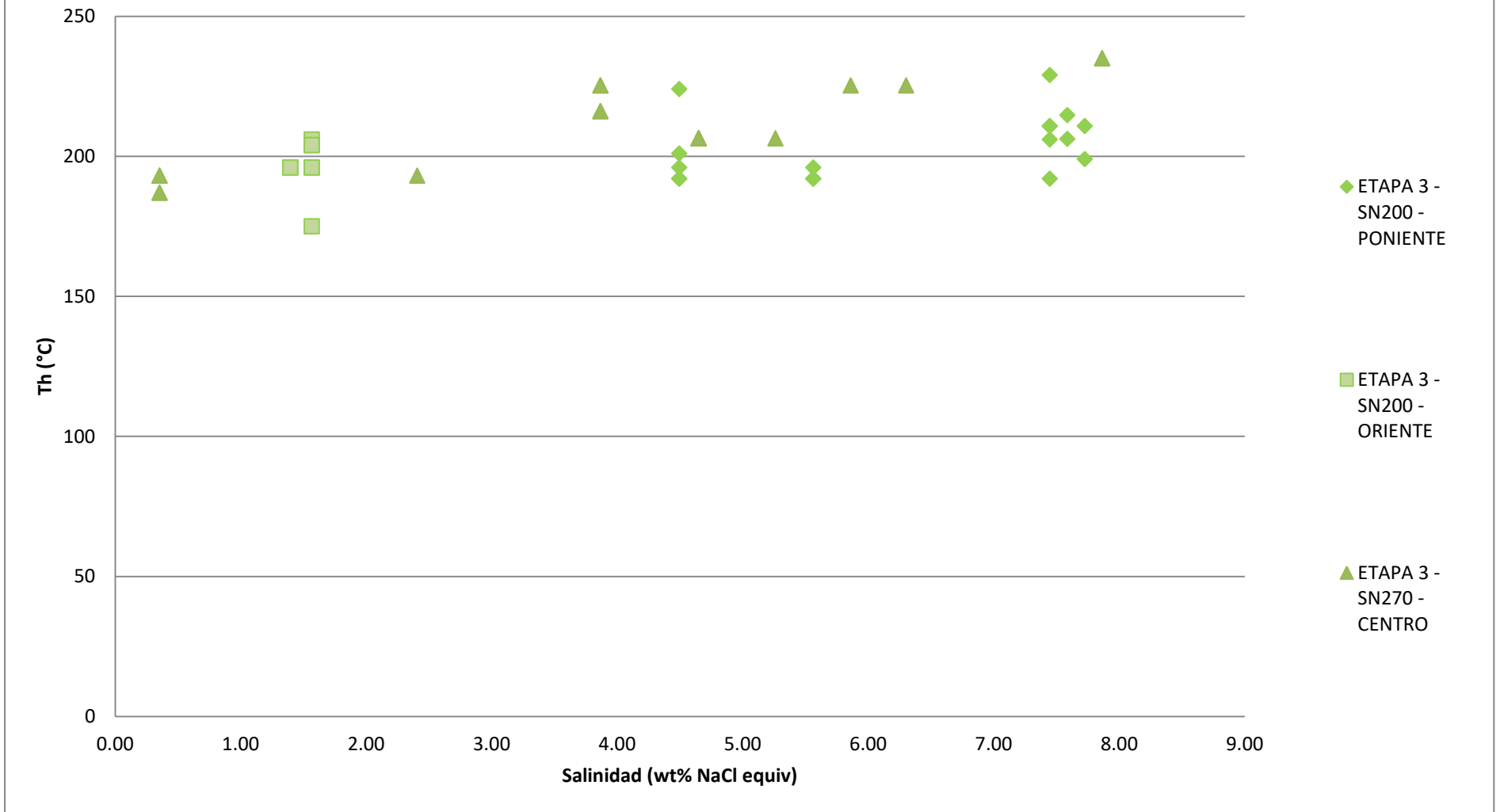


ETAPA 2 - SN200/340 - ORIENTE



ETAPA 3 - SN200/270 - PONIENTE-ORIENTE/CENTRO

C



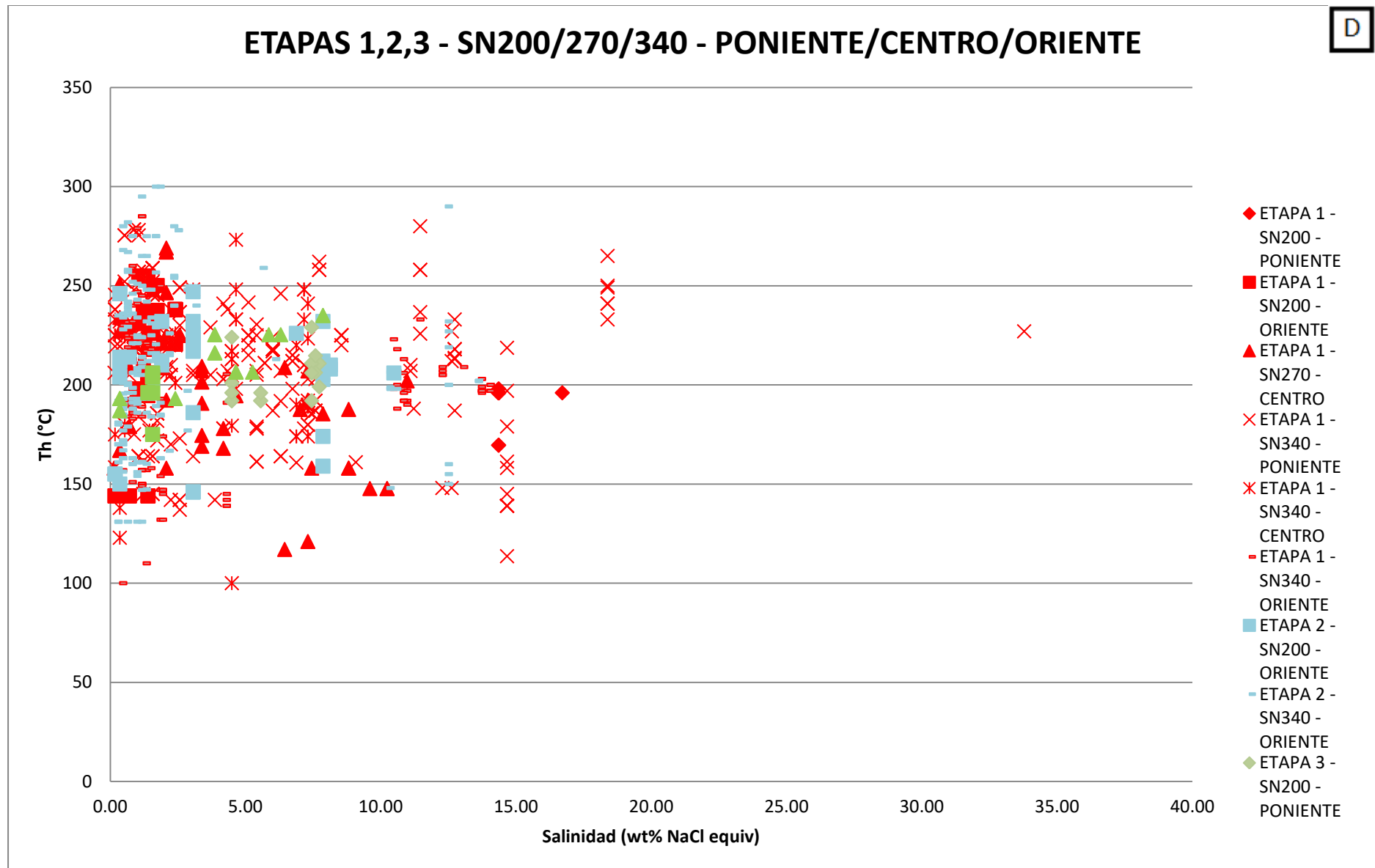


Figura16. Resultados de microtermometría de las asociaciones de inclusiones fluidas [Salinidad wt% NaCl equiv. (eje x) vs. Th°C (eje y)] A. Etapa I. B. Etapa II. C. Etapa III. D. Etapas I, II y III juntas.

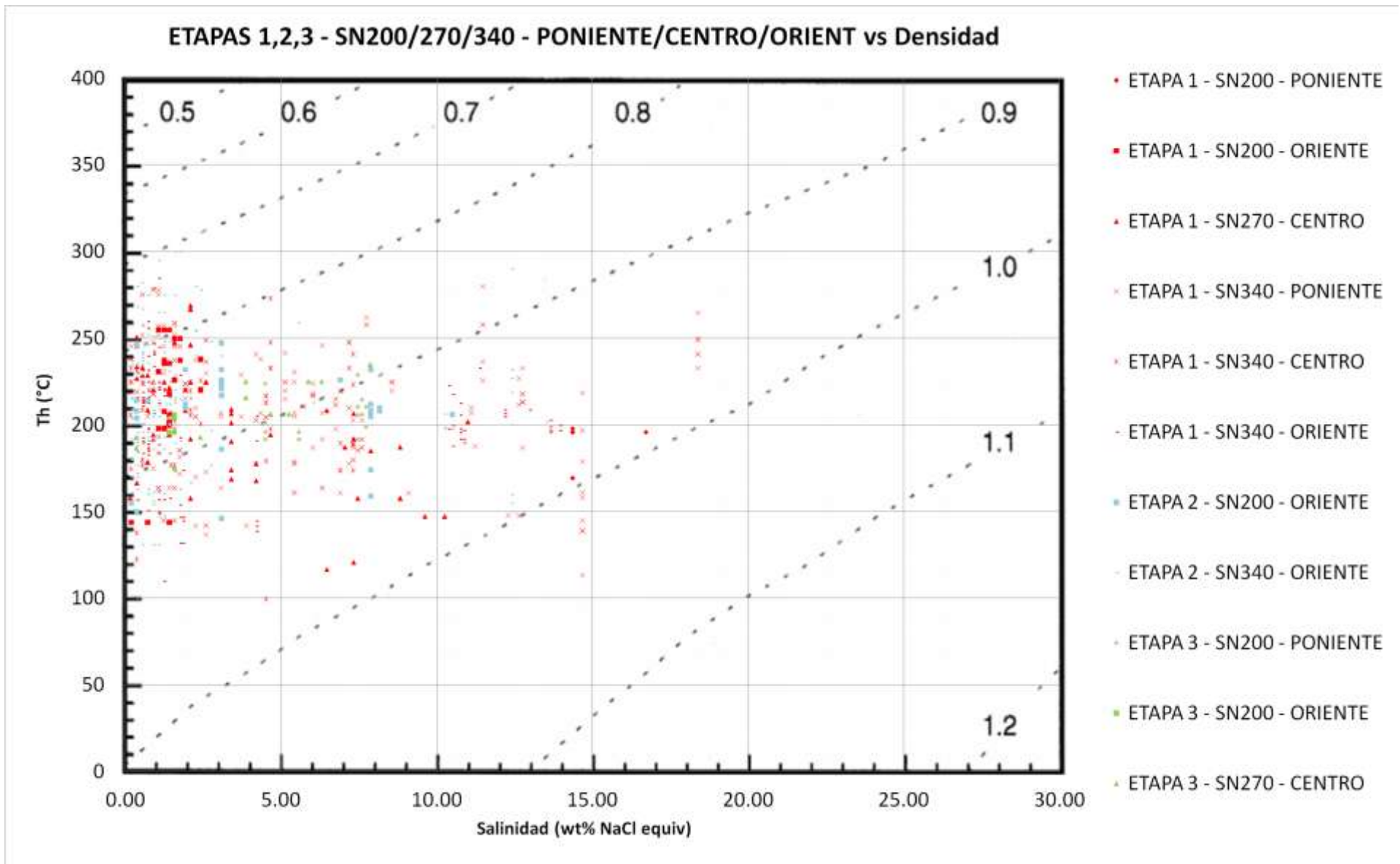


Figura 17. Diagrama de valores de densidad para soluciones en el sistema H₂O-NaCl junto con los valores de Salinidad wt% NaCl equiv. (eje x) vs Th (°C) (eje y) de los grupos de inclusiones fluidas de las muestras de la veta San Carlos. Diagrama de valores de densidad tomado de Wilkinson (2001).

Condiciones de presión durante la mineralización

Simmons *et al.* (1988) menciona que al tener evidencia de ebullición en las inclusiones fluidas elimina la necesidad de realizar correcciones de presión a las temperaturas de homogenización obtenidas de los análisis microtermométricos. Con base en lo anterior, para poder calcular las condiciones de presión a las que fueron atrapadas las inclusiones solamente se requiere conocer la composición de los fluidos atrapados y las temperaturas de atrapamiento.

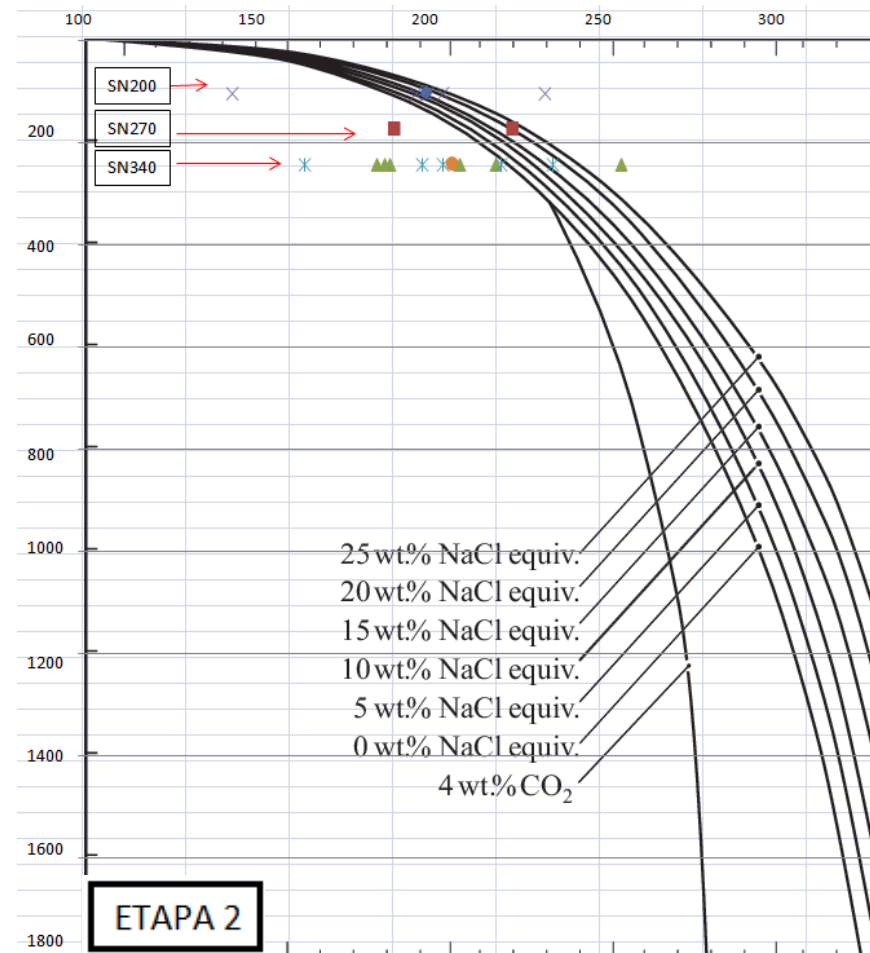
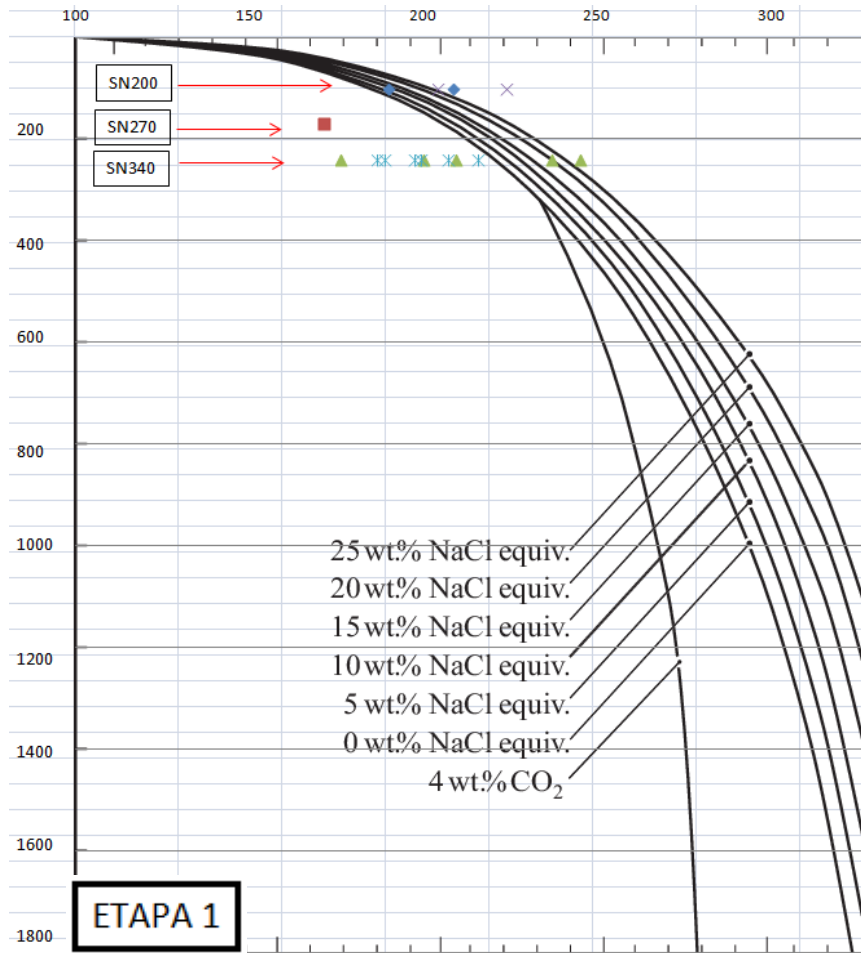
Con base en los valores medidos y obtenidos para las T_h (°C) y salinidades (wt% NaCl equiv.) se estiman valores de presión para los fluidos con un rango entre los 10 bars (140°C) y 50 bars (270°C) utilizando el diagrama de correlación de Fournier (1999).

Profundidad de atrapamiento

Para conocer la profundidad de atrapamiento de las inclusiones fluidas se pueden graficar las temperaturas de homogenización (T_h) de cada etapa y subnivel contra puntos de ebullición que corresponden a curvas de profundidad características de fluidos con composiciones que presentan dilución (Haas, 1971; Henley *et al.*, 1984; Simmons *et al.*, 1988). De acuerdo con Simmons *et al.* (1988) el nivel piezométrico de los fluidos de ebullición debió estar situado aproximadamente 100m por debajo de la superficie actual (Figura 18).

Procesos asociados al atrapamiento de inclusiones fluidas

Los valores de temperatura de homogenización, junto con los datos obtenidos para la salinidad de los fluidos atrapados para cada etapa pueden ser de gran utilidad para inferir los procesos que podrían haber influido en la precipitación mineral de la veta. De acuerdo con Wilkinson (2001) estos procesos de evolución hidrotermal incluyen: mezcla de agua, ebullición y enfriamiento (Figura 19).



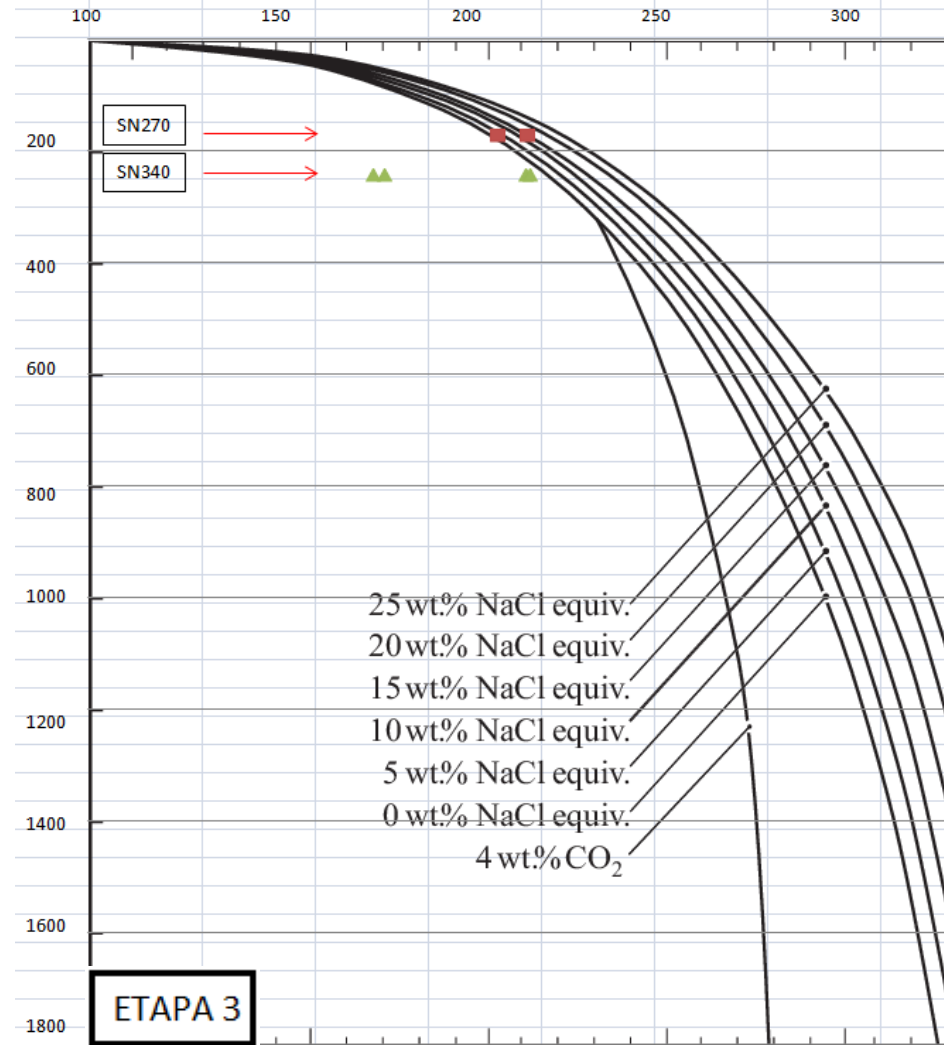
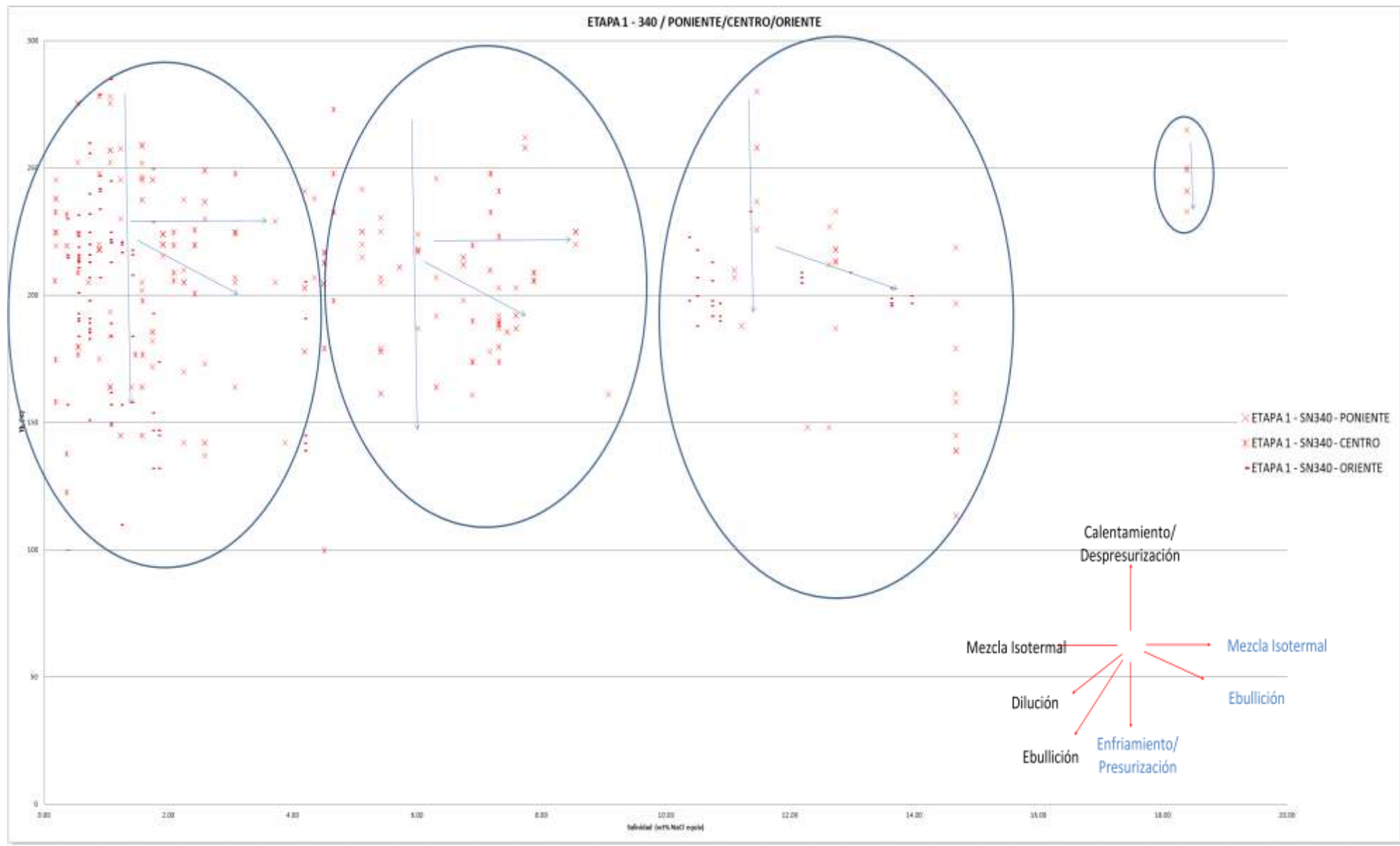
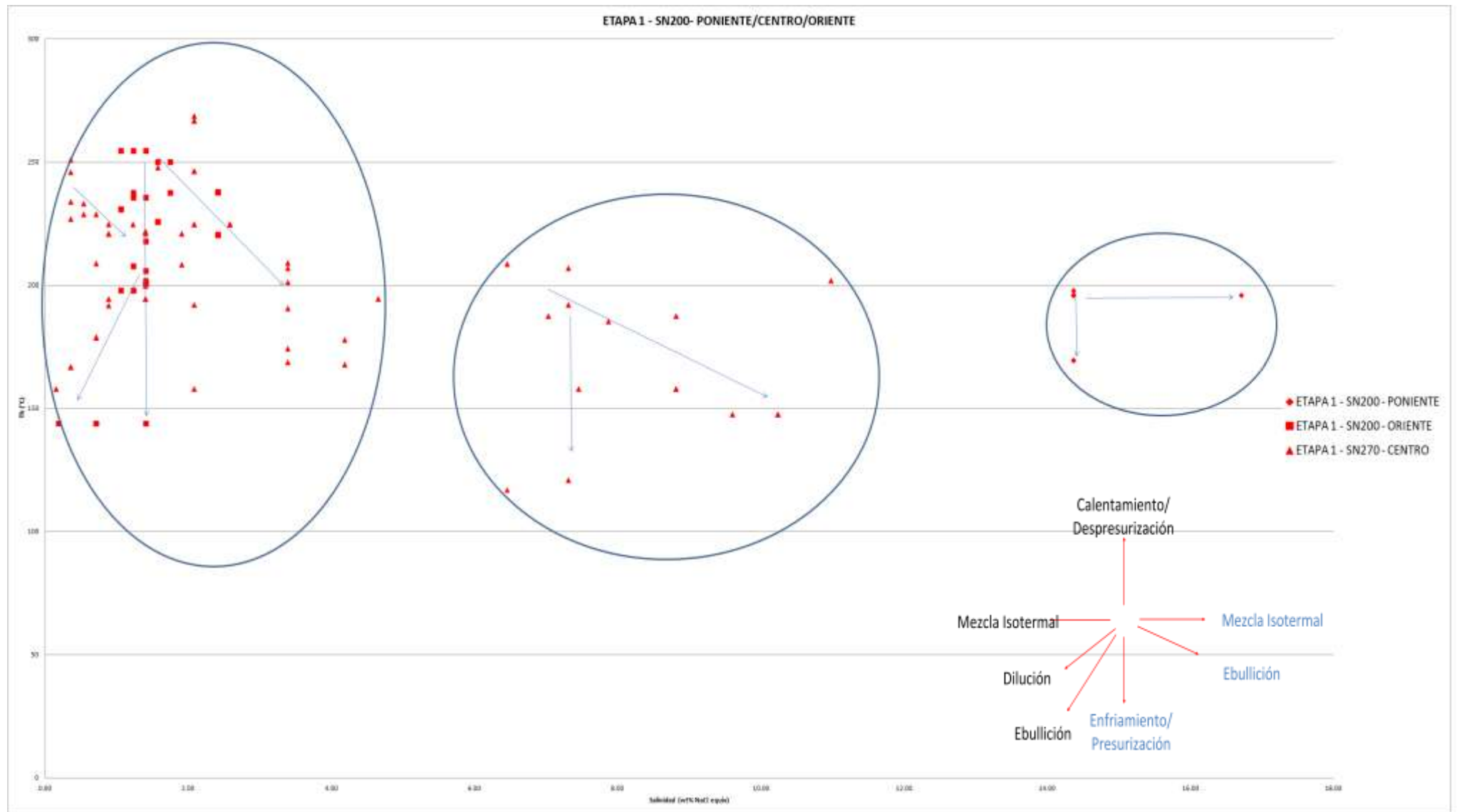
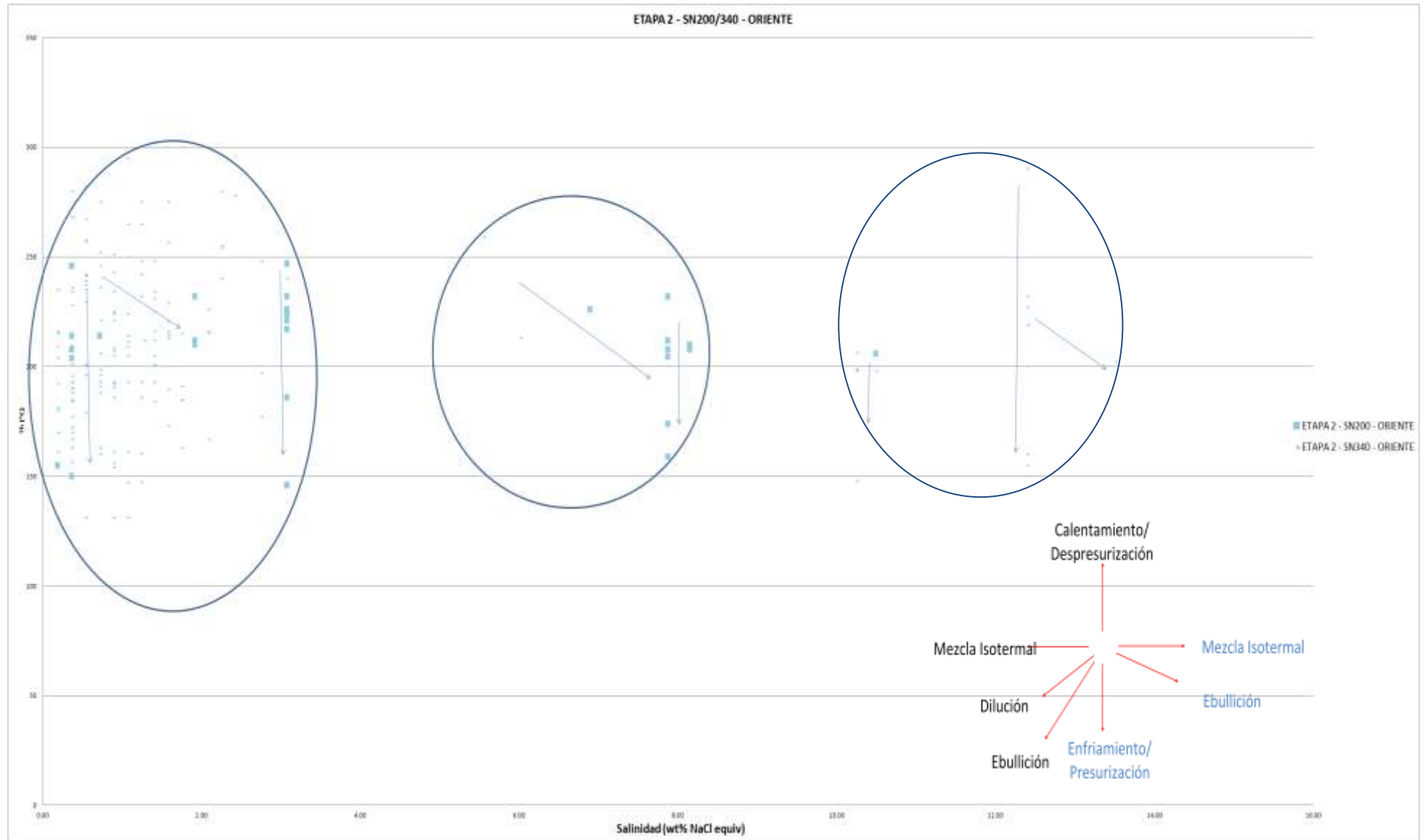


Figura 18. Correlación entre los resultados obtenidos para las temperaturas de homogenización [T_h °C (eje x)] y las salinidades [wt% NaCl equiv. (eje y)] de las muestras de las tres etapas de mineralización vs. los subniveles muestreados en la Veta San Carlos (Fresnillo, Zacatecas). Modificada de Haas, 1971.







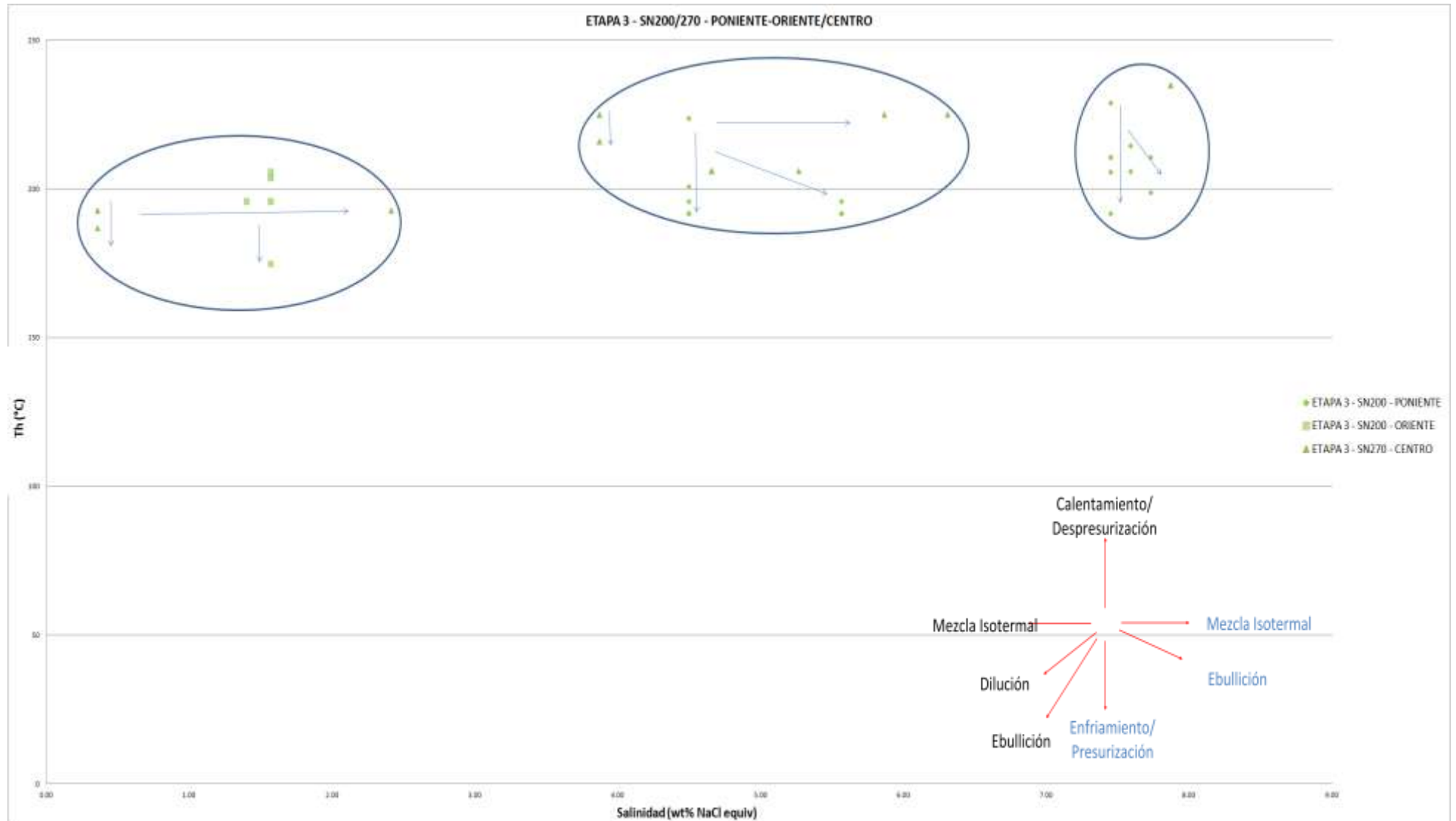


Figura 19. Salinidades (wt% NaCl equiv.) (eje x) vs Th(°C) (eje y) junto con un diagrama que muestra las tendencias típicas para estos valores debido a procesos asociados con la evolución de los fluidos (ej. Ebullición, enfriamiento, mezcla de aguas, dilución, etc.). Modificado de Wilkinson, 2001.

8. QUÍMICA MINERAL DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y GEOBARÓMETROS DE ESFALERITA

Durante el análisis por microsonda electrónica se emplearon estándares naturales de calcopirita, esfalerita, galena y plata nativa. Las características del equipo y condiciones de operación han sido descritas previamente en el Capítulo 2 del presente trabajo.

Esfalerita

Es el mineral más abundante (después de la pirita) observado en las muestras de la Veta San Carlos.

La mineralización de esfalerita dentro de la etapa I presenta formas irregulares a subedrales y se

observan por lo general formando bandeamientos y como diseminación.

El contenido de FeS se presenta en un rango 1.5 a 7.7 wt% para el SN270 – zona poniente/central (promedio de 4.5 wt%) y un rango de 5.7 a 8.7 wt% para el SN340 zona poniente (promedio de 7.5 wt%) para la etapa I (Figura 20).

El contenido de FeS en la etapa II alcanza valores de 3.5 a 11.1 wt% para el SN200 – zona poniente (promedio de 6.5 wt%) y entre 4.9 a 9.7 wt% en el SN300 – zona poniente (promedio 3 wt%).

Por último, la esfalerita dentro de la etapa III presenta contenidos de Fe de hasta 1.5 y 11.5 wt% en el SN200 – zona poniente (promedio 7.5 wt%).

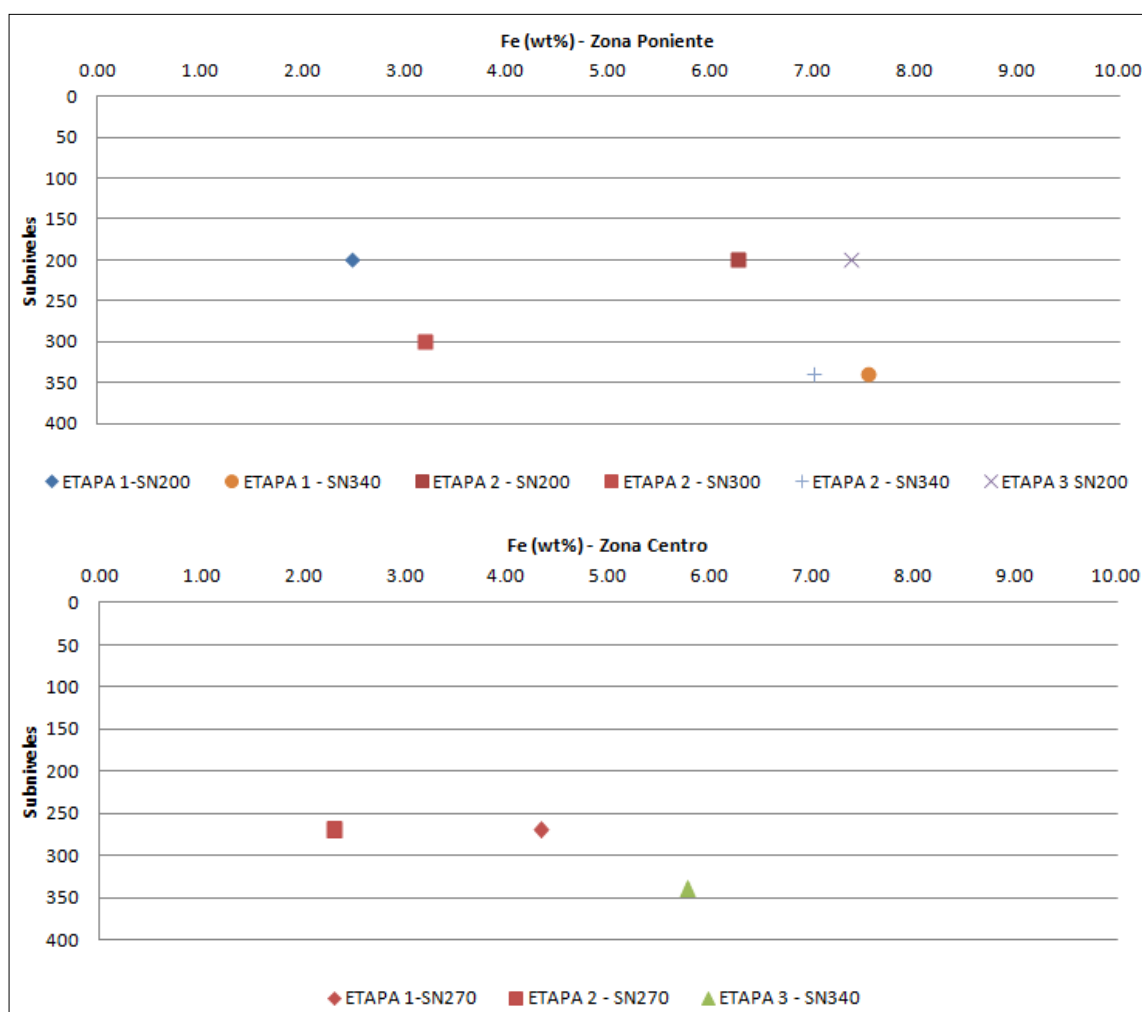


Figura 20. El contenido de Fe (wt%) aumenta con la profundidad en la E1. En las EII y EIII el contenido de Fe (wt%) disminuye con la profundidad.

De acuerdo con Scott (1974) y Carrillo-Rosua *et al.* (2007) el incremento en el contenido de Fe (mol%) tiene como consecuencia un descenso en la fS2. La causa de este cambio podría ser influenciada por la precipitación de pirita o por la incorporación de fluidos externos al sistema hidrotermal. Bajo fS2 coincide con precipitación de Cu, Zn, Sb, Cd, Mn y Ag. Opuesto a esto al disminuir el contenido de Fe (mol%) hay un incremento en la fS2 y un descenso en la temperatura (Scott, 1983).

Pirita

Considerando el hecho de que la presencia de pirita dentro de los sistemas epitermales es abundante, su composición puede complementar las observaciones mineralógicas y los datos obtenidos de inclusiones fluidas y otorgar información valiosa acerca de la composición del fluido mineralizante (Deditius *et al.*, 2014; Franchini *et al.*, 2014 y Reich *et al.*, 2013).

La mineralización de pirita se encuentra distribuida en todas las etapas (E1, E2, E3) y subniveles analizados (SN200-270-300-340) para la Veta San Carlos. El contenido de Fe (wt%) se mantiene en promedio entre 44 y 45.07 wt%.

Galena

El contenido de Ag en galena es mayor en las muestras pertenecientes a la E1 con respecto a las de la E3, presentando valores de 0.147 wt% en la primera etapa a 0.09 wt% en la etapa 3. De igual forma el contenido de Sb disminuye con cada etapa y en general con la profundidad, con valores desde 0.16 a 0.032 wt%.

Kant *et al.* (2012) asocian los bajos niveles en Sb, Bi y Ag en galena con bajas temperaturas durante la mineralización

Arsenopirita

Durante la etapa E3 se observa de manera escasa, con formas alargadas. Su contenido en As está comprendido entre 41.8 y 49.3 wt% en el SN200.

Pirargirita

Para la etapa I el promedio de As / (As+Sb) es 0.016 wt% para el SN200. Para la etapa II presenta valores promedio de As/(As+Sb) 0.016 wt% (SN200) y de 0.013 para el SN300.

Tetraedrita

Su composición varía entre 0.11 wt% [Cu/ Cu+Ag] para las tetraedritas dentro de la etapa I (SN200) y 0.16wt% [Cu/ Cu+Ag] para la etapa II (SN270).

Argentita

Su contenido varía en la etapa I desde la zona poniente con valores promedio de Ag de 84 wt% a valores de 75 wt% en la zona centro.

En la etapa II los valores de plata promedio son de 60.4 wt% en el SN270. Finalmente en la etapa III los valores de Ag promedio son de 60 a 79 wt% SN200.

Hematita

Se distingue escasa presencia de Hm (Hematita) en forma subedral, alargada (forma de "espada") asociada con pirita subedral. Su contenido en Fe en las muestras de la etapa I es alrededor de 78.2 y 84wt%.

GEOTERMÓMETROS

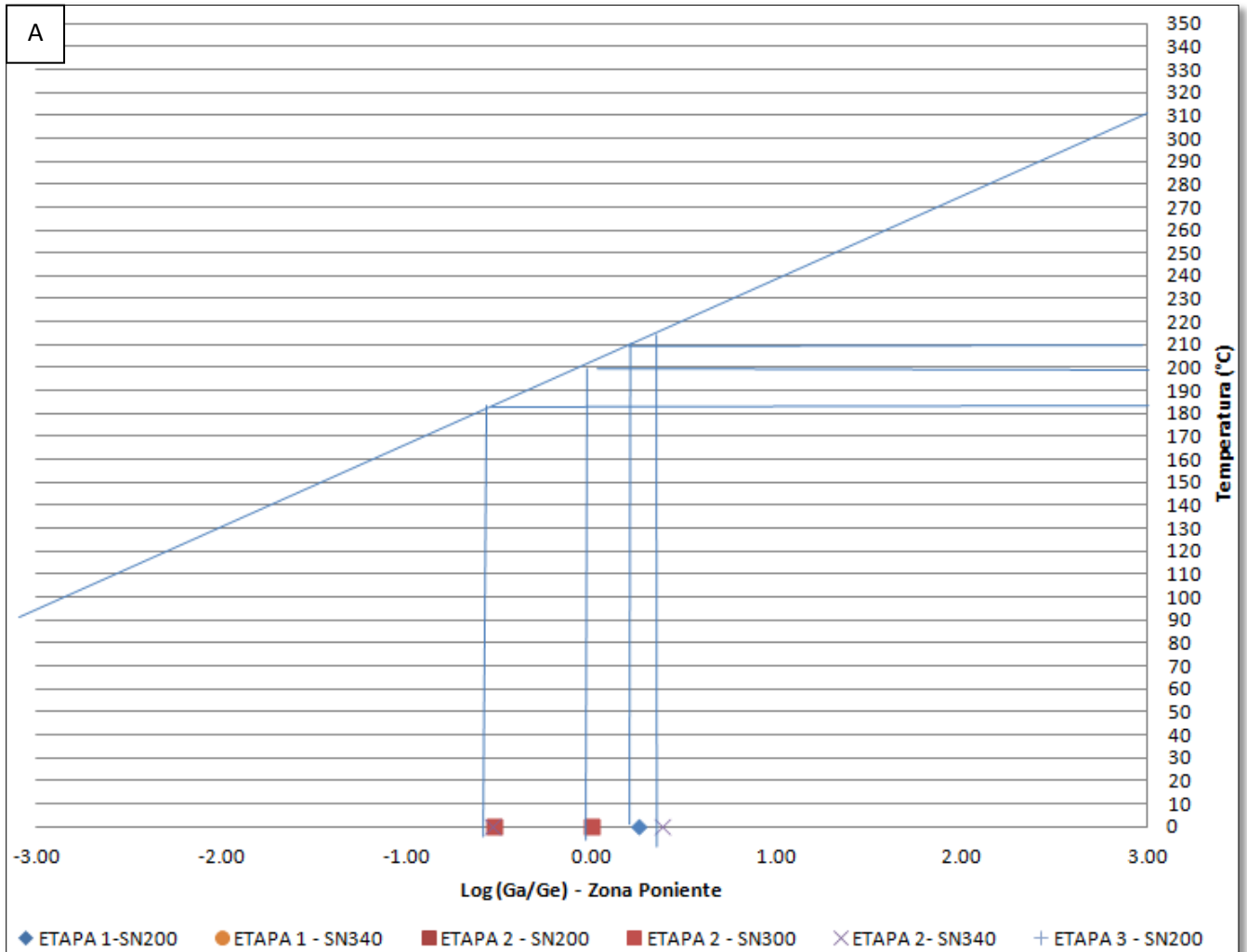
Esfalerita

La variación en el contenido de Fe en las esfaleritas ha sido empleado en gran medida como herramienta para calcular el descenso o incremento en la fS2 y la asociación con precipitación de otros minerales como pirita y de elementos como Cu, Zn, Sb, Cd, Mn y Ag, y la posible incorporación de fluidos extremos al sistema hidrotermal (Scott, 1974, 1983; Carrillo-Rosua *et al.*, 2007).

Por otra parte, Möller (1987) y Kant *et al.* (2012) proponen que la tasa de Ga/Ge podría utilizarse como geotermómetro (Figuras 21,22).

De esta forma, la presencia de altos valores de Ga y Ge con bajo contenido de Fe, In y Mn se asocian con yacimientos de “baja temperatura”, mientras que los de “alta temperatura” se relacionan con valores bajos de Ga y Ge y altos de Fe en esfaleritas

(Oftedahl, 1940; Cook *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2018). Mohr y Jagger (1978) asocian el descenso de Ge (ascenso de Fe) con la presencia de elementos como Ag y Cu.



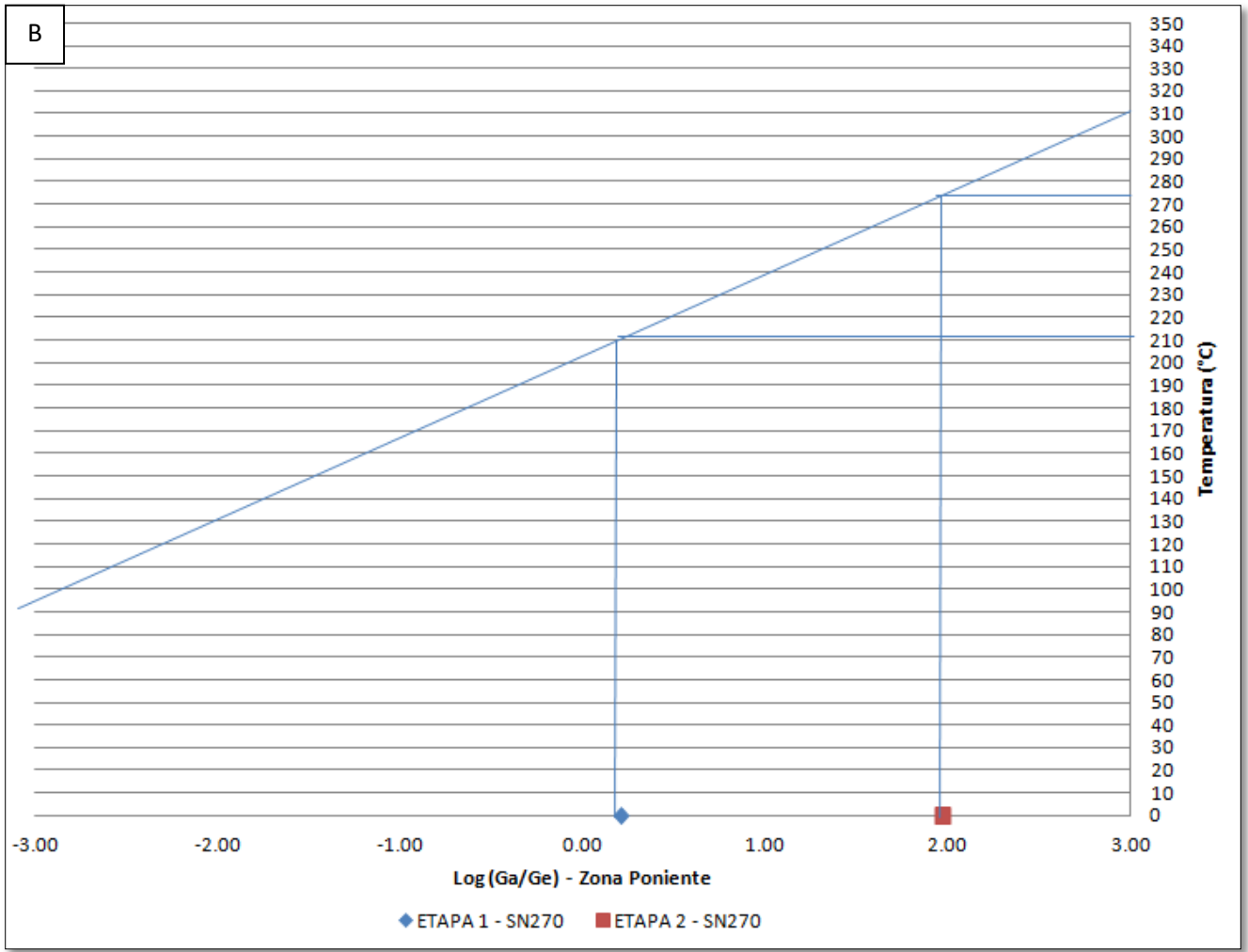


Figura 21. Calculo de temperaturas de formación de esfaleritas con base en su tasa Ga/Ge. Modificada de Kant et al. (2012). A = Zona poniente; B = Zona Central.

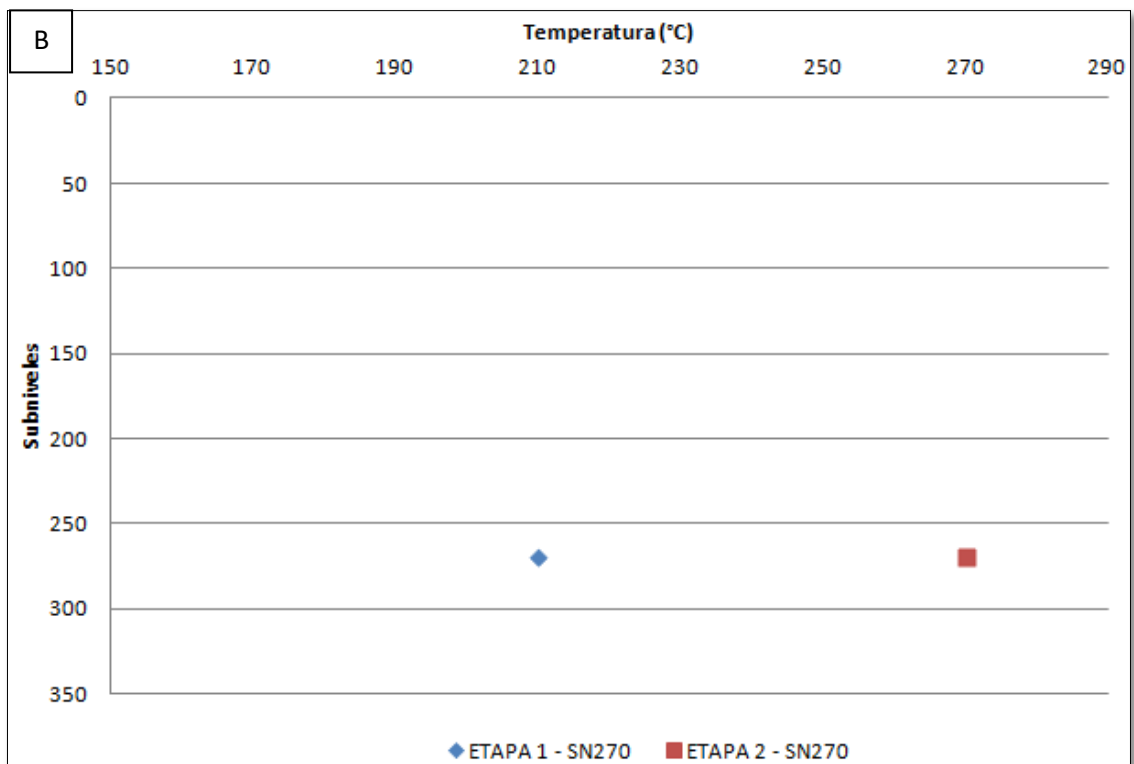
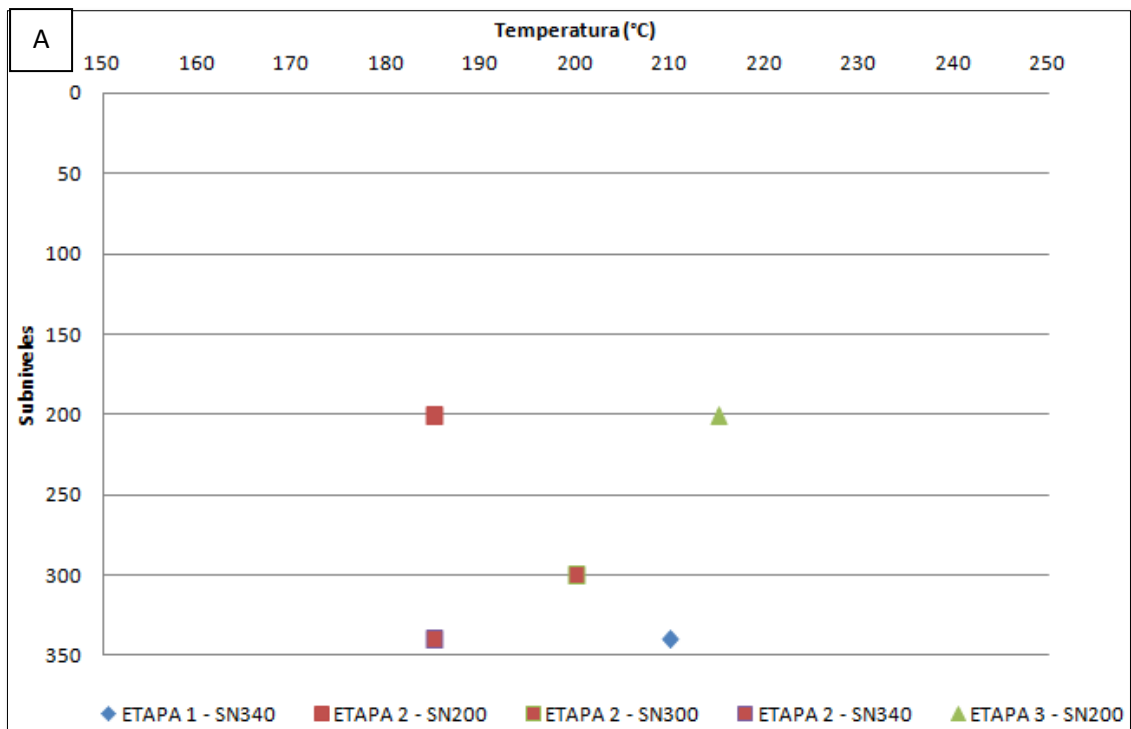


Figura 22. Temperaturas de formación de esfaleritas calculadas con base en la tasa Ga/Ge [según lo propuesto por Möller (1987)] para cada subnivel en la zona poniente de las muestras de la veta San Carlos. A = Zona poniente; B = Zona Central.

9. ISÓTOPOS DE AZUFRE

Se obtuvieron valores de $\delta^{34}\text{S}$ en todas las zonas y en la mayoría de los subniveles de la veta (excepto el SN300). Para las muestras de éste análisis se tomaron en cuenta los sulfuros más abundantes como pirita, esfalerita, galena y sulfosales como proustita y tetraedrita. Los resultados de $\delta^{34}\text{S}$ de las muestras de sulfuros se presentan en la (Tabla 2), donde se puede observar que los valores presentan un rango general de 2.8 a -14.3 ‰ para las piritas, aunque cabe señalar que algunas muestras de la etapa I tienen valores de hasta -33.4 ‰. Las esfaleritas presentan rangos entre 1.6 y -4.8 ‰, mientras que el contenido de $\delta^{34}\text{S}$ para las galenas es de -6.2 a -6.6 ‰. Los valores para la proustita son entre -2.8 y -8.4 ‰ y para la tetraedrita de entre 1.4 y -4.3 ‰.

Los valores más negativos para pirita se encuentran en las muestras de la etapa I en la zona centro (SN270), mientras que los valores más cercanos a cero se ubican en las muestras del subnivel 200 en la zona poniente.

Como se puede apreciar en el histograma la concentración de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ se ubica en los picos de -2 y -6 ‰, siendo en su mayoría muestras de pirita de la etapa I, esfalerita de la etapa III y

galena de la etapa II. En menor medida, en este pico se concentran los valores de las muestras de los sulfosales.

Para poder comparar los valores obtenidos de $\delta^{34}\text{S}$ de las muestras de la veta San Carlos con los de otros sistemas geológicos, se buscó empalmar el histograma de frecuencias obtenido en el presente trabajo con la Figura modificada de Hoefs (1980). Lo anterior permite observar el hecho de que el rango de valores de las mayores concentraciones de $\delta^{34}\text{S}$ de las muestras de la veta San Carlos coincide principalmente con los rangos de rocas sedimentarias y metamórficas (Figura 23). En general, los valores isotópicos del azufre denotan una fuente principalmente magmática (Camprubí *et al.*, 2003; Camprubí y Albinson, 2006).

Los valores muy negativos de las piritas de la etapa I podrían deber su origen a las rocas sedimentarias de la zona de estudio o al resultado de reducción bacteriana, pirita biogénica y/o extensiva interacción agua-roca (Camprubí *et al.*, 2003; Tang *et al.* 2014).

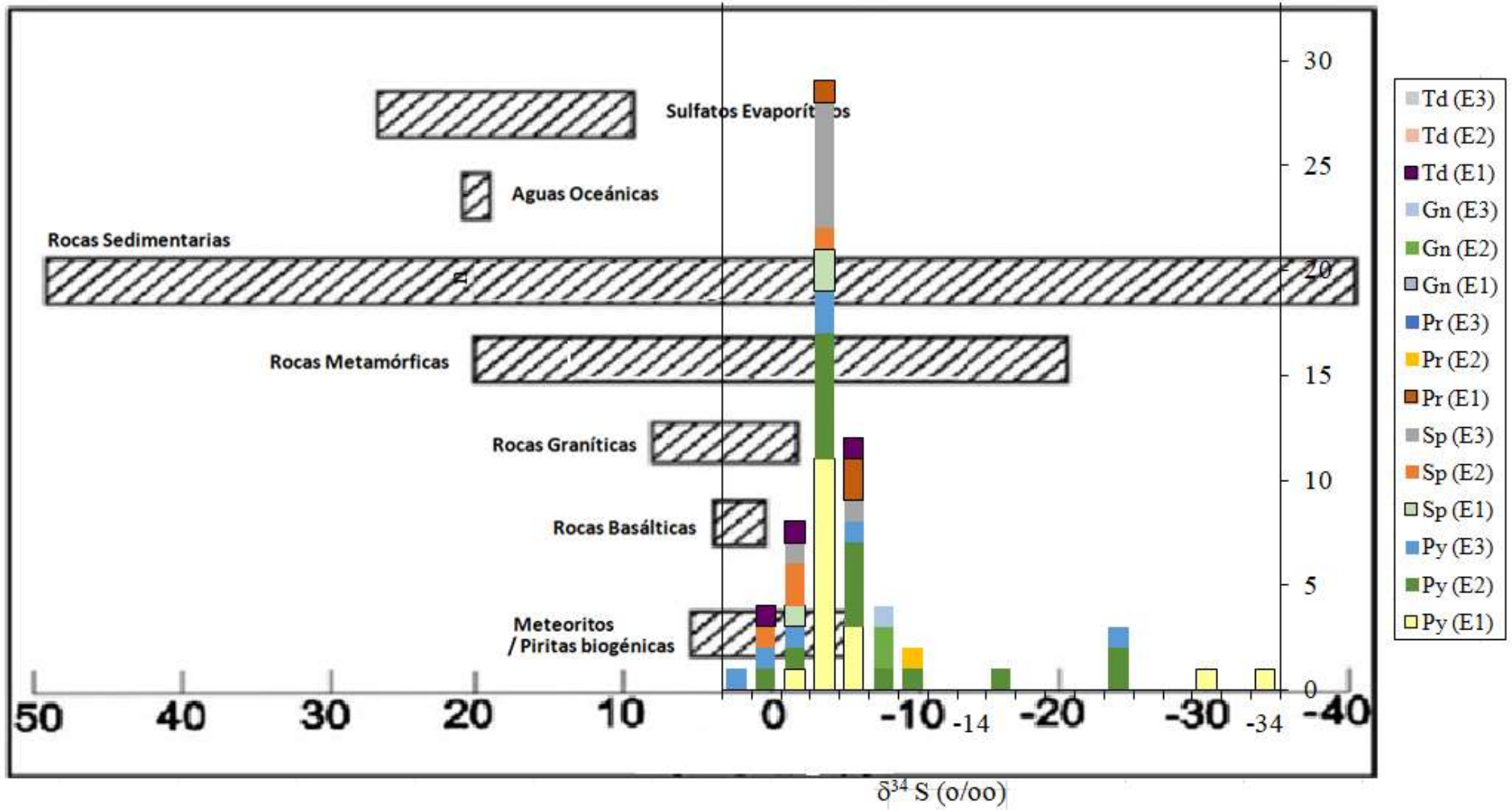


Figura 23. Rango de valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sistemas geológicos (Modificado de Hoefs, 1980). El histograma vertical representa el rango de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en las muestras de sulfuros y sulfosales de la Veta San Carlos.

Tabla 2. Valores Isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos de muestras de sulfuros y sulfosales en los subniveles 200 y 340 (zona poniente) y subnivel 270 (zona central) de la veta San Carlos. . (Py = pirita; Gal = galena; Sp = esfalerita; td = tetraedrita; Pr = proustita)

Muestra	SN	Zona	Mineral	Py	Sp	Pr	Gn	td
			Etapas	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$
27	200	poniente	E1			-4.7		
28	200	poniente	E1	-2.8		-4.9		
29	200	poniente	E1	-3.4				
30	200	poniente	E1	-4.0				
31	200	poniente	E2	-8.4				
35	200	poniente	E2	-2.2				
32	200	poniente	E2	-22.4	-0.2			
34	200	poniente	E2	-4.3		-8.4		
35	200	poniente	E2	-2.2				
36	200	poniente	E2	1.1				
37	200	poniente	E2	-14.3				
41	200	poniente	E3	-4.1			-6.6	
43	200	poniente	E3	0.9	-3.9			
47	200	poniente	E1	-3.6				
48	200	poniente	E1	-3.9	-3.4			
50	200	poniente	E1		-3.2			
10	270	centro	E1	-33.4				
11	270	centro	E1	-29.4				
112	340	poniente	E1	-2.9				
113	340	poniente	E1	-0.2				
115	340	poniente	E1	-3.6				
116	340	poniente	E1	-5.2				
117	340	poniente	E1	-3.1				
127	340	poniente	E2	-7.7				
129	340	poniente	E2	-2.6				
130	340	poniente	E2	-3.4				
131	340	poniente	E2	-2.2				
134	340	poniente	E2	-22.3				
135	340	poniente	E2	-2.7				

Continua Tabla 2. Valores Isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos de muestras de sulfuros y sulfosales en el subnivel 340 (zona central) de la veta San Carlos.

Muestra	SN	Zona	Mineral	Py	Sp	Pr	Gn	td
			Etapas	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$
64	340	centro	E3	-3.1	-4.8			
65	340	centro	E3	2.8	-3.7			
67	340	centro	E3	-0.6	-3.5			
68	340	centro	E3	-2.1	-3.5			
71	340	centro	E3	-23.6	-0.5			
72	340	centro	E3		-3.9			
73	340	centro	E3		-3.5			
78	340	centro	E2		-3.6			

Continua Tabla 2..Valores Isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos de muestras de sulfuros y sulfosales en el subnivel 340 (zona oriental) de la veta San Carlos.

Muestra	SN	Zona	Mineral	Py	Sp	Pr	Gn	td
			Etapas	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$
164	340	oriente	E1	-3.8				
165	340	oriente	E1	-2.7				1.4
166	340	oriente	E1	-2.8	-0.2			
167	340	oriente	E2	-5			-6.2	
168	340	oriente	E2	-5.5			-6.3	
170	340	oriente	E2		1.6			
173	340	oriente	E2	-0.6				
175	340	oriente	E2	-4.7	-0.2			
176	340	oriente	E1	-4.7		-2.8		-1.0
179	340	oriente	E1	-2.5				-4.3

DISCUSIÓN

Para la Veta San Carlos existen al menos tres etapas de mineralización que consisten principalmente en bandeamientos de cuarzo y brechamientos asociados a eventos de apertura de fisuras (Simmons *et al.*, 1988; Eckberg, 1999). La presencia de la mineralización en eventos multiepisódicos se puede encontrar asociada a yacimientos epitermales como los de la Veta Santo Niño, Santa Eulalia y otros del mismo tipo en México como La Guitarra, Temascaltepec (Gemmell *et al.*, 1988; Simmons *et al.*, 1988; Albinson, 2001; Camprubí *et al.*, 2001; Camprubí y Albinson, 2007).

Dentro de las cuatro etapas de alteración y mineralización dentro del Distrito Minero de Fresnillo mencionadas por Ruvalcaba-Ruiz y Thompson (1988), se encuentra la precipitación de minerales de ganga, sulfuros y sulfosales en tipologías como mantos y vetas, y cuyo depósito es concurrente con alteración en la roca encajonante de tipo argílico y fílico adyacente a las vetas. Los resultados de los análisis SWIR de las muestras de la Veta San Carlos muestran la presencia de alteraciones fílica (principalmente en las zonas poniente y central) y argílica (SN340 de zonas poniente y central).

Yacimientos como el de Veta Madre, Guanajuato (Moncada, 2008) y La Guitarra, Temascaltepec (Camprubí *et al.*, 2001) presentan asociación entre el incremento o presencia de metales preciosos y base con la presencia de adularia pseudorromboédrica y calcita hojosa. Esta textura (lattice) se interpreta como el reemplazamiento de calcita por cuarzo y de acuerdo a Simmons y Christenson (1994) está asociada con procesos de ebullición. En las distintas etapas de mineralización de las muestras de la Veta San Carlos en las que se observa la presencia de sulfuros y sulfosales, también se observa la presencia de textura lattice (principalmente SN340 y zona poniente).

Earthman (2010) menciona que la veta Valdecañas exhibe una zonación espacial de metales base y

preciosos según lo establecido para sistemas epitermales (Buchanan, 1981) presentando la mayor concentración de plomo y zinc en los niveles más bajos de la veta y un incremento en las concentraciones de oro y plata en los niveles más altos de la veta. De acuerdo a lo observado en el presente trabajo para la Veta San Carlos, existe una tendencia a presentar mayor concentración de sulfosales y sulfuros de plata en los subniveles más someros (200, 270 y 300) y hacia la zona poniente (Figura 14).

Con base en la zonación mineral y asumiendo en que la mayoría de los metales base se depositaron a partir de fluidos más calientes, y considerando que estos fluidos tienden a enfriarse conforme se alejan de su fuente, Gemmell *et al.* (1988) concluye que el flujo de los fluidos habría sido desde la zona oeste (poniente) y hacia zonas más someras para la Veta Santo Niño. Por otra parte, Eckberg (1999) menciona que existe un incremento de temperatura con la profundidad y en dirección poniente según resultados de inclusiones fluidas. En el presente trabajo solo se puede determinar que existe un descenso de temperatura hacia los subniveles más someros (Figura 16). En cuanto a la presencia de mineralización, se observó que esta va disminuyendo hacia la zona oriente con el tiempo, dejando de observarse la presencia de sulfuros y sulfosales en los niveles más someros desde la Etapa 2 y desapareciendo por completo de ésta zona en las muestras de la Etapa 3 en la zona Oriente (Figura 10).

Los resultados de Th medidos en las inclusiones de la Veta San Carlos arrojan un rango entre los 140 y 270°C. Los valores de salinidad que se obtuvieron presentan rangos entre 0 y 18 wt% NaCl equiv. Los valores elevados de inclusiones fluidas para salinidad (wt% NaCl equiv) corresponderían a eventos asociados a la formación de menas de sulfuros y/o sulfosales; en concordancia con los resultados de alta salinidad obtenidos por Eckberg (1999) para la Veta San Carlos. Inclusiones fluidas con valores de salinidad de alrededor de 10wt% NaCl equiv o superiores denominadas como salmueras por

Simmons (1990), también se encuentran en muestras pertenecientes a la Veta Santo Niño y en muestras de inclusiones de los cuerpos mineralizados del área de Fortuna (Chico, 1986; MacDonald et al., 1986). En la Etapa 1, los valores más altos de salinidad (>14wt% NaCl equiv) se encuentran en las muestras de la zona poniente (en los subniveles profundos-SN340 y someros-SN200), donde se observa de forma predominante la presencia de mineralización de sulfuros y sulfosales en todos sus subniveles. Por otro lado, es importante señalar que la precipitación mineral en las tres etapas se da principalmente a partir de fluidos con salinidades entre 4 y 11 wt% NaCl equiv y temperaturas con un rango de 190 a 240°C. Gemmell et al. (1988) y Simmons et al. (1988) concluyeron que los minerales de mena habrían sido depositados por pequeños pulsos de fluidos con alta salinidad (entre 8.5 y 12 wt% NaCl equiv.) hacia un sistema hidrotermal de fluidos más diluidos supersaturados en cuarzo y calcita.

En la Figura 19 se puede observar que los valores de las inclusiones fluidas caen en grupos de diferente salinidad (>14wt%NaCl equiv, 6 y 11 wt% NaCl equiv y <5wt%NaCl equiv). Esto se relaciona con lo señalado por Simmons (1990), donde presenta valores de inclusiones fluidas en grupos de salinidades con rangos similares para muestras de Cerro Proaño. Simmons (1991), logró señalar que algunas zonas del distrito minero de Fresnillo sufrieron alteración hidrotermal por dos tipos de fluidos con composiciones diferentes.

Al igual que los valores de inclusiones fluidas obtenidos por Eckberg (1999), los resultados de inclusiones fluidas en el presente trabajo para la Veta San Carlos (Figura 19) también muestran evidencia de ebullición y su relación con la precipitación de sulfuros y sulfosales de acuerdo a lo señalado por Wilkinson (2001). Evans (1993) menciona que la ebullición ocasiona un descenso rápido de temperatura con un incremento en la salinidad del fluido remanente, ocasionando la precipitación de minerales de mena y ganga.

Bodnar y Moncada (2014) señalan que existe evidencia de mezcla de fluidos magmáticos y meteóricos asociados a la mineralización de plata y sulfuros de metales base para el Distrito Minero de Fresnillo. Los resultados de inclusiones fluidas para cada etapa, subnivel y zona presentan evidencia de precipitación de menas y ganga debido a procesos de enfriamiento y mezcla hidrotermal. En las zonas central y oriental (SN270 y SN340, respectivamente) para la Etapa 1 la presencia de menas se relaciona en su mayoría con procesos de mezcla hidrotermal con base en la distribución de los resultados de inclusiones fluidas. Para la Etapa 2 (SN340) los resultados de inclusiones fluidas se asocian también con procesos de enfriamiento y se evidencian por el descenso de temperatura sin cambios en la salinidad (Figura 19).

En las etapas, subniveles y zonas en las que los valores de inclusiones fluidas presentan valores bajos de salinidad (p.ej. <4wt% NaCl equiv para la Veta Santo Niño; Simmons et al., 1988) no existe evidencia de la presencia de menas. Con base en resultados similares, Eckberg (1999) propone que la precipitación de minerales de ganga como el cuarzo y la calcedonia estaría asociada a fluidos con salinidades más bajas, mientras que los fluidos con salinidades más elevadas se asociarían con la precipitación de sulfuros y sulfosales.

Tal es el caso para la Etapa 1 en la zona central-SN340 en el que sus inclusiones fluidas se encuentran asociadas al grupo de salinidades bajas (<8wt% NaCl equiv; Figura 19) y en su paragénesis mineral no se observa la presencia de mineralización de sulfuros y sulfosales (Figura 10). Lo mismo ocurre con las muestras de la Etapa 1 (SN200 – Zona Oriente) en el que no hay evidencia de inclusiones fluidas con alta salinidad y de igual forma no se observó presencia de sulfuros ni sulfosales en sus muestras asociadas.

Scott (1974) y Carrillo-Rosua *et al.* (2007) mencionan que el incremento en los valores de Fe (mol%) podría estar influenciado por la precipitación de pirita o por la incorporación de fluidos externos. Por otro lado,

Scott (1983) señala que el contenido de FeS está en relación con la temperatura; asociando el incremento en FeS con un aumento en la temperatura y viceversa. Los valores de FeS (mol%) contenidos en esfaleritas durante la Etapa 1 presentan valores mayores hacia los subniveles más profundos (lo cual se relaciona con los valores de Th en inclusiones fluidas para esta etapa). Los valores de FeS asociados a las muestras de la Etapa 2 muestran un descenso de FeS en profundidad, significando un aumento de temperatura en niveles más someros (evidenciado por procesos de enfriamiento en los subniveles más profundos con base en los resultados de inclusiones fluidas).

En la Etapa 3 los valores de FeS son mayores que las dos etapas anteriores, lo que significaría que durante ésta etapa el enfriamiento de los fluidos habría sido menor o que hubo algún proceso que ayudó a incrementar la temperatura de los fluidos en niveles más someros. Esto podría relacionarse con el hecho de que para la Etapa 3 la variación de temperaturas no es tan grande (rango entre 230° a 190°C) y que en los niveles más someros durante ésta etapa no hay evidencia de ebullición.

El contenido de Ga y Ge en esfaleritas y la tasa Ga/Ge también se relaciona con los cambios de temperatura para cada etapa (esta tasa evidencia un incremento de temperatura en las muestras de la Etapa 2 en los niveles intermedios y de igual forma en las muestras de esfalerita de la Etapa 3 en la zona poniente y en el subnivel 200) (Möller, 1987; Kant *et al.*, 2012). Mohr y Jagger (1978) asocian el descenso de Ge (ascenso de Fe) con la presencia de elementos como Ag y Cu. Cabe señalar que tanto para la Etapa 2 (zona central-SN270) y Etapa 3 (zona poniente-SN200) se observa la presencia de mineralización de sulfuros y sulfosales de plata (Figura 10).

Kant *et al.* (2012) asocian los bajos niveles en Sb, Bi y Ag en galena con bajas temperaturas durante la mineralización. El contenido de Ag en galena es mayor en las muestras pertenecientes a la E1 con respecto a las de la E3, presentando valores de 0.147 wt% en la primer etapa a 0.09 wt% en la etapa 3. De

igual forma el contenido de Sb disminuye con cada etapa y en general con la profundidad, con valores desde 0.16 a 0.032 wt%. De igual manera, los resultados de inclusiones fluidas muestran un descenso en la temperatura con cada etapa (Tabla 1).

Los resultados de los análisis isotópicos de azufre ($\delta^{34}\text{S}$) en muestras de sulfuros y sulfosales indicarían que la fuente principal del azufre habría sido magmática, en semejanza con lo señalado por Simmons *et al.* (1988) para el Distrito de Fresnillo y en particular para la Veta Santo Niño; al mismo tiempo que señala el potencial que tiene el magma para suministrar plata (y que claramente se encuentra evidenciado en la mineralización de sulfuros y sulfosales de plata de las muestras analizadas en la Veta San Carlos). En menor medida, el origen del azufre estaría asociado también a la interacción de los fluidos mineralizantes con rocas sedimentarias (asociadas probablemente a las rocas huésped de las Formaciones Plateros y Chilitos) y rocas metamórficas (pertenecientes al basamento de los Terrenos Sierra Madre y/o Terreno Guerrero). Los valores muy negativos (presentes en muestras de pirita de la zona central-SN270) se deberían seguramente a procesos de reducción bacteriana (Tang *et al.* 2014).

Camprubí *et al.* (2003) presentan valores de salinidad para el yacimiento epitermal de La Guitarra de hasta 14.4wt% NaCl equiv. y mencionan la posibilidad de que los altos valores en la salinidad provendrían de exhalaciones magmáticas. En el presente trabajo se encuentran valores de salinidad superiores a los 14wt% NaCl equiv en muestras de la Etapa 1 (zona poniente-SN340).

CONCLUSIONES

Los resultados y observaciones obtenidos de los análisis de inclusiones fluidas ha permitido concluir y describir diferentes características asociadas con el origen del yacimiento epitermal de la Veta San Carlos tales como el flujo de los fluidos mineralizantes y su evolución temporal, las características y composición de los fluidos, los diferentes mecanismos asociados con la precipitación mineral y origen de los fluidos mineralizantes.

Con base en los valores obtenidos para las temperaturas mínimas de atrapamiento (T_h) de las diferentes muestras para cada zona y subnivel, se pudo observar que existe mayor concentración de inclusiones con temperaturas elevadas en los niveles más profundos (SN340) y en particular en la zona poniente. De igual manera, la temperatura en cada etapa de mineralización identificada muestra un descenso desde la Etapa 1 hasta la Etapa 3, lo que significaría que los fluidos no solamente fueron perdiendo calor hacia los niveles más someros sino que también lo hicieron con el tiempo.

A pesar de estos cambios, se observó que la mineralización en las tres etapas tiende a presentar un desarrollo semejante. En cada etapa se observaron tres fases hipogénicas en las que se distingue la precipitación de pirita en la primera fase, sulfuros de metales base en la fase II, progresando hacia la presencia de sulfuros de plata y sulfosales de plata en la fase final. Esta mineralización de menas se distribuye a lo largo de la veta junto con múltiples bandeamientos y brechamientos de cuarzo y calcedonia, ya sea de forma bandeada o como disseminaciones.

En cuanto a los fluidos analizados, se pudo observar en los resultados de inclusiones fluidas que para las tres etapas se hacían agrupaciones con diferente salinidad. Con base en esto se concluyó la presencia de fluidos con alta salinidad ($>14\text{wt}\%$ NaCl equiv) asociado principalmente a la mineralización de menas en la Etapa 1 (SN340), fluidos con salinidad intermedia (entre 6 y $11\text{wt}\%$ NaCl equiv) asociados

en su mayoría con la mineralización de la Etapa 2 tanto en los niveles más profundos (SN340) como en los intermedios (SN270-zona central) y de la Etapa 3 en los subniveles 270 y 200 (zona central y poniente, respectivamente). Fluidos con baja salinidad ($<5\text{wt}\%$ NaCl equiv) que no presentan asociación con mineralización de sulfuros y sulfosales y que estarían asociados a la mineralización de los bandeamientos de ganga de cuarzo y calcedonia.

El mecanismo de precipitación principal observado para la Veta San Carlos es el de ebullición. Este proceso cuenta con diferentes evidencias (p.ej. texturas tipo lattice, inclusiones fluidas) que lo asocian con la presencia de mineralización de sulfuros y sulfosales en diferentes etapas, subniveles y zonas del yacimiento; principalmente en las zonas más profundas (SN340) y la zona poniente de la veta. Otros mecanismos de precipitación que se identificaron fueron enfriamiento y mezcla hidrotermal, ambos evidenciados principalmente por la distribución de los resultados de inclusiones fluidas; y que a su vez permiten ver la evolución en los fluidos y en la fuente de los mismos.

Por último, el análisis isotópico de azufre permitió no solo obtener el rango de valores para las muestras de sulfuros y sulfosales analizados y poder asociar estos con un origen principalmente magmático, sino que se buscó distinguir las diferentes etapas a las que pertenecen estos minerales y de esta forma poder percibir mejor la evolución de la fuente de azufre en los fluidos o distinguir los diferentes procesos que pudieron haber ocasionado cambios en su composición (p.ej. interacción de los fluidos mineralizantes con las rocas encajonantes).

REFERENCIAS

- Albinson F, T 1988 - Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombroete, Colorado, and Fresnillo districts, Zacatecas State, Mexico: in *Econ. Geol.* v83 pp 1647-1667.
- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., and Chomiak, B.A., 2001, Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data, in Albinson, T., and Nelson, C.E., eds., *New mines and discoveries in Mexico and Central America: Society of Economic Geologists Special Publication Series*, v. 8, p. 1–32
- Álvarez, S. A. A., & Samaniego, Á. F. N. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.
- Aranda-Gómez, J. J., Aranda-Gómez, J. M., & Nieto-Samaniego, A. F. (1989). Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central: Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista*, 8, 33-46.
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., & Henry, C. D. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuenca y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 59-71.
- Arribas, A., Cunningham, C.G., Rytuba, J.J., Rye, R.O., Kelly, W.C., Podwysoki, M.H., Mckee, E.H. & Tosdal, R.M. (1995): Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold alunite deposit, Spain. - *Econ. Geol.* 90: 795-822.
- Barton, P.B. & Bethke, P.M. (1987): Chalcopyrite disease in sphalerite: pathology and epidemiology. - *Am. Miner.* 72: 451-467.
- Bente, K. & Doering, T. (1993): Solid-state diffusion in sphalerites: an experimental verification of the "chalcopyrite disease". - *Eur. J. Min.* 5: 465-478.
- Benton, L. D. (1991). Composition and source of the hydrothermal fluids of the Santo Nino Vein, Fresnillo, Mexico, as determined from ⁸⁷Sr—Sr, stable isotope, and gas analyses (Doctoral dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology).
- Bortnikov, N.S., Genkin, A.D., Dobrovolskaya, M.G., Muravitskaya, G.N. & Filimonova, A.A. (1991): The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite: exsolution, coprecipitation, or "disease"? - *Econ. Geol.* 86: 1070-1082
- Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S., & Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 84-98.
- 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.
- Camprubi, A., Prol-Ledesma, R. M., & Tritlla, J. (1999). Comments on 'Metallogenic evolution of convergent margins: selected ore deposit models' by SE Kesler. *Ore Geology Reviews*, 14, 71-76.
- 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.
- Camprubí, A., Norman, D. I., & Chomiak, B. A. (2003). Evidence for fluid sources by quadrupole mass spectrometry in the La Guitarra AgAu epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 593–599.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México-Actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Camprubí, A., González-Partida, E., & Iriondo, A. (2006). Mineralizing fluids of the shallow epithermal Au–Ag deposits of the El Barqueño district, Jalisco, Mexico. *Journal of geochemical Exploration*, 89(1-3), 39-44.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2007). Epithermal deposits in México—Update of current knowledge, and an empirical reclassification. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 377-415.
- Camprubi, A. (2009). Major metallogenic provinces and epochs of Mexico. *SGA News*, 25, 1-20.
- Camprubí, A. (2013). Tectonic and metallogenic history of Mexico. Tectonics, metallogeny, and discovery: the North American Cordillera and similar accretionary settings: Society of Economic Geologists, Special Publication, 17, 201-243.
- CANDELA, P.A. Y PICCOLI, P.M. (1995): Model ore-metal partitioning from melts into vapor and vapor/brine mixtures. In: I.F.H. Thompson (ed.), *Magma, fluids and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 23: 101-127.
- Cantú-Chapa, C. M. (1974). Una nueva localidad del Cretácico inferior en México. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 1(4), 51-54.
- Carrillo-Rosúa F.J., Morales-Ruano S., Boyce A.J. & Fallick A.E. (2003a): High and intermediate sulphidation environment in the same hydrothermal deposit: the example of Au-Cu Palai-Islica deposit, Carboneras (Almería). In: ELIOPOULOS, D.G. *et al.* (eds.): *Mineral exploration and sustainable development*: Rotterdam, Netherlands, Millpress, pp. 445-448.
- Centeno-García, E., & Silva-Romo, G. (1997). Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(2), 244-260.
- Centeno-García, E., Guerrero-Suástegui, M., & Talavera-Mendoza, O. (2008). The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone. *Geological Society of America Special Papers*, 436, 279-308.
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M., & Gehrels, G. (2011). Evolution of the Guerrero composite terrane along

- the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc. *Geological Society of America Bulletin*, 123(9-10), 1776-1797.
- Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J. A., Vázquez, P., Damián, N., Cossio Torres, T., & Aranda Gómez, J. J. (2011). Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 253-270.
 - Chico, E. (1986). Mineralogy, paragenesis, and fluid inclusion studies of three veins of the Fresnillo mining district; Zacatecas, Mexico: Unpub (Doctoral dissertation, MS thesis, Dartmouth College).
 - Clark, K. F., Damon, P. E., Shafiquillah, M., Ponce, B. F., and Cardenas, D., 1981, Sección geologica-estructural a traves de la parte Sur de la Sierra Madre Occidental, entre Fresnillo y la costa de Nayarit: Asociación de Ingenieros Mineros, Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica XIV, p. 69–99.
 - Clark, K. F., Foster, C. T., & Damon, P. E. (1982). Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 93(6), 533-544.
 - Clark, K. F., & Fitch, D. C., 2013. Evolution of metallic deposits in time and space in Mexico. UTEP.
 - Coney, P. J. (1972). Cordilleran tectonics and North America plate motion. *American Journal of Science*, 272(7), 603-628.
 - Cook N. J., Ciobanu C. L. and Mao J. W. (2009) Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton, (Hebei Province, China). *Chem. Geol.* 204, 101–121.
 - Damon, P. E., Shafiquillah, M., & Clark, K. F. (1981). Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5(2), 223-238.
 - Davila Alcocer, V. M. (1981). Radiolarias del Cretácico Inferior de la Formación Plateros, distrito minero de Fresnillo, Zacatecas: Univ. Nac. Autónoma México, *Inst. Geología Rev*, 5, 119-120.
 - De Cserna, Z. (1976). Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 87(8), 1191-1199.
 - Del-Pozo-Mendoza, R. D. J. (2014). Cocientes metálicos: un nuevo sistema de exploración en 2270, distrito minero Fresnillo, Zacatecas.
 - Di Benedetto, F., Bernardini, G.P., Costagliola, P., Plant, D. & Vaughan, D.J. (2005): Compositional zoning in sphalerite crystals. - *Am. Miner.* 90: 1384-1392.
 - Dong, G., Morrison, G., & Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology*, 90(6), 1841-1856.
 - Earthman, M. A. (2010). Sulfur Isotope and fluid inclusion study of fluid sources within the Fresnillo southwest silver district, Zacatecas, Mexico (Doctoral dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology).
 - Eckberg, E. (1999). A fluid inclusion and cathodoluminescence study of the Santo Niño and San Carlos vein systems in the Fresnillo Silver District, Zacatecas, Mexico.
 - Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. *México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 1-26.
 - Eldrige, C.S., Bourcier, W.L., Ohmoto, H. & Barnes, H.L. (1988): Hydrothermal inoculation and incubation the chalcopyrite disease in sphalerite. - *Econ. Geol.* 83: 978-989
 - 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.
 - Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Hockett, B. 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.
 - Fix, J. E. (1975). The crust and upper mantle of central Mexico. *Geophysical Journal International*, 43(2), 453-499.
 - Freydier, C., Lapierre, H., Ruiz, J., Tardy, M., Martínez-R, J., & Coulon, C. (2000). The Early Cretaceous Arperos basin: An oceanic domain dividing the Guerrero arc from nuclear Mexico evidenced by the geochemistry of the lavas and sediments. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4), 325-336.
 - Gastil, G., Krummenacher, D., and Jensky, A. W., 1979a, Reconnaissance geology of west-central Nayarit, Mexico: Summary: *Geological Society of America Bulletin*, part I, v. 90, p. 15–18
 - Gemmell, J. B., Simmons, S. F., & Zantop, H. (1988). The Santo Niño silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico; Part I, Structure, vein stratigraphy, and mineralogy. *Economic Geology*, 83(8), 1597-1618
 - Gemmell, J. B., Zantop, H., & Birnie, R. W. (1989). Silversulfosalts of the Santo Niño vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico. *Canadian Mineralogist*, 27, 401-418.
 - Gottesmann, W. & Kampe, A. (2006): Zn/Cd ratios in calcisilicate-hosted sphalerite ores at Tumurtijin-ovoo, Mongolia. - *Chem. Erde- Geochem.* doi: 10.1016/j.chemer.2007.01.002
 - Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Robert, F., & Hart, C. J. (2003). Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic geology*, 98(1), 1-29.
 - Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Reynolds, T. J. (1998). Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4), 373-404.
 - Helgeson, H.C. (1964): Complexing and hydrothermal ore deposition. Pergamon, New York, 136 p.

- Henley, R. W., Brown, K. L., 1985. A practical guide to the thermodynamics of geothermal fluids and hydrothermal ore deposits. *Reviews in Economic Geology* 2: 25-44.
- Hughey, E. (1999). Mineral deposition, paragenesis, and fluid flow in the San Carlos vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico.
- Huston D. L., Sie S. H., Suter G. F., Cooke D. R. and Both R. A. (1995) Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Econ. Geol.* 90, 1167–1196.
- Joan, Z. (1988): Indium and Germanium in the structure of sphalerite: an example of coupled substitution with copper. - *Miner. Petrol.* 39: 211-229.
- Jonasson, I.R. & Sangster, D.F. (1978): Zn/Cd ratios for sphalerites from some Canadian sulfide ore samples. - *Geol. Surv. Can.* 78, 195-201.
- Kapusta, Y., 2005, Reporte de fechamientos radiométricos por el método de K/Ar roca total, Unpublished Internal Report for Peñoles Industries, 2 p.
- Kojima, S., Nagase, T. Y Inoue, T. (1995): A coprecipitation experiment on the chalcopyrite disease texture involving Fe-bearing sphalerite. - *J. Miner. Petrol. Econ. Geol.* 90: 261- 267.
- Kuhlemann, J. & Zeeh, S. (1995): Sphalerite stratigraphy and trace element composition of East Alpine Pb-Zn deposits (Drau Range, Austria-Slovenia). - *Econ. Geol.* 95: 2073- 2080.
- Labarthe, G., Tristán, M., & Aguillón, R. A. (1982). Estudio geológico-minero del área de Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas: Instituto de Geología y Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico, 76, 80.
- Lang, B., Steinitz, G., Sawkins, F. J., & Simmons, S. F. (1988). K-Ar age studies in the Fresnillo silver district, Zacatecas. *Economic Geology*, 83(8), 1642-1646.
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Iriondo, A. (2008). Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(3), 533-548.
- Lusk J. and Ford C. E. (1978) Experimental extension of the sphalerite geobarometer to 10 kbar. *Am. Mineral.* 63, 516–519
- Macdonald, A. J., Kreczmer, M. J., & Kesler, S. E. (1986). Vein, manto, and chimney mineralization at the Fresnillo silver-lead-zinc mine, Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(10), 1603-1614.
- 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.
- McDowell, F., & Clabaugh, S. E. (1981). The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5(2), 195-206.
- Megaw, P. K. M. (2010). Discovery of the silver-rich Juancipio-Valdecañas zone, western Fresnillo district, Zacatecas, Mexico. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ*, 15, 119-132.
- Miranda-Gasca, M. A. (2000). The metallic ore-deposits of the Guerrero Terrane, western Mexico: an overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4), 403-413.
- Moh G. H. and Ja"ger A. (1978) Phasengleichgewichte des Systems Ge–Pb–Zn–S in Relation zu Germanium-Gehalten alpiner Pb– Zn-Lagersta"tten. *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt Wien* 1978. pp. 437–440.
- Möller P. (1987) Correlation of homogenization temperatures of accessory minerals from sphalerite-bearing deposits and Ga/Ge model temperatures. *Chem. Geol.* 61, 153–159.
- Moncada de la Rosa, J. D. (2008). *Application of Fluid Inclusions and Mineral Textures in Exploration for Epithermal Precious Metals Deposits* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Nagase, T. & Kojima, S. (1997): A SEM examination of the chalcopyrite disease texture and its genetic implications. - *Mineral. Mag.* 61: 89-97.
- Nieto-Samaniego, A. F. (1992). Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(2), 146-155.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Labarthe-Hernández, G. (1997). La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(1), 13-25.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(3), 347-363.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Álvarez, S. A. 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.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2007). Mesa Central of México: Stratigraphy, structure, and Cenozoic tectonic evolution. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 41-70.
- Nuñez- Peña, E. P., & Berumen, H. R. Actualización de las redes piezométricas del acuífero Chupaderos, estado de Zacatecas.
- Oftedahl I. (1940) Untersuchungen u"ber die Nebenbestandteile von Erzmineraleien norwegischer zinkblendfu"render Vorkommen. *Skrift. Norsk Vidensk. Akad. Oslo, Math. Naturv. Kl.* 8, 1–103.
- Ortega-Gutierrez, F., Ruiz, J., & Centeno-Garcia, E. (1995). Oaxaquia, a Proterozoic microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic. *Geology*, 23(12), 1127-1130.

- Perez, A. A. (2015). The mineral industry of Mexico. *Minerals Yearbook: Volume 3: Area Reports: International Review: 2012 Latin America and Canada*, 3.
- Querol, F. & Palacios, H., 1990, *Geology of the Fresnillo Mining District, Zacatecas*. Compañía Fresnillo, S.A. de C.V., en: *Mexican Silver Deposits*. Edited by K.F. Clark, Society of Economic Geologists-Special Publication.
- Ramdohr, P. (1969): *The ore minerals and their intergrowths*. - Pergamon Press, Oxford, U.K.
- Reyes, A.G., 1990, *Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 43, p.279-09.
- Romero-Rojas, S. A. (1977). *Estudio geológico en la zona de óxidos proyecto Glory-Hole Unidad Fresnillo* (Doctoral dissertation, SA Romero Rojas).
- Ruvalcaba-Ruiz, D. C., & Thompson, T. B. (1988). Ore deposits at the Fresnillo mine, Zacatecas, Mexico. *Economic Geology*, 83(8), 1583-1597.
- Scott S.D. (1974): *Experimental methods in sulfide synthesis*. - In: RIBBE, P.H. (ed.): *Sulfide mineralogy*. Rev. Miner. 1, Washington D.C., USA, Miner. Assoc. Am. pp 1-38.
- Seward, T. M., Williams-Jones, A. E., & Migdisov, A. A. (2014). The chemistry of metal transport and deposition by ore-forming hydrothermal fluids. *Treatise on Geochemistry*, 13, 29-57.
- Seward, T. M., Barnes, H. L. 1997. Metal transport by hydrothermal fluids. En: Barnes HL (Ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd edn. Wiley, New York, p. 435-486.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., & Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geological Society of America Special Papers*, 278, 1-153.
- Shimizu, T. (2014). *Reinterpretation of Quartz Textures in Terms of Hydrothermal Fluid Evolution at the Koryu Au-Ag Deposit, Japan*. *Economic Geology*, 109(7), 2051–2065.
- Sibson, R. H. (1987). Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, 15(8), 701-704.
- Silva-Romo, G. (1993). *Estudio de la Estratigrafía y Estructuras Tectónicas de la Sierra de Salinas*. Edos. de San Luis Potosí y Zacatecas [MS thesis]: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México.
- Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 315-343.
- Sillitoe, R. H., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 845-890.
- Simmons, S. F., Gemmell, J. B., & Sawkins, F. J. (1988). The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas; Part II, Physical and chemical nature of ore-forming solutions. *Economic Geology*, 83(8), 1619-1641.
- Simmons, S. F. (1991). Hydrologic implications of alteration and fluid inclusion studies in the Fresnillo District, Mexico; evidence for a brine reservoir and a descending water table during the formation of hydrothermal Ag-Pb-Zn orebodies. *Economic Geology*, 86(8), 1579-1601.
- Simmons, S. F., & Christenson, B. W. (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294(3), 361–400.
- Simmons S.F., White N.C. & John D. (2005): Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. - HEDENQUIST J.W. *et al.* (eds.): in: *Economic Geology 100th Anniversary Volume 1905-2005*. Soc. Econ. Geol., Littleton, Colorado, USA, pp 485-522.
- 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.
- Stoffregen, R. E. (1987). Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 82(6), 1575-1591.
- Stone, J. B., & McCarthy, J. C. (1948). Mineral and metal variations in the veins of Fresnillo, Zacatecas, Mexico. *Am. Inst. Min. Eng. Trans*, 148, 91-106.
- Taylor, R. (2010). *Ore textures: recognition and interpretation*. Springer Science & Business Media.
- Tang, Y.-Y., Bi, X.-W., Fayek, M., Hu, R.-Z., Wu, L.-Y., Zou, Z.-C., Wang, X.-S. (2014). Microscale sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from the Jinding Zn–Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China. *Gondwana Research*, 26(2), 594–607. doi: 10.1016/j.gr.2013.07.021
- Trejo, P. (2001). *Geology of the Fresnillo Southeast Mine, Fresnillo, Zacatecas, Mexico*. SPECIAL PUBLICATION-SOCIETY OF ECONOMIC GEOLOGISTS, 8, 105-114.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Cruz-Márquez, J., García-Arreola, M. E., Bellon, H., & Labarthe-Hernández, G. (2015). Características geoquímicas y significado tectónico del complejo de diques y domos félsicos del Paleoceno-Eoceno de La Tesorera, Zacatecas, en la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(3), 455-474.
- Velador, J. M. (2010). Timing and origin of intermediate sulfidation epithermal veins and geochemical zoning in the Fresnillo District, Mexico: constrained by 40 Ar/39 Ar geochronology, fluid inclusions, gas analysis, stable isotopes, and metal ratios (Doctoral dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology).
- Vélez-Scholvink, D. (1990). Modelo transcurrente en la evolución tectónico-sedimentaria de México: *AMGP Boletín*, v.
- White, N. C., & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG newsletter*, 23(1), 9-13.
- Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits: *Lithos*, 55, 229–272.