

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



**FACULTAD DE INGENIERIA
AREA CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS DE LOS YACIMIENTOS
DE MERCURIO EN EL ÁREA DE GUADALCÁZAR, S. L. P.”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOLOGO**

Presenta
Virginia Rebeca de Jesús Morales Ávila

San Luis Potosí, S.L.P Abril 2008



DEDICADO

Principalmente a Dios

Por otorgarme salud y bienestar, la facultad del saber para realizarme profesionalmente y la fortaleza para alcanzar las metas que me he trazado.

A mis Padres (José A. y Virginia R.)

De quienes aprendí mis principios y valores, a ser perseverante y sobre todo de darme vida y alegrías.

“A veces el hombre mas pobre deja a sus hijos la herencia mas rica”

A M. C. J. J. V. M.

Por su sabiduría, comprensión, amor y paciencia en todo momento.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo recepcional fue parcialmente financiado por el proyecto PAPIIT No. IN102107 y CONACYT No. 58825; concretamente los trabajo de campo y laboratorio de análisis microtermométricos, mismos que se llevaron al cabo con el enorme apoyo, asesoría y gran conocimiento del tema el Dr. Eduardo González Partida del Centro de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla, Otro le estaré eternamente agradecida,. Igualmente agradezco al Dr. Antoni Camprubi Cano para el desarrollo del mismo.

Agradecimiento especial a mis sinodales, el Dr. Delfino Ruvalcaba Ruiz por su asesoría en este trabajo, Ing. Miguel Mayer Tanguma por el apoyo en la descripción de láminas delgadas y en la elaboración de laminas pulidas y Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia, por sus comentarios finales hacia este trabajo.

Agradezco el apoyo otorgado al M. en C. Juan Manuel Torres Aguilera en la descripción mineragráfica.

Mi gratitud al Dr. Alfredo Aguillón Robles por sus sabios consejos y permitirme trabajar en el Instituto de Geología (UASLP) durante la realización de este proyecto.

Agradezco especialmente a mi gran amigo el Ing. Macario Rocha Rocha por su constante asesoría en este proyecto y atención personal; así como también mi buen amigo Ricardo Sierra Rivera por su ayuda en la espeleología, durante los trabajos de campo.

A mi amigo el Ing. Jorge Aceves de Alba por su constante asesoría en los Sistemas de Información Geográficos diferentes al realizar planos y gráficos del proyecto de tesis.

A quienes hice buenas amistades durante mi trayecto profesional de licenciatura; Nadia, Chino, Gastón, Karla, Marco, Eva, El Lic., Ing. Margarito T., Ing. Ramón T., Damián del Instituto de Geología; al Dr. Francisco González, Gilberto del centro de Geociencias de la UNAM.

A la M. en C. Leticia Padilla Sánchez y Finita, por el apoyo tanto administrativo, como moral y constante motivación para seguir adelante.

Al Ing. Juan José Vargas Martínez (Mi Chaparro) quien agradezco con todo mi corazón por compartir conmigo esta maravillosa etapa de mi vida.

A mis padrinos, la familia Puente Ojeda por su apoyo, paciencia y alegría que me proyectaron durante el principio y el final de esta tesis, quienes fueron como mi segundo hogar durante mi estancia en Querétaro.

Eternamente agradecida a mis padres Dr. José A. Morales Mendoza y Virginia R. Ávila de Morales por fomentar el esfuerzo a superarme y por su incondicional apoyo durante toda mi vida, y a mis hermanos C.P. Zaira, Lic. Antonio e Ing. Edgar y familias, en su constante aliento y de quienes tengo grandes ejemplos de vida.

Y a todas esas personas que germinaron en mí un granito de arena a mi persona... y especialmente Dios. ¡GRACIAS!!

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	ii
ILUSTRACIONES	vii
RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
A. Objetivos Generales	2
B. Metodología de trabajo	2
C. Antecedentes	4
Capítulo 1	
GEOGRAFÍA	6
1.1. Ubicación geográfica y vías de acceso	6
1.2. Fisiografía y geomorfología	8
1.3. Hidrografía	10
1.4. Clima y vegetación	12
Capítulo 2	
MARCO GEOLÓGICO	14
2.1. Geología regional	14
2.2. Geología local	17
2.3. Estratigrafía	25
2.3.1. Cretácico	25
• Formación Guaxcama	25
• Formación El Abra	27
2.3.2. Terciario	33
• Formación El Realejo	33
• Granito	34
• Ignimbrita El Leoncito	35
2.3.3. Cuaternario	37
2.4. Tectónica	37

	Pagina
Capitulo 3	
YACIMIENTOS MINERALES DE MERCURIO	40
3.1. Introducción	40
3.2. Antecedentes	41
3.3. Generalidades teóricas de depósitos hidrotermales	42
3.4. Tipos de yacimientos de mercurio	44
3.5. Descripción de la mineralización de mercurio y la relación con la estratigrafía	46
3.6. Distribución de los yacimientos y manifestación de Mercurio en el área de Guadalcazar	50
3.6.1. Muestreo	50
3.6.2. Generalidades de los yacimientos de mercurio dentro del área de estudio	51
3.6.3. Zonas mineralizadas de mercurio en el área de estudio	52
• Zona La Trinidad	52
• Zona Laguna de Gerardo	55
• Zona Oriente	59
3.6.4. Mineragrafía	63
Capitulo 4	
INCLUSIONES FLUIDAS	66
4.1. Generalidades	66
4.1.1. Temperatura de atrapamiento	68
4.1.2. Presión de atrapamiento	68
4.2.. Clasificación de las Inclusiones	70
4.2.1. Clasificación genética	70
4.2.2. Clasificación según el numero el fases	74
4.2.3. Otras clasificaciones.	74
4.3. Conceptos importantes	77
4.3.1. Fundamentos de estudio	77

	Pagina
4.4. Cambios post-atrapamiento que pueden producir diversas transformaciones en las fases capturadas y en la naturaleza física de la inclusión	79
4.4.1. Cambios en las fases	79
4.4.2. Reequilibrio de las paredes de las inclusiones	79
4.4.3. Cambios del emplazamiento y la morfología.	80
• Estrangulamiento (necking down)	80
• Aumento de volumen o extensión-dilatación (Stretching)	82
• Apertura y/o decrepitación y relleno con fluidos nuevos (leaking).	83
4.4.4. Detección de los fenómenos post-atrapamiento.	83
4.5. Selección de las inclusiones fluidas.	85
4.6. Preparación de muestras	85
4.6.1. Muestras en general.	85
4.6.2. Manejo de las muestras ya preparadas	86
4.7. Microtermometría	87
4.7.1. Equipo	87
4.7.2. Proceso de enfriamiento	90
4.7.3. Proceso de calentamiento	90
4.8. Los principales sistemas térmicos	91
4.8.1. El sistema H ₂ O-NaCl.	91
4.9. Datos micro-termométricos (Inclusiones fluidas)	93
DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFIA	107
ANEXOS	CD

ILUSTRACIONES

<i>INDICE DE FIGURAS</i>	Pagina
I.1. Localización del área de estudio dentro del municipio de Guadalcázar	6
I.2. Vías de acceso para el área de estudio	7
I.3. Mapa de subprovincias fisiográficas de San Luís Potosí	8
I.4. Aspecto en tercera dimensión del área de estudio, Sierra Guadalcázar	9
I.5. Cuencas hidrológicas del estado de S.L.P	10
I.6. Plano hidrológico de la zona de estudio	11
I.7. Mapa climático del estado de S.L.P	12
I.8. Diferentes zonas de vegetación	13
II.9. Provincias geológicas de la Republica Mexicana	14
II.10. Terrenos tectonoestratigráficos de la Republica Mexicana	16
II.11. Plano geológico del área de estudio en el municipio de Guadalcázar	18
II.12. Fotografía capturada en la mina Los Murciélagos	19
II.13. Interior de la mina Norte Laguna de Gerardo	20
II.14. Mina Los Yugos II	21
II.15. Columna estratigráfica del área de estudio Guadalcázar	24
II.16. Sección N-E del área de estudio en Guadalcázar	25
II.17. Plano estructural del área de estudio	39
III.18. Esquema comparativo volcánico-magmático	44
III.19. Mapa hipsométrico, mostrando las zonas como se dividieron los yacimientos de mercurio: zona La Trinidad, zona de Gerardo y zona Oriente, en el área de Guadalcázar	51
III.20. Ubicación de las minas de mercurio, sobre mapa de elevación y geológico. Zona La Trinidad en el municipio de Guadalcázar	52
III.21. Vista panorámica, parte de la zona La Trinidad	53
III.22. Aspecto de uno de los tiros, que se ubican en La Trinidad	53
III.23. Interior de mina Las Palmas	54
III.24. Ubicación de las minas de mercurio, sobre mapa de elevación y geológico. Zona Laguna de Gerardo, área de Guadalcázar	55
III.25. Minas de Santo Tomás	56

	Pagina
III.26. Vista general de la mina El Refugio de los patos, Ejido Laguna de Gerardo	57
III.27. Fotografía tomada dentro del área, minas de Santo Tomás	58
III.28. Localización de las minas de mercurio, sobre el mapa de elevación y geológico. Zona Oriente, área de Guadalcázar	59
III.29. Mina Los Yugos II, en la parte oriente del estudio	60
III.30. Fotografía tomada en interior mina de Los Yugos II	61
III.31. Fotografías tomadas hacia la parte oriente del área de estudio	62
IV.32. Mecanismos de captura de inclusiones fluidas primarias	71
IV.33. Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias	72
IV.34. Inclusiones pseudosecundarias	73
IV.35. Inclusiones primarias y secundarias	73
IV.36. Tipos de inclusiones	76
IV.37. Inclusión con estrangulamiento (necking down)	80
IV.38. Efecto de estrangulamiento (necking down)	81
IV.39. Efecto de dilatación (stretching) en una inclusión fluida	82
IV.40. Efecto de rompimiento y relleno de una inclusión fluida (leaking)	83
IV.41. Diagramas Th-Salinidad (Tf)	84
IV.42. Equipo microtermométrico con platina calentadora-refrigeradora, Linkam THMSG-600	87
IV.43. Platina térmica Linkam THMS600 (www.linkam.co.uk)	88
IV.44. Controladora de Temperatura (TMS94). Bomba de Nitrógeno y Dewar (THM-LNP94) del CGUNAM	90
IV.45. Relaciones de fase vapor-saturadas en el sistema NaCl-H ₂ O a baja temperatura	92
IV.46. Temperaturas de homogeneización general	95
IV.47. Histogramas utilizando promedios de las muestras en general	95
IV.48. Tipos de inclusiones fluidas en el granito Guadalcázar	96
IV.49. Diagrama de salinidad vs Temperatura de homogenización,	102

representando el comportamiento para cada una de las poblaciones de minerales en yacimientos de mercurio	102
IV.50. Aspecto del comportamiento de las inclusiones fluidas del intrusivo	103
IV.51. Diagrama del resumen de la temperatura de homogenización-salinidad, ilustrando rangos típicos para inclusiones de diferentes tipos de depósitos	104
IV.52. Sección con dirección al N-E, presentándose valores intermedios de temperaturas y salinidades	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores geológicos y geoquímicos de control para los yacimientos de mercurio	46
Tabla 2. Minerales de mercurio en yacimientos epigenéticos	48
Tabla 3. Resumen de resultados microtermométricos del análisis de inclusiones fluidas.	94

INDICE DE LAMINAS

Lamina 1. Petrografía de una muestra de la Formación el Abra, ejido Laguna de Gerardo	32
Lamina 2. Minerografía de la muestra tomada en zona Laguna de Gerardo	65
Lamina 3. Perspectiva de oro libre	66
Lamina 4. Inclusiones del granito	97
Lamina 5. Inclusiones fluidas en cinabrio-calcita	99
Lamina 6. Inclusiones en la fluorita del área de estudio	101

RESUMEN

Durante la historia minera, el mercurio se ha considerado como un elemento de explotación ocasional debido a su precio bajo en el mercado mundial y demanda esporádica. Este Distrito Minero de Guadalcázar se descubrió durante el siglo XVII en tiempos del Virrey Don Diego Fernández de Córdoba, Marqués de Guadalcázar empezando su explotación en la zona conocida como Minas Viejas. La extracción de mercurio fue muy importante sobre todo durante las guerras mundiales, especialmente en la segunda, sobresaliendo las minas de la Trinidad y San Antonio. Las minas de este distrito, región conocida como Sierra de Guadalcázar (SG) se ubican a 80 Km al NE de la ciudad de San Luís Potosí en la parte centro oriental de la Republica Mexicana, dentro de lo que se conoce fisiográficamente como la Plataforma Valles-San Luís Potosí (PVSLP).

La geología de la zona está comprendida por rocas sedimentarias del Cretácico inferior y son las Formaciones Guaxcamá (yesos) y El Abra (caliza) junto con La Formación El Realejo que es una brecha calcárea. Estas rocas están intrusionadas por un granito Terciario el cual esta relacionado con la mineralización del Distrito minero. Dentro de los diferentes tipos de mineralización relacionadas al intrusivo (Au-Ag-Pb-Zn-Hg). En este trabajo se estudiaron las diferentes minas de mercurio de la fase final del proceso mineralizante. Se determinaron temperaturas de homogenización en un rango que va de 104° - 348° C y temperaturas de fusión de $T_f = -0.2^{\circ}$ a -14° C, con un rango de salinidad de 0.35% a 18% de NaCl. Las altas temperaturas de homogenización son el producto del aumento en volumen (stretching) que sufrieron las inclusiones fluidas. De acuerdo con la salinidad y temperaturas de homogeneización, los fluidos de menores temperaturas corresponden a salinidades más bajas, interpretándose como un fenómeno de dilución. Esta información concuerda con datos publicados anteriormente en la bibliografía para este Distrito minero y otros semejantes.

INTRODUCCION

A. Objetivos Generales.

El objetivo general del presente trabajo, constituye aportar información original de microtermometría y salinidad; con el fin de lograr un mejor conocimiento acerca de las condiciones de formación de los yacimientos de mercurio en el Distrito minero de Guadalcázar, S.L.P.

A.1. Objetivos Específicos

1. Realizar una compilación de información geológica y geoquímica, existente sobre estos depósitos.
2. Motrar en planos los yacimientos y manifestaciones de mercurio en los alrededores del área, en el municipio de Guadalcázar.
3. Estudiar la geoquímica de sus fluidos.
4. Proponer un modelo coherente de génesis y evolución del depósito.

Al clasificar estos depósitos de mercurio, se podrán comprender sus condiciones geológicas, las cuales generaron el emplazamiento de esta mineralización.

B. Metodología del Trabajo

Con la finalidad de cumplir las expectativas y objetivos del trabajo de investigación se siguió una metodología que permitiera cumplir lo anterior.

B.1. Recopilación de Información

Se realizó la compilación de información geológica-minera relacionada a la región del Realejo municipio de Guadalcázar, S.L.P., así mismo se elaboraron bases de datos, gráficos, mapas y figuras correspondientes al área de estudio, según información generada por el Servicio Geológico Mexicano (escala 1:50,000); topografía y toponimia generada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (datos vectoriales Guadalcázar F14-A65), además de información

generada por el Instituto de Geología (UASLP), entre otros estudios realizados en distintas épocas que incluyen esta área.

B.2. Trabajo de Campo

Se realizó trabajo de campo, con el fin de ubicar, reconocer y muestrear los yacimientos y manifestaciones de mercurio en el área en cuestión. Durante esta etapa se posicionaron minas, tiros y catas, con mineralización de mercurio en coordenadas geográficas y UTM; la base fueron datos en planos obtenidos en la etapa de recopilación. Durante el reconocimiento sobre algunas obras mineras, se seleccionaron muestras con mineralización de mercurio y mineral de ganga como calcita, barita, fluorita y cuarzo, tanto en roca huésped como en terreros, con la finalidad de analizarlas y caracterizarlas. Además, se reconoció la mineralización.

B.3. Trabajo de Gabinete y Laboratorio

Se seleccionaron muestras adecuadas, con el objeto de prepararlas para realizar análisis de microtermometría, petrología, petrografía y mineragrafía. La laminación para el estudio microtermométrico se llevo a cabo en el taller de laminación del Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla, Qtro (Juan Tomas, laminador) y las laminas petrográficas en el Area Ciencias de la Tierra (UASLP).

Las muestras de gran formato se cortaron inicialmente con sierras de disco diamantado refrigeradas mediante agua; las muestras ya con formato para laminación se cortaron mediante una sierra diamantada de baja velocidad lubricada por agua Struers Minitom.

B.4. Resultados Obtenidos

Se registraron los resultados de análisis microtermométricos de las inclusiones concernientes a las muestras colectadas en las obras mineras de mercurio situados en los alrededores del cuerpo intrusivo (granito), en el municipio Guadalcázar.

B.5. Redacción de Texto

Se realizó el texto explicativo en formato tesis, con información geológica-minera, basada en la investigación documental minuciosa e información generada durante ésta. Conjuntamente se elaboró la cartografía geológica-minera, tomando como base los datos obtenidos en la recopilación bibliográfica y modificada con resultados derivados del trabajo de campo.

C. Antecedentes

En esta región del país existen gran cantidad de estudios con información geológica, pero la mayoría de ellos son de tipo descriptivo-evaluativo, ya sea de unidades litológicas, unidades magnetométricas, localización de yacimientos minerales y estudios geológicos-estructurales. Los trabajos más representativos son:

A nivel regional existe la Carta Metalogenética de la República Mexicana, (Salas, 1980), presenta la distribución de las zonas metálicas y las provincias fisiográficas, editada por el Consejo de Recursos Minerales.

Alonso-Lomeli L., (1981) realizó el estudio geológico minero del área de Realejo y parte del norte de la hoja de Guadalcázar.

González. P. J., (1983), es un estudio tipo geológico-económico.

Zermeño-Cataño, (1988) realizó un estudio metalogenético del municipio de Guadalcázar, S.L.P., que está enfocado en la prospección de yacimientos a lo largo y ancho de lineamientos bien definidos.

Torres-Hernández J. (1994) describe la evolución estructural de la sierra de Guadalcázar.

Torres-Hernández R. y Tristán-Hernández M., (1999), proporcionan el informe de la carta geológica-minera y geoquímica, de la Carta Guadalcázar, escala 1:50,000; Consejo de Recursos Minerales.

Solana-López J. y Mata-Lechuga J, (2006) realizan el inventario físico de los recursos minerales del municipio de Guadalcázar, S.L.P. realizados en diferentes épocas por el Servicio Geológico Mexicano y organismo antecesor.

Los trabajos antes mencionados son de carácter general y solo ofrecen una breve descripción de las zonas mineralizadas y fueron aprovechados como base bibliográfica.

CAPITULO 1

GEOGRAFÍA

1.1. Ubicación Geográfica y Vías de Acceso

La zona de estudio se ubica en la porción centro-norte del estado de San Luís Potosí, dista 80 kilómetros en dirección N 45° E de la ciudad de San Luís Potosí, dentro de los márgenes del municipio de Guadalcázar (Figura I.1.).

El área está ubicada en la hoja Guadalcázar F14-A65, escala 1:50,000; limitada por las coordenadas UTM 2,502,000 y 2,509,000 de latitud norte, 350,000 y 358,000 de longitud oeste y cubre una superficie de 56 km².

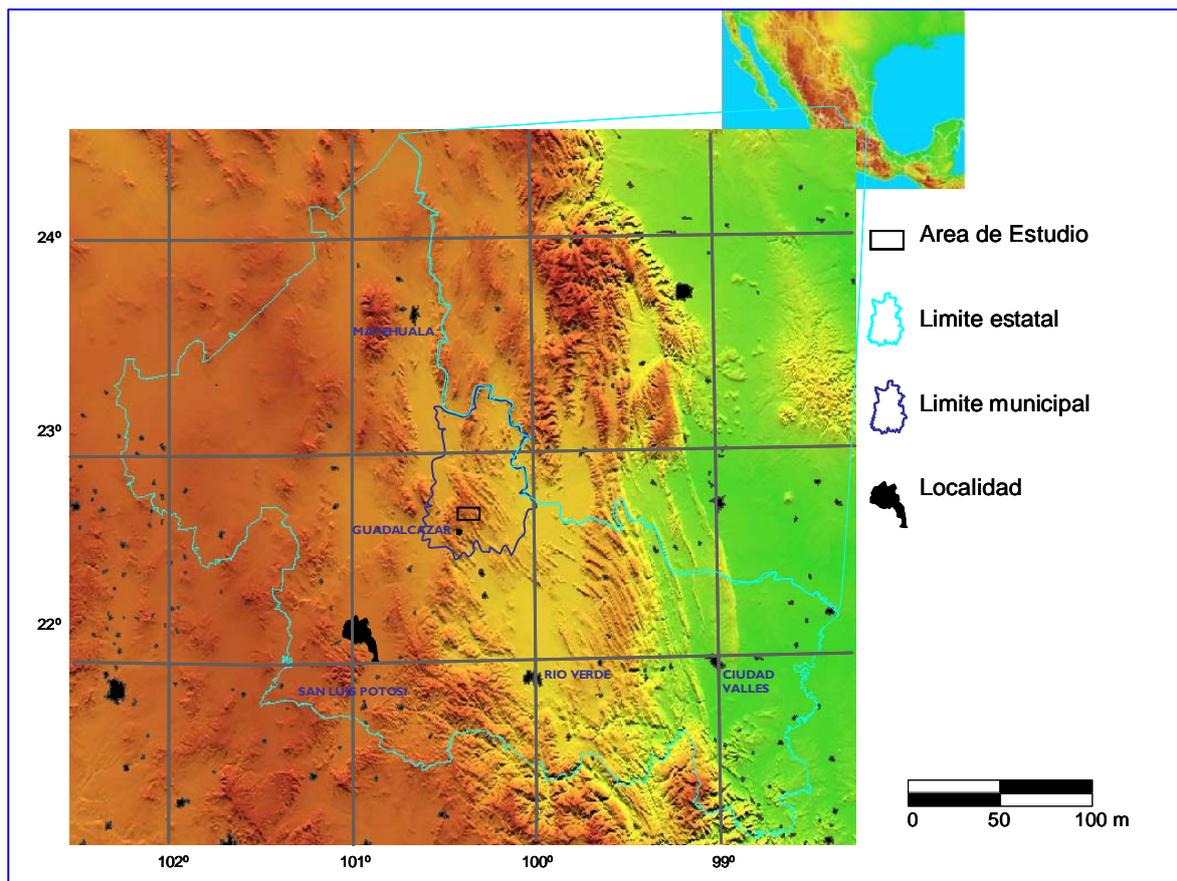


Figura I.1. Localización del área de estudio dentro del municipio de Guadalcázar

El acceso a la zona de estudio partiendo de la ciudad de San Luis Potosí, por la carretera federal N° 57 en dirección norte hasta el kilómetro 75, posteriormente se vira en dirección oriente por una carretera estatal pavimentada y sinuosa por una distancia de 15 kilómetros hasta llegar a la cabecera municipal de Guadalcazar. Desde este lugar se puede llegar a la porción oriental del área de estudio por un camino pavimentado en dirección oriente hasta el poblado El Abrégo, donde se desvía sobre un camino de terracería en dirección norte que se termina en la parte baja de la Sierra de Guadalcazar, subsiguientemente se camina a través de veredas que comunican a las minas de mercurio (Figura I.2).

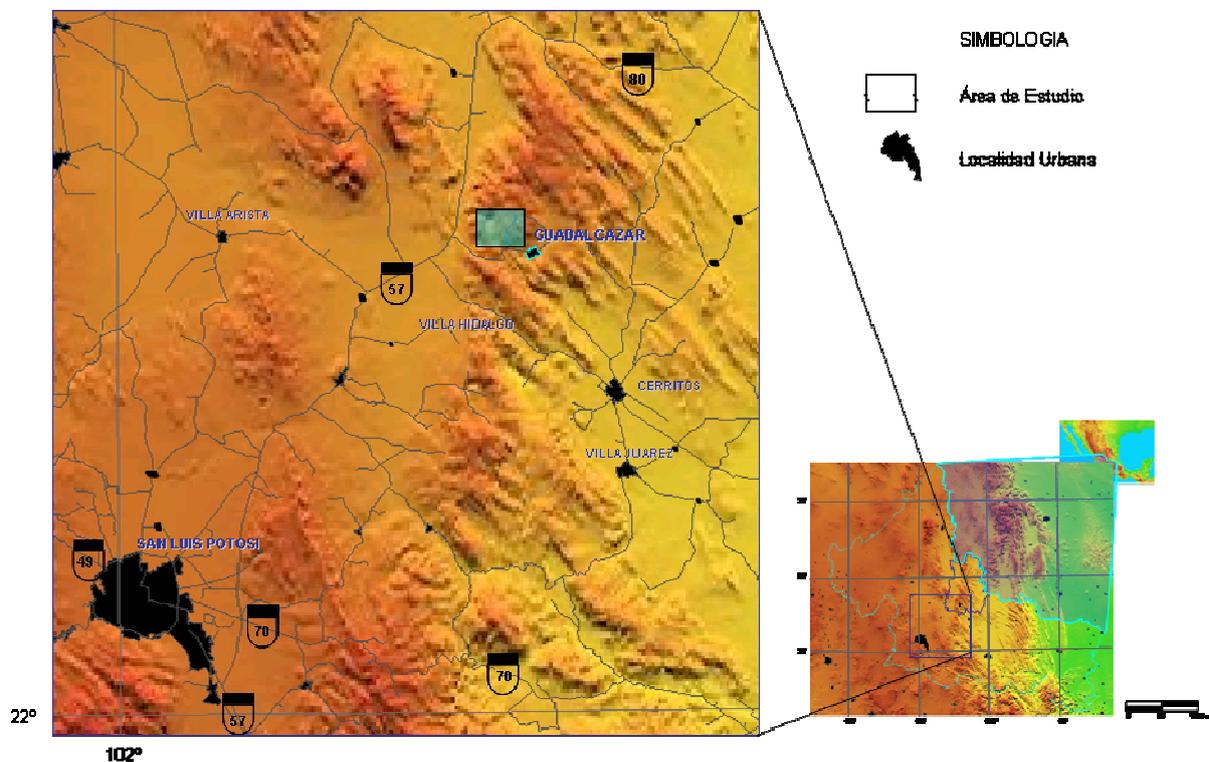


Figura I.2. Principales poblaciones y vías en el área de estudio

Para llegar a la porción centro y occidente del area de estudio se parte de la cabecera municipal de Guadalcazar, por una carretera estatal pavimentada con dirección oriente y por un tramo de 4.5 km. Posteriormente, se gira al noreste por una camino pavimentado y sinuoso que atraviesa los poblados Laguna de Gerardo, Mina de Plata y termina en El Realejo. Desde los poblados antes

Concretamente, el área de estudio se caracteriza por la presencia de un altiplano en la parte superior de la sierra, con áreas de depresión cársticas (dolinas, cavernas y mogotes). Estas son el resultado de la disolución de la roca calcárea por efectos de la infiltración del agua, a través de la caliza. Además en la morfología se distingue un lineamiento semicircular, provocado por el emplazamiento de un cuerpo intrusivo (Figura I.4).

Las elevaciones superiores son de hasta 2,240 m.s.n.m., representada en la porción oriente del área (cerros San Cristóbal y Las Comadres), mientras en la porción sur oriental la altitud es de 1,650 m.s.n.m. (Figura I.4).

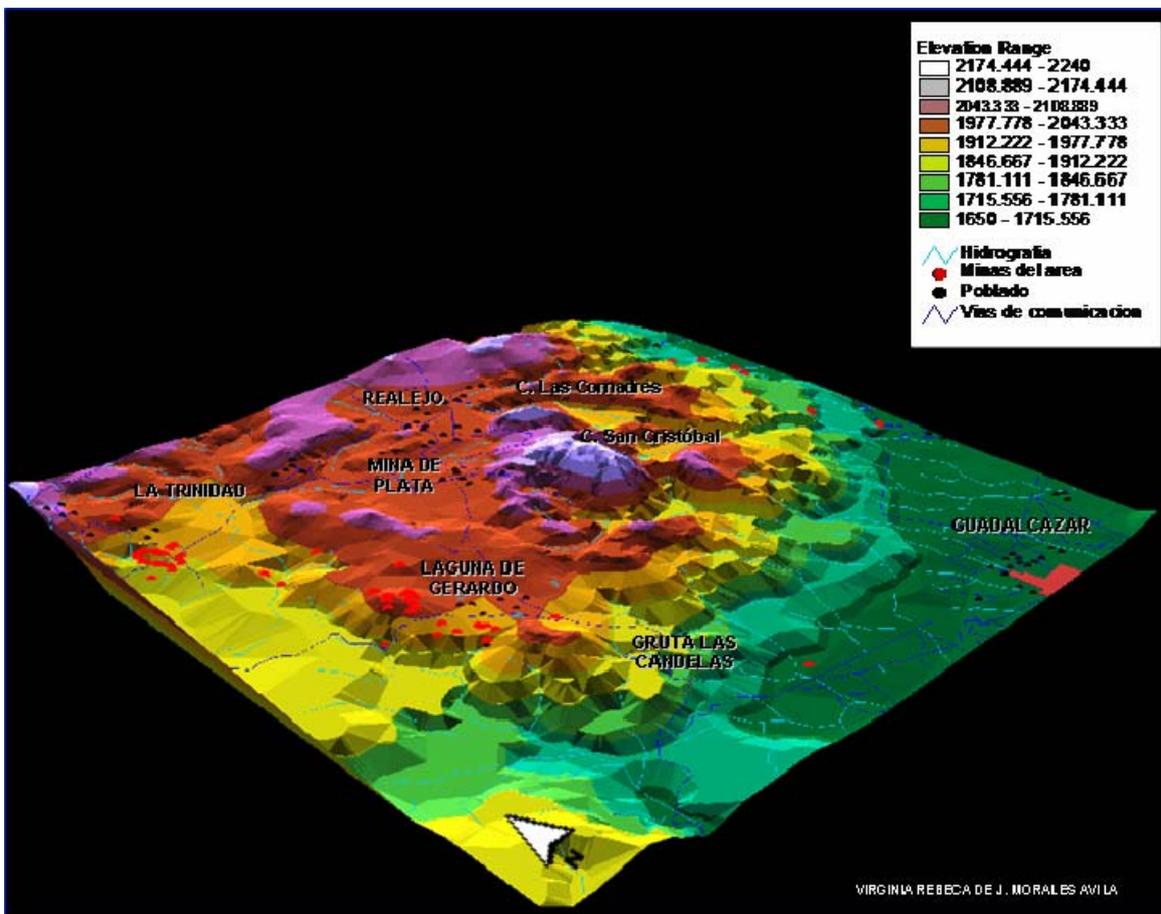


Figura I.4. Aspecto en tercera dimensión del área de estudio, color conforme a rango de elevación (Sierra de Guadaluca)

En la parte central de la zona de estudio, sobresale una geoforma alargada en dirección norte-sur que corresponde a los cerros San Cristóbal y Las Comadres formados por roca intrusiva (granito) y rodeados por caliza.

1.3. Hidrografía

La zona de estudio está ubicada dentro de la región hidrológica RH-37 denominada El Salado, INEGI (1997); comprende parte de la altiplanicie septentrional del estado de San Luis Potosí. Al occidente del área, limita con la cuenca Presa San José-Los Pilares, que se caracteriza por una serie de subcuencas endorreicas; su topografía de poca elevación equivale a un drenaje de tipo dendrítica en las rocas calcáreas y sin grandes corrientes superficiales. Hacia la parte sureste del área limita con la región hidrológica RH-26 (Pánuco), comprendida dentro de la cuenca Cerritos. Las corrientes que se generan dentro de esta cuenca drenan hacia el Golfo de México. (Figura I.5).

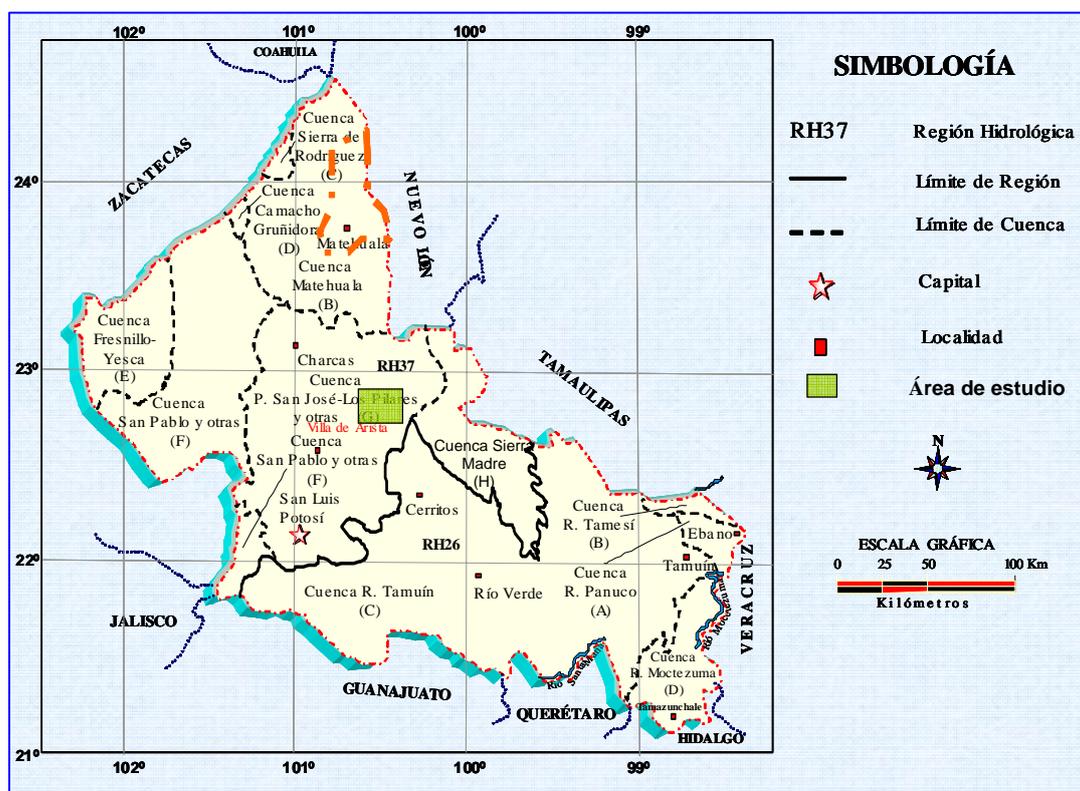


Figura I.5. Cuencas Hidrológicas del estado de SLP, tomado y modificado de INEGI (1997).

El drenaje superficial lo complementan varios arroyos intermitentes distribuidos en la mayoría del área de estudio, siendo la corriente tributaria El Muerto y el Arroyo Grande las principales. Al noroeste y centro de la zona, desembocan algunos arroyos en represas o estanques. El agua almacenada es usada con fines domésticos, agrícolas y pecuarios. Hacia la parte sur el drenaje es de tipo arborescente para las porciones mas bajas del área, es de tipo intermitente. Los arroyos y las corrientes se forman solo en temporada de lluvia y su curso es por lo general reducido a lo largo de estos arroyos, extinguiéndose en las llanuras debido a la infiltración y la evaporación: por tal razón no existen cauces permanentes. (Figura I.6).

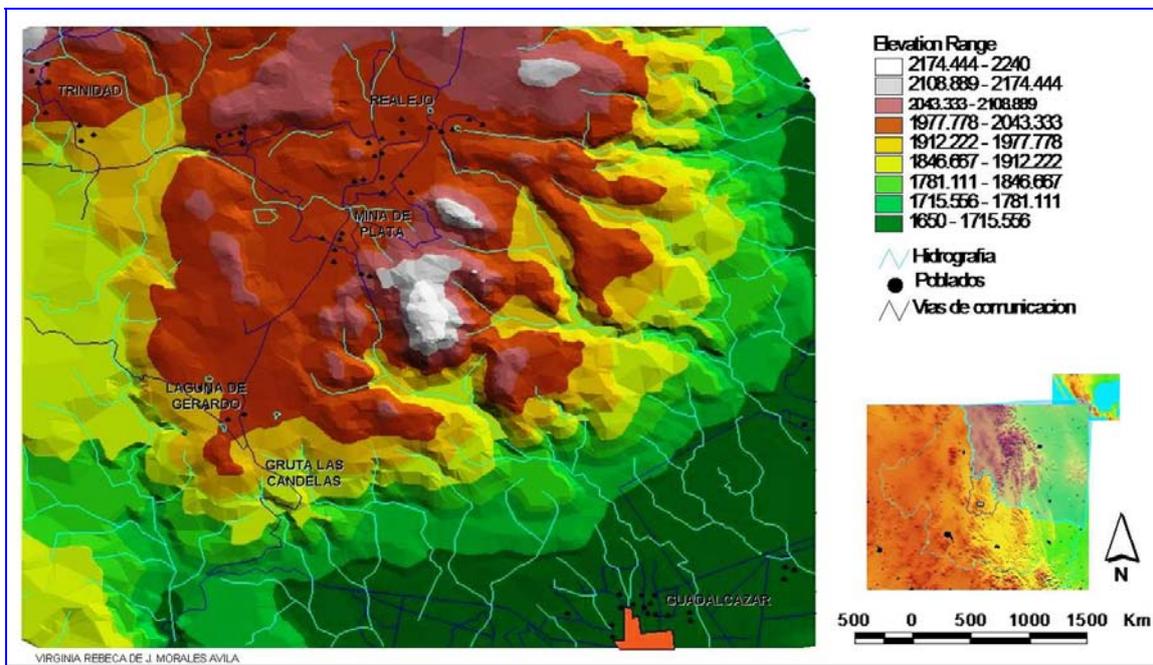


Figura I.6. Plano hidrológico de la zona de estudio.

1.4. Clima y Vegetación

El contexto geográfico, la disposición del relieve, la altitud y las condiciones atmosféricas provocan que el tipo de clima en el área de estudio sea una zona semicálida con lluvias en verano y algunas porciones semihúmedas [(A) Ca (x') (wa) (e) gw"] según Köppen y modificada por García, (1988). (Figura I.7).

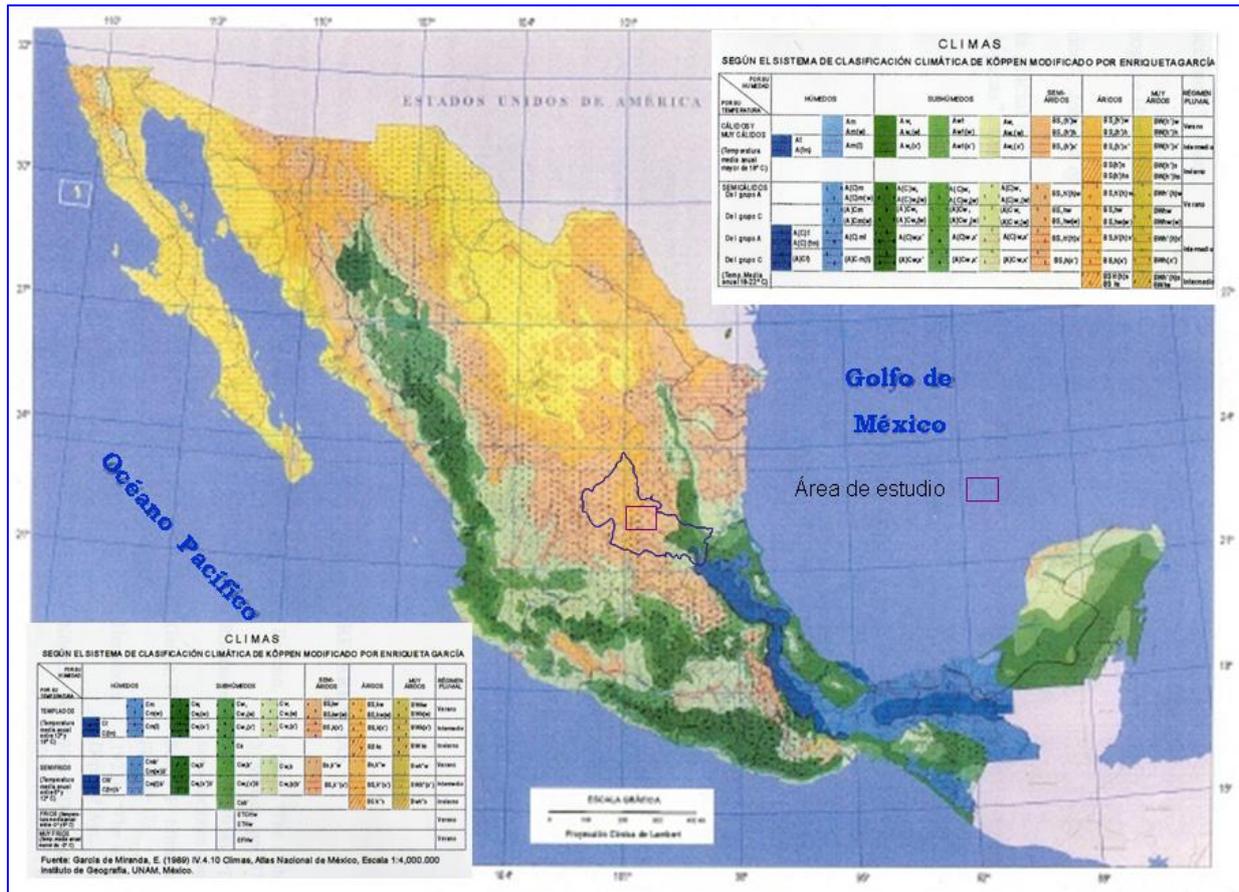


Figura I.7. Mapa de climas de la Republica Mexicana de Köppen modificado por Enriqueta García, (1988)

La precipitación media anual en esta zona es de 355 mm, mientras que la temperatura media anual es de 18° a 24°, y cambios de precipitación invernal entre 5° y 10.2° C publicado por INEGI, (1997).

La vegetación correspondiente a matorral combinado con izotal, además en las zonas altas predominan bosques de encinos y coníferas (Figura I.8), pero en gran parte abundan zonas con pastizales.

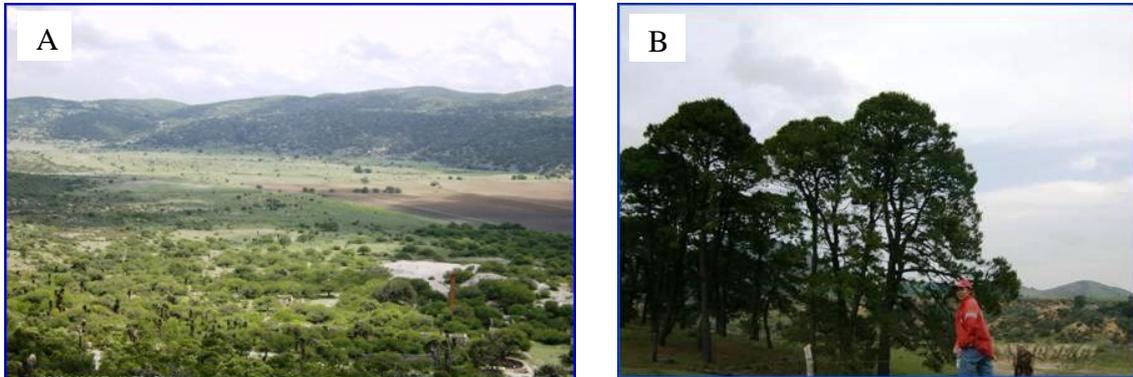


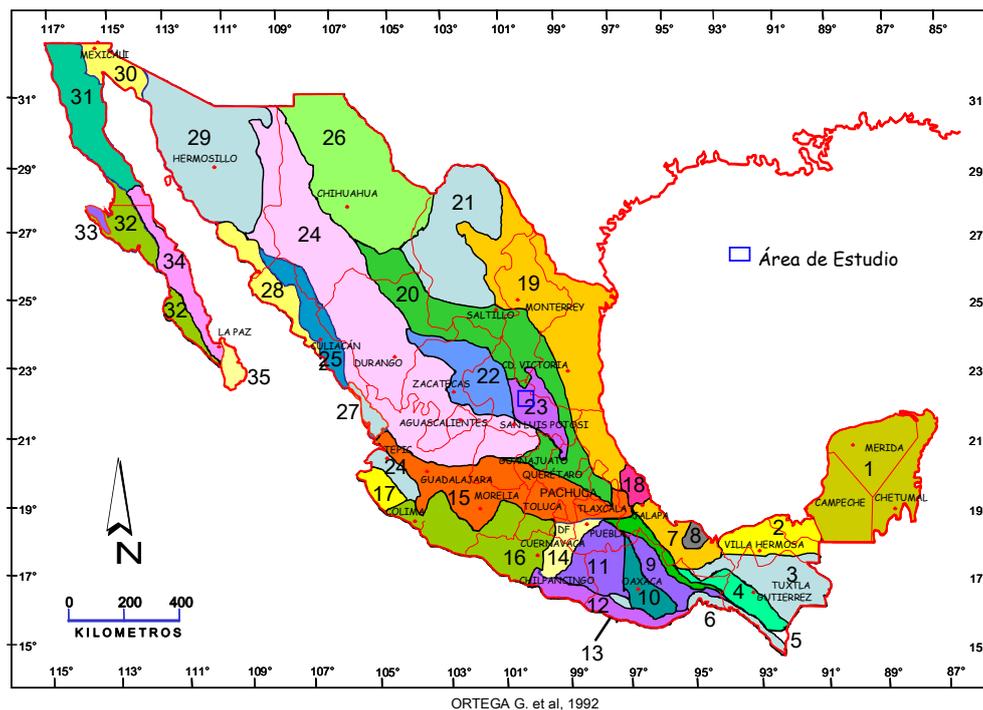
Figura I.8. Diferentes zonas de vegetación A. Representación de la vegetación, matorral e izotal B. Región alta con indicios de coníferas.

CAPITULO 2

MARCO GEOLOGICO

2.1. Geología Regional

Con la finalidad de ubicar la zona de estudio, dentro del marco geológico regional se presenta una síntesis.



- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Plataforma de Yucatán | 18. Macizo Ígneo de Palma Sola |
| 2. Cuenca deltáica de Tabasco | 19. Miogeoclinal del Golfo de México |
| 3. Cinturón Chiapaneco de Pliegues | 20. Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas |
| 4. Batolito de Chiapas | 21. Plataforma de Coahuila |
| 5. Macizo Ígneo del Soconusco | 22. Zacatecana |
| 6. Cuenca de Tehuantepec | 23. Plataforma de Valles-San Luis Potosi |
| 7. Cuenca Deltáica de Veracruz | 24. Faja Ignimbrítica Mexicana |
| 8. Macizo Volcánico de los Tuxtlas | 25. Cinturón Orogénico Sinaloense |
| 9. Cuicateca | 26. Chihuahuense |
| 10. Zapoteca | 27. Cuenca de Nayarit |
| 11. Mixteca | 28. Cuenca Deltáica de Sonora-Sinaloa |
| 12. Chatina | 29. Sonorense |
| 13. Juchateca | 30. Delta del Colorado |
| 14. Plataforma de Morelos | 31. Batolito de Juárez Sn Pedro Mártir |
| 15. Faja Volcánica Transmexicana | 32. Cuenca de Vizcaíno -Purísima |
| 16. Complejo Orogénico de Col. -Gro. | 33. Cinturón Orogénico Cedros-Vizcaíno |
| 17. Batolito de Jalisco | 34. Faja Volcánica de La Giganta |
| | 35. Complejo Plutónico de La Paz |

Figura II.9. Provincias Geológicas de la Republica Mexicana, por Ortega G. et al (1992).

En cuanto a provincias geológicas de acuerdo con Ortega et. al., (1992), esta región queda comprendida en la provincia denominada Plataforma Valles-San Luís Potosí (PVSLP) (Figura II.9). En el Mesozoico, la PVSLP se origino por una trasgresión marina (Carrillo-Bravo, 1971), la plataforma se caracteriza por una secuencia de evaporitas de la Formación Guaxcamá del Cretácico temprano y un banco arrecifal con desarrollo progresivo del Albiano al Maastrichtiano con las formaciones El Abra, Tamasópo y Cárdenas.

Las rocas más antiguas que afloran en la zona PVSLP corresponden a rocas metamórficas de esquistos granjeno y filitas de edad Paleozoica, expuesto en la porción norte (Miquihuana y Bustamante, Tamps.) según Carrillo-Bravo, (1971). Los Esquistos Granjeno sobreyacen discordantemente a los lechos rojos de edad Jurásico Inferior-Medio.

En el Jurásico Superior se depositaron rocas de un ambiente deltáico conocida como Formación Huayacocotla, expuesta en la porción sur de la provincia geológica (El Alamito, municipio de Río Verde, S.L.P.); esta formación se encuentra constituida por una secuencia de arenisca, cuarcita, pizarra, lutita y limonita. Esta unidad estratigráficamente, subyace discordantemente a la Formación El Abra.

El Cretácico Inferior se presenta una secuencia evaporítica llamada Formación Guaxcamá, expuesta en la parte central de la PVSLP, desarrollándose hacia sus márgenes un ambiente arrecifal denominado Formación El Abra. Hacia finales del Cretácico Superior se depositaron secuencias calcáreo-arcillosas.

Durante el Terciario-Oligoceno, la actividad magmática de cuerpos ígneos en la porción sur-occidente de la PVSLP, sobreyacen sobre una secuencia de fases granito-granodiorita-monzonita del Mesozoico. En el Cuaternario los depósitos en esta provincia geológica fueron básicamente conglomerados polimícticos y arcillas

ocasionalmente intercalados con derrames basálticos, que rellenaron depresiones o fosas tectónicas.

En el contexto geotectónico (Figura II.10), el área en estudio queda comprendida en la unidad tectonoestratigráfica denominada Terreno Sierra Madre (Campa y Coney, 1983). El aspecto estructural y el contraste en composición y ambiente de depósito de los sedimentos del Jurásico-Cretácico entre los Terrenos Guerrero y Sierra Madre, sugieren una considerable cantidad de eventos tectónicos ocurridos durante el Cretácico Tardío (Orogenia Laramide).



Figura II.10. Terrenos tectonoestratigráficos de la República Mexicana por Campa y Coney, (1983).

El terreno Sierra Madre evolucionó en una margen continental, relativamente profunda, con una probable subducción continua y depósitos de carbonatos en la cuenca Mesozoica del centro de México, depositándose sobre un basamento asociado con la evolución del arco continental del Triásico Superior-Jurásico Medio; esta sedimentación estaba controlada por un sistema de fosas y pilares.

Durante la fase de deformación de la Orogenia Laramide, el Terreno Guerrero fue levantado y deslizado sobre una porción del Terreno Sierra Madre, el cual corresponde a una zona de cizalla intensa, frágil, dúctil de varios kilómetros de ancho (Campa y Coney, 1983).

2.2. Geología Local

La secuencia litológica que aflora dentro del área de estudio esta representada en la Figura II.11. El registro litológico inicia con las evaporitas de la Formación Guaxcamá (Aptiano) al noroeste del área; formada ocasionalmente por anhidrita la cual presenta textura sacaroidea (Figura II.12), y yeso bandeado, de color gris claro a oscuro.

Cabe mencionar que en dicha formación existe mineralización de mercurio en forma de cinabrio (HgS_2) diseminado, como se muestra en la Fotografía 4. La Formación Guaxcamá, estratigráficamente, sobreyace a ella una secuencia delgada de rocas dolomíticas, cambiando transicionalmente a estratos calcáreos.

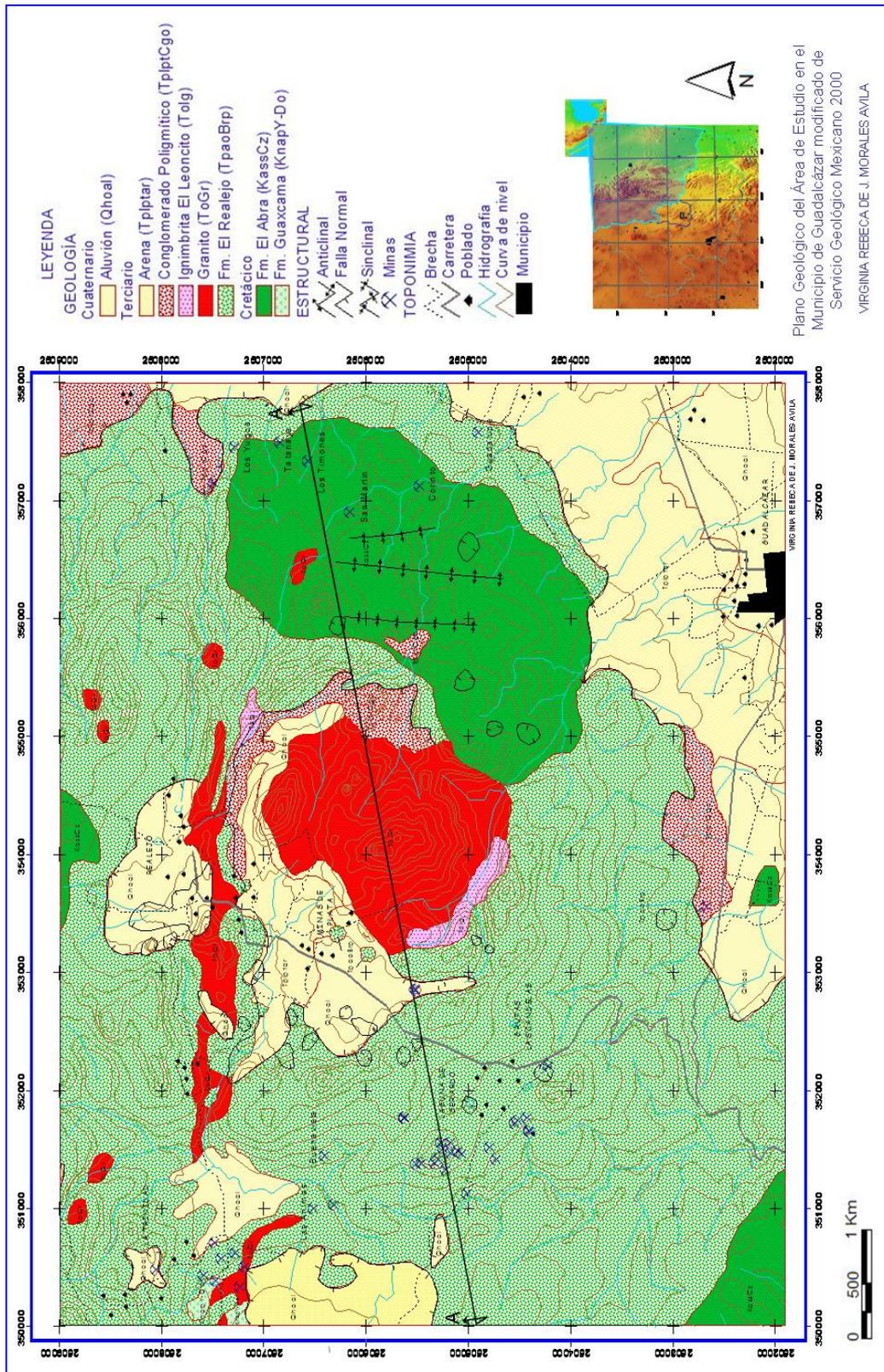


Figura II.11. Plano geológico del área de estudio, en el municipio de Guadalcázar

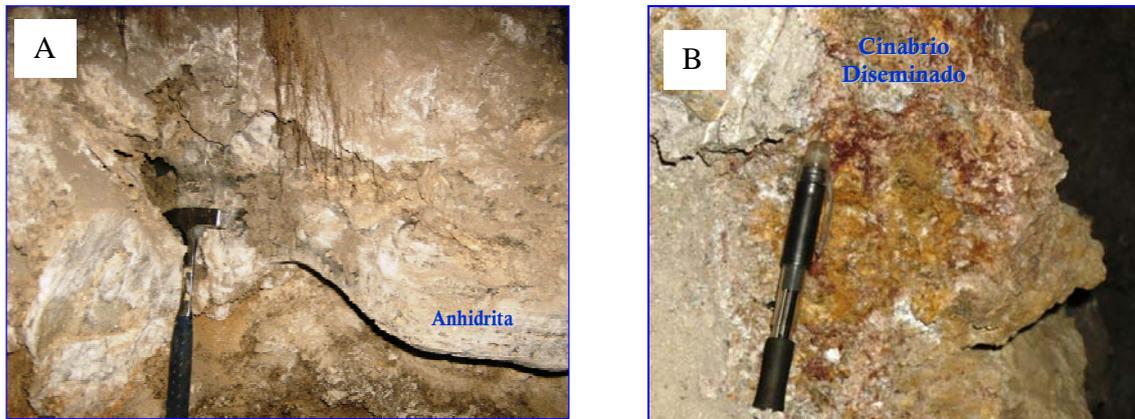


Figura II.12. Fotografía capturada en la mina Los Murciélagos. A. Aspecto de la anhidrita en la zona de la Trinidad. B. Se aprecia mineral de cinabrio diseminado en la anhidrita.

La Formación El Abra (Cretácico Temprano-Tardío), esta expuesta en las porciones oriente, norte y sur-occidente del área de estudio; consiste de una caliza de estratos gruesos, ocasionalmente dolomitizados de color gris claro, con bioclástones comunes. Debido a la acción del agua meteórica; la unidad litológica presenta un aspecto cárstico, con disolución fuerte en superficie. En dicha unidad litológica se encontró mineralización de mercurio (cinabrio), que está relleno de fracturas o zonas de debilidad (Figura II.13).

Esta facies arrecifal o pre-arrecifal, aparece sobreyaciendo a la secuencia evaporítica la Formación Guaxcamá; y una brecha calcárea sin trazas de estratificación denominada Formación El Realejo por Torres-Hernández y Tristán-Hernández M.,(1999).

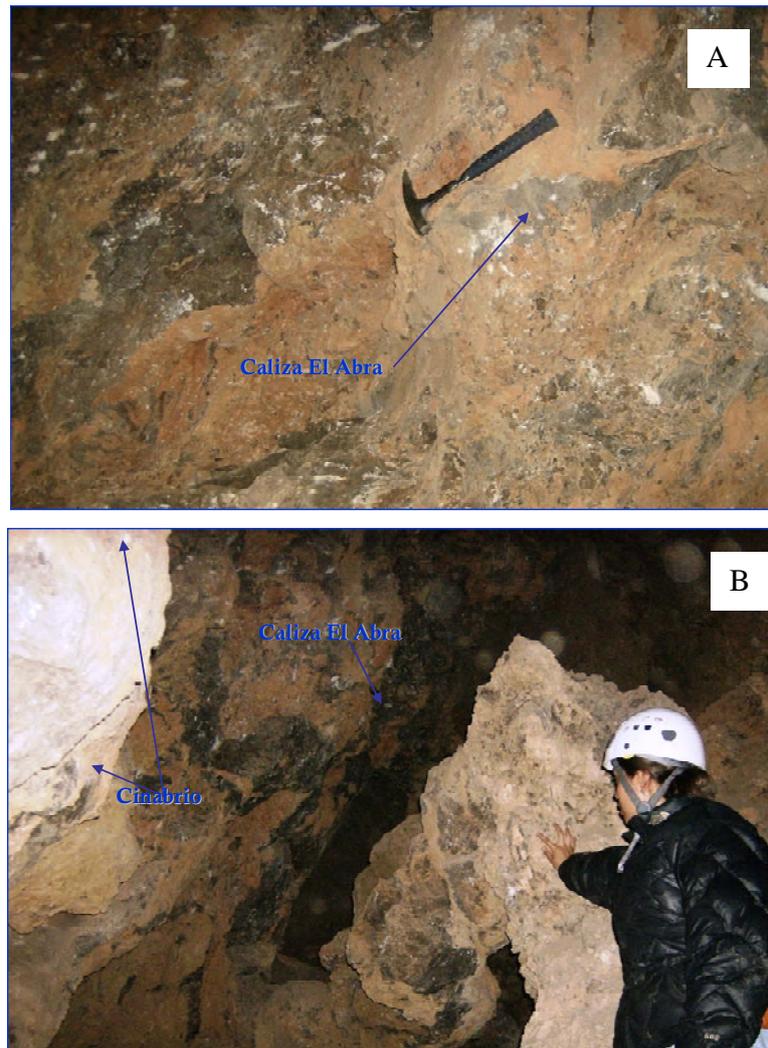


Figura II.13. Interior de la mina Norte Laguna Gerardo A. Vista de la Fm. El Abra en interior mina en Laguna de Gerardo, los fluidos minerales rellenaron zonas débiles como fracturas en forma irregular. B. Mineralización de cinabrio sobre la caliza.

La Formación El Realejo data del Paleoceno-Oligoceno; está expuesta en la mayor parte del área de estudio, constituida principalmente por una mezcla caótica de bloques pequeños, medianos y grandes de caliza, sin estratificación. Ocasionalmente, en los caminos de terracería de Guadalcázar al poblado El Realejo, se logran visualizar megabloques de caliza de El Abra, de diferentes dimensiones que preservan estratificación primaria flotando sobre la brecha calcárea de la Formación el Realejo; sin embargo, la brecha subyace a la caliza de ambiente arrecifal o pre-arrecifal. La mineralización de mercurio observada en esta unidad litológica es diseminada. (Figura II.14.)

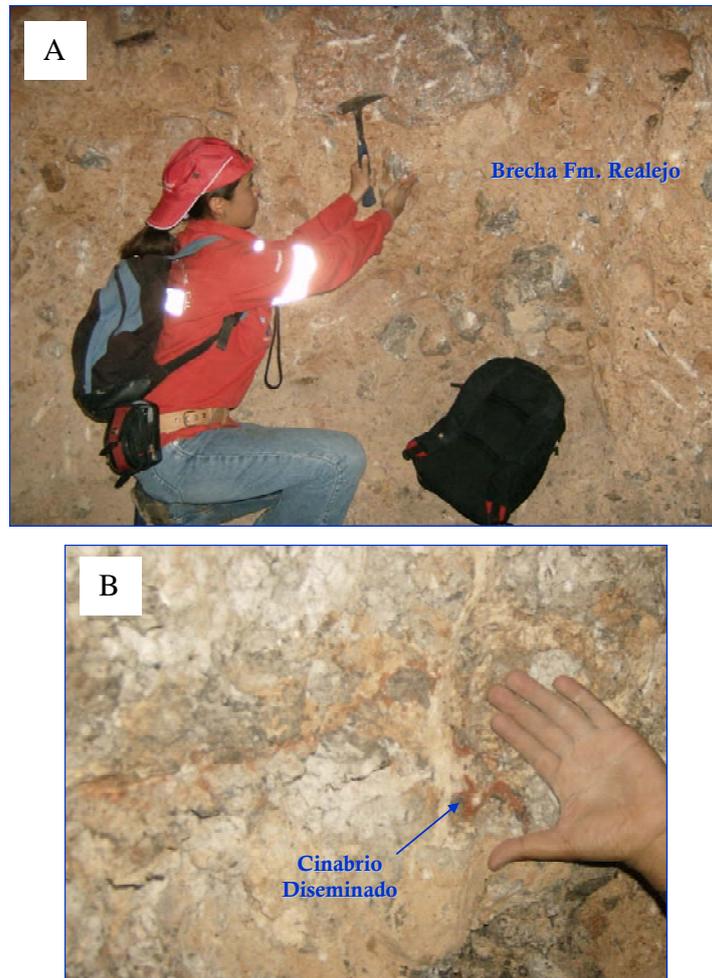


Figura II.14. Mina Los Yugos II. A. Presentación de la brecha policítica de la Fm. El Realejo en interior de una mina. B. En la misma mina, la brecha contiene algo de diseminados de mercurio.

Existe un cuerpo magmático denominado intrusivo Guadalcázar (Fries y Schmitter, 1948) y se trata de un cuerpo granítico con textura porfírica cuyos minerales predominantes son el cuarzo y el feldespato potásico. Dicho intrusivo está emplazado en rocas del Cretácico y Terciario (Formaciones Guaxcamá, El Abra y El Realejo). En la parte central del área de estudio existen dos grandes afloramientos, el primero tiene una forma elíptica en dirección NE-SW (cerros San Cristóbal y Las Comadres), justamente al norte del afloramiento antes mencionado está expuesto el segundo cuerpo intrusivo en forma alargada con dirección oriente-poniente; en la porción noroeste (La Trinidad). Además, existe un afloramiento del intrusivo, en forma alargada en dirección noroeste-sureste en

contacto con las formaciones Guaxcamá y El Realejo; existen otros apófisis menores y una serie de diques de dimensiones variables, localizados en la porción norte y noreste del área (Figura II.11).

La Ignimbrita El Leoncito (Tolg), aflora al centro de la zona de investigación, sobre las partes bajas de los cerros San Cristóbal y Las Comadres. Dicha unidad litológica está rodeada y sobreyaciendo a la brecha calcárea de la Formación El Realejo y en contacto con el intrusivo granítico.

En la parte central del área, existe un afloramiento conformado por gravas, arenas y limos denominado Conglomerado Polimíctico (TlptCgo) en la columna estratigráfica, el afloramiento está distribuido desde una pequeña parte de la comunidad de El Realejo hasta rodear las faldas del cerro Las Comadres y cerca del cerro San Cristóbal como se aprecia en la Figura II.11, donde yace discordantemente sobre la ignimbrita El Leoncito. También existen afloramientos de dicha unidad litológica, ubicados al sur y noreste del área de estudio.

Los depósitos de aluvión se presentan en los alrededores de los poblados (Guadalcazar, Minas de Plata y El Realejo) y en la porción noroeste del área de estudio, estos depósitos consisten de arenas gravas y arcillas mal consolidadas, por lo general rellenan las zonas bajas. Al sur de la comunidad de La Trinidad existe material no consolidado y muy reciente (Qhoal).

Al realizar una sección A-A' con dirección SW-NE en el área de estudio, principia por el oeste de la planicie de Laguna de Gerardo (Formación El Realejo), atraviesa por aluvión, centro del cerro San Cristóbal, conglomerado polimíctico, Formación El Abra y aluvión (Figura II.16).

Se presenta relieve alto, tanto por el evento de la orogenia Laramide como posterior intrusión del granito Guadalcazar. Este último, ocasiona la deformación a la Formación El Abra, la cual es más antigua que el granito. Hay algunos

anticlinales tanto en la parte oriente como occidente, siendo más notables hacia el oeste del perfil.

Sobreyaciendo a la formación El Abra, se tiene el brechamiento calcáreo alterada. Cabe mencionar que a esta se le considera otra formación, debido a su origen cárstico y a varios eventos episódicos como Formación El Realejo según Torres-Hernández y Tristán-Hernández, (1999).

Al este del intrusivo se tiene un pequeño depósito de conglomerado polimíctico donde su relieve se pronuncia seguramente por fallamiento. Hay algo de aluvión en la falda de cerro del intrusivo.

Por medio de hipótesis de los depósitos hidrotermales, se puede interpretar en la sección, que durante el proceso magmático y emplazamiento del intrusivo y por deformación previa de la misma roca, los fluidos mineralizantes conforme se alejaron del intrusivo (cerro San Cristóbal) van cambiando sus rasgos físicos-químicos atravesando por fallas y fracturas, depositando minerales de manera diseminada.

La mineralización del cinabrio (HgS_2) esta en un nivel somero o cercano a la superficie; por su temperatura (200°C) y baja presión, generalmente la profundidad de formación de estos yacimientos es menor a los 1000 m. La roca encajonante es principalmente caliza de la Formación El Abra (mina Los Timones) y brecha calcárea de la Formación El Realejo (Lago de Gerardo) como se muestra en la Figura II.16.

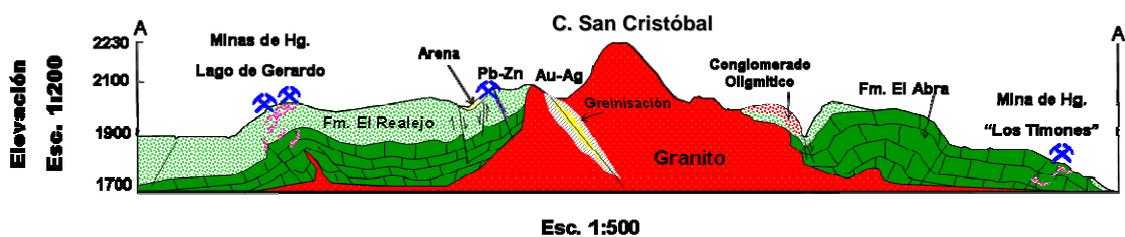


Figura II.16. Sección A-A' con orientación casi E-W (ver Figura II.10).

2.3. Estratigrafía

Las rocas que afloran en el municipio de Guadalcázar, cuentan con una variación de edad que va del Cretácico Superior al Reciente. A continuación, en orden cronoestratigráfico se hace una breve descripción de las diferentes unidades litológicas para comprender los eventos geológicos, tectónicos y sedimentarios, acaecidos en tiempo, espacio y su relación con los procesos que originaron las rocas.

2.3.1. Cretácico

Formación Guaxcamá (KnapY-Do)

Definición

La Formación Guaxcamá fue definida por J. Martínez en el año de 1965, como una secuencia evaporítica de edad Neocomiano-Aptiano. Esta unidad litológica está expuesta ampliamente en la porción central de la Plataforma Valles-San Luís Potosí.

Localidad tipo

La localidad tipo se sitúa en los alrededores de la comunidad Guaxcamá, al sur poniente del área municipal de Villa Juárez, S.L.P., concretamente a 12 km al sur de la cabecera municipal del mismo nombre. Esta zona yesífera ha sido estudiada ampliamente por Martínez, (1965) (en Carrillo-Bravo, 1971).

Distribución

Dicha Formación está expuesta en el flanco sur poniente de la Sierra de Guadalcazar, cerca del límite poniente del área de estudio. En este lugar se ubica la mina conocida como La Vía Láctea, a 3 km al sureste del poblado de Núñez, S.L.P. Al parecer, la unidad litológica tiene continuidad hacia la porción oriente debido a que existe un pequeño afloramiento en la comunidad La Trinidad.

Descripción Litológica

De manera general, está constituida por anhidrita y en menor proporción presenta yeso y dolomía, en capas de 5 a 50 cm de espesor. La roca presenta aspecto sacaroide, de color gris tenue a gris oscuro, ocasionalmente blanco y bandeado, es posible que la coloración se deba a la presencia de material carbonoso. Intercalada con el yeso, es posible apreciar caliza microcristalina y dolomita de color gris oscuro. Además en esta Formación es común observar azufre nativo diseminado, estratificado o rellenando fracturas; cuando esta roca es impactada emite un olor fétido.

En la zona de La Vía Láctea, la Formación se aprecia sumamente plegada, muy estrecha, pequeña y en distintas direcciones. El rumbo y la inclinación de los

estratos cambian frecuentemente, pero en la localidad de la mina La Vía Láctea el rumbo general de los estratos es norte-sur y su buzamiento al poniente.

Edad y correlación

Por su posición estratigráfica y contenido de microfósiles (*Orbitolina* sp., *Glomospira* sp., *Hyperammina* sp., *Dictyoconus* sp.) a esta unidad litológica se le ha asignado una edad del Aptiano (Carrillo-Bravo, 1971).

Espesores

En la localidad tipo afloran más de 300 m de espesor de esta unidad litológica, el Pozo de Guaxcamá No. 1, perforado en la misma zona cortó 3,009 m; en la cercanía de la Mina La Vía Láctea, se hallan expuestos más de 200 m de espesor y el Pozo Agua Nueva No. 1 cortó una sección evaporítica de 1,987 m.

Relaciones estratigráficas

En la porción centro-occidental de la PVSLP la Formación Guaxcamá subyace concordantemente a la Formación El Abra, en los afloramientos cercanos a la Localidad Tipo (área Guaxcamá) y en la Sierra de Guadalcázar, subyace concordantemente a calizas de plataforma de la Formación El Abra.

La secuencia evaporítica, fue precipitada en una cuenca cerrada, localizada sobre la PVSLP y separada del mar abierto, seguramente por barreras de tipo orgánico; sugerido por la presencia de rocas arrecifales y post-arrecifales dentro de la secuencia evaporítica, representada en los márgenes poniente, oriente y sur de la unidad paleogeográfica (Sierra de Álvarez, noroeste del Arco de Nahola, noroeste de Jalpan, Qro.) (Carrillo-Bravo, 1971; PEMEX, 1988b)

Formación El Abra (KassCz)

Definición

Las rocas correspondientes a esta unidad litológica fueron descritas por Böse (1906) y denominó Caliza Tamasopo (in Smith 1986). Power 1925 (in Carrillo-

Bravo 1971) aplica por primera vez el término El Abra para las calizas de los campos petroleros de la Faja de Oro y fue formalmente elevada a la categoría de formación por Kellum (1930), quien la dividió en fase Miliolina y fase Taninul.

Localidad tipo

El nombre de Formación El Abra fue aplicado por Muir (1936) para un grupo de dos facies: la facies Taninul, con localidad tipo en el túnel Taninul, ubicada al poniente de la estación Taninul sobre el ferrocarril Tampico-San Luis Potosí y la facies El Abra, con localidad tipo en la estación El Abra a 9.4 km al oriente de Ciudad Valles.

Descripción litológica

Heim (1940) menciona que la Caliza El Abra, junto con las calizas Tamaulipas y Taninul son diferentes facies pertenecientes a la Formación Tamábra; Carrillo-Bravo (1971), determina que la Caliza El Abra incluye los carbonatos de la Plataforma Valles-San Luis Potosí y de la Faja de Oro de edad Albiano-Cenomaniano, comprendiendo las facies pre-arrecifal (equivalente a la Formación Tamabra), la facies arrecifal (equivalente a la facies Taninul), y la facies post-arrecifal (facies El Abra); Suter (1990) incluyó dentro de la Formación El Abra, a las facies El Abra y Taninul, separando a la facies de talud (Formación Tamabra), por tal razón se ha generalizado el uso de Formación El Abra bajo este criterio.

Esta unidad ha sido tradicionalmente dividida en las facies El Abra y Taninul; Carrillo-Bravo (1971) describe la facies Taninul como arrecifal representada por caliza masiva de color crema amarillento y gris crema, constituida principalmente por un conjunto de bancos arrecifales (de caprínidos y radiolítidos), separados por calcarenita, calcarenita oolítica y clásticos biogénicos; mientras que las facies El Abra, las subdivide en cinco litofacies:

- 1) Unidad clástica post-arrecifal, constituida por calcirudita, calcarenita y caliza oolítica de color crema amarillento y gris crema, en capas gruesas con estratificación cruzada en algunos sitios.
- 2) Unidad de calcilutita y calcarenita con miliolas y toucasias, de color gris y gris crema, partes de color negro por impregnación de hidrocarburos, en capas de

espesor grueso a masivo, toda la unidad contiene pelets, miliolidos y en ocasiones estos últimos son tan abundantes que llegan a formar calcarenita de miliolidos, también son frecuentes los biostromas de toucásias.

3) Unidad de dolomita y caliza parcialmente dolomitizada, representadas por dolomita de grano fino a medio, ocasionalmente grueso, de color pardo grisáceo y gris acero, en capas mediana a gruesas, en algunas ocasiones se observa caliza parcialmente dolomitizada y algunas capas de calcilutita y calcarenita con miliolidos y pequeños biostromas de rudistas.

4) Unidad de calcilutita y calcarenita con miliolidos y toucasias, constituida por calcilutita, calcarenita biogénica, caliza oolítica y algunos horizontes de caliza dolomítica, de color crema amarillento y gris crema, en capas medianas y gruesas, con abundantes miliolidos y algunos desarrollos biostromales de toucasias o de radiolítidos, monopléuridos y muy escasos corales

5) Zona dolomítica basal, dolomita de grano fino a grueso, de color café grisáceo y gris acero, en capas gruesas.

Espesor.

El espesor de la Formación El Abra, medido y reportado sobre las diferentes localidades en las que ha sido motivo de estudio por distintos autores, va de 1100 a 2720 m (Basañez *et al.*, 1993).

Relación estratigráfica

Los reportes sobre la relación estratigráfica que guarda esta unidad litológica son los siguientes: Basañez *et al.* (1993) mencionan que la Formación El Abra yace concordantemente sobre la Formación Guaxcamá y la arenisca Alamitos y puede estar cubierta concordantemente por las formaciones San Felipe, Agua Nueva, La Muralla o Tamasópo, dependiendo de la ubicación dentro de la plataforma. En la Sierra de Álvarez y área de Jalpan subyacen discordantemente a la Formación Soyatal.

Ambiente de depósito

En distintos trabajos de investigación concluyen que el ambiente de depósito de esta unidad litológica corresponde a una plataforma amplia y estable de aguas someras, con dos facies principales (post-arrecifal o lagunar y la arrecifal) (PEMEX 1988).

Edad

La edad asignada por distintos autores como Muir (1936) a la Formación El Abra, ha sido basada en su contenido de fauna, litología y relación estratigráfica. Se ha concluido que esta unidad litológica varía dentro del límite Cretácico Temprano-Tardío. Sin embargo, la mayoría de los criterios utilizados por los diferentes autores concuerdan en que puede ser en el rango Albiano-Cenomaniano.

- Petrografía en una muestra de la Formación El Abra

En la zona de Laguna de Gerardo, se realizó el estudio petrográfico de una muestra de caliza tomada in situ de la mina VM-05, localizada en las coordenadas UTM longitud 351783 y latitud 2505624. Ésta petrografía es con el fin de relacionar la muestra con los datos recopilados de la Formación El Abra.

Descripción Megascópica

La muestra de roca sana se clasifica de la siguiente manera:

Es una roca sedimentaria, ortoquímica que viene de un ambiente de precipitación deltaico, de color gris claro a oscuro. Su estructura es como masiva; en la textura, los granos van desde arena fina a mediana, comúnmente equigranular.

En su mineralogía la muestra presenta caliza recristalizada y dolomita; la forma de los minerales es hipidiomorfa, con brillo adamantino y de color blanco a gris muy claro o pardusco, raya blanca con dureza entre los 2.5-3. Tiende a tener reacción moderada con el ácido, indicando dolomitización o mayor contenido de magnesio y menor de calcio; tiene olor fétido al momento de golpearla.

En el campo esta unidad está muy intemperizada, ocasionando que sea algo deleznable, lo que hace que su permeabilidad secundaria (fracturas, vetillas) se

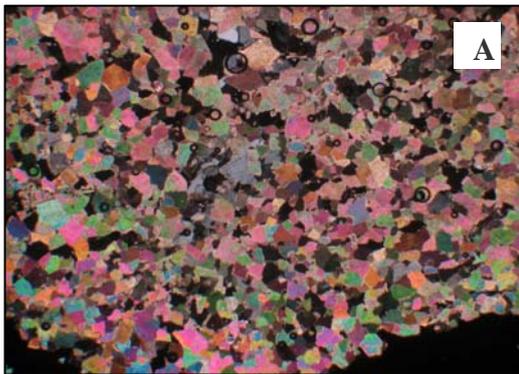
deba a eventos posteriores a la litificación, y/o a la dolomitización (solución de bioclásticos); que pudieron haber ocasionado la disolución de los carbonatos durante la estabilización mineralógica.

Según Dunham (1962) esta roca corresponde a un Grainstone

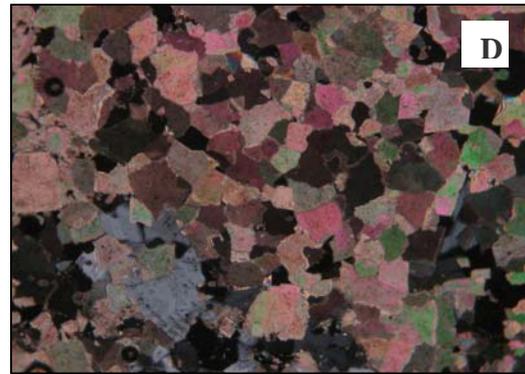
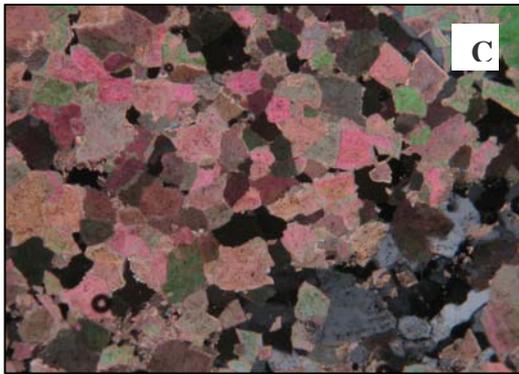
Descripción Microscópica

En lámina delgada se logró observar que en su totalidad es carbonato; con cristales de tamaño homogéneo, los granos están en contacto entre si, son idiomorfos a alotriomorfos. La textura como se observa en las fotografías de las láminas adjuntas, es cerrada o sacaroide. Se aprecia esparita, intensamente dolomitizada; los cristales son homogéneos de aproximadamente el mismo tamaño (0.02 mm), variando de hipidiomorfos a alotriomorfos (Lamina 1 A y B).

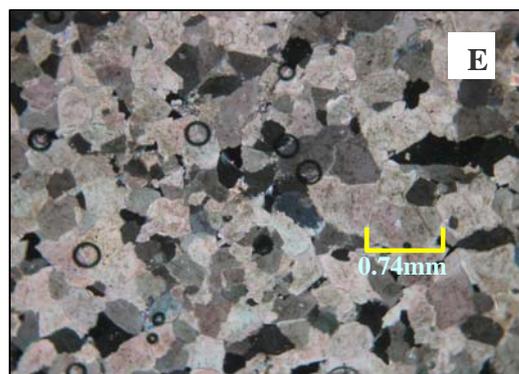
En general, es una roca calcárea recristalizada homogénea que de acuerdo con la clasificación de Folk es una caliza espática intensamente dolomitizada.



A y B, Presentan cristales de dolomita-calcita equigranulares, hipidiomorfos a alotriomorfos con textura sacaroide, lente de 4x zoom 3.8 L.P.



C. Cristales equigranulares, hipidiomorfos de dolomita-calcita, lente de 10x zoom 3.8 L.P.
Fotografía **D.** Igual a la anterior con rotación de 20° izq.



E. Lamina con cristales de dolomita-calcita, de tamaño de 10mm a .17 el más grande, alotriomorfos a hipidiomorfos. Lente de 20x zoom 3.0 L.P.

Lamina 1. Petrografía de una muestra de la Formación el Abra, ejido Laguna de Gerardo

2.3.2. Terciario

Formación El Realejo (TpaobRp)

Definición

Recibe este nombre un potente paquete de brecha, formada por fragmentos y bloques angulares a subangulares de caliza y travertino, aislados bloques de yeso e ignimbrita, que se encuentran dentro de la parte central de la Sierra de Guadalcázar, en la zona conocida como Altiplano El Realejo (Torres-Hernández et. al., 1999).

Distribución

En la zona de estudio, la unidad litológica (brecha calcárea) ocupa la mayor parte sobre el altiplano El Realejo. La formación El Realejo, se trata de material calcáreo brechoso formado por colapsos sucesivos, por efecto de asentamiento del techo de estructuras cársticas, en la cima de un anticlinorio. La unidad litológica está constituida por una mezcla caótica de bloques pequeños, medianos y grandes de caliza, en menor proporción, hay fragmentos y bloques de travertino. Ocasionalmente se observan bloques de yeso de la Formación Guaxcama y de ignimbrita El Leoncito.

Litología y espesor

En algunos casos los mega bloques de caliza, que alcanzan hasta decenas de metros de diámetro, están flotando en la brecha, pero aún se distingue la estratificación primaria en ellos. Los bloques más grandes, al estar rodeados completamente por la brecha calcárea, parecen ser pilares menos afectados por el proceso que generó la brecha. Dichos bloques contienen fósiles de diferente edad (*Planocaprína sp.* del Aptiano, *Cualcomana sp.* del Albiano inferior y *Actaeonella sp.* del Turoniano al Coniaciano?) (Torres-Hernández et. al., 1999).

El origen de esta brecha ha sido discutido por Torres-Hernández (1994), quien le asignó un origen cárstico en un proceso multiepisódico y prolongado. El espesor de esta unidad litológica esta estimado en los perfiles geológicos en más de 100 m

en la parte nororiental del altiplano el Realejo, aunque en la parte occidental del mismo, su espesor es de unos cuantos metros a decenas de metros (Torres-Hernández et. al., 1999).

Relación estratigráfica

La unidad litoestratigráfica sobreyace de manera discordante sobre la Formación Guaxcamá, intrusionada por el cuerpo ígneo de Guadalcázar de edad Oligoceno medio; subyace al conglomerado polimíctico en la zona del Realejo y La Trinidad (Valle de San Juan Dila) y está cubierta por material aluvial y arenas provenientes del intemperismo del granito.

Ambiente de depósito

La formación de la brecha calcárea se originó por la sucesión de colapsos, efecto de asentamiento del techo de estructuras cársticas, en la cima de un anticlinorio. Entre los megabloques que se encuentran en el Altiplano del Realejo, algunos de ellos presentan características de un margen de arrecife, por lo que constituye verdaderas brechas sinsedimentarias que contienen fósiles de diferente edad.

Edad

Al estar intrusionada por cuerpos ígneos de 31 ± 2 Ma, se le asigna una edad Paleoceno-Oligoceno, aunque el proceso que formó funcionó probablemente hasta el Mioceno (Torres-Hernández et. al., 1999).

Granito (ToGr)

Definición

Denominado por Fries y Schmitter (1948) en Torres-Hernández (1999), como Intrusivo Guadalcázar, siendo el cerro de San Cristóbal el afloramiento más extenso. Además del cerro San Cristóbal, existen otros dos que son El Cerro Las Comadres, Sangre de Cristo y cinco diques de la misma composición en la zona El Realejo.

Distribución

El afloramiento mayor es el Cerro de San Cristóbal, el cual tiene una forma ovalada de dimensiones de 2.5 km de largo por 1.5 km de ancho; además existen otros apófisis menores y una serie de diques de dimensiones variables, localizados en la periferia del cuerpo mayor.

Litología y espesor

Le constituye una roca ígnea intrusiva de composición granítica que afecta todas las unidades de la columna sedimentaria y se presenta en forma de apófisis y troncos (stocks). El granito es porfirítico, de tipo calcoalcalino variando de holocristalino-hipidiomórfico a holocristalino-alotriomórfico, los fenocristales son de cuarzo, plagioclasa y micas.

La intrusión produjo zonas de skarn provocando condiciones favorables para la mineralización que se tiene en la zona de influencia del cuerpo magmático. Hay cuerpos tabulares dentro del granito con intenso fracturamiento y zonas de oxidación con rumbo NW-SE.

Edad y correlación

En estudios realizados en el Cerro San Cristóbal por Mújica y Albarrán en el año 1983, se reportó una datación radiométrica por el método ^{40}K - ^{40}Ar de 31 ± 2 Ma.

Ignimbrita El Leoncito (Tolg)

Definición

Zapata-Zapata y Perez-Venzor, (1980) en Torres-Hernández, (1999) mencionan una serie de rocas riolíticas sobreyaciendo sobre basaltos en las inmediaciones del Leoncito, nombrándolas como Ignimbrita Chiquihuitillo, tomando el nombre de unos derrames semejantes descritos por Torres-Hernández y Tristán-González (1999) le asignan el nombre de Ignimbrita El Leoncito . Se trata de un derrame de ceniza bien soldado que varía de color café grisáceo a rojizo, con 10-15% de

fenocristales de cuarzo más o menos en la misma proporción que sanidino de 2-3mm, y algunos ferromagnesianos alterados. Su matriz esta desvitrificada y tienen algunos fragmentos y de rocas sedimentarias de la Formación Cárdenas (Torres-Hernández et. al., 1999). Por lo regular se puede ver gran cantidad de vesículas con depósito de cuarzo secundario y algunos vesículas que quedaron por escape de gases. Por lo regular la unidad litológica forma mesetas.

Distribución

El material ignimbrítico se encuentra descrito principalmente en la porción surponiente de la Carta Guadalcázar, sobresaliendo en las áreas del Leoncito, Mesa Los Peñoles, al sur-oriente del Peyote, Mesas de la Gallina, el Muerto, al sur y surponiente del Peyote.

Relación estratigráfica

La Ignimbrita El Leoncito se encuentra sobreyaciendo las formaciones El Abra y El Realejo, en algunas zonas se encuentra cubierto por el conglomerado polimíctico.

Edad

A esta unidad litológica, en estudios anteriores le han asignado una edad tentativa del Oligoceno, basándose en similitud con otras áreas (Zapata-Zapata et al 1980, Labarthe-Hernández, et al., 1982).

Ambiente de depósito

Se conoce que muchos de los piroclásticos del Campo Volcánico de San Luís Potosí, estuvieron relacionados con la apertura de centros volcánicos que dieron origen a domos riolíticos y a productos piroclásticos intercalados entre sus derrames. Este tipo de vulcanismo se ha relacionado con mecanismos de extensión ocurridos principalmente durante el Oligoceno en los campos volcánicos de la Sierra Madre Occidental, por lo que los productos de la Ignimbrita El Leoncito pudieran pertenecer a un centro de emisión cercana, posiblemente al de Villa Hidalgo (Torres-Hernández et. al., 1999).

2.3.3. Cuaternario

Conglomerado (T_{plpt}C_{go})

Esta unidad litológica corresponde a material producto de la meteorización de rocas preexistentes depositado durante el Plioceno, conformado por grava, arena y limo. La depositación fue en fosas tectónicas, originando el conglomerado, aglomerado, arenisca, arenisca calcárea y grava. Yaciendo discordantemente sobre roca ígnea de origen ignimbrítico y la Formación El Realejo (Figura II.15).

Arenas, Gravas y Coluvión (T_{plptar})

En el área de estudio existe una serie de depósitos que se encuentran en la base de los cerros formando el piamonte. Los más sobresalientes son los de la ladera norte y nor-poniente del Intrusivo Guadalcázar, donde se distinguen bloques enormes de granito apilados unos contra otros, algunos empacados por arena derivada "insitu" del intemperismo del granito; consiste de una serie de fragmentos y bloques acomodados sobre las laderas. Además existen otros depósitos de arenas y gravas combinadas con los depósitos coluviales.

Aluvión (Q_{hoal})

Se ha calificado como depósitos aluviales a la serie de limos, arenas, gravas y suelos vegetales, depositados en el extenso valle de la parte poniente del área de estudio (La Trinidad), así como depósitos en terrazas pequeñas en los márgenes de los arroyos y una serie de suelos derivados de caliza, en ocasiones intercalados con material pumicítico depositados en las depresiones cársticas de la zona del Altiplano El Realejo, así como en la comunidad de Minas Viejas al noroeste del estudio y en La Trinidad.

2.4. Tectónica

El área de estudio está situada dentro de la Sierra de Guadalcázar, las estructuras de esta serranía fueron causadas por: procesos de la Orogenia Larámide, los esfuerzos provocados por el emplazamiento de un cuerpo magmático y la continua cársticidad en la zona.

La mayor evidencia de rasgos tectónicos en la zona estudiada son las fallas normales, la mayoría provocadas por efectos de carsticidad. Una de las mayores fallas normales es el *Polje* de Guadalcázar-Ábrego al sur-este del área (Figura II.17.), su forma es definida por la curva de nivel 1650 m.s.n.m., esta continúa su contorno noroeste al oriente del área, siendo su curva de nivel 1700 m.s.n.m., el *polje* está parcialmente relleno de material aluvial calcáreo y gravas graníticos. Posiblemente la estructura se originó por la disolución de la roca calcárea, debido a que los arroyos mayores drenan desde la parte interna de la Sierra de Guadalcázar a la cuenca del valle de Guadalcázar-Abrego.

Aunque el volumen de precipitación anual en esta zonas, es actualmente muy reducido (solo 500 mm por año) no justifica grandes disoluciones, ni aún que se trate de material brechoide. Este volumen de precipitación interrumpido, disminuye el fenómeno cárstico (Llopis, 1970), por lo que puede considerarse que las formas cársticas se desarrollaron bajo condiciones climáticas distintas.

El Polje La Trinidad (Valle San Juan de Dila), ubicado en la porción occidental del área, tiene longitud de 1km con su forma a elíptica en dirección norte-sur. El contorno del *polje* está marcado por la curva de nivel 1850 y su parte más baja a 1830 m.s.n.m., pero un escalón superior (curva de 1950) señala la verdadera magnitud de la depresión. Un pequeño abanico aluvial se ha desarrollado sobre la parte meridional del *polje* y está constituido casi totalmente por arenas graníticas que están siendo removidas del *Polje* El Realejo (Figura II.17.).

El *Polje* El Realejo ubicado en la porción centro-norte del área, tiene forma irregular a elíptica, con longitud aproximada de 1 km en dirección oriente-poniente y un ancho aproximado de 500 m. Otras estructuras de menor extensión, corresponden a fallas normales provocadas por disolución de la roca calcárea formando dolinas. Estas son de redondeada a subredondeada, ubicadas en el

altiplano el Realejo y en el valle de Guadalcázar; varias de estas se ubican en los alrededores del Intrusivo Guadalcázar (Figura II.17).

También existe un anticlinal en la porción norte de Guadalcázar, tiene dirección norte-sur con tendencia al noreste, y longitud aproximada de 1 km (Figura II.17).

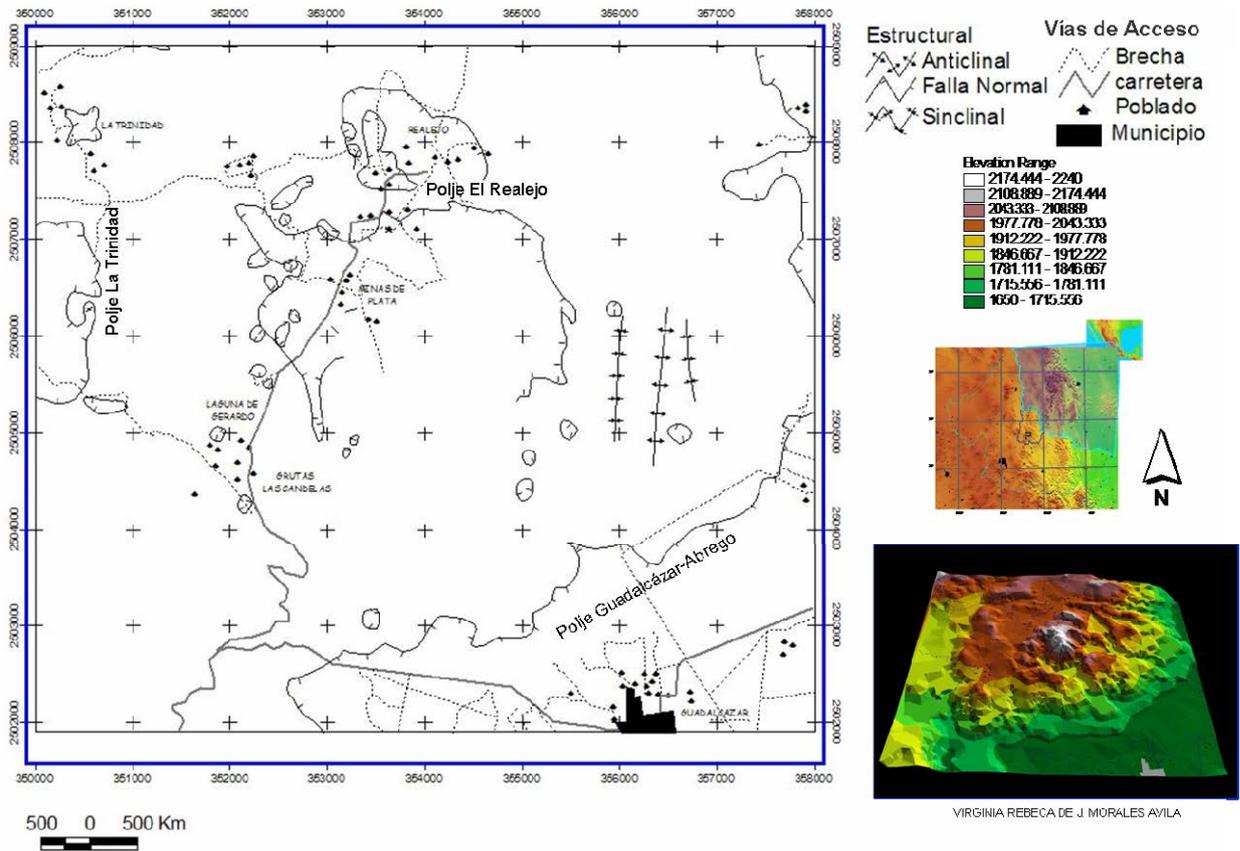


Figura II.17. Plano estructural del área de estudio.

CAPITULO 3

YACIMIENTOS MINERALES DE MERCURIO

3.1. Introducción

El mercurio raramente se encuentra libre en la naturaleza en pequeñas gotas, que representa el $8.5 \times 10^{-6}\%$ en peso de la corteza. El cinabrio es el mineral de mena más importante para la obtención del mercurio. El método para conseguir este metal es triturando el cinabrio (contenido en Hg 86.2%) y posteriormente calentarlo en un horno a unos 700°C en una corriente de aire.

Tiende a ser de color blanco plateado, pesado, bastante mal conductor del calor y un buen conductor de la corriente eléctrica. El único metal en estado líquido a temperatura ambiente; tiene una elevada tensión superficial, por lo que no moja a la mayoría de las sustancias. Es bastante estable frente a los ácidos sulfúrico y clorhídrico diluidos. Se disuelve en ácido sulfúrico caliente, nítrico y agua regia.

Forma fácilmente aleaciones con muchos metales como el oro, por lo que se utiliza para obtener el metal precioso de sus menas (la plata y el estaño) denominadas amalgamas.

El mercurio tiene aplicaciones en los laboratorios como termómetros, barómetros, bombas de difusión y otros instrumentos; tiene empleos eléctricos como la fabricación de lámparas de vapor de mercurio, en interruptores líquidos y en otros dispositivos electrónicos; también se usa en la preparación electrolítica del cloro y la sosa cáustica, además como impermeabilizante contra el *mildeu o moho*.

En cuanto al mineral de cinabrio, es leyenda de que en tiempos ancestrales, se colocaban piedras de gran peso sobre los cuerpos de fallecidos, esparciendo alrededor de toda la fosa un polvo de color rojo opaco, el cual al parecer era algo utilizado para que el cuerpo no volviera a la vida o para proteger el mismo y no pudiera levantarse de su tumba. En otras ocasiones, se utiliza en ornamentación.

Entre sus compuestos, existe el óxido mercuríco empleado para celdas de mercurio, en pinturas antisuciedad y como catalizador; el cloruro mercurioso (Hg_2Cl_2 , calomelanos) es usado todavía en medicina, como insecticida, y en electrodos de calomelanos. El fulminato de mercurio [$\text{Hg}(\text{CON})_2$] es un detonador usado en explosivos. El sulfuro mercuríco (HgS , bermellón), es un pigmento y los compuestos orgánicos del mercurio (métilmercurio, étilmercurio) son fuertemente tóxicos.

El mercurio llega a ser un elemento tóxico, ya que puede ser fácilmente absorbido a través de los tractos respiratorio e intestinal o de la piel. El aire saturado con vapor de mercurio a 20°C , contiene una concentración que supera varias veces el límite de toxicidad, actuando de forma acumulativa y alcanzando niveles peligrosos en el aire. El peligro se incrementa a mayores temperaturas; es necesario que este elemento se maneje con mucho cuidado, es por eso que se necesitan tipos de recipientes adecuados, debiendo estar bien tapados.

3.2. Antecedentes

El descubrimiento de las minas de mercurio que se encuentran en el área de Guadalcázar; se le atribuye el descubrimiento a Don Juan de Oñate en el año de 1583 (Torres-Hernández, *et. al.*, 1999).

Los yacimientos de mercurio han sido explotados desde el siglo XVII, coincidiendo la época de mayor actividad minera con el período durante el cual se usó el beneficio de patio para la amalgamación de oro y plata, siendo trabajadas por los indígenas. Con el descubrimiento de nuevos procesos metalúrgicos, el mercurio pasó a tener una importancia secundaria habiéndose paralizado la mayoría de las minas. Después, sobre todo durante la primera y segunda guerras mundiales, hubo nuevamente gran demanda de mercurio, lo que propició la reapertura de las minas antiguas, que hubieron de reducir sus actividades al término de dichos conflictos.

Hoy en día se usa un sistema de lixiviación para recuperar de los jales mineros plata, mercurio y oro, este último en menor proporción. Se encuentran registradas 4 plantas en México en donde tan solo en 1996 se produjeron de 30 a 33 toneladas de mercurio (Rodríguez-Galeotti, 2006).

Se considera que la mayor fuente de mercurio en los suelos es el depósito atmosférico; diversos estudios establecen que la retención de este metal en el suelo ocurre principalmente por absorción a través de materia orgánica, óxidos de Mn, Fe y minerales de arcillas (Rodríguez-Galeotti, 2006).

Las emisiones naturales terrestres de mercurio en México son aproximadamente 1000 ton/año y parece dudoso que el 80% de ellas se derive de erupciones activas como anteriormente se pensaba; estimaciones recientes dan un flujo global de mercurio volcánico anual de 20-90 ton/año, que es mucho menor que las estimaciones previas por Fitzgerald, 1996 (en Rodríguez-Galeotti, 2006).

3.3. Generalidades Teóricas Depósitos Hidrotermales

Los depósitos épitermales son aquellos en los que la mineralización ocurrió dentro de 1 a 2 km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales calientes. Los fluidos se estiman en el rango desde <100°C hasta unos 320°C y durante la formación del depósito estos fluidos hidrotermales pueden alcanzar la superficie como fuentes termales.

Cabe mencionar que los depósitos épitermales se encuentran de preferencia en áreas de volcanismo activo alrededor de los márgenes activos de continentes o arcos de islas y los más importantes son los de metales preciosos (Au, Ag), aunque pueden contener cantidades variables de Cu, Pb, Zn, Bi, etc. Se puede dar las características semejantes de estos depósitos épitermales en áreas que fueron no por volcanismo, si no por un proceso de intrusión magmática.

La mineralización epidermal de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos. Los de “baja sulfuración” son reducidos y tienen un pH cercano a neutro (la medida de concentración de iones de hidrógeno) y los fluidos de “alta sulfuración”, los cuales son más oxidados y ácidos (Figura III.18). Los términos de alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist et al., (1987) y se refieren al estado de oxidación del azufre. En los de alta sulfuración el azufre se presenta como S^{4+} en forma de SO_2 (oxidado) y en los de baja sulfuración como S^{-2} en forma de H_2S (reducido).

Los fluidos de baja sulfuración (BS) son una mezcla de aguas-lluvias (aguas meteóricas) que han percolado superficie y aguas magmáticas (derivadas de una fuente de roca fundida a mayor profundidad en la tierra) que han ascendido hacia la superficie. Los metales preciosos han sido transportados en solución como iones complejos (en general bi-sulfurados a niveles épitermales; clorurados a niveles más profundos) y para fluidos de baja sulfuración la precipitación de metales ocurre cuando el fluido hierve al acercarse a la superficie (ebullición).

Los fluidos de alta sulfuración (AS) se derivan principalmente de una fuente magmática y depositan metales preciosos cerca de la superficie cuando el fluido se enfría o se diluye mezclándose con aguas meteóricas.

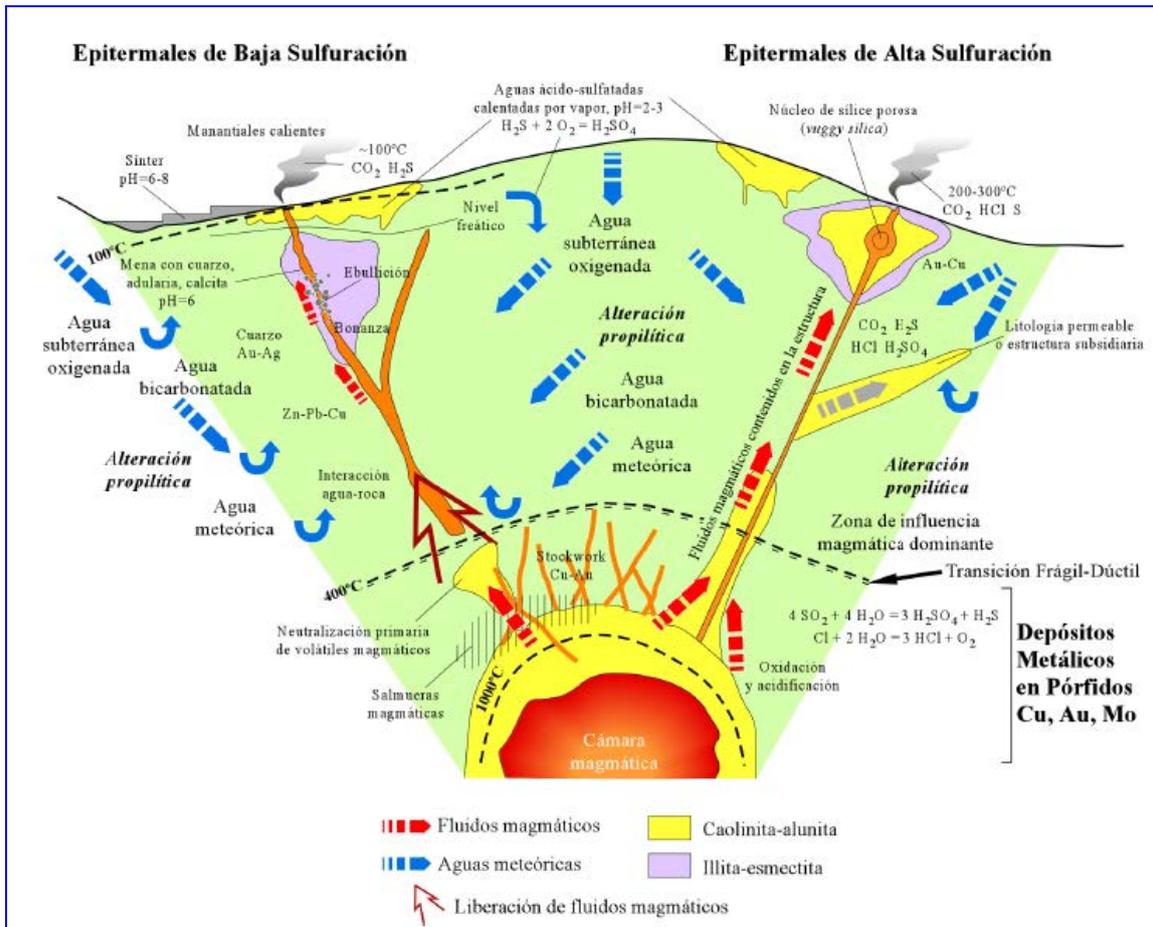


Figura III.18 Esquema comparativo volcánico-magmático (no a escala) de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración. Igualmente se muestra su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos para estos depósitos, comprendiendo desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal (modificado de Sillitoe, 1995; con base en los datos de Hedequist y Lowenstern, 1994; Gammons y Williams-Jones, 1997)

3.4. Tipos de Yacimientos de Mercurio

Estos yacimientos de mercurio pueden clasificarse en 3 grandes grupos:

- Silíceo-Carbonatados (Tabla 1.); están especialmente asociados con serpentinitas alteradas a una asociación de minerales carbonatados y sílice, generalmente pequeños de 0.1 a 10 millones de toneladas métricas de mena que contienen 0.2 a 1.8% de Hg en peso. Estructuralmente consisten

en vetas y cuerpos de mena de reemplazamiento desarrollados dentro de y adyacentes a cuerpos silíceo-carbonatados con serpentina alterada.

La alteración se divide en una zona central de cuarzo-calcedonia-magnesita-pirita-marcasita y la zona periférica de magnesita-calcita-dolomita-magnetita. El proceso de alteración inicial consiste en la adición de carbonato a la serpentinita seguido por la introducción de sílice en la zona central [Sherlock et. al., (1993) en Rodríguez-Galeotti, (2006)]. La zona periférica puede extenderse por varios kilómetros al exterior del depósito. Además de mercurio, estos depósitos normalmente tienen elevadas concentraciones de antimonio (0.1-1000 ppm), arsénico (2-200 ppm), níquel (10-3000 ppm), cobalto (5-100 ppm), talio (1-12 ppm), y zinc (2-50 ppm); el cobre tiene valores bajos, < 50 ppm. El tamaño del grano del cinabrio es aproximadamente de 0.2 mm, pero puede tener un tamaño de grano más grande, hasta 5 mm. Este tipo de depósito se forma a bajas temperaturas, menos de 120°C, con fluidos ricos en CO₂ – CH₄ – H₂S que normalmente contiene hidrocarburos [Peabody, (1992); Sherlock et al., (1993) en Rodríguez-Galeotti, (2006)]. Los cuerpos de serpentinita impermeables son importantes en la localización de yacimientos silíceo-carbonatados, debido a que sellan las fracturas por donde circulan los fluidos hidrotermales [Rytuba, (1996) en Rodríguez-Galeotti, (2006)].

- b) Los depósitos de mercurio tipo *hot spring* (Tabla 1.); están asociados a zonas volcánicas y se forman cerca de la superficie. Las rocas encajonantes son alteradas a adularia, cuarzo y sericita a profundidad, y en la superficie presentan una alteración argílica avanzada formada por caolinita, alunita y cristobalita, que normalmente contienen azufre elemental. Estos depósitos son a menudo la expresión superficial de yacimientos de oro (Lehrman, 1986 en Rodríguez-Galeotti, 2006). Los fluidos mineralizantes son una mezcla de aguas meteóricas y aguas magmáticas de baja salinidad y temperatura de aproximadamente 200°C (Rytuba, 1993 en Rodríguez-Galeotti, 2006).

- c) Los depósitos tipo *Almaden* son los mas grandes y de mas alta calidad. Según los estudios realizados es probable que los cuerpos mineralizados hayan sido formados por volcanismo submarino máfico; los depósitos con dimensiones 300 m por 150 m, contienen cinabrio masivo, cuerpos de reemplazamiento en cuarcitas, brechas y piroclásticos de composición intermedia, diques máficos, y esquistos negros ricos en hidrocarburos. Hay cuerpos con cinabrio en fracturas desarrolladas mas tarde por tectonismo regional y metamorfismo de estos depósitos (Rytuba *et al.*, 1988).

Características	TIPO SILICE-CARBONATO	TIPO HOT SPRNG
Elementos traza	Ni - Co - Cr - Sb - Zn - Cu	Au - As - Sb - Li - Tl - W
Alteracion	carbonatos - cuarzo	adularia - cuarzo - arcillas
Sulfuros presentes	pirita - marcasita 5 - 50 %	pirita 2 - 5 %
Roca encajonante	serpentina -pizarras arcillosa	rocas volcanicas y clásticas
Estructuras	fallas y fracturas	fracturas - tubos volcanicos
Menas mineral	cinabrio - metacinabrio, Hg nativo	cinabrio - corderoita
Minerales secundarios	sulfatos, cloruros y cromatos de mercurio	sulfatos, cloruros y óxidos de mercurio
Tonelaje	0.1 - 10 millones de Tm	10 - 100 millones de Tm
Dimensiones	espesores de veta 0.5 a 10 mts	cuerpos de mas de 10 m de ancho
Leyes	DE 0.2 A 2 %	DE 2 HASTA 20 %

Tabla 1. Factores geológicos y geoquímicas de control para los yacimientos de mercurio por Rodríguez-Galeotti, (2006).

3.5. Descripción de la Mineralización de Mercurio y la Relación con la Estratigrafía en el area de estudio

Metalogénesis del mercurio.

El área geológica enriquecida en mercurio esta relacionada con mineralizaciones de metales preciosos, básicos y altos flujos de calor. El mercurio se esta emitiendo de manera permanente desde regiones profundas de la corteza, alcanzando la superficie a través de fracturas y fallas en las rocas suprayacentes.

El área de Guadalcazar de acuerdo con Rodríguez-Galeotti, (2006), se encuentra dentro de la IV provincia metalogenética de América en yacimientos de mercurio al centro de México. Ésta provincia, como las otras tres mundiales son relativamente jóvenes. La formación de éstas se da a partir del Mesozoico hasta el volcanismo

cuaternario; en el caso del área de estudio se estima que la intrusión del granito fue a partir del Cenozoico en el Terciario-Oligoceno.

Geología del mercurio.

Las concentraciones económicas de mercurio pertenecen a los yacimientos de tipo epitermales, relacionados en el caso de Guadalcázar con rocas intrusivas de profundidad baja a intermedia. En la mayoría de los yacimientos de mercurio de la zona de estudio existe una asociación con fallas y fracturas regionales. Por lo general, las minas de mercurio de Guadalcázar están dentro de calizas brechadas y silicificadas en la Formación El Abra, y también en yesos o anhidrita de la formación Guaxcamá.

La ley de corte de las menas de mercurio es de 0.3%, aunque la mayoría de las minas alcanzan leyes de hasta 2% en promedio (Rodríguez-Galeotti, 2006); según datos del Servicio Geológico Mexicano se estima que desde principio de siglo hasta 1968 se extrajeron de la zona La Trinidad, 112000 toneladas con leyes del orden de 0.3% de Hg. Las características geológicas del área muestran que aun se pueden localizar yacimientos importantes de este mineral, pero el bajo precio del mercurio en la actualidad no justifica su explotación.

Sin embargo, hay criterios de exploración definidos para la búsqueda de yacimientos de mercurio para proponer zonas potenciales de formación de estos yacimientos; semejantes a los que se emplean para la prospección de yacimientos epitermales, cómo los mecanismos de movilidad de las soluciones hidrotermales. El mínimo de concentración para ubicar posibles yacimientos de mercurio es de 0.1 ppm, cantidad típicamente encontrado en depósitos de manantiales termales (*hot spring*). Los cuerpos explotables ocurren en terrenos pequeños y su superficie de impacto ocupa un área no mayor a un kilómetro cuadrado.

Zonas favorables.

Los yacimientos de mercurio se encuentran encajonados en las calizas y en el yeso, llenando cavidades y poros en una faja de unos 4 Km de longitud y rumbo NW 30° SE, que principia en La Trinidad y termina en Laguna de Gerardo (Figura III.19.).

Las principales zonas mineralizadas están orientadas transversalmente a la faja citada, y la mineralización forma parte del cementante del material brechoide que llenó por lo menos en parte algunas dolinas, o que resultó del fracturamiento o fallamiento de los sedimentos.

Características de los minerales de mercurio.

El mineral de mena primario en todos los depósitos es el cinabrio (HgS). El mercurio nativo también es común, generalmente en cantidades pequeñas. Los minerales epigenéticos de los yacimientos son comúnmente: mercurio nativo, cinabrio, metacinabrio e hipercinabrio (Tabla 2.).

MINERALES PRIMARIOS			
Mercurio nativo	Hg	Tiemanita (cub)	HgSe
Cinabrio (trig)	Hg(1-X)S	Moschlandsbergita (cub)	Ag ₂ Hg ₃
Metacinabrio (cub)	Hg(1-X)S	Coloradita (cub)	HgTe
Hipercinabrio (hex)	Hg(0.97-X)S	Corderoita (cub)	Hg ₃ S ₂ Cl ₂
Livigstonita (mon)	HgSb ₄ S ₈	Soluciones solidas	
		Extensivas en esfalerita	(Zn, Hg)S
MINERALES SECUNDARIOS			
Terlinguaita (mon)	Hg ₂ OCl	Montroidita (ort)	HgO
Calomel (tet)	Hg ₂ Cl ₂	Kuzminita (tet)	Hg(BrCl) ₂
Schuetita (hex)	Hg ₃ (SO) ₄ O ₂		
Eglestonita (cub)	Hg ₆ OCl ₃ (OH)		
Kleinita (hex)	Hg ₂ N(Cl SO ₄) n H ₂ O		
Mosesita (cub)	Hg ₂ N(Cl SO ₄ MoO ₄ CO ₃) H ₂ O		
Mercurio antivo	Hg		
Solucion solida	BaSO ₄		
Enbarita (ort)			

Tabla 2. Minerales de mercurio en yacimientos epigenéticos.

En México, el metacinabrio tiene dos especies únicas conocidas como guadalcazarita, rica en zinc, la cual se encuentra en el municipio Guadalcázar dentro del área de estudio; y onofrita, en la que se encuentra selenio.

Los silicatos y cromatos de Hg suelen ocurrir en los depósitos del tipo silícico-carbonatados en cantidades muy pequeñas. En los depósitos tipo *hot spring* o manantiales termales, el sulfato, cloruro y óxidos de mercurio están presentes en las partes superiores de los cuerpos de la mena y se forman por alteración supergénica. Debido a que estas fases son muy solubles, normalmente estos cuerpos se conservan en vetas y rellenos de fracturas selladas, principalmente en las partes superiores del cuerpo mineral principal.

En los depósitos del tipo silícico-carbonatados los sulfuros férricos comprenden de 5-10% del volumen de las menas y roca alterada excepto dónde estos depósitos se localizan adyacentes al intrusivo. Otros minerales de mercurio son la livinstonita ($\text{HgS} \cdot 2\text{Sb}_2\text{S}_3$), el calomelano o mercurio córneo (Hg_2Cl_2), la tiemannita, (HgSe) y la coloradoiota (HgTe). La variedad tetraédrica de mercurio (schwazita o hermesita) no tiene ninguna importancia económica.

Forma

El mercurio se presenta en diseminados; entre los yacimientos reconocidos corresponden a las minas: San Antonio, El Escarabajo, San Vicente, Santa Lucía, San Agustín, Las Animas y la Trinidad, que es la principal. En este último yacimiento, el mercurio se presenta como cinabrio y guadalcazarita y de acuerdo con el zoneamiento se le encuentra lejos del intrusivo.

Los clavos en general son irregulares, aunque en ciertas minas tienden a formar pequeñas chimeneas más o menos verticales. Las chimeneas tienen dimensiones muy variables, siendo su longitud entre 15 y 50 m aproximadamente.

Asociación mineralógica

En los yacimientos epitermales son frecuentes las concentraciones de oro, plata y mercurio a profundidades que no pasan de los 1000 m bajo la superficie.

Los minerales característicos de esta zona de estudio son, oro nativo, pirita, esfalerita, galena, calcopirita, acantita-argentita polibasita, cinabrio, seleniuros y otros.

Los minerales de ganga son el cuarzo, calcita, dolomita, rodocrosita, rodonita, fluorita, barita y yeso. Es importante hacer mención de la existencia en el distrito de la guadalcazarita, nombre que se dio al sulfuro de mercurio y zinc (Zermeño, 1988).

Paragénesis

Los yacimientos de mercurio tienen una paragénesis bastante sencilla; primero se deposita cuarzo y luego cinabrio. En algunos yacimientos se presenta una segunda paragénesis que se caracteriza una depositación de mercurio nativo y calomel (HgCl_2) por efectos termo-neumatolíticos (Rodríguez-Galeotti, 2006).

3.6. Distribución de los yacimientos y manifestación de Mercurio en el área de Guadalcázar

3.6.1. Muestreo

La selección de muestreo para las inclusiones fluidas (IF), inicia desde el trabajo de campo en donde se define el marco geológico-estructural y se detecta el evento geológico a dilucidar. Durante esta etapa, se cuidó de recolectar y georeferenciar cada una de las muestras que contenga mineralización de mercurio y de ganga como calcita, cinabrio, barita, fluorita y cuarzo. Estas se extrajeron de la roca encajonante, in situ y terreros; siendo las esquirlas de tamaño entre 3cm a 5cm de diámetro.

Se obtuvieron 14 muestras, las cuales fueron preparadas para los análisis de inclusiones fluidas en 20 secciones doblemente pulidas, de cada uno de los minerales asociados como el cinabrio, barita, fluorita y calcita. Estas se presentan en fracturas y diseminadas en la caliza de la Formación El Realejo principalmente y formación El Abra; hay en algunas minas, anhidrita y yeso de la Formación

Guaxcamá. De las 20 muestras se obtuvieron 9 ejemplares para el estudio determinativo de inclusiones fluidas (IF) de los distintos yacimientos de mercurio; esto, en el capítulo V, se explica con más detalle.

3.6.2. Generalidades de los yacimientos de mercurio dentro del área de estudio

La distribución de los yacimientos y la manifestación del mercurio en el área de estudio es a lo largo de la porción occidental y oriental del mapa hipsométrico del área. Identificándose aproximadamente 62 minas que han sido georeferenciadas con este tipo de mineralización.

Para facilitar el reconocimiento de dichas minas, se les ha dividido por zonas La Trinidad, Laguna de Gerardo y Oriente de Guadalcázar (Figura III.19).

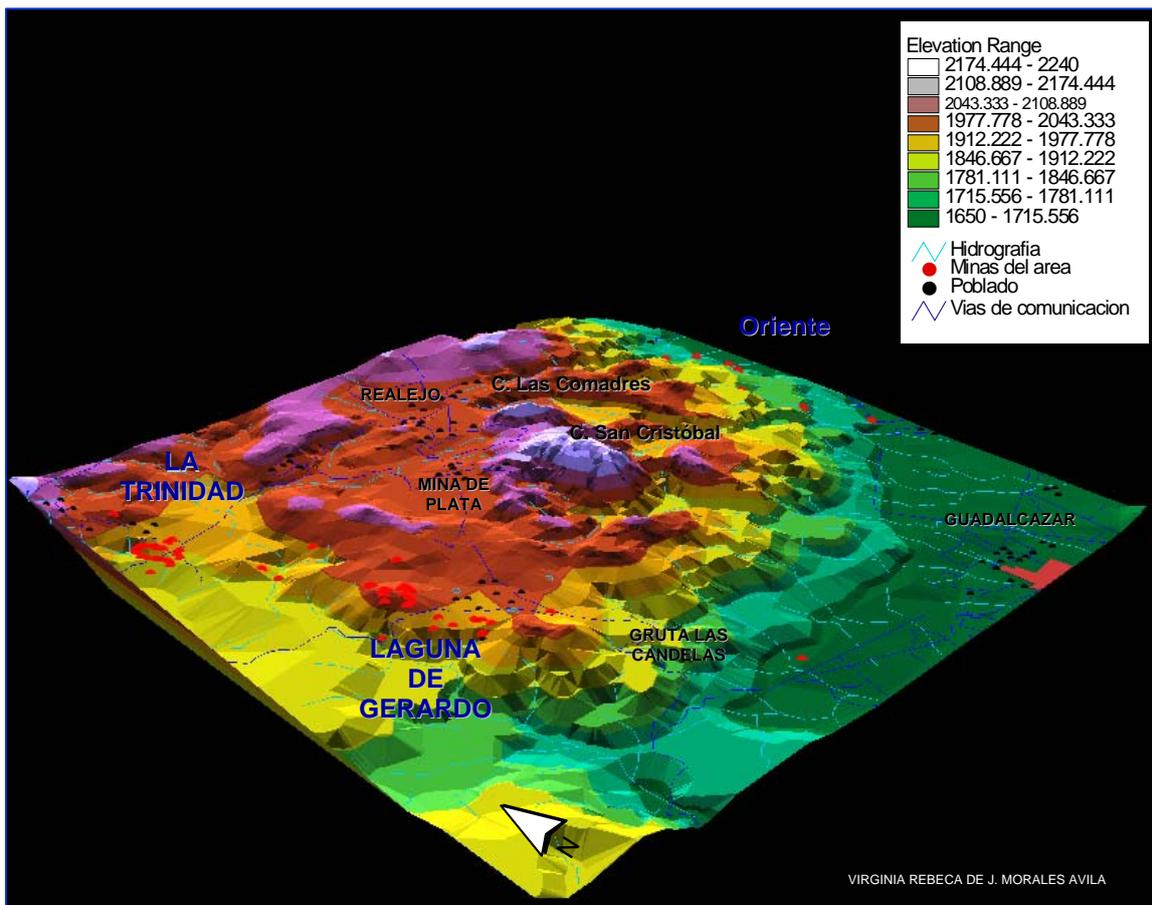


Figura III.19. Mapa hipsométrico mostrando las zonas como se dividieron los yacimientos de mercurio: Zona La Trinidad, Zona Laguna de Gerardo y Zona Oriente, en el área de Guadalcázar.

La mineralización en general forma parte del cementante del material brechoide o roca encajonante (Fm. El Realejo) y se encuentra usualmente diseminado en forma irregular, rellenando fracturas esta es de color rosa fuerte a rosa pálido. En algunos casos hay minerales accesorios como calcita, fluorita, barita, yeso y anhidrita.

3.6.3. Zonas mineralizadas de mercurio en el área de estudio en Guadalcázar.

Zona La Trinidad.

Se ubica al noroeste del área de estudio, con coordenadas U.T.M. del punto central longitud 350526 y latitud 2507505. Partiendo de la comunidad El Realejo, se sigue una desviación en dirección poniente, a través de un camino de terracería en malas condiciones, hasta llegar a las minas de La Trinidad (Figura III.20).

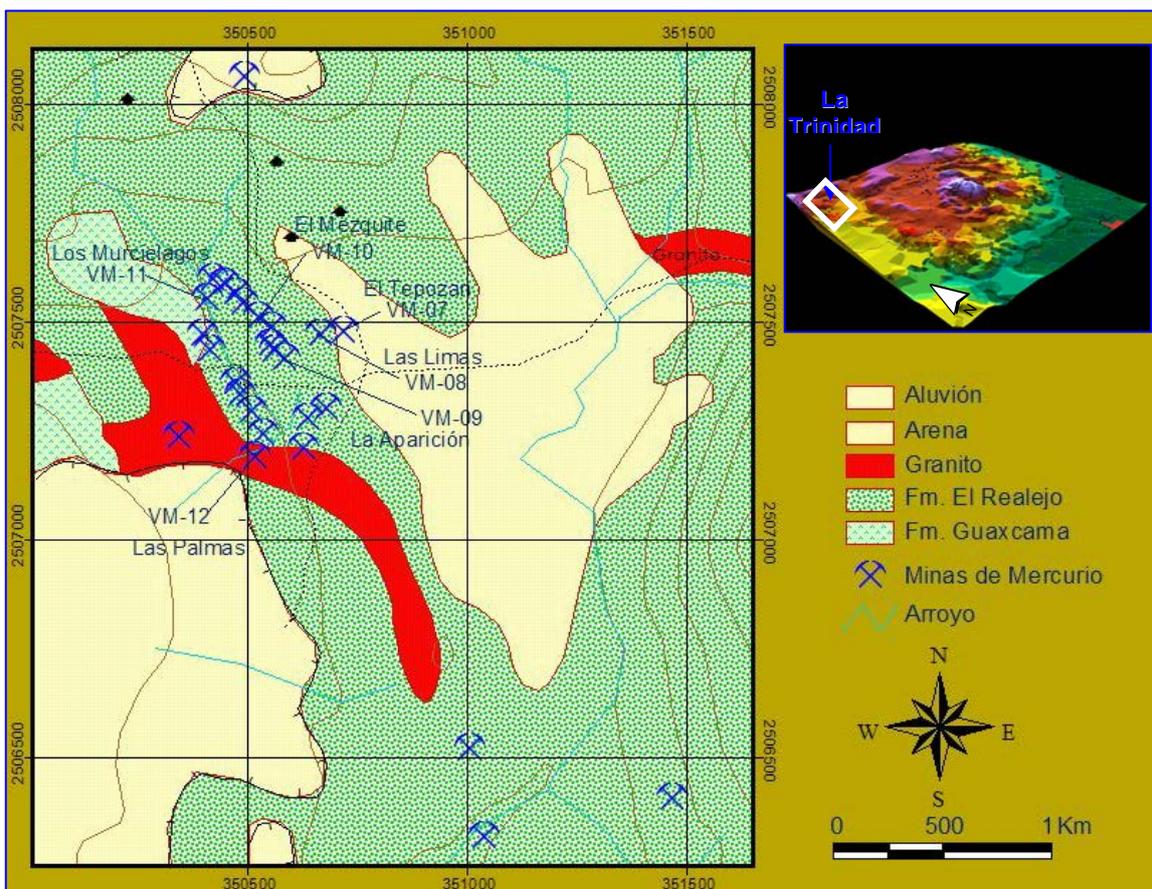


Figura III.20. Ubicación de las minas de mercurio, sobre los planos de elevación y geológico. Zona de La Trinidad en el municipio de Guadalcázar.

Generalmente en esta zona, las minas se ubican en una elevación de 1886 m como mínima y 1954 m la máxima. Existe evidencia de una planta de beneficio (Figura III.21), y chimeneas de fundición abandonados, que fueron usadas para la extracción del mercurio.



Figura III.21. Vista panorámica parte, Zona La Trinidad. A. Planta de beneficio, y la ubicación de algunas minas de mercurio.

En esta zona se ubican alrededor de 27 minas de mercurio, de dimensiones considerables, algunas desarrolladas horizontalmente y otras con tiros y cruceros. Las obras horizontales por lo general son de 2 m de alto por 3 m de ancho y 20 m de longitud. Por otra parte, el tamaño de los tiros van desde 1.8 de diámetro y 10 metros de profundidad, extendiéndose horizontalmente a través de cruceros irregulares (Figura III.22).



Figura III.22. Aspecto de uno de los tiros, que se ubican en La Trinidad, municipio de Guadalcázar. A. Mostrándose la entrada, desarrollada sobre brecha calcárea de la Formación El Realejo.

La mineralización de mercurio en la zona de La Trinidad, se presenta como sulfuros de mercurio (cinabrio), de forma diseminada e irregular, concretamente en fracturas, vetillas y bolsadas irregulares. En esta zona se observaron alteraciones hidrotermales tales como silicificación moderada, y dolomitización. En un afloramiento de intrusivo se aprecia algo de argilización; en dicha zona el cinabrio esta emplazado en anhidrita y el yeso (Fm. Guaxcamá) y sobre todo en la brecha calcárea (Figura III.23).

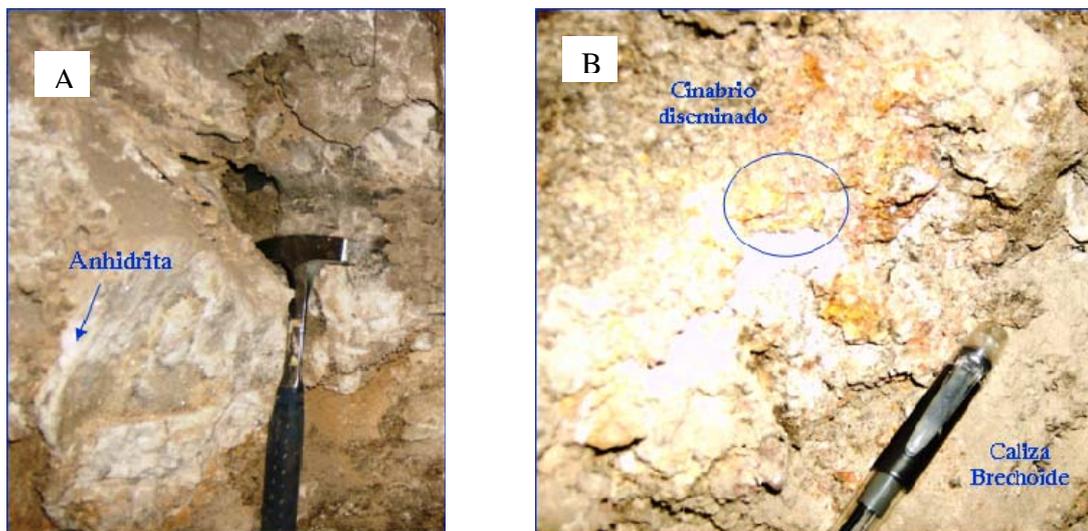


Figura III.23. Tomada en interior mina Las Palmas. A .Se muestra la formación de la anhidrita (yeso) en la caliza brechada (Fm. El Realejo). B. Presentación del mineral de cinabrio en forma diseminada en la misma formación que la anterior foto, ubicados dentro de la zona La Trinidad.

También es posible observar, fuera de las minas, grandes terreros, donde existen minerales tales como hematita, fluorita, calcita, anhidrita, barita y cinabrio (Figura 15), de las cuales se tomaron muestras de cada mineral. Siendo en total 6 muestras de las minas El Tepozán (VM-07), Las Limas (VM-08), La Aparición (VM-09), El Mezquite (VM-10), Los Murciélagos (VM-11) y mina Las Palmas (VM-12).

Zona Laguna de Gerardo.

Esta zona se sitúa hacia el suroeste del área de estudio, las coordenadas U.T.M. del punto central son longitud 351529 y latitud 2504782. El acceso a la zona, es a través de la carretera pavimentada que comunica la cabecera municipal de Guadalcázar, con el poblado El Realejo hasta el km 6, donde se desvía mediante un camino de terracería 700 m en dirección poniente, hasta llegar a la comunidad Laguna de Gerardo, desde este lugar es posible llegar por brechas y veredas en dirección sur y poniente a varias minas de mercurio (Figura II.24).

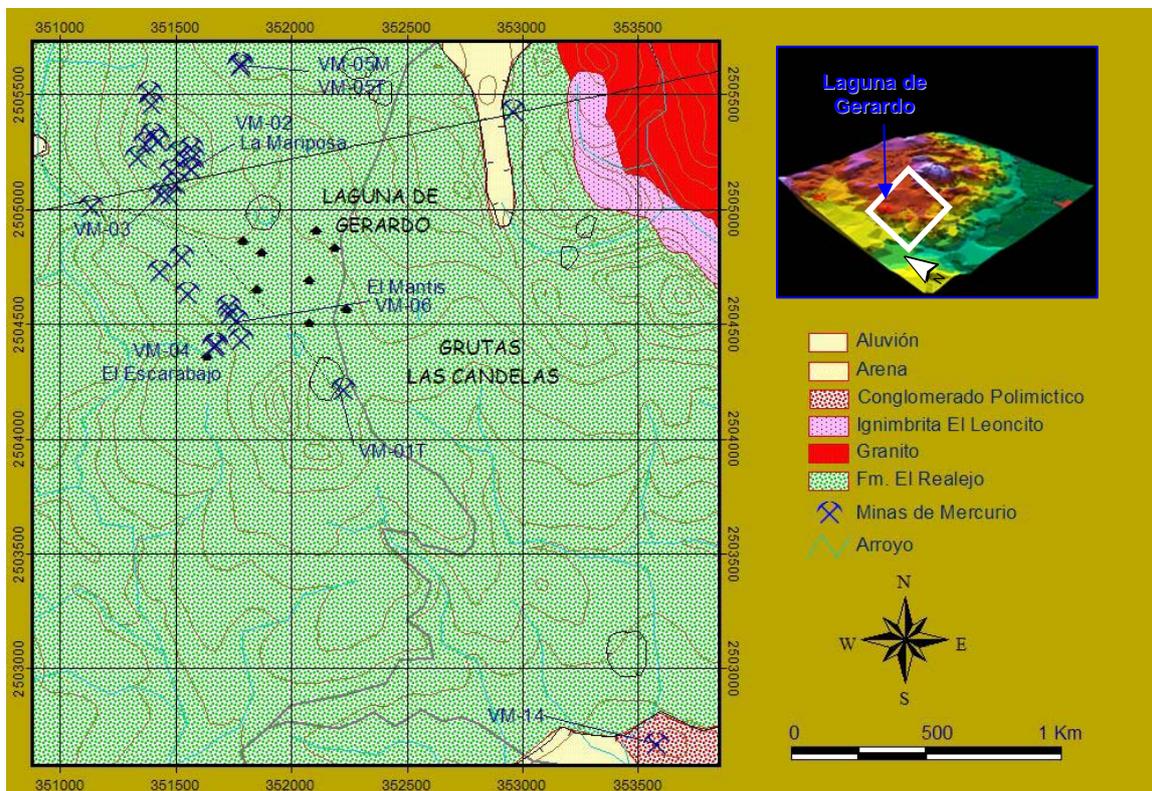


Figura II.24. Ubicación de las minas de mercurio, sobre los planos de elevación y geológico, de la zona Laguna de Gerardo, área Guadalcázar.

En esta zona se registraron entre 30 minas y/o terreros, algunos de estos terreros son de grandes dimensiones (Figura III.25). En la minas muestreadas, como El Refugio de los Patos (VM-01), se aprecia un tiro cuadrado de 2. m por 2 m con mas de 20 m de profundidad. A las afueras de este tiro, existen 2 catas al sur. Este punto tiene muy poco desarrollo, se apreciaron terreros con material calcáreo y

fragmentos de cuarzo, en algunos fragmentos fue posible observar trazas de cinabrio. Ocasionalmente se observan venillas de cinabrio dentro de la caliza; es muy común ver fracturas rellenas de aragonito (Figura III.26).



Figura III.25. Minas de Santo Tomas. A. Aspecto de terreros, ubicados en la zona Norte de Laguna de Gerardo. B. Exterior de un asentamiento de masa rocosa, provocado por los minados subterráneos de mercurio, explotadas en las diferentes minas y/o terreros Santo Tomas, Laguna de Gerardo.

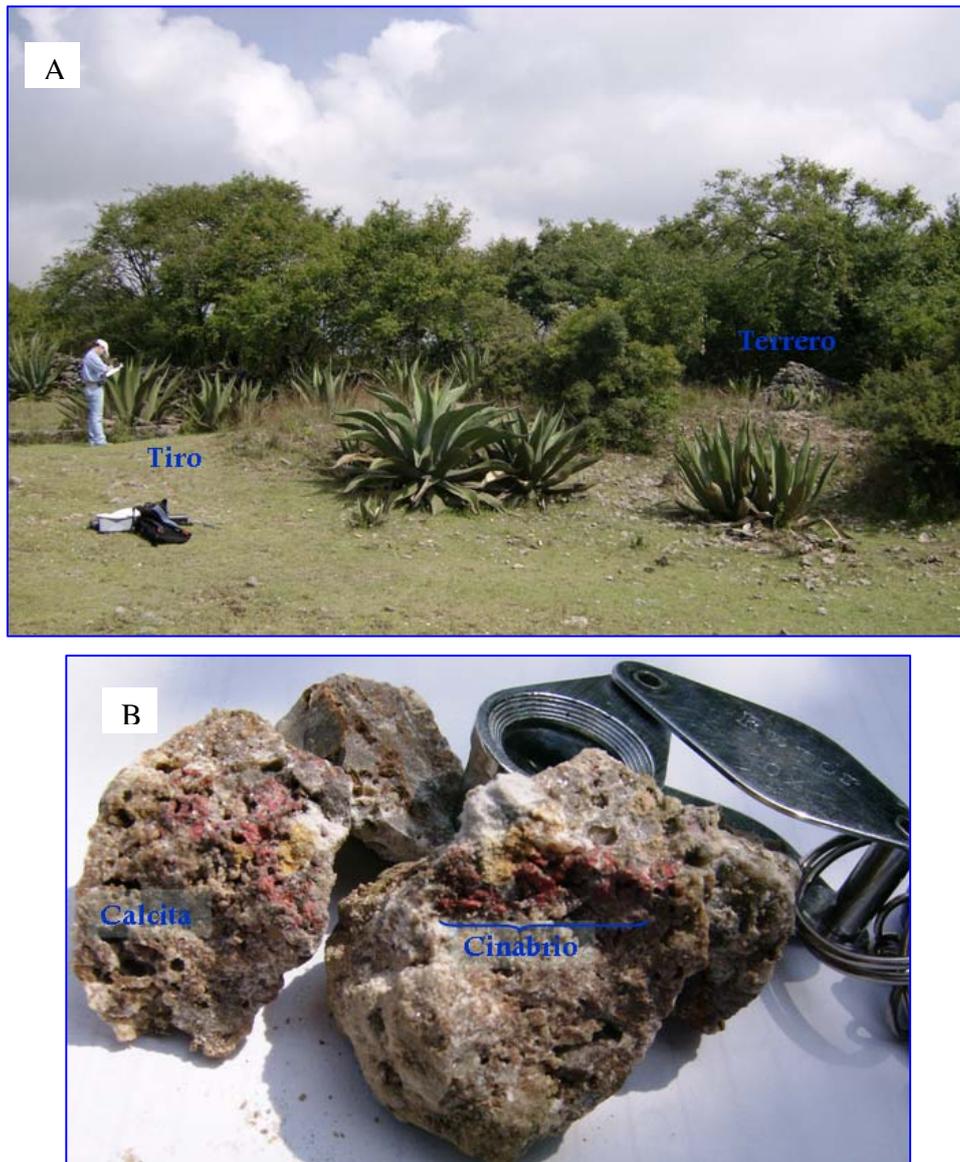


Figura III.26. Vista general de la mina El Refugio de los patos, ejido Laguna de Gerardo. A. Tiro y terrero. B. Esquirlas obtenidas del terrero referido en la foto anterior, donde se logra observar la asociación del cinabrio con la calcita tardía deleznable; incluso el cinabrio se muestra como cemento en las brechas calcáreas.

La mina El Escarabajo posee un socavón de 30 m de longitud y posteriormente presenta un tiro de 5 m, sobre ese nivel existe desarrollos hacia sus lados, sobre todo a lo largo de una falla con un rumbo NE 40° SW e inclinación de 70° al NW. A partir de la falla hacia el oeste, la mineralización se observa también diseminada entre las rocas y las fracturas, mientras que al este de la falla la mineralización esta principalmente en las fracturas, drusas y en las juntas de los estratos en

forma irregular o bolsadas. Al oeste de la fractura, está presente una brecha calcárea (Fm. El Realejo) con vetillas de calcita, y también anhidrita con textura sacaroide de la Formación Guaxcamá; mientras que al oriente de la falla existe caliza masiva de la Formación El Abra.

En esta zona de Laguna de Gerardo, hay hornos de fundición con forma rectangular con dos entradas; en el interior de cada una, se encuentra un platillo que en su parte central parece ser donde se escurría el mercurio al calentarse (Figura III.27).



Figura III.27. Fotografía tomada dentro del área, minas de Santo Tomás. A. Aspecto de horno de fundición para la obtención y separación del mercurio.

De las minas La Mariposa (VM-02), Santo Tomas (VM-03), El Escarabajo (VM-04), Norte de Laguna de Gerardo (VM-05) y Mantis (VM-06) y La Lomita (VM-14) se tomaron muestras de terreros, con presencia de minerales asociados como barita, cinabrio y calcita roja; ocasionalmente se ve hematita, yeso y anhidrita. Estas minas presentan las mismas características que se mencionaron anteriormente. En general en esta zona de Laguna de Gerardo se presenta una mineralización muy diseminada y de formas irregulares. Se tiene recristalización y silicificación y dolomitización tardía.

Zona Oriente.

Como su nombre lo indica, se ubica al oriente del área de estudio; las coordenadas U.T.M del punto central son longitud 357175 y latitud 2507490. Partiendo de la carretera pavimentada para el poblado de Guadalcázar, a 6.5 km para llegar a la comunidad de Abrégo se encuentran algunas brechas antes de llegar a ese poblado, sin embargo hacia el norte de Abrégo un poco hacia el oeste, a 4.5 km de la comunidad se toma la brecha que llega hacia el campamento llamado El Venado, hasta encontrarse en los límites del arroyo Los Yugos. Prosiguiendo caminando por una vereda donde se sitúan las minas de esta zona dentro del área de estudio (Figura III.28.).

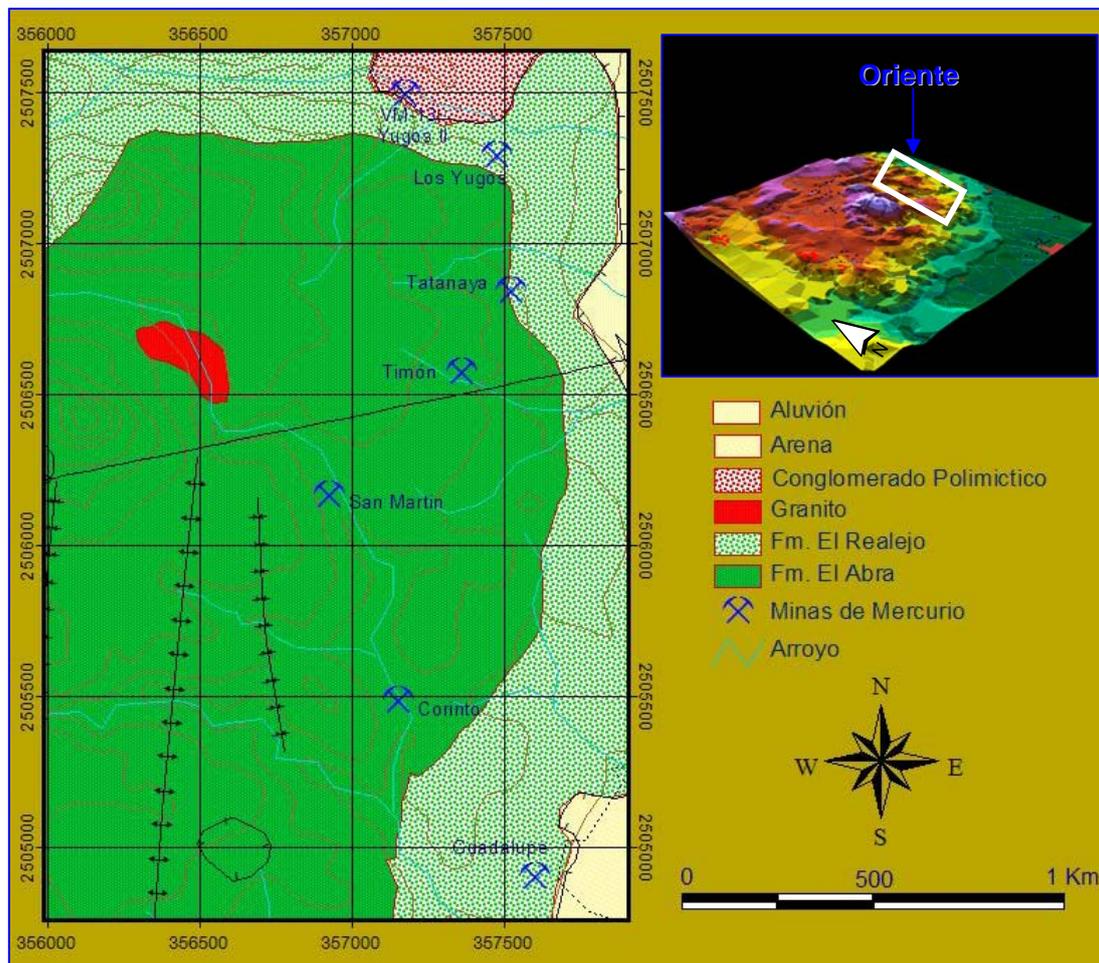


Figura III.28. Localización de las minas de mercurio, sobre el plano de elevación y geológico, Zona Oriente, área Guadalcázar.

Aquí hay restos de un horno de fundición, a escasos 10 m de la mina Los Yugos II (Figura III.29.A). Se presentan alrededor de 7 minas como, Guadalupe, Corinto, San Martín, Timón, Tatanaya, Los Yugos y Yugos II (VM-13) la cual fue muestreada. Algunas desarrollan socavones de dimensiones considerables. Las obras horizontales en su mayoría son de 2m x 2m y de longitud entre los 20 y 25 metros en general, y los tiros de 6m de diámetro por 7 m de profundidad (Figura III.29.B).

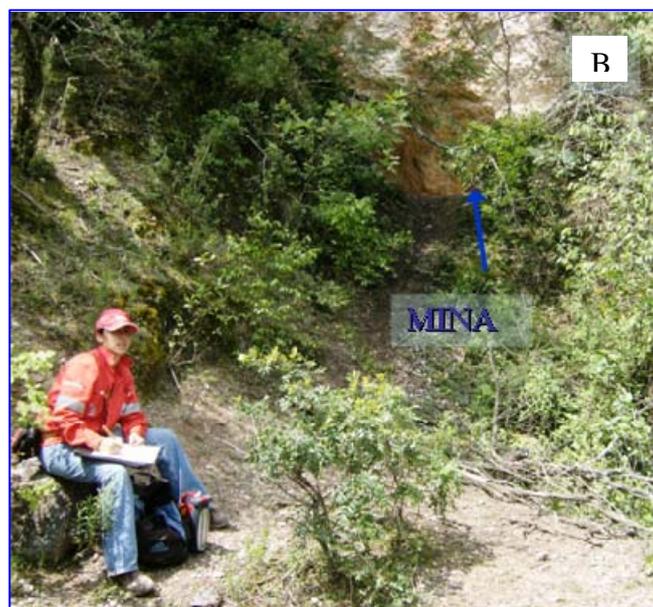


Figura III.29. Mina Los Yugos II, en la parte oriental del estudio. A. Aspecto de horno de fundición para la obtención de mercurio, zona Oriente. B. Exterior de una entrada de las minas.

La mineralización en estas minas y/o terreros se presenta como sulfuros de mercurio (cinabrio), observándose en diseminados, vetillas o fracturas hacia las márgenes de las venas de calcita, ocasionalmente atravesando a éstas; la mineralización esta cementando bloques de caliza de la Formación el Abra y mayormente presentándose en la brecha calcárea (Fm. El Realejo) de forma irregular, de poco espesor (Figura III.30).

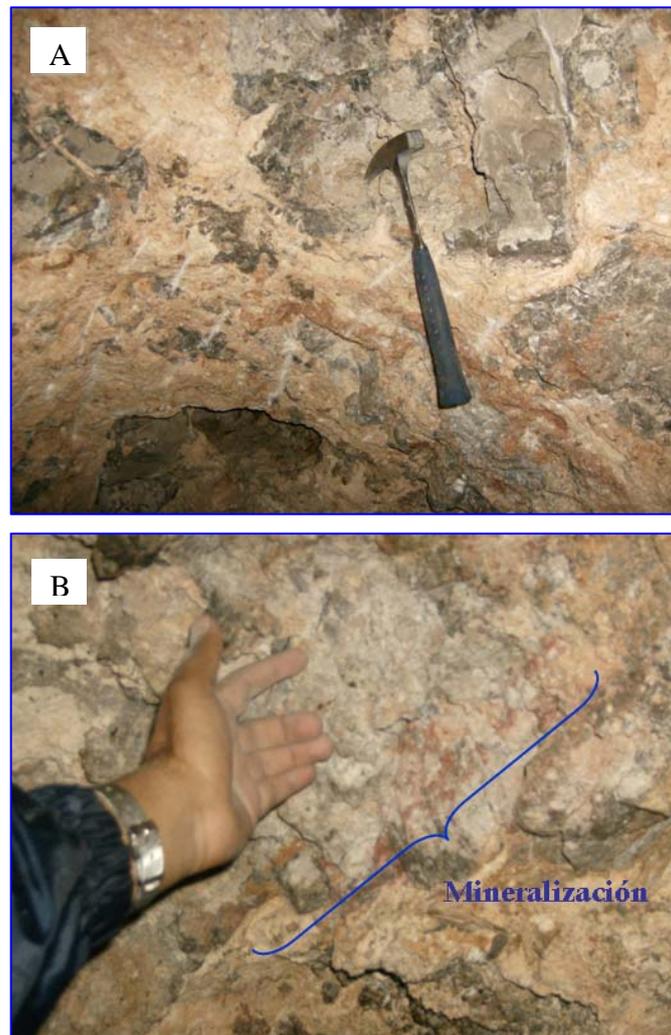


Figura III.30. Fotografía tomada en el interior mina de Los Yugos II. A. Apariencia en una de las minas de mineralización, cementando tanto a rocas de la Formación El Abra como en su mayoría a la Formación El Realejo. B. Zona de mercurio de forma diseminada sobre la roca de la Formación El Realejo.

Generalmente en las minas Guadalupe y Los Yugos se nota una menor silicificación en la roca brechoide; igualmente algunos terreros cuentan con minerales, como calcita y cinabrio.

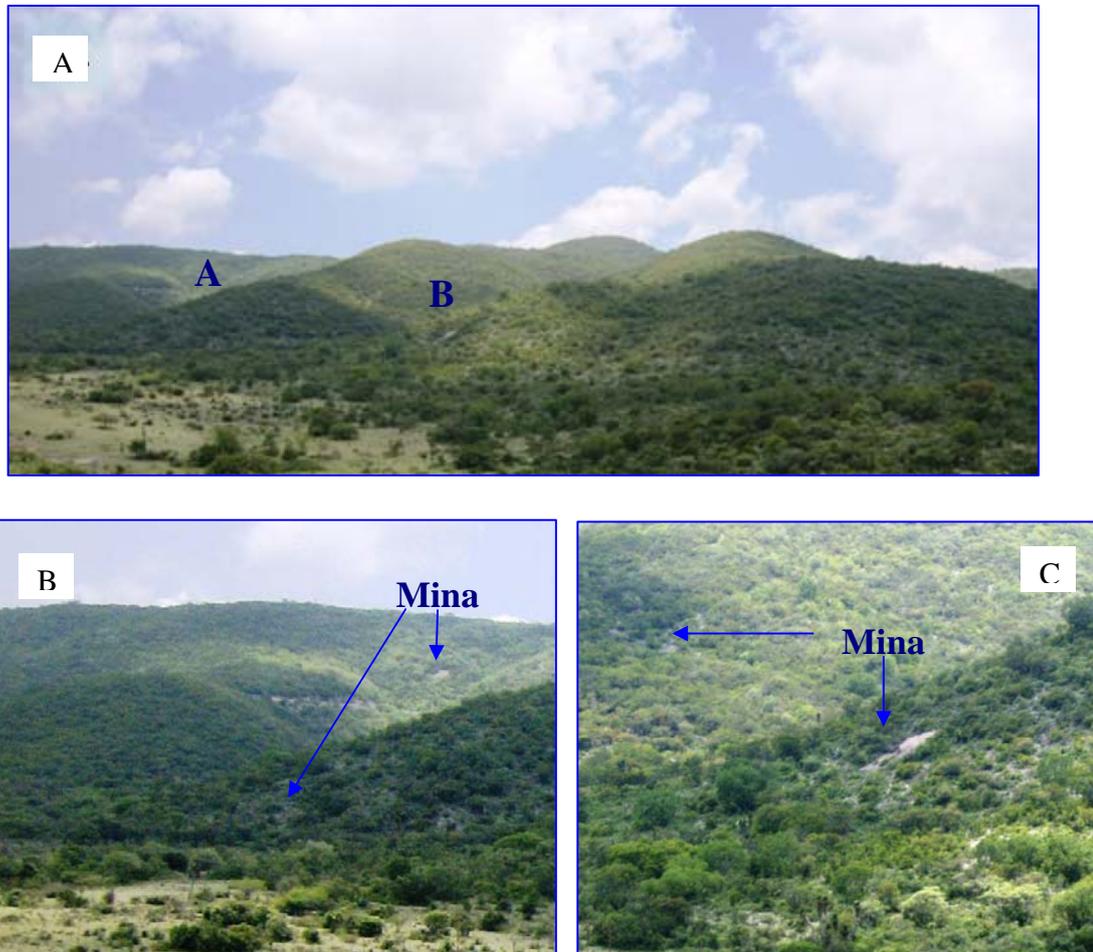


Figura III.31. Fotografías tomadas hacia la parte oriente del área de estudio. A Panorámica del este de la Sierra de Guadalcázar, (zona oriente). A y B. Algunas minas y terreros.

3.6.4. Minerografía

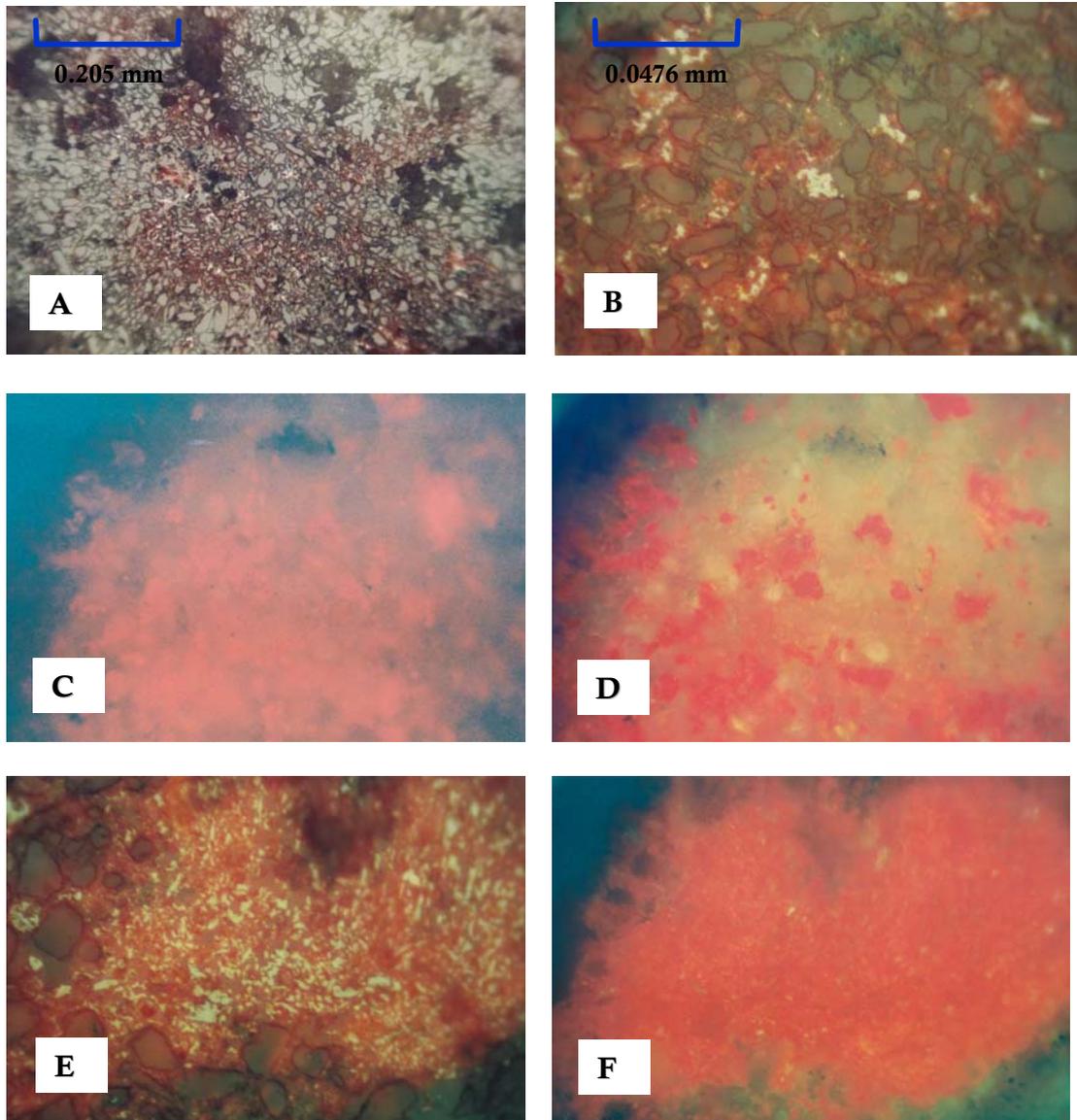
Junta con la petrografía se hizo una sección pulida de una muestra de la mina El Refugio de los Patos, Ejido Laguna de Gerardo; que se selecciono para observar su contenido mineralógico.

Descripción Microscópica

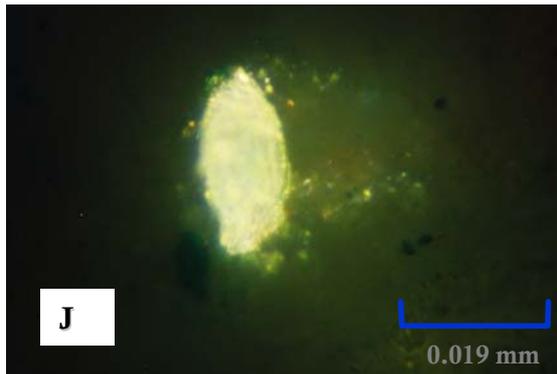
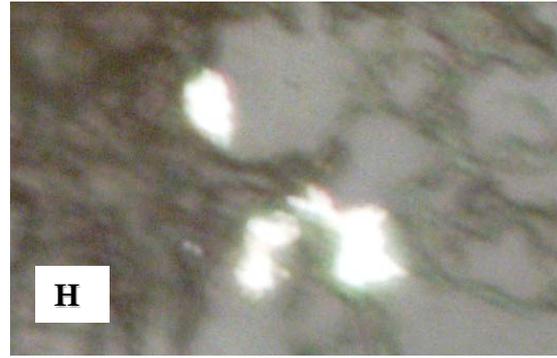
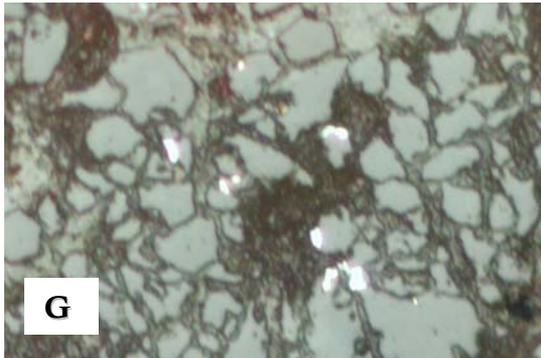
La estructura es principalmente de relleno de espacios abiertos (fracturas y venillas), con algo de recristalización de calcita.

Los minerales metálicos: son cinabrio, pirita; óxidos de manganeso y fierro y posible pirargirita o plata roja y algo de oro. En general, éstos minerales se encuentran dispersos sobre toda la muestra, en un 70 % y el resto es caliza recristalizada.

Hay abundante cinabrio impregnado en la muestra (Lamina 2 A-F.). Los cristales son alotriomorfos dando un color rojo bermellón; están distribuidos irregularmente 50% de la muestra asociados a otros sulfuros; de la misma manera puede haber pirargirita (plata roja) ya que se le confunde con el cinabrio siendo su tamaño muy pequeño. También hay pirita cerca de 0.5% o menos, que tiende a su forma cúbica, ídiomorfa, con reflectancia en aceite o aire color amarillo. Los óxidos de manganeso son en menor cantidad que los sulfuros; escasean en esta muestra, irregularmente, su forma es alotriomórfica a hipidiomórfica y equivalen al 1%. Hay escasos telururos de oro en pequeños cristales alotriomórficos. Con nicoles cruzados su reflexión tiende a ser intensa; suelen aparecer en micropartículas entre los minerales de ganga en 0.01% o menores (Laminas 3 G-J).



Lamina 2.. Mineragrafía de la muestra tomada en zona Laguna de Gerardo. A. Vista del mineral de cinabrio; aumento 100X con luz natural (LN). B. Acercamiento del mismo cinabrio, lente 400X (LN.). C y D. Con luz polarizada (LP) la foto anterior, viendo el color y dispersión del color rojizo del mineral. E. Otra toma de la muestra del cinabrio, lente 100X en luz natural. F. Anterior con luz polarizada.



Lamina 3. G. Perspectiva de oro libre, aumento 20X2X10X con Luz Natural. H. Acercamiento del anterior, utilizando aumento 40X (LN). I. Diferente toma, posible cristal de pirita u oro, relleno de una fracturita de tamaño aproximado 36 micras, (100X con LN) J. Cristal de oro (1000X, inmersión en aceite, LN)

CAPITULO 4

INCLUSIONES FLUIDAS

4.1. Generalidades

En la formación de un mineral, los fluidos juegan un papel muy importante, tanto en la formación de las rocas como en los que intervienen posteriormente. Muestras de estos fluidos quedan atrapadas en pequeñas cavidades o lagunas de cristalización en la red cristalina de los minerales – la mayoría menores a 100 μm – que reciben el nombre de *inclusiones fluidas*. Por lo tanto, una inclusión fluida se forma cuando una cavidad o laguna de crecimiento de un mineral, se rellena por uno o varios fluidos de formación, a partir del cual pueden precipitar uno a más minerales sólidos. De esta manera, de las inclusiones fluidas podemos obtener información sobre las condiciones de presión y temperatura al momento de su atrapamiento. Su composición y las fases de equilibrio están controladas por las condiciones termodinámicas de presión-volumen-temperatura-composición (PVTX):

- **Temperaturas:** Los estudios microtermométricos son aceptados como geotermómetros directos. Las temperaturas de homogeneización de los fluidos se interpretan como temperaturas mínimas de atrapamiento de los mismos.
- **Presión:** Para obtener información sobre este parámetro, se compara con datos experimentales y propiedades termodinámicas de fluidos similares.
- **Densidad:** Al poder reconocer las distintas fases de las inclusiones y las densidades específicas de cada fase, se puede calcular la densidad general. Un análisis in-situ de la composición y, por consiguiente, de la densidad, puede hacerse con la ayuda de una microsonda Raman.
- **Composición:** El comportamiento del fluido a bajas temperaturas permite conocer la composición de los fluidos subsaturados en sales, o la presencia de CH_4 en fluidos acuo-carbonosos ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$). La presencia de halita en fase sólida implica un fluido sobresaturado. La determinación global de la

composición de las inclusiones, se basa sobre las medidas de volumen de cada una de las fases y tomando en cuenta las densidades individuales.

Sorby, 1858, propuso la hipótesis de que las burbujas de gas presente en la mayoría de las inclusiones fluidas aparece por un contracción diferencial del líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de formación y atrapamiento hasta la temperatura ambiente, por lo que la temperatura de observación. Su razonamiento lo llevo a establecer que la temperatura de atrapamiento puede estimarse calentando la muestra hasta que la burbuja de gas desapareciera (temperatura de homogeneización ó Th). Con limitaciones esta hipótesis es la base de los procesos de calentamiento, ya que la evolución del fluido atrapado en las inclusiones durante el enfriamiento en condiciones naturales es el mismo, pero en sentido inverso, que la que tiene lugar durante el calentamiento experimental.

La homogenización puede ocurrir mediante diferentes transiciones de fases y los reactantes y los productos se registran en conjunto con su temperatura:

- (1) homogenización a estado líquido vía transición punto de burbuja, Th (LV→L);
 - (2) homogenización al estado de vapor vía transición punto de rocío, Th (LV→V);
 - (3) homogenización a un fluido supercrítico vía transición crítica, Th (LV→SCF) o simplemente Th (crítica);
 - (4) homogenización a líquido vía transición *liquidus* (fusión-disolución) Th (SL→L)
- y
- (5) homogenización vía transición *vaporus* (sublimación), Th (SV→V).

En algunas inclusiones de gas, tales como N₂-CO₂ e inclusiones fluidas acuosas-gaseosas, tales como CO₂-H₂O ± sal y CH₄-H₂O ± sal, se pueden observar dos o más transiciones de homogenización conforme el calentamiento progresa: (1) la homogenización *parcial* de las fases no acuosas a baja temperatura, ejemplo, Th (LCO₂ Laq V→LV) y (2) la homogenización *total* de la inclusión a alta temperatura, ejemplo, Th (LV→L). Diamond, L. W. (2003).

La temperatura de homogenización final o total (T_{hf}) en conjunto con los datos obtenidos del estudio a bajas temperaturas (congelación), pueden ser usados para calcular la densidad casi total de los fluidos y de esta manera poder proyectar la isocóra a través de la cual la inclusión fluida fue atrapada, con el objetivo de determinar las condiciones de temperatura y presión en el momento del atrapamiento de la inclusión.

4.1.1. Temperatura de atrapamiento.

La temperatura de homogenización (T_h) da una estimación de la temperatura de atrapamiento (T_a), sin embargo, la T_h es una estimación mínima de tal temperatura y rara vez la T_h representa la T_a real ($T_h=T_a$ solo cuando la inclusión fue atrapada en un sistema de fluidos inmiscibles o en ebullición). Para la obtención de la T_a , se tiene que realizar una corrección por presión cuya magnitud dependerá de la presión de homogenización " P_h " ($P_h=P_t$ solo cuando la inclusión fue atrapada en un sistema de fluidos inmiscibles o en ebullición), de la presión de atrapamiento (P_t) y de la pendiente de la isocóra ($\Delta P/\Delta T$), esto es: La corrección por presión = $(P_t - P_h)/(\Delta P/\Delta T)$. La P_t se puede conocer mediante datos geológicos de campo relacionados al espesor de la cubierta existente en el momento de atrapamiento o a través de algún otro geobarómetro independiente. De ser así, la T_h medida puede ser corregida por presión para obtener de esta forma la T_a . Roedder, E. (1984), Goldstein & Reynolds (1994).

A fin de adquirir la pendiente de la isocóra $\Delta P/\Delta T$, debemos conocer el punto de inicio de la misma sobre la curva de burbuja, dicho punto de inicio está indicado por la temperatura de homogenización medida, la cual nos proporciona además la presión de curva de burbuja (presión de vapor del fluido a T_h) Shepherd, et al. (1985).

4.1.2. Presión de atrapamiento

La estimación de la presión en el momento de atrapamiento de las inclusiones fluidas da entrada al entendimiento de su significado geológico y a la vez es un medio por el cual podemos hacer correcciones a las temperaturas de

homogenización para obtener la temperatura de atrapamiento verdadera. Las máximas presiones ejercidas sobre un fluido son las provocadas por la presión litostática cuando le cubren masas rocosas. Sin embargo, si este fluido ha quedado expuesto a la superficie, la presión que se ejerce sobre él es la presión hidrostática.

Los métodos principales para la estimación de la presión de fluido partiendo de datos obtenidos de las inclusiones fluidas son:

1. La presión de vapor del fluido a T_h . (presión mínima absoluta).
2. Isocóras del fluido usadas en conjunto con geotermómetros independientes (se puede usar la partición de elementos traza entre fases minerales coexistente, asociaciones minerales y geotermómetros de isótopos estables (Word y Fraser 1976; Shepherd 1985).
3. Intersección de las isocóras de los fluidos cuando estos coexisten.
4. Disolución de los minerales hijos (halita), especialmente en casos donde la temperatura de disolución es mayor que la temperatura de homogenización (Shepherd, et al. 1985).

Para obtener una aproximación de la presión mínima de atrapamiento en inclusiones que fueron atrapadas a temperaturas más altas que las de la superficie, se hace determinando la presión de la fase gaseosa de la inclusión a temperatura de laboratorio por medio ya sea de trituración (crushing) o por espectroscopía Raman. A pesar de que este método subestima significativamente la presión al momento de su atrapamiento, cuando menos proporciona una presión mínima de atrapamiento.

Otra manera de obtener una presión mínima de atrapamiento es mediante la determinación de la curva de punto de burbuja. Como se mencionó con anterioridad, esta estimación la fija el T_h sobre la curva de punto de burbuja que es el punto de inicio de la isocóra de la inclusión (Goldstein y Reynolds, 1994). Para determinar la presión de formación real (más aproximada a lo real) se tiene que asumir que se conoce la temperatura de atrapamiento, ya que la posición de

esta temperatura sobre la isocóra nos aporta la presión de atrapamiento. Las temperaturas auxiliares se tienen que obtener por medio del conocimiento geológico o geoquímico y pueden estar basadas en, fraccionamiento de elementos traza entre fases minerales coexistentes, equilibrio de asociaciones minerales, composición mineral y geotermómetros de isótopos estables. Shepherd, et al. (1985). Otro medio de proporcionar una temperatura de atrapamiento es el uso de gradientes termobáricos actuales y asumir con gran probabilidad de error que es el mismo gradiente que existió al momento de que la inclusión fue atrapada, Goldstein & Reynolds, (1994).

Cuando se tienen fluidos inmiscibles en la inclusión, pueden también coexistir inclusiones con predominancia de uno u otro fluido. Si este es el caso, se pueden calcular las isocóras de ambos fluidos y el punto en donde se cruzan esta determinado por el par de temperatura y presión real de atrapamiento de las inclusiones.

La disolución de minerales hijos como halita dentro de la inclusión, también ofrece la posibilidad de obtener una temperatura de atrapamiento y utilizarla como suministro para la determinación de la presión de atrapamiento (Shepherd, et al. 1985, Diamond L. W. 2003).

4.2. Clasificación de las inclusiones.

En la actualidad, la clasificación mas utilizada es la que se propuso Roedder (1976, 1981, 1984). Esta agrupa a las IF de acuerdo con parámetros geométricos y morfológicos, a la vez que da una idea aproximada de su cronología.

4.2.1. Clasificación genética

El criterio más importante para esta clasificación es la que se basa en el origen. Roedder (1976, 1981, 1984) establece ciertos parámetros geométricos y morfológicos para distinguir la cronología de las inclusiones, si bien ninguno de ellos es definitivo y resultan ser un tanto ambiguos. A partir de las

observaciones microscópicas, se puede distinguir tres tipos genéticos de inclusiones: primarias, secundarias y pseudosecundarias.

a) Inclusiones primarias.

Son aquellas inclusiones que representan y contienen al fluido que dio origen al cristal que las contiene formadas al mismo tiempo que éste, las cuales se pueden localizar en el avance de las caras, aristas y vértices del cristal (a favor de los planos cristalográficos) aunque, al considerarse como defectos intracristalinos también pueden estar distribuidas al azar (aisladas) Ver Figura IV.32. Estas inclusiones son las más representativas de las condiciones termodinámicas presentes en el momento del atrapamiento.

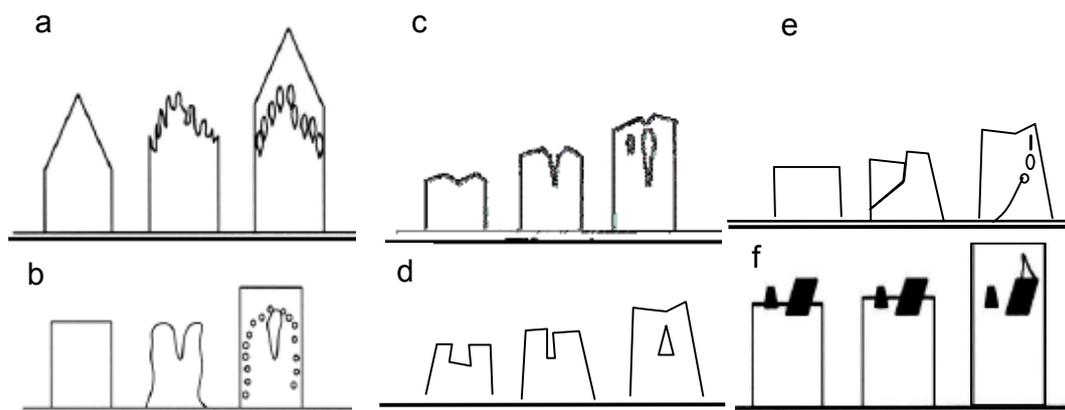


Figura IV.32. Mecanismos de captura de inclusiones fluidas primarias. (a) El crecimiento rápido dendrítico es cubierto por un recrecimiento mineral. (b) La disolución parcial de un cristal preexistente origina una zona de corrosión y una superficie curva: ambas facilitan la captura de inclusiones fluidas durante el crecimiento posterior del mineral. (c) Las inclusiones son capturadas entre espirales de crecimiento individuales y a veces en el centro de ellas. (d) El crecimiento sub-paralelo de cristales provoca la captura de inclusiones. (e) Una fractura en la superficie de un cristal en crecimiento provoca desarrollo imperfecto y captura de inclusiones. (f) Cualquier objeto sólido en la superficie de un cristal en crecimiento, puede ser englobado como inclusión sólida y puede también entramparse algo de fluido con él. (Según Mangas et., 1991)

b) Inclusiones secundarias.

Se incluyen aquí todas las inclusiones que se originan con posterioridad a la formación del cristal. Así pues, si un cristal se fractura en presencia de un fluido de solubilidad finita, el fluido penetra en la fractura y comienza una acción de disolución y recristalización del mineral, reduciendo la superficie y atrapando un conjunto de inclusiones secundarias (Figura IV.33) por lo tanto se considera que se distribuyen a lo largo de fracturas recristalizadas. Como el cristal en donde se encuentra la fractura sigue cristalizando al tiempo que entra el fluido, el término inclusión secundaria es relativo.

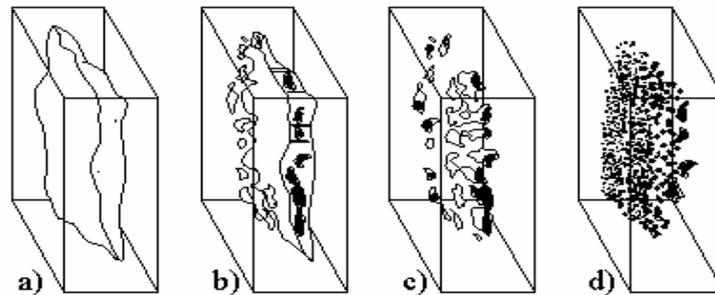


Figura IV.33. Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias. Si este proceso ocurre al tiempo que desciende la temperatura, las inclusiones individuales pueden tener relaciones gas/líquido variables (Roedder, 1962a).

El estudio de las inclusiones fluidas de diversas fracturas, ayuda a determinar y comparar los diferentes fluidos que han atravesado una roca, así como la cronología de los mismos.

c) Inclusiones pseudosecundarias.

Si un cristal se fractura durante su crecimiento, los fluidos nutrientes entran dentro de la fractura y quedan atrapados dentro del cristal. Las inclusiones formadas por este proceso reciben el nombre de pseudosecundarias y representan estados intermedios entre inclusiones primarias y secundarias. Para poder definir exactamente estas inclusiones, es necesario que estén bien delimitadas las fracturas dentro del cristal como se muestra en la Figura IV.34.

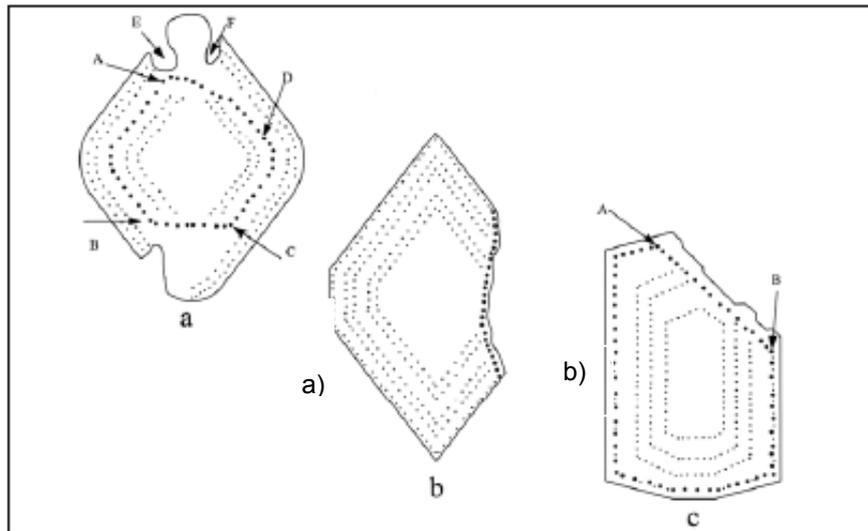


Figura IV.34. Inclusiones pseudosecundarias (Ermakov, 1950): a) Confinadas a superficies de soldadura de un cristal (sectores AD y BC). O bien singenéticas, con inclusiones primarias regeneradas (sectores AB y CD) restringidas en este ultimo caso o superficies débilmente corroídas, E y F espacios primarios asociados con corrosiones globulares múltiples. b) Confinadas a superficies de corrosión planas. c) Asociadas con superficies de corrosión debidas a la exfoliación (Mangas et., 1991).

Las inclusiones primarias y pseudosecundarias reflejan el fluido presente durante el crecimiento del cristal, mientras que las inclusiones secundarias corresponden a soluciones posteriores posiblemente no relacionadas con los fluidos responsables del crecimiento las cuales atraviesan el cristal con orientaciones irregulares como se presenta en la Figura IV.35.

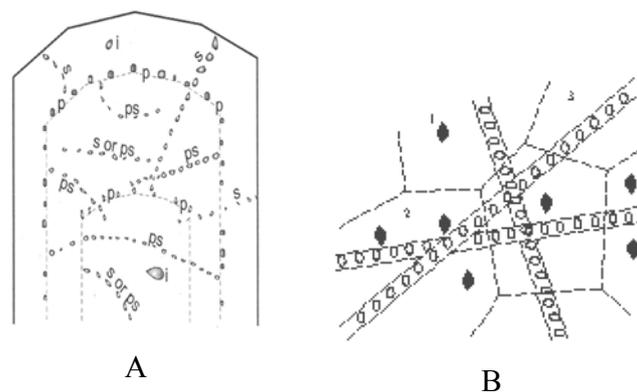


Figura IV.35. Inclusiones primarias y secundarias: **A.** En cristales ídioromfos: p = primaria; s = secundaria; ps = pseudosecundaria (Goldstein 2003). **B.** En rocas masivas: 1) Inclusiones aisladas en granos. 2) Inclusiones a lo largo del borde del grano. 3) Líneas de inclusiones a lo largo de fracturas cicatrizadas (Touret, 1994).

4.2.2. Clasificación según el número de fases.

Junto con la clasificación anterior y de forma complementaria, se utiliza una segunda clasificación basada en el número de fases presentes en la inclusión a temperatura ambiente (Mangas et., 1991):

- Monofásica, si solo se presenta una fase
- Bifásica, si presenta 2 fases (líquido y gas)
- Trifásica, si presentan 3 fases (líquido, un sólido atrapado o precipitado y una burbuja de vapor de gas).
- Polifásica, presenta más de 3 fases, combinaciones de diferentes líquidos y/o sólidos.

4.2.3. Otras clasificaciones

En la actualidad, otro intento de clasificación muy extendido es el de indicar con letras los diferentes tipos en función de las fases principales presentes a temperatura de laboratorio (Roedder, 1984; Shepherd *et al.* 1985; Goldstein, 2003; Van den Kerkhof y Hein, 2001; (Figura IV.36). Así tenemos:

Tipo L₂ Homogeneizan en fase líquida.

- No suelen llevar sólidos significativos.
- A veces no tienen fase de vapor (monofásicas a temperatura ambiente).
- Tienen mayor densidad.
- Son las más abundantes.

Tipo V. Homogeneizan en fase vapor.

- No suelen presentar sólidos significativos.
- La fase de vapor ocupa un 50%.
- Tienen menor densidad.

Tipo C₂ A temperaturas de 20° C, presentan 3 fases:

- L₁ (líquido fundamentalmente acuoso),
- L₂ (líquido fundamentalmente carbónico con CO₂, CH₄,....) y

- V (vapor carbónico: CO₂, CH₄, N₂).

Tipo S. Este tipo contiene, por lo menos, un sólido.

- La fase líquida suele ser mucho mayor que la fase de vapor.
- El sólido puede ser precipitado o atrapado mecánicamente. En el primer caso indica que el fluido está saturado en ese compuesto. Los sólidos más comunes son NaCl, KCl, anhidrita, nacolita, carbonatos de Ca y Mg, los minerales atrapados mecánicamente son sólidos que estaban en equilibrio con el medio.

Tipo G. Vidrio más fluido y/o fases sólidas, son frecuentes en rocas volcánicas, sub-volcánicas, meteoritos y muestras lunares. De apariencia similar, sin embargo presentan una o varias burbujas inmóviles, debido a su elevada densidad.

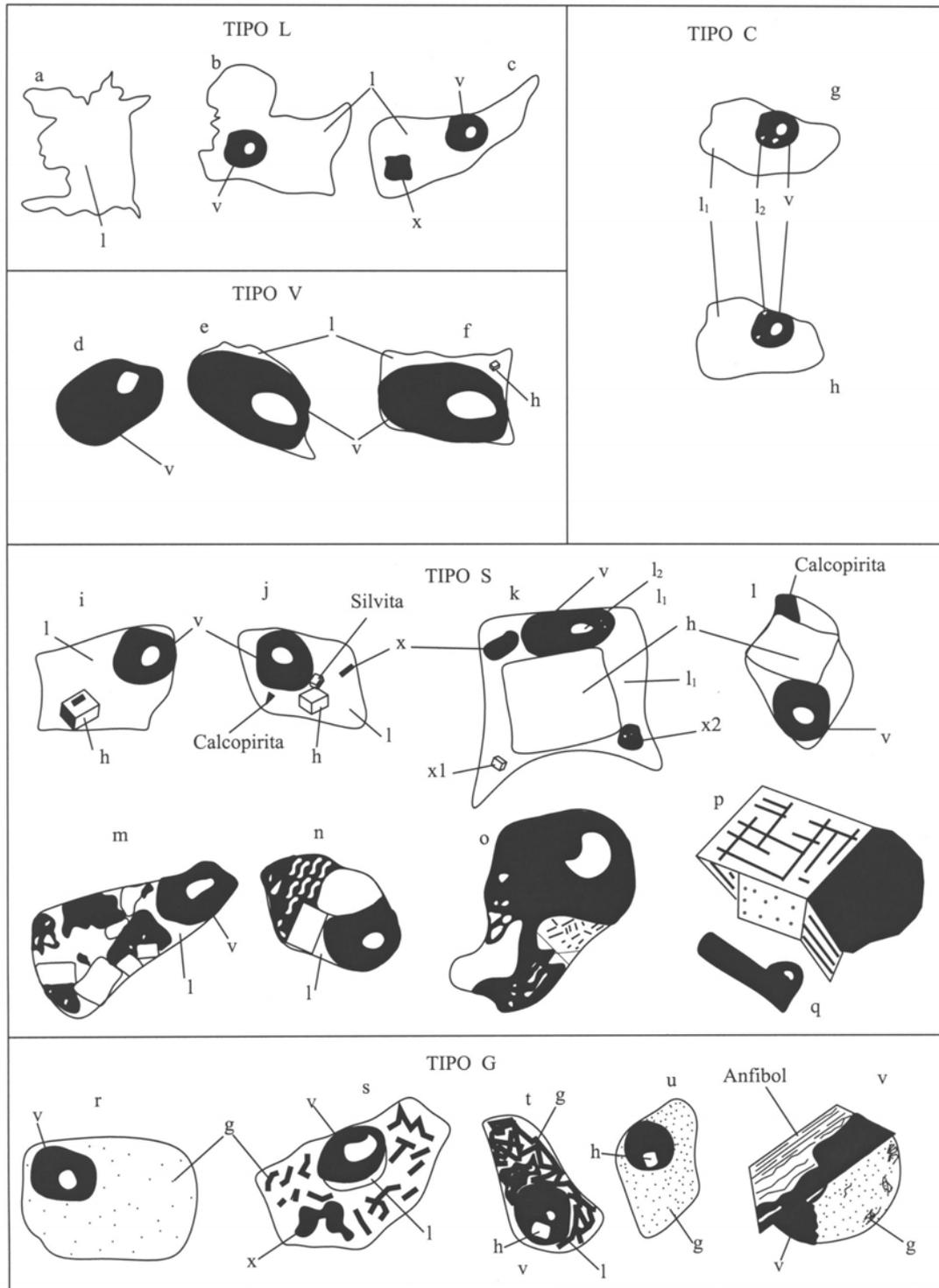


Figura IV.36. Tipos de inclusiones: l, líquido; v, vapor; h, halita; x, varios cristales a menudo no identificados; g, vidrio. (Roedder, 1984; Shepherd *et al.* 1985; Goldstein, 2003; Van den Kerkhof y Hein, 2001)

4.3. Conceptos importantes

- **Temperatura de homogeneización (Th):** es la temperatura a la cual dos fases se comportan como una sola, ejemplo: la desaparición de una burbuja de vapor en fase líquida al calentar la inclusión. A partir de aquí la inclusión evoluciona a lo largo de una isocóra siguiendo una línea recta; esta temperatura de cambio de fase representa la temperatura mínima de atrapamiento de la formación del cristal.
- **Temperatura de atrapamiento (Ta):** temperatura a la cual una inclusión fue atrapada, en la práctica equivale a la temperatura de homogeneización más una corrección de temperatura debido a la presión.
- **Temperatura de decrepitación (Td):** temperatura a la cual una inclusión explota debido al exceso de presión perdiendo sus fluidos, en este caso las manipulaciones sobre la misma inclusión se vuelven irreproducibles.
- **Temperatura de fusión del hielo (Tf):** temperatura a la cual funde el último cristal de hielo, misma que se relaciona con la composición del fluido ya que lo podemos relacionar con las sales disueltas en el mismo.
- **Temperatura crítica:** temperatura a la cual, líquido y vapor se comportan termodinámicamente de una misma manera. Se relaciona con una densidad crítica.
- **Temperatura eutéctica (Te):** es la temperatura a la cual inicia la fusión de las fases congeladas de un sistema. Por ejemplo, la temperatura eutéctica para el sistema H₂O-NaCl es -20.8° C. Para H₂O-KCl es -10.6° C.

4.3.1. Fundamento de estudio.

Para estudiar las inclusiones fluidas es necesario tener en cuenta ciertos parámetros que es preciso admitir para que los resultados sean válidos. Estas condiciones según (Roedder y Bodnar, 1997):

- Que el fluido atrapado represente la solución a partir de la cual creció el mineral o al estado geológico que se considere.

- Que una vez atrapado el fluido se supone que la cavidad permanece hermética y químicamente inerte. En este caso, las características fisicoquímicas del fluido, tales como la composición, volumen y la densidad, no se modifican, por lo que las inclusiones fluidas se comportan como cavidades de paredes rígidas que actúan como pequeñísimos sistemas termodinámicos aislados del exterior. En la práctica la mayor garantía de que esto sucede consiste en comprobar, que la inclusión recobra su estado inicial al volver a la temperatura ambiente.
- Que se conozcan las relaciones espacio-temporales entre el evento del atrapamiento y el proceso geológico de interés.
- Que los efectos de la presión fueron insignificantes o son conocidos.

No obstante, se deben tener en cuenta una serie de fenómenos que pueden presentarse en muchas inclusiones y que son contrarios a la completa validez de estas hipótesis. Los más importantes son:

Las capturadas en sistemas heterogéneos:

Durante el crecimiento cristalino, el fluido puede llevar partículas en suspensión que provienen de la rotura de la roca encajonante y del material que cristaliza al mismo tiempo. Estos sólidos aparecen en el interior de las inclusiones en cantidades y tamaños variables, otro factor a tener en cuenta es la posibilidad de que se produzca la captura simultánea de dos fases inmiscibles, glóbulos de petróleo o una fase rica en CO₂, en un líquido acuoso. Cuando el ambiente donde crece el cristal es un sistema heterogéneo de dos fluidos pueden quedar atrapadas simultáneamente inclusiones inmiscibles de ambos.

4.4. Cambios post-atrapamiento que pueden producir diversas transformaciones en las fases capturadas y en la naturaleza física de la inclusión

4.4.1. Cambios en las fases

1. Durante el enfriamiento natural puede haber cristalización en el mineral que contiene la inclusión si el fluido está saturado. Esta nueva fase mineral es difícil de ver y frecuentemente se ignora (Ermakov, 1950). La característica más distintiva de las inclusiones a temperatura ambiente es la presencia de una burbuja de gas o vapor que se puede mover por la influencia de gradientes térmicos o gravitatorios, si es suficientemente pequeña, puede tener un movimiento constante al que se ha llamado equívocamente movimiento browniano (Roedder, 1981).
2. El fluido homogéneo atrapado originalmente puede precipitar nuevas fases sólidas que sean diferentes a las del mineral encajonante. Estos cristales se denominan cristales hijos. El más común es el NaCl, aunque también se han encontrado entre otros, sulfatos y carbonatos. A excepción del NaCl, el volumen de estos minerales hijos es tan pequeño que no se pueden identificar normalmente al microscopio.
3. Las inclusiones fluidas son pequeños sistemas en los que frecuentemente se observan procesos de metaestabilidad de diferente grado, durante el enfriamiento de las inclusiones que eran homogéneas a temperatura ambiente.

4.4.2. Reequilibrio de las paredes de las inclusiones.

Algunas inclusiones con forma irregular tienen la tendencia de cambiar a morfologías más regulares, como cristales negativos o esferoidales. Este equilibrio es isoquímico a volumen constante (Shepherd et al, 1985).

4.4.3. Cambios del emplazamiento y la morfología.

- *Estrangulamiento (necking down)*

Muchas inclusiones presentan formas diferentes a las que tenían en el momento del atrapamiento. Así, cuando el mineral tiene una solubilidad finita en el fluido atrapado, los procesos de recristalización pueden producir estrangulamiento (necking down) como se muestra en la figura IV.37.

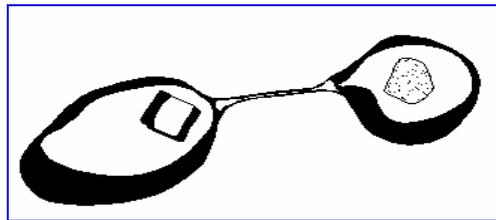


Figura IV.37. Inclusión con estrangulamiento (necking down).

Resultado de ello, es el cambio de forma o la creación de inclusiones más pequeñas con fases heterogéneas, que puede afectar muchas inclusiones fluidas formadas en ambientes diagenéticos. Por lo tanto es importante tomar en cuenta la posibilidad de existencia de este fenómeno. Este efecto depende de dos factores:

- a).- Si el cambio de forma se llevó a cabo cuando la inclusión fluida se encontraba en una sola fase (monofásica).
- b).- Si se realizó cuando la inclusión presentaba cambio de fase (bifásica).

En el primer caso de una inclusión monofásica, no provoca problema alguno para los datos de inclusiones, debido a que para este caso, el proceso no cambia la densidad de la inclusión fluida significativamente, ya que el material de la inclusión solo es movido de un lugar a otro. El proceso puede cambiar la composición de elementos trazas y composición isotópica pero se considera que la composición de los iones principales y salinidad total permanecen sin cambio. En la Figura IV.38a, por ejemplo, en el punto A que es el de atrapamiento, una inclusión acuosa (toda líquida) la cual se encuentra a cierta temperatura sufre de un posterior efecto de estrangulamiento formándose varias inclusiones (punto B) cada una de las

inclusiones nuevas producidas tendrían la misma densidad que la inclusión original. Con el enfriamiento hacia las condiciones de P-T en que la isocóra intercepta el límite líquido-vapor (punto C) cada inclusión tiene el potencial de nuclear una burbuja de vapor. Bajo enfriamiento continuo a lo largo de la curva líquido-vapor hasta la temperatura ambiente (25°C, punto D) cada inclusión contendrá una pequeña burbuja de vapor. Si esas inclusiones se calentaran en el laboratorio, homogeneizarían exactamente a la misma temperatura que la inclusión original tenía, ya que las inclusiones que sufrieron estrangulamiento (necking down) aún contienen fluidos de densidad representativa de este proceso inicialmente atrapado.

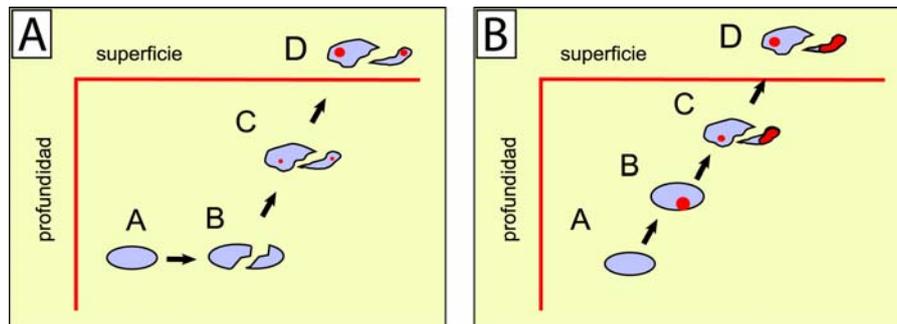


Figura IV.38. Efecto de estrangulamiento o necking-down: a).- En una inclusión que sufre cambio de forma cuando se encuentra en una sola fase; b).- En una inclusión que sufre estrangulamiento cuando ésta ha cambiado de fase.

Para el segundo caso, la Figura IV.38b muestra el proceso de cambio de forma que origina inclusiones que no son representativas del fluido que inicialmente se atrapó, como por ejemplo una inclusión que se atrapa en el punto A de la Figura 22b. El sistema se enfría antes de que el estrangulamiento se lleve al cabo y las condiciones de P-T de la inclusión bajan hasta que la curva de líquido-vapor es alcanzada en el punto B. Si la inclusión sufriera una ruptura resultando en varias inclusiones después de nucleada de una burbuja de vapor (punto C), entonces una de estas inclusiones podría contener la mayor parte de la burbuja y otra inclusión contendría únicamente una pequeña porción de vapor y abundante líquido. Si continúa el enfriamiento hasta la temperatura ambiente (punto D) se podrían nuclear nuevas burbujas. De esta manera, cada una de las inclusiones

producidas por estrangulamiento después de un cambio de fases, podría tener diferentes densidades y, por consiguiente, diferentes temperaturas de homogeneización altamente variables. Por ejemplo, una mayor proporción de vapor atrapada en alguna de las inclusiones resultantes, tendrá temperaturas mayores con respecto a las dominadas por la fase líquida.

- *Aumento de volumen o extensión–dilatación (Stretching)*

El stretching es el efecto de incremento de volumen de la cavidad de la inclusión que trae como consecuencia una disminución de la densidad de la inclusión y por lo tanto un incremento en T_h . La Figura IV.39 ilustra el proceso de stretching en la naturaleza. Si una inclusión fluida es atrapada durante el sepultamiento en el punto A y sufre un enterramiento adicional, la presión de la inclusión habrá aumentado. Si la presión interna causa la expansión de la cavidad de la inclusión a un punto de deformación plástica (punto A'), la densidad de la inclusión decrecerá. Si esta inclusión posteriormente fuera levantada y por lo tanto enfriada, interceptaría la curva de líquido/vapor y nuclearía una burbuja de vapor (punto B') y por lo tanto la medición microtermométrica daría una T_h mayor (en el punto C') que la inclusión fluida originalmente atrapada (punto C). Así el resultado del incremento de volumen de la inclusión con el sepultamiento será un T_h mayor para cada inclusión que ha sufrido este efecto.

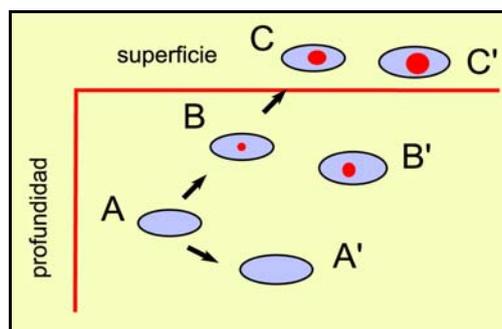


Figura IV.39. Efecto del stretching en una inclusión fluida.

3.- Apertura y/o decrepitación y relleno con fluidos nuevos (*leaking*).

Para este caso, la inclusión que ha decrepitado por sobrecalentamiento natural Ej. sepultamiento o por un levantamiento brusco. Las fracturas así formadas alrededor de la inclusión son aprovechadas por la misma para perder parte de su relleno por capilaridad o hasta puede conectarse con los fluidos de sus alrededores, y rellenarse con un fluido ajeno. La Figura IV.40 muestra la trayectoria A-B-C para una inclusión fluida que no ha sido modificada, y A'-B'-C' la trayectoria para una inclusión que ha sido modificada en su composición y condiciones de P-T. Para este último caso la fractura alcanza el borde de la cavidad de la inclusión en el punto X, equilibrándose con los fluidos capilares y los fluidos dentro de la inclusión, posiblemente alcanzarán una composición y densidad idéntica a los fluidos capilares de los alrededores (A'). Bajo este mecanismo, una inclusión puede cambiar totalmente, debido al relleno de fluidos tardíos por sepultamiento. Este mecanismo de pérdida y relleno de las inclusiones, ha sido identificado por estudios empíricos y experimentales.

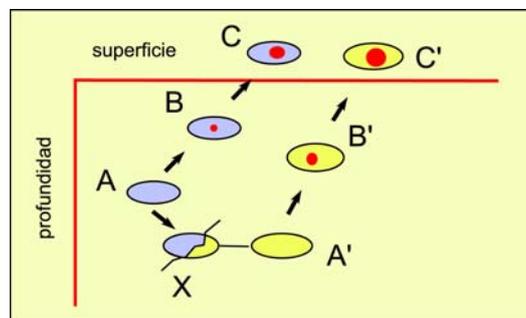


Figura IV.40. Efecto de rompimiento y relleno de una inclusión fluida (*leaking*).

4.4.4. Detección de rasgos post-atrapamiento.

Existe una manera gráfica que nos puede servir para detectar los fenómenos de post-atrapamiento mostrados en la Figura IV.41; en esta figura el comportamiento de la Th y de la salinidad pueden ser usadas para identificar si las inclusiones fluidas han sufrido stretching, o *leaking* durante el sepultamiento, dando información concerniente a la historia que ha tenido una inclusión posterior a su atrapamiento. En ambientes sedimentarios es común que las inclusiones sean

sepultadas profundamente, provocando cambios en sus condiciones internas de presión y temperatura, Bajo tales circunstancias, las inclusiones fluidas son sobre presurizadas, y la cavidad del fluido puede sufrir los cambios ya señalados.

Cuando ocurre el stretching el fluido de la inclusión no se escapa, pero las condiciones internas han cambiado debido al incremento de volumen de la cavidad, esto produce un incremento en la medición de T_h . En los diagramas de la Figura IV.41, los grupos de inclusiones que no han estado sujetos a stretching o a leaking presentan un patrón circular (Figura IV.41a). Las muestras que han sufrido stretching muestran gran variedad en T_h , pero invariable salinidad, por lo que el conjunto de datos adopta la dirección del eje de la temperatura (Figura IV.41b). Las inclusiones que se han perdido fluido y han vuelto a llenar generalmente trazan una tendencia lineal hacia mayores valores de T_h -salinidad (Figura IV.41c), debido a que los fluidos diagenéticos comúnmente incrementan su temperatura y salinidad durante el sepultamiento progresivo en una cuenca. Finalmente el conjunto de datos de poblaciones compuestas por inclusiones que han sufrido stretching e inclusiones que se han vuelto a llenar por fluidos nuevos, se arreglan de forma triangular entre dos líneas que convergen hacia su parte inferior en un punto que representa las condiciones originales de T_h y salinidad (Figura IV.41d).

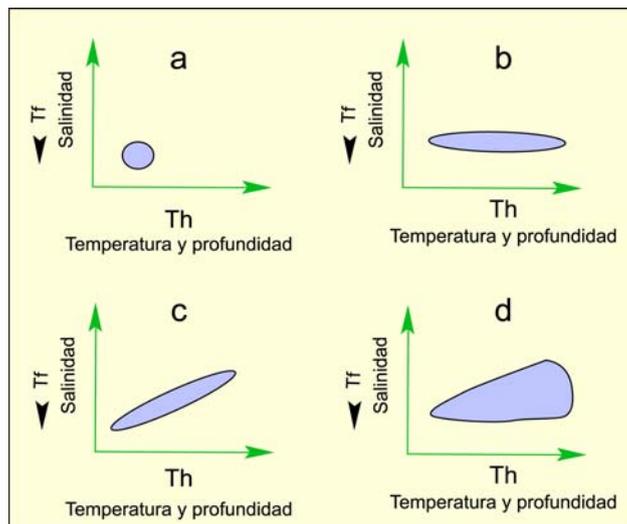


Figura IV.41. Diagramas T_h -Salinidad (T_f): a) Representa la población original de inclusiones fluidas; b) Población de inclusiones fluidas que han sufrido stretching; c) Población de inclusiones que han experimentado fracturamiento-relleno y d) Población de inclusiones que han experimentado fracturamiento-relleno y stretching (tomado de Goldstein y Reynolds 1994).

Por lo tanto, antes de llevar a cabo el estudio microtermométrico, es fundamental observar cuidadosamente las muestras para distinguir entre estos fenómenos, para no caer en la interpretación de datos erróneos.

4.5. Selección de las inclusiones fluidas.

Para hacer la selección de las IF que se deben de estudiar se tiene que enfrentar el problema de establecer la liga entre tales inclusiones y el proceso que se quiere investigar. La tarea de selección de las IF inicia desde el trabajo de campo en donde se define el marco geológico-estructural y se detecta el evento geológico a dilucidar.

Una vez que se define el problema geológico que se quiere resolver, se procede a tomar las muestras que pertenezcan al evento o sucesión de eventos involucrados en dicho problema y se da inicio a la elaboración de las secciones delgadas doblemente pulidas en las cuales se hará la separación de las familias de inclusiones. Aunque la mayoría de las muestras contienen numerosas asociaciones de inclusiones, solo algunas de ellas serán relevantes para dar respuestas que conduzcan a la solución del problema (Goldstein y Reynolds, 1994).

Por lo tanto, para los estudios petrológicos y de secuencia paragenética se utilizaron laminas delgadas Standard; para el estudio de inclusiones fluidas se obtuvieron laminas gruesas (100-150 μm) doblemente pulidas.

Para los análisis microtermométricos de las inclusiones se obtienen muestras de los cristales mas transparentes y menos deformados, tanto de fluorita como de calcita y cinabrio, para evitar problemas de modificación post-atrapamiento de las inclusiones fluidas.

4.6. Preparación de muestras

4.6.1. Muestras en general.

La forma de preparación de la muestra dependerá de la dureza de la roca o mineral que se desea estudiar, pero independientemente de esto, hay que

considerar que las inclusiones fluidas son frágiles por lo cual, las muestras deben ser tratadas cuidadosamente. Las técnicas de preparación deben de estar diseñadas para evitar el calentamiento de la muestra y su deformación mecánica.

Sección delgada doblemente pulida: Para preparar una sección de este tipo se requiere realizar ocho pasos. (Goldstein, 2003):

1. Impregnación de la muestra de roca.
2. Reducción del tamaño de la muestra mediante corte.
3. Esmerilado de la superficie que será montada.
4. Pulido de la superficie a ser montada.
5. Montaje de la roca pulida sobre al vidrio.
6. Corte del excedente de roca en el vidrio.
7. Desvastado de la roca montada hasta obtener el espesor apropiado y
8. Pulido de la superficie de la sección delgada.

Una vez realizado el pulido final, se procede a desmontar la muestra del portaobjeto y a hacerle la limpieza requerida.

4.6.2. Manejo de las muestras ya preparadas

El manejo que se le debe de dar a las muestras una vez que las secciones delgadas doblemente pulidas han sido preparadas, debe de ser el más adecuado para evitarles cualquier daño, por ejemplo, evitar: tratamiento con ácidos, ponerlas en contacto directo con otras muestras, o bien, si son muestras para estudios microtermométricos, no se les debe realizar otro tipo de análisis que implique el uso de haces de electrones, por ejemplo, en un SEM, en una platina de CL, (Goldstein, 2001) o aplicación de fluorescencia UV, (Pironon y Pradier, 1992) ya que el uso de estas técnicas provocan sobrecalentamiento que se puede traducir en perturbaciones de las inclusiones fluidas.

4.7. Microtermometría

La microtermometría se basa en la medida de las temperaturas a las que se producen los cambios de fases en las inclusiones cuando éstas se someten a un progresivo aumento de la temperatura para lograr las fusiones: la fusión de fases sólidas (sales, hidratos, etc.) y la homogeneización de sistemas gas-líquido en una sola fase gaseosa o líquida. Las temperaturas de homogeneización dan valores sobre el fluido atrapado, mientras que las temperaturas de fusión permiten estimar la densidad. Como se ha mencionado anteriormente la temperatura de homogeneización se considera la temperatura mínima de formación de las inclusiones.

4.7.1. Equipo

El equipo microtermométrico que se muestra en la figura IV.42 consta de una platina calentadora-refrigeradora y una consola de medida y regulación microtermométrica Linkam THMSG-600 acoplada a un microscopio Olympus BX51 con duplicador de aumentos, fuente de luz fría de 150W y sistema de video, ubicado en el laboratorio especializado de geofluidos de la UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro.



Figura IV.42. Equipo microtermométrico con platina calentadora-refrigeradora, Linkam THMSG-600 (Centro de Geociencias, UNAM)

Este modelo THMSG-600 (Figura IV.43) de platina enfriadora y calentadora mas sofisticada, fue creado para tener un mayor control de procesos de calentamiento

y enfriamiento. Se instala sobre la del microscopio petrográfico donde a la vez la muestra se posiciona directamente sobre un bloque pequeño de plata que contiene una ventana cubierta por una lamina de cuarzo cortado paralelamente al eje cristalográfico c, en el centro de una celda térmica de aluminio desmontable. Este bloque de plata contiene una resistencia de platino para calentarlo, y un termopar que permite medir la temperatura dentro del bloque de plata, no en la superficie de la lámina de cuarzo. En su interior existe una cavidad con forma solenoide conectada a dos tubos de acero inoxidable conectados a la entrada y salida de nitrógeno líquido y que, a su vez, mantiene el bloque de plata elevado, sin tocar las paredes inferior y superior de la cámara de la platina. Los rangos de temperatura que se pueden alcanzar es entre los -180° y $+600^{\circ}$ c.



Figura IV.43. Platina térmica Linkam THMS600 (www.linkam.co.uk)

Esta platina posee dos secciones desmontables con dobles ventanas de un vidrio muy fino para dejar pasar luz del microscopio y estar totalmente aislada del exterior. El aire que queda atrapado dentro de la cámara de la platina puede ser extraído utilizando nitrógeno-gas, el cual se inyecta a la platina y por diferencia de densidades desplaza al aire dentro de la platina.

Esta platina, cuenta con 2 tornillos en los ejes X-Y, lo cual permite estudiar muchos puntos dentro de la misma muestra, haciendo su uso más cómodo; tiene 3 conexiones directas, una para el tubo capilar que lo conecta con el dejar que contiene el nitrógeno, otra que se conecta al controlador de temperatura conectada a la resistencia la cual controla la temperatura y una tercera que va a

la bomba de vacío, controlando el flujo del nitrógeno. Posee dos conexiones extras que funcionan como sistema de purgación del aire contenido dentro de la platina; uno se conecta a la bomba de vacío, el cual bombea aire hacia la platina y otro que sirve como válvula que se abre o cierra dependiendo del sentido de la purgación.

Se ocupan 3 controladores digitales:

- 1) Controladora (TMS94) programable con descensos y aumentos de temperatura (manuales o automáticos), que puede programarse directamente sobre el aparato o por medio de una computadora conectada a la interfase de control térmico, maneja los cambios en la temperatura por medio de una resistencia de platino acoplada a un termopar que esta colocada dentro del bloque de plata.
- 2) Control de Bombeo de Nitrógeno (THM-LNP94) (Figura IV.44), el cual al encenderse genera un vacío que por efecto Bernoulli extrae en 4 velocidades diferentes el nitrógeno del dewar que lo contiene, manual o automáticamente. El envase térmico es un Dewar LNP94/2 con capacidad para 3 litros de nitrógeno líquido, posee un tubo capilar protegido con un recubrimiento de poliuretano para su aislamiento. El tubo se conecta directamente a la platina.
- 3) Mezcladora de video (TMS94) y una cámara de video montada sobre el microscopio (Figura IV.42), a través de las cuales se pueden observar los análisis térmicos en un monitor y grabar en video simultáneamente la imagen real de la muestra bajo observación mezclada con el termómetro del aparato (Sthepherd, 1981).



Figura IV.44. Controladora de Temperatura (TMS94). Bomba de Nitrógeno y Dewar (THM-LNP94) del CGUNAM

4.7.2. Proceso de enfriamiento

En éste proceso las inclusiones se congelan y se procede a su recuperación hasta la temperatura ambiente mediante el contacto del aire atmosférico con la platina. Generalmente la congelación se produce bruscamente, observándose una pérdida de transparencia en el contenido de la inclusión, la cual adquiere un aspecto escarchado.

4.7.3. Proceso de calentamiento

En ese proceso la *temperatura de homogeneización* es aquella en que dos fases distintas de una inclusión se transforman en una fase única. La temperatura de homogeneización permite determinar fácilmente, si el sistema químico es simple y la densidad del líquido atrapado en la inclusión. Para ello es preciso conocer la naturaleza del fluido, disponer de datos necesarios (valores experimentales o ecuaciones de estado) para la construcción de las gráficas PVT correspondientes y aceptar que la masa y el volumen de la inclusión no varían durante el enfriamiento geológico ni por el calentamiento en el laboratorio cosa que, tal y como se ha podido demostrar experimentalmente, a veces puede ocurrir.

4.8. Los principales Sistemas Térmicos

4.8.1. El sistema H₂O-NaCl.

La mayoría de las inclusiones fluidas de líquido y vapor encontradas en la naturaleza pueden ser modeladas mediante el sistema H₂O-NaCl, sobre todo en sistemas de baja temperatura para medir la salinidad de inclusiones acuosas ya que el decaimiento del punto de congelamiento del agua pura es directamente proporcional a la cantidad de sal en solución.

Dado que es difícil observar en que momento el líquido de la inclusión se solidifica en su totalidad, se utiliza la medida de la temperatura de fusión "T_f" la cual se logra al someter a calentamiento el agua ya congelada y registrar la temperatura a la que funde el último cristal de hielo, las "T_f" se reportan por convención como "equivalentes en porcentaje en peso de NaCl" (Weight% NaCl eq.), a menos que el comportamiento de la fusión o la presencia de fases hijas indiquen la presencia de cationes adicionales (Shepherd, et al. 1985; Belkin H. E. 1994; Bodnar and Vityk, 1994).

La Figura IV.45. muestra las relaciones de fase H₂O-NaCl en la región de baja temperatura, incluyendo la relación entre la salinidad y la temperatura de fusión, a partir de este diagrama se puede calcular la salinidad pero igualmente se puede hacer por medio de la ecuación propuesta por Bodnar (1992) en la cual se relaciona el abatimiento del punto de congelación (freezing point depression) con la salinidad por medio de la ecuación:

$$\text{Salinidad (peso \%)} = 0.00 + 1.78\theta - 0.0442\theta^2 + 0.000557\theta^3$$

Donde: θ es el abatimiento del punto de congelación (FPD) en grados Celsius. (FPD= temperatura de congelación negativa).

Esta ecuación es útil para el rango de composiciones desde el agua pura hasta la composición eutéctica (23.2 wt%NaCl) y un rango de temperatura desde 0.0°C hasta la T_e (-21.2°C). Shepherd, et al. (1985); Belkin H. E. (1994); Bodnar and Vityk, (1994); Bodnar, R. J. (2003).

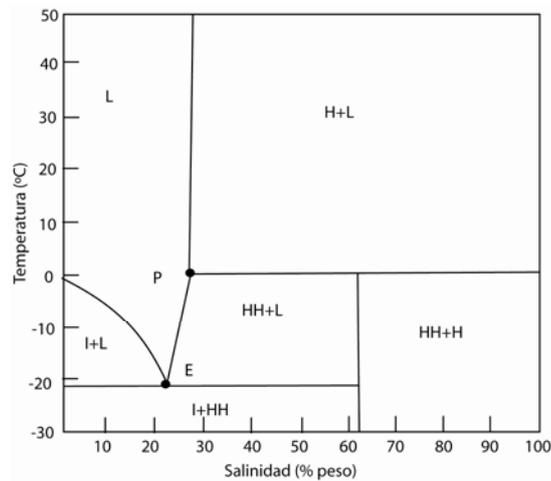


Figura IV.45. Relaciones de fase vapor-saturadas en el sistema NaCl-H₂O a baja temperatura. I= hielo; L=líquido; HH=hidrohalita; H=halita; P=peritético (0.1°C, 26.3wt. % NaCl; E=eutéctico (-21.2°C, 23.2 wt. % NaCl). Tomada de Bodnar and Vityk (1994).

La medición de la temperatura eutéctica T_e (temperatura a la cual aparece el primer líquido después de haber congelado la inclusión en su totalidad y es característica de cada sistema) puede ser útil en la elección del sistema químico apropiado, este fenómeno es muy difícil o casi imposible de observar, sin embargo, realizar el registro de la primera temperatura de fusión “observable” en ocasiones es de gran utilidad.

Para este sistema los valores de la temperatura eutéctica (T_e) es igual a 21.2°C y la del punto peritético (T_p) es de 0.1°C con salinidades entre 23.3 wt% a 26.4 wt% NaCl. Para las inclusiones con salinidades superiores a 26.3 wt%NaCl, se pueden aproximar las salinidades en función de la temperatura de disolución de la halita de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Salinidad (peso \%)} = 26.242 + 0.4928\psi + 1.42\psi^2 - 0.223\psi^3 + 0.04129\psi^4 + 6.295 \times 10^{-3}\psi^5 - 1.967 \times 10^{-3}\psi^6 + 1.1112 \times 10^{-4}\psi^7$$

Donde: $\psi = T (^{\circ}\text{C})/100$

La aplicación de esta ecuación tiene algunas restricciones que dependen de la presión al momento de la disolución de la halita y de la salinidad. Bodnar, R. J. (2003).

4.9. Datos micro-termométricos (Inclusiones Fluidas)

En el presente trabajo de investigación se realizaron análisis sistemáticos de inclusiones fluidas (IF) en los distintos yacimientos de mercurio ubicados en las zonas de: La Trinidad, Laguna de Gerardo y Oriente del área de estudio de Guadalcázar, así como también a los minerales asociados con esta mineralización (cinabrio, calcita y fluorita).

El equipo que se utilizó para las mediciones de inclusiones fluidas fue una platina micro-termométrica Linkam THMSG-600, acoplada a un microscopio Olympus BX51 con duplicador de aumentos, fuente de luz fría de 150W y sistema de video.

Dichos análisis fueron realizados sobre cada especie mineral de manera independiente, para de esta forma determinar las temperaturas de homogenización (T_h), temperatura de fusión del hielo (T_f) y la temperatura eutéctica (T_e) con el fin de obtener la composición del sistema, el cual se mencionara mas adelante

El número total de inclusiones fluidas medidas en el presente trabajo fue de 248, de las cuales 5 fueron en cuarzo, 6 en cinabrio-calcita, 220 en fluorita y 17 en calcita (Tabla 3). La morfología que se observó en estas, es de formas alargadas a semiredondeadas e irregulares; en algunas inclusiones se presentan fases de crecimiento de cristales cúbicos, el tamaño de las inclusiones fue alrededor de 5 micras.

Localidad	Muestra	Mineral	Rango Th °C	Promedio Th °C	Rango Tf °C	Promedio Tf °C	Salinidad (% W de NaCl equiv.)	n IF	Tipo de I. F. Observaciones	Te
Laguna de Gerardo	VM-03T	Mercurio-Calcita	53-57	55	-8	-8	11.7	6	L (v) tiende Líquido	-21.3 NaCl
Laguna de Gerardo	VM-05T	Calcita	80-110	104	-0.5 a -1	-11	14.97	10	L (v) tiende Líquido	
Laguna de Gerardo	VM-14	Calcita	103-106	105	-0.2	-0.2	0.35	7	L (v) tiende Líquido	
Laguna de Gerardo	VM-02M	Cuarzo	130-151	140	-6.9 a 7.1	-7	10.49	5	L (v) tiende Líquido	
La Trinidad	VM-07T	Fluorita_7	170-250	198	-11.6 a -10	-11	14.97	35	L (v) tiende Líquido	
La Trinidad	VM-08Ta	Fluorita_8	230-250	245	-10.5	-10.5	14.46	51	L (v) tiende Líquido	
La Trinidad	VM-09Ta	Fluorita_9	130-141	134	-7	-7	10.49	48	L (v) tiende Líquido	
La Trinidad	VM-11T	Fluorita_11	159-177	165	-8 a -9	-8	11.7	50	L (v) tiende Líquido	
La Trinidad	VM-12T	Fluorita_12	340-320	348	-14	-14	17.79	36	L (v) tiende Líquido	

Tabla 3. Resumen de resultados microtermométricos del análisis de inclusiones fluidas; Th = temperatura de homogeneización, Tf = temperatura de fusión, n = número de inclusiones analizadas, L = líquido, V = vapor, I.F. = inclusión fluida.

La temperatura eutéctica (Te) en los estudios realizados fue de -21.3 °C, la cual nos determina la estimación de la composición de las sales disueltas en el fluido acuoso, el cual es difícil de observar, ya que depende del tamaño de la inclusión y de su transparencia. Por lo tanto, el dato obtenido a lo anterior se puede inferir que la fase líquida está constituida por un sistema de dos componentes H₂O + NaCl.

La temperatura del sistema está determinada por el grado de relleno y la temperatura de homogeneización, en todos los casos de las muestras del estudio que se analizaron se produjo en una fase líquida, en un límite de 104° a 348 °C (Figura IV.46.A); generalmente el rango frecuente en Th es entre 241-280 °C (Figura IV.46.B); y en cuanto a la temperatura de fusión (Tf), oscilan en -0.2° a 14 °C (Figura IV.47.A); mientras que la salinidad equivalente que se obtuvo en todas las inclusiones fue entre 0.35% hasta 18% de NaCl, siendo el rango más abundante en 11 y 14% de NaCl (Figura IV.47.B).

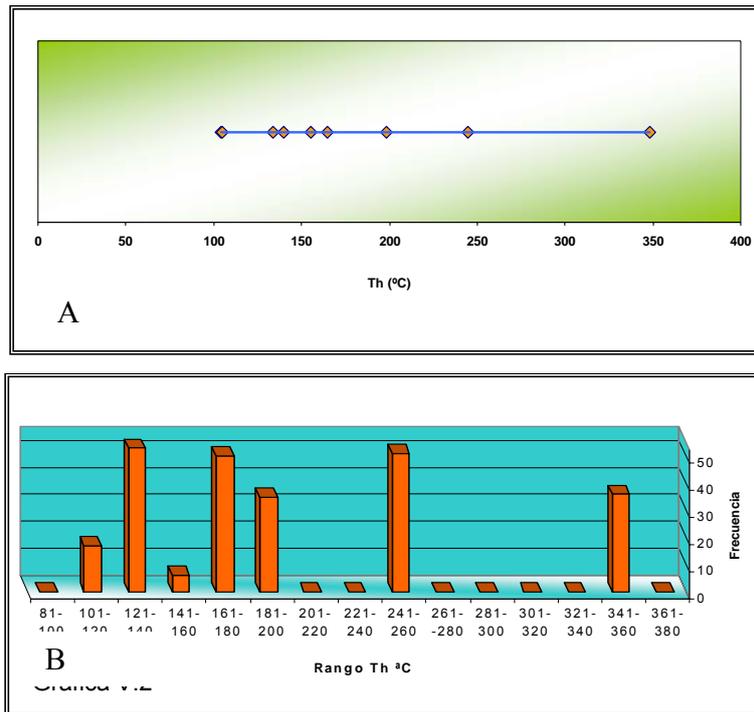


Figura IV.46. Temperaturas de homogeneización general. A. Histograma de temperatura de homogenización (Th) de las inclusiones fluidas. B. Rango de Th de las muestras en el área de estudio en Guadalcázar.

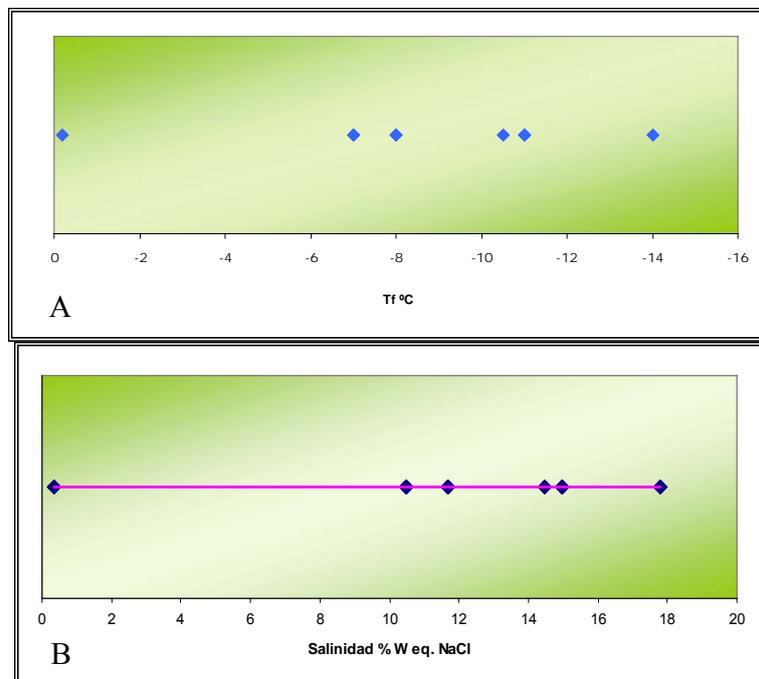


Figura IV.47. Histogramas utilizando promedios de las muestras en general. A. En temperatura de fusión. B Salinidad de las inclusiones analizadas.

Sobre los análisis de inclusiones fluidas del intrusivo granítico realizados por Chryssoulis y Wilkinson, (1983), se obtuvieron mediciones de las temperaturas de homogenización de 130° hasta 430° C; en cuanto a sus salinidades fue 2 al 50% en W equivalente NaCl. Morfológicamente las inclusiones fluidas en el cuarzo granítico caen en seis tipos: (A) rico en gas, (B) líquido, (C) rico en líquido con uno o dos minerales isotrópicos hijo, (D) rico en líquido con tres o más minerales hijos el cual uno es anisotrópico, (E) inclusión multifase con minerales hijos (Figura IV.48. y Láminas 4, A-D).

La distribución espacial de los tipos de inclusiones reconocidos, sugirió que estos pertenecen a cuatro generaciones distintas de inclusiones: (1) inclusiones ricas en gas distribuidas en fracturas secundarias, (2) inclusiones ricas en líquido distribuidas en fracturas secundarias, (3) inclusión rica en líquido con uno o dos minerales isotrópico hijos, formando zonas extensas al interior de la estructura del cristal, e (4) inclusiones multifasicas (presentándose más de 4 fases) unidas con inclusiones ricas en gas, en su mayor parte teniendo formas negativas los cristales de cuarzo y distribuidos a lo largo de la zona (no

necesariamente una zona de crecimiento). Es muy difícil de definir la edad relativa en las inclusiones fluidas de la generación del cuarzo primario del granito. Se puede sugerir, en base a la salinidad y temperatura de homogenización, que la tercera y cuarta generación son anteriores a los de segunda y primera generación (Chryssoulis y Wilkinson, 1983)

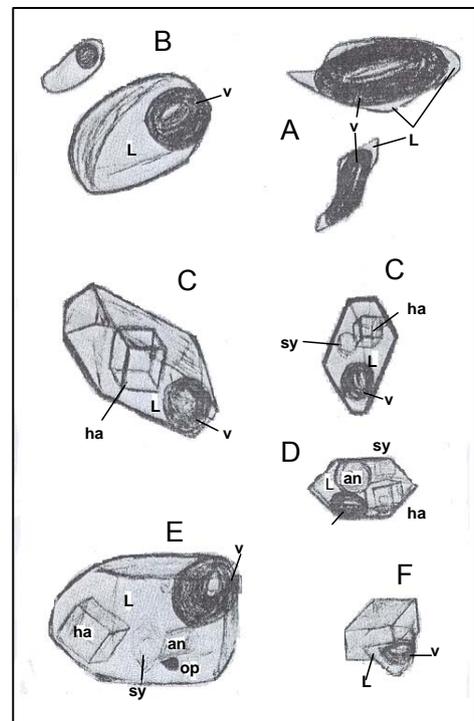
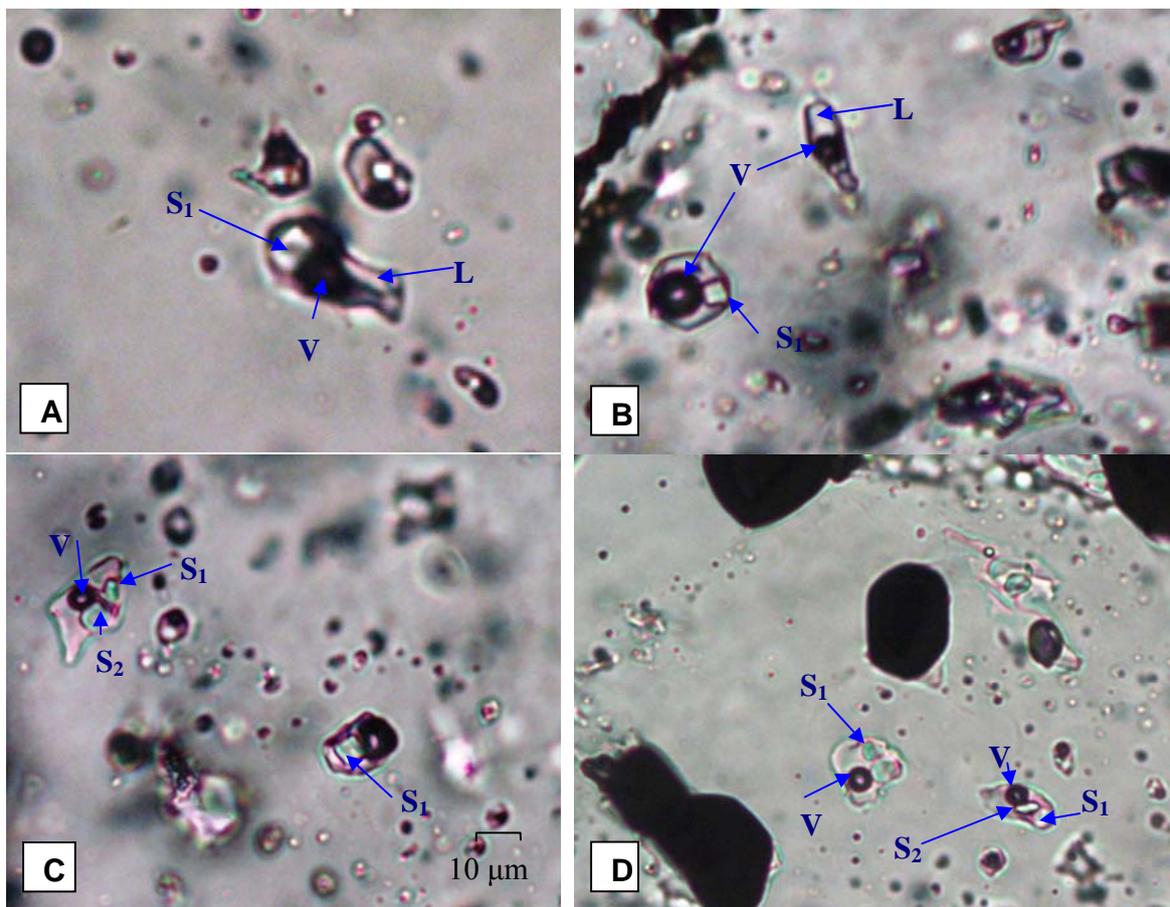
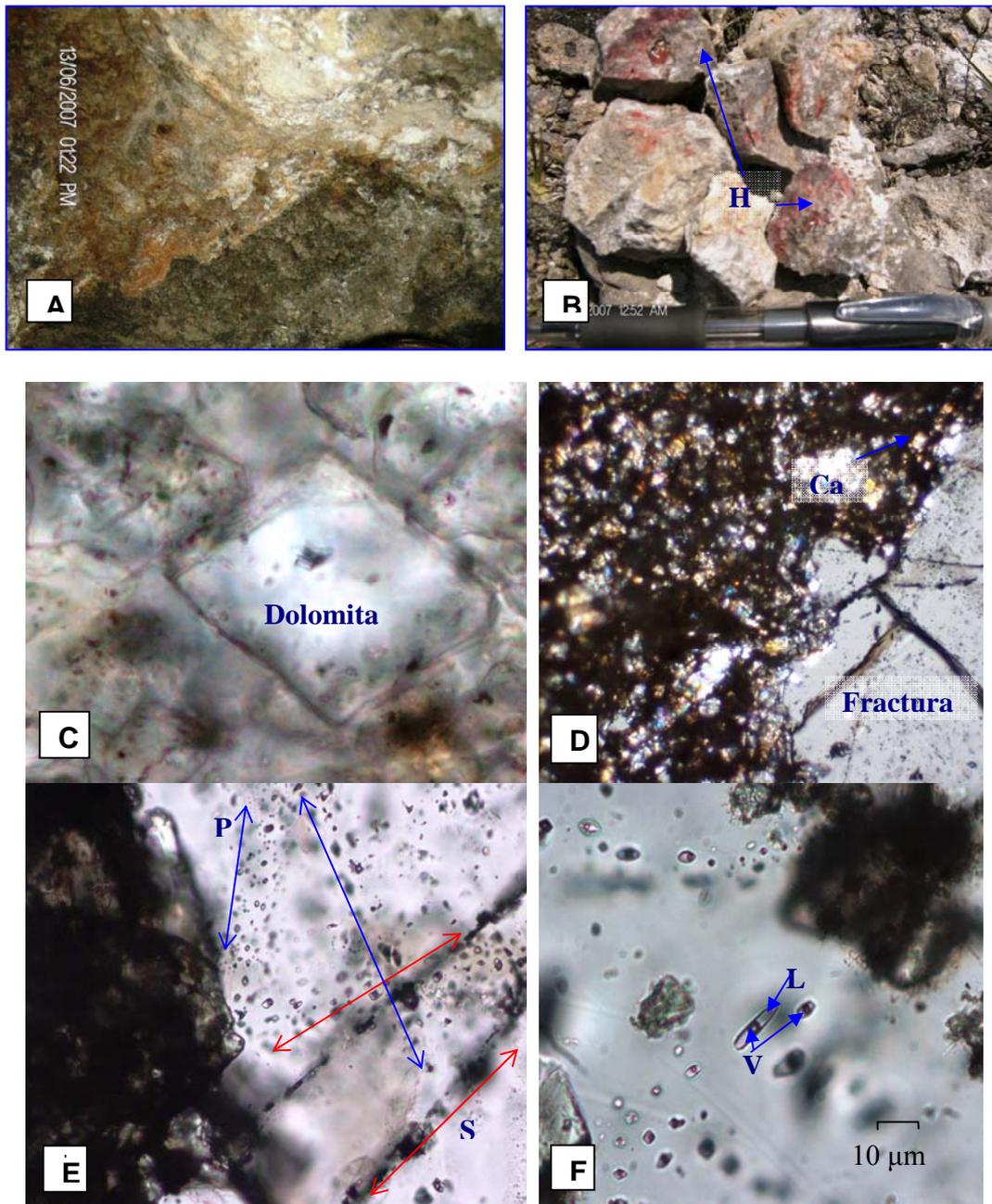


Figura IV.48. Tipos de inclusiones fluidas en el granito Guadalcazar: A, rico en gas; B, rico en líquido; C, rico en líquido con mineral hijo hálita; tal vez silvita; D, rico en líquido con tres minerales hijos: hálita (ha), silvita (sy), y un mineral anisotrópico hijo (an); E, tipo (D) inclusiones fluidas con un mineral hijo opaco (op); F, inclusión sólida acompañada con una inclusión fluida rica en gas (L = líquido; v = vapor). Chryssoulis-Stephen.



Lamina 4. Inclusiones del granito. A-D. Aspecto de las inclusiones fluidas en cristales de cuarzo primario, del granito, estas presentan fases trifásicas. S₁: solidó de NaCl, S₂: solidó KCl, V: vapor, L: liquido; muestras colectadas del intrusivo Guadalcázar (Chryssoulis y Wilkinson, 1983).

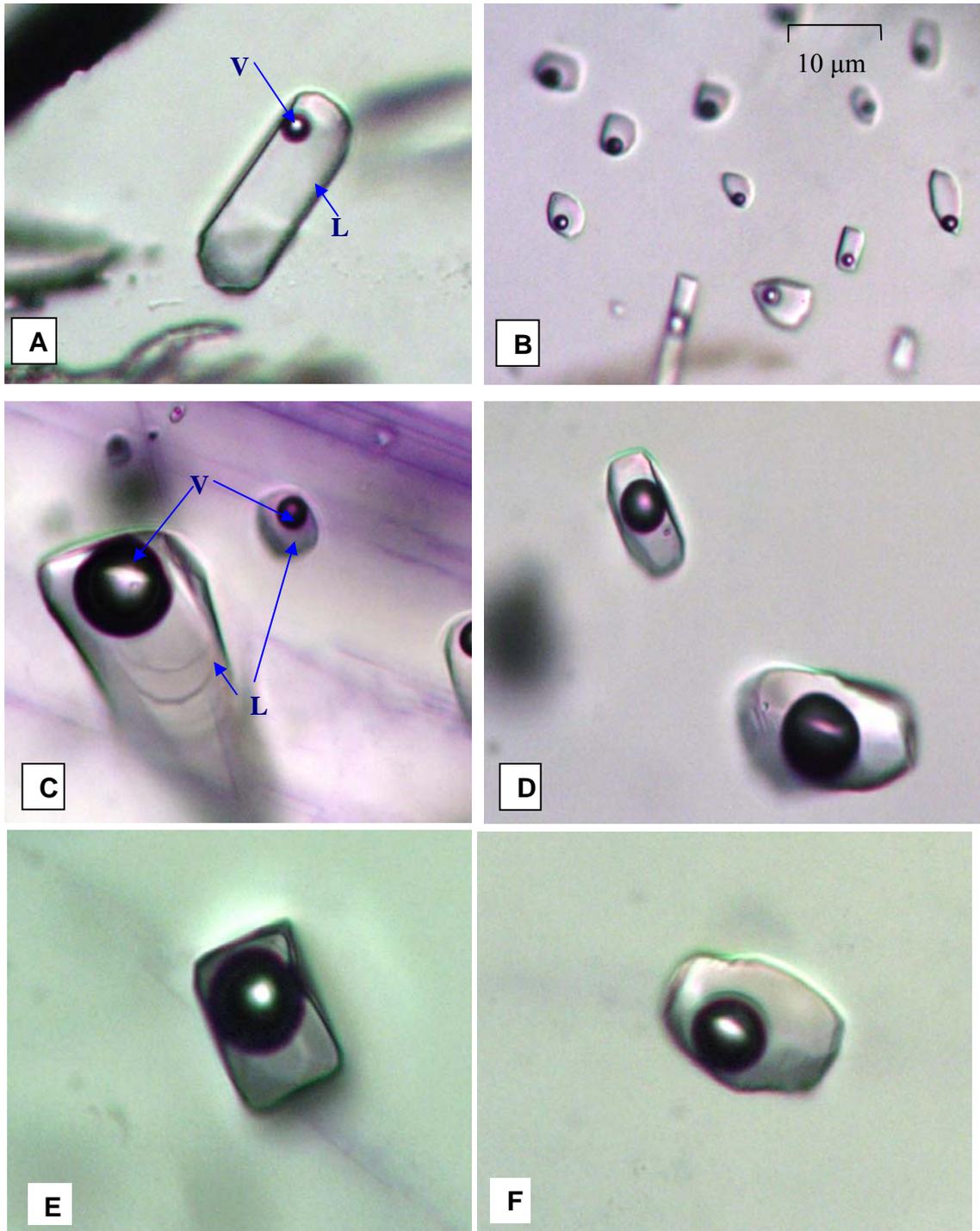
Las determinaciones microtermométricas realizada a cristales de calcita relacionada con los yacimientos de mercurio, presentaron temperaturas de homogenización promedio que oscilan de 105° a 155° C, mientras que la T_f que se observaron van desde los -0.2° hasta los -11° C; con salinidades equivalentes como mínimo 0.35% y máximo 14.97% de NaCl. En las inclusiones analizadas estas láminas muestran contenido calcita y sulfuro de mercurio; se observaron cristales de dolomita que preserva su forma isométrica; en cuanto a la calcita ocupa diferentes proporciones de la lámina en parte dispersa (Laminas 5C) en fracturas y exhibe algo de disolución en los cristales. Se tienen inclusiones tanto primarias como secundarias (Lamina 5E), las primarias que contienen al fluido que dio origen al cristal; son redondas a semiredondeadas. Las inclusiones secundarias, se observan dentro de las fracturas con formas alargadas e irregulares (Laminas 5F). El tamaño de ambos tipos de inclusiones es alrededor de 5 μ ; la mayoría se presentan de manera bifásica, constituidas por un líquido incoloro transparente y por una burbuja de vapor de agua de color gris oscuro brillante; así mismo, presentan una relación líquido/vapor muy constante, de aproximadamente 70/30%, sin desarrollo alguno de solidó.



Lamina 5. Inclusiones fluidas en cinabrio-calcita. A. Aspecto de la roca en interior de mina, mostrándose mineralización diseminada de mercurio, en caliza de brecha calcárea. 27. B. Esquirlas con cinabrio, tomadas de la mina. C. Dolomita isométrica. D. Lamina mostrando el cristal fracturado, en matriz cálcica. E. Vista de inclusiones primarias (P) y fractura rellena de inclusiones secundarias (S). F. Inclusiones fluidas de calcita relacionada con cinabrio, en fase bimodal Líquido + Vapor (L + V).

En el análisis de inclusiones fluidas en cuarzo relacionado como ganga de los yacimientos de mercurio solo se obtuvo una muestra (VM-02M), dando las Th cerca de 140 °c y la Tf de -7 °c, con salinidad de 10.49% equivalente en peso de NaCl. Hay inclusiones primarias (L+V) con liquido dominante. En cuanto a su morfología, las inclusiones son alargadas, y presentan un tamaño de 5 a 10 μ .

Las inclusiones fluidas dentro de la flúorita relacionadas con los yacimientos de mercurio mostraron por lo general que son primarias, muy abundantes y de tamaño entre +- 10 μ , alargadas a semiredondas con puntas ovaladas, bifásicas, compuestas por un liquido incoloro transparente y por una burbuja de vapor de agua de color gris oscuro, con una proporción liquido-vapor (L / V) 90/10% (Lamina 6); Las temperaturas de homogenización (Th) obtenidas oscilan dentro de un rango de 165-245° C, las temperaturas de fusión (Tf) varían en rangos de -10° a -18°C, con una salinidad de 13.94 a 21.04 % de NaCl. Cabe mencionar que la muestra VM-12T presento una Th mayor a 348°C ya que fue tomada cerca de un dique de la mina Las Palmas, la temperatura de fusión para esta fue -14° C y su salinidad de 17 % de NaCl.



Lamina 6. Inclusiones en la fluorita del área de estudio. A-F. Inclusiones fluidas bifásica (vapor / líquido).

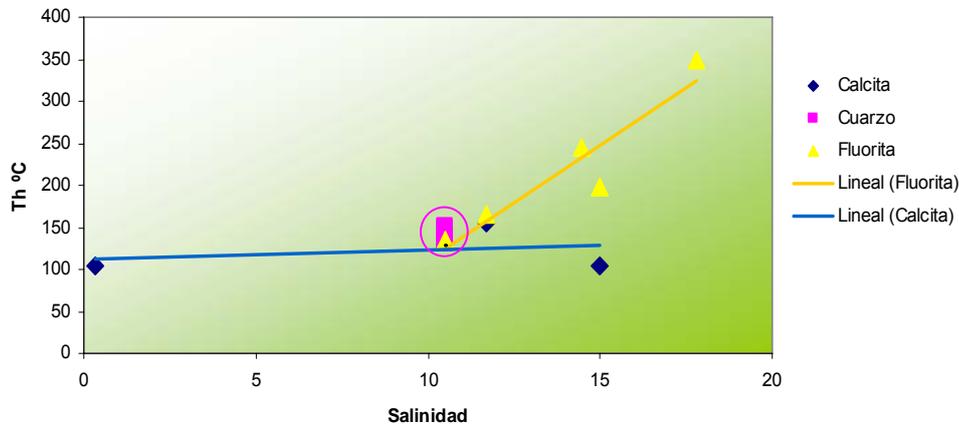


Figura IV.49. Diagrama de salinidad vs Temperatura de homogenización, representando el comportamiento para cada una de las poblaciones de minerales en yacimientos de mercurio.

Para las muestras de mercurio (ver Figura IV.49.) y al graficar a un grupo mineral sobre un diagrama de Salinidad vs temperatura de homogenización, se observa lo siguiente: para las inclusiones en la calcita con 0.35 a 11.7% de salinidad y temperaturas de 104° C como mínima a 155° C como máxima, se infiere que las inclusiones fluidas sufrieron un estretching (Lineal Calcita) ocurriendo un proceso de mezcla isotérmica durante la aparición y evolución de los fluidos; en cuanto, al cuarzo éste representa la población original de las IF con temperatura de 132° C a 150° C para la homogenización y salinidad equivalente a 10.49 % de NaCl; y por ultimo, inclusiones con la fluorita temperaturas desde 134° hasta 348 °C, con salinidades de 11.7% y 17.79%.

Los resultados de las mediciones del Th y salinidad para toda la población de inclusiones del granito Guadalcázar medidos por Chryssoulis y Wilkinson, (1983) y los resultados de este estudio se presentan en la (Figura IV.50), en ella se observa una evolución de enfriamiento relacionado a una clara dilución de la salmuera ya que los fluidos mas calientes (600° C) presentan saturación en sales y los mas diluidos muestran una salmuera característica de aguas meteóricas. (Shepherd, 1981).

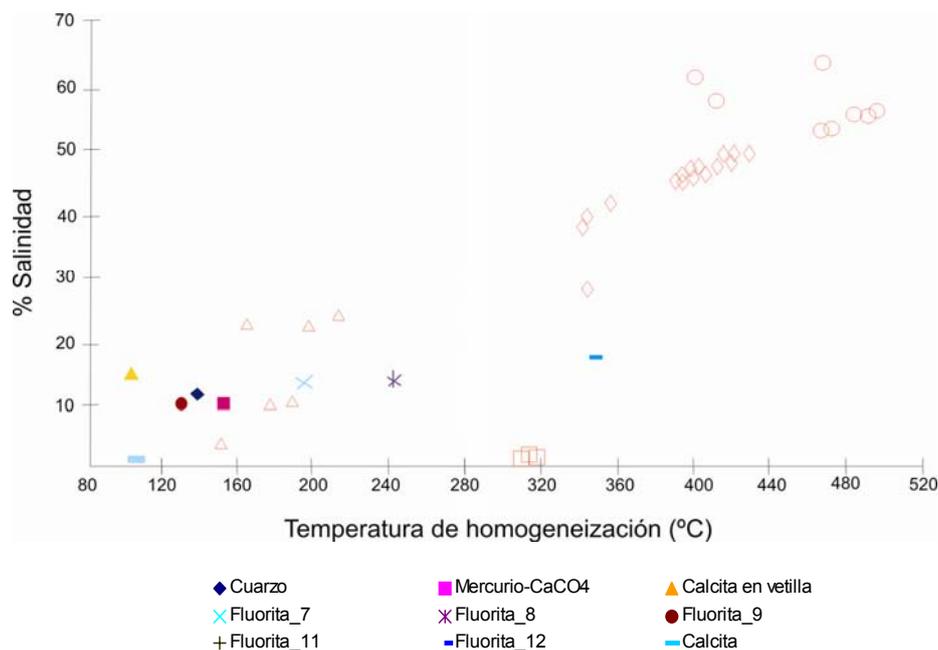


Figura IV.50. Aspecto del comportamiento de las inclusiones fluidas del intrusivo publicadas (Chryssoulis y Wilkinson, 1983) y los promedios de inclusiones de las minas de mercurio de este estudio, alrededor del granito.

Los resultados promedios de las mediciones de temperatura de homogeneización (Th) vs salinidad, en los minerales de flúorita, calcita y cuarzo se presentan en la figura IV.51, con el fin de comparar su comportamiento con respecto a otros tipos de yacimientos, situándose esos minerales de fluorita, calcita y cuarzo en el campo de depósitos épitermales.

Esta grafica es limitada a lo largo de la curva de saturación de la hálita y por la curva critica para soluciones puras de NaCl, dicha grafica refleja las propiedades básicas de los fluidos involucrados en su formación. Por instancia los depósitos épitermales primarios son modificados por fluidos superficiales que han circulado dentro del régimen frágil de la corteza, normalmente involucrado a baja presión sirvan como una aproximación de la temperatura de atrapamiento (Wilkinson, 2001). Sin embargo, cabe hacer mención que los limites de los campos en la figura IV.51 no son limites formales, por lo que la información presente en la grafica, deberá ser utilizada como guía.

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En el área de Guadalcázar, S.L.P. se identifica un intrusivo granítico Terciario, el cual se encuentra atravesando a las rocas sedimentarias del Cretácico, de las Formaciones Guaxcamá (yeso) y El Abra (caliza) así como la Formación El Realejo del Terciario inferior, constituida por una brecha calcárea.

Dentro de los diferentes tipos de mineralización (Au-Ag-Pb-Zn-Hg) relacionadas con el intrusivo, en este trabajo se estudiaron diferentes minas (dístales) de mercurio de la fase final del proceso mineralizante. El trabajo consistió principalmente en el análisis de 248 inclusiones fluidas para obtener las temperaturas de fusión (Tf), y de homogenización (Th) al igual que el porcentaje en peso equivalente de NaCl (Salinidad) y se determinó que:

1. Las minas de mercurio que se sitúan alrededor del intrusivo tanto en la zona de Laguna de Gerardo (constituida por minerales de cinabrio y ganga, calcita y cuarzo), como en la zona de La Trinidad (mineral de fluorita) tienen temperaturas de homogenización en un rango que va de $Th = 104^{\circ}$ hasta 348° C y temperaturas de fusión entre $Tf = -0.2^{\circ}$ a -14° C; los resultados de altas temperaturas de homogenización son el producto de inclusiones fluidas que sufrieron un aumento de volumen ó stretching.
2. La medición de la Temperatura eutéctica, es decir, la temperatura a la cual aparece el primer líquido después de haber congelado a la inclusión, se alcanzó a visualizar a los -21.3° C, lo que corresponde al sistema térmico de H₂O-NaCl.
3. De acuerdo con las Tf, la salinidad presenta un rango de 0.35% a 18% de NaCl, donde los fluidos de menores temperaturas corresponden a salinidades más bajas lo cual se interpreta como un fenómeno de dilución. Esta información concuerda con datos publicados anteriormente en la literatura para este distrito minero.

4. En el distrito minero de Guadalcázar se observa zoneamiento en la distribución de las menas que corresponden a una evolución fisco-química de las salmueras, a saber: las vetas Auro-argentíferas (dentro del intrusivo) presentan condiciones de muy alta presión, temperatura y fluidos hipersalados, las menas de Plomo-Zinc presentan valores intermedios y la mineralización mas distal de Hg-Au muestra las temperaturas y salinidades mas bajas del distrito como se aprecia en la sección de la figura IV.52.

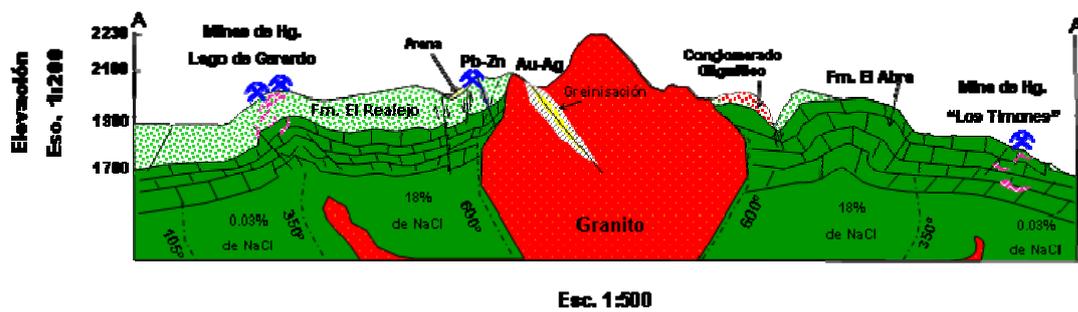


Figura IV.52. Sección A-A' con dirección al N-E, presentándose valores intermedios de temperaturas y salinidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, L. L., (1981)**, El estudio geológico minero del área El Realejo y parte norte de la hoja de Guadalcázar en el estado de San Luis Potosí., Trabajo Recepcional: UASLP, pp. 1-49.
- Basañez, L. M.A., Fernández-Turner, R., Rosales-Domínguez, C., 1993**, Cretaceous Platform of Valles-San Luis Potosi, northeastern central Mexico: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 56, 51-59.
- Belkin, H. E., 1994**, Microthermometric investigations: Th and Tm. Practical and Theoretical aspects. In Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals" Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena pp. 7-23.
- Bischoff, J.L., Pitzer K.S., 1989**, Liquid-vapor relations for the system NaCl-H₂O: Summary of the P-T-x, surface from 300°C a 500°C. American Journal of Science, p. 217-248.
- Bodnar, R. J., 2003a**, Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, short Course Series Vol. 32, 1-8.
- Bodnar, R. J. 2003b**, Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation, Mineralogical Association of Canada, short Course Series Vol. 32, 81-100.
- Bodnar, R. J. 2003c**, Reequilibration of fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & . Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, short Course Series Vol. 32, 213-231.
- Bodnar, R.J., 1992**, Revised equation and table for freezing-point depression of H₂O-salt fluid inclusions: Fourth Biennial Pan- American Conference on Research on Fluid Inclusions, PACROFI IV, Lake Arrowhead, CA, May 21-25, Program and Abstracts, 14, 15.
- Bodnar, R. J. y Vityk M. O. (1994)**, Interpretation of microthermometric data for H₂O-Na-Cl fluid inclusions. In Fluid inclusions in minerals: methods and Applications, Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals"

- Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena pp. 117-130.
- Campa, M. F., Coney, P. J., 1983.** Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, p. 1040-1051.
- Carrasco, B., 1970,** La Formación El Abra (Formación El Doctor) en la Plataforma Valles-San Luis Potosí: Revista del Instituto mexicano del Petróleo, 2(3), p.97-99
- Carbonell, C. M. y Pesquera V. R., 1968,** Bosquejo de los Yacimientos de Mercurio en Guadalcázar, S.L.P., Consejo de Recursos Naturales No Renovables actualmente SGM; archivo técnico, pp. 2-8.
- Carrillo, B. J., 1971,** La Plataforma Valles San Luis Potosí, Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, V. 13.
- Chryssoulus, S. y Wilkinson, N., 1983.,** Hight Silver of Fluid Inclusions in Quartz from Guadalcázar, San Luis Potosí, México: A Contribution to Ore-Genesis Theory; Economic Geology, Vol.78, pp.302-318.
- Diamond, L. W., 2003,** Systematics of H₂O inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation, Mineralogical Association of Canada, short Course Series Vol. 32, 55-81.
- Ermakov, N. P., 1950,** Research the nature of mineral-forming solutions (en ruso) Kharkov... Press., pp 460. Traducido al ingles Yermakov y otros, 1965. V. 22 of In. Ser. Of Monog. In Herat Sciences. Perg. Press, New York.
- Fries, Jr. C. y Schmitter E., 1948,** Los Placeres de Estaño de la región de Guadalcázar S.L.P., Comité directivo para la Investigación de Rec. Minerales de Mex., Geological Survey, USA.
- García, de M. E., 1988,** Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana), 4ta ed., Mexico.p.170.
- Goldstein, R. H. y Reynolds T. J., (1994),** Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short course 31, Tulsa, 199 pp.

-
- González, P. J., 1983**, Estudio Geológico-Económico del Área de Guadalcázar, San Luís Potosí: Trabajo Recepcional, Univ. Aut. De SLP, FAC. Ingeniería, pp.1-43.
- Hedenquist, J.W., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N.C., Giggenbach, W.F., Aoki, M., 1994**, Geology, geochemistry, and origin of highsulfidation Cu–Au mineralization in the Nansatsu District, Japan: *Economic Geology*, 89, 1-30.
- Heim, A., 1940**, The front ranges of Sierra Madre Oriental, Mexico, from Ciudad Victoria to Tamazunchale: *Eclogae Geologicae Helveticae*, 33(2), 313-352.
- INEGI, 1999**, (Hoja) Guadalcázar (F14-A65), Cartografía Topográfica escala 1:50,000, San Luís Potosí.
- INEGI, 2002.**, Estudio Hidrológico del Estado de San Luís Potosí., Publicación única. Primera edición., pp.136.
- INEGI (2007)**, http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/regiones_hidrologicasdams consulta octubre
- Kellum, L.B., 1930**, Similarity of surface Geology in front range of Sierra Madre Oriental to subsurface in Mexican south fields, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geology*, 14, 73p.
- Köppen W., 1936**, Clasificación climática de México (mapa).
- Köppen W., 1931**, Climatología, fondo de cultura económica, pp. 320
- Mangas J. & Sierra J., 1991**, Las inclusiones fluidas: Método de análisis e interpretación, in García Guinea and Martínez Frías (Eds): *Recursos Minerales en España*. CSIC. Textos Univer 12, 947-967.
- Muir, J. M., 1936**, *Geology of the Tampico Region*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., Tulsa.
- Mújica M. R. y Albarrán J., 1983**, Estudio Petrogenético de las rocas ígneas y Metamórficas del Altiplano Mexicano; Reporte interno (Inédito), Instituto Mexicano del Petróleo.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A, Nieto-Samaniego, Á. F., 1992**, Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana escala 1:2'000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y SEMIP Consejo de Recursos Minerales.

-
- PEMEX, 1988**, Estratigrafía de la República Mexicana, Mesozoico: México, D.F., Subdirección de Producción Primaria, Coordinación ejecutiva de Exploración, Informe inédito, 216 p.
- PEMEX, 1988b**, Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico, Subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración, p.229
- Picot, P. y et Z. Johan 1982**, Atlas des Mineraux Metalliques, Ed. du B. R. G. M.,Limoges; pp 311
- Pironon Jacques and Pradier Bernard, 1992**, Ultraviolet-fluorescence alteration of hydrocarbon fluid inclusions. Org. Geochem. Vol. 18, N°4, pp. 501-509.
- Rodríguez. G. E., 2006**, La Minería de Mercurio en México; Sociedad Mexicana de Mineralogía A.C., Boletín de Mineralogía ISSN 0186-470X; pp. 29-36.
- Rodríguez. H. E., 2004**, Actualización Estratigráfica de la porción Centro-Septentrional del estado de San Luís Potosí: Trabajo Recepcional, UASLP, FAC. de Ingeniería, pp. 1-86.
- Roedder E. 1962a**, Ancien fluids in crystals». Sc. Am., 207: 38-47
- Roedder E. 1976**, Fluid inclusion evidence on the genesis of ores in sedimentary...volcanic rocks, En K. H. Wolf (edit.), Handbook of strata-bound and stratf ore deposits, 2: 69-110
- Roedder E., 1981**, Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping. In: Hollister & Crawford (eds.) Miner, Assoc. Canada, Short Course in fluid inclusions, v. 6, pp. 101-137.
- Roedder E., 1984**, Fluid inclusions, Reviews in Mineralogy, 12, Miner. Soc. Amer. Pp.
- Roedder E., 1990.**, Fluid inclusion analysis-prologue and epilogue; Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, p. 495-508. Servicio Geológico Mexicano, 2000., Cartas Geológico-Minera y Geofísica de Guadalcázar F14-A65 escala 1:50,000, San Luís Potosí., Primera edición.
- Salas G. P., 1980**, Carta y provincias metalogenéticas de la República Mexicana; Consejo de Recursos Minerales, México, Boletín 21-15, 2ª edición, 200, p., 3 planos.
- Sheppherd T. J., 1985**, A practical guide to fluid inclusion studies. Ed. Blackie, pp. 23.

-
- Smith, B.A., 1986**, Upper Cretaceous stratigraphy and the mid-Cenomanian unconformity of east-central Mexico: University of Texas at Austin, Ph. D. dissertation, 190 p.
- Solana L. J., 2005**, Carta Yacimientos Minerales Municipio de Guadalcázar, S.L.P escala 1:100,000.
- Sorby H. C., 1858**, On the microscopio structure of cristal, indicating the origin of minerals and rocks; Geological Society of London Journal, 14, pp. 453-500.
- Suter, M., 1990**, Geología de la hoja de Tamazunchale, Estado de Hidalgo, Querétaro y San Luís Potosí, Escala 1: 100,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, (22), p. 55.
- Sillitoe, R.H., 1995**, The influence of magmatic–hydrothermal models on exploration strategies for volcano-plutonic arcs, in Thompson, J.F.H. (ed.), Magmas, Fluids and Ore Deposits: Ontario, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, pp. 511-525.
- Tapia, U., 2003**, Estudio sedimentológico facial y petrográfico de la porción central de la zona de transición entre la Plataforma Valles-San Luís Potosí y la Cuenca Mesozoica del Centro de México.
- Torres, H. J. 1994**, Evolución Estructural de la Sierra de Guadalcázar San Luís Potosí: Tesis, Univ. Aut. De México, Facultad de Ingeniería, Div. Est. De Postgrado, pp. 1-73.
- Torres-Hernández R. y Tristán-Hernández M., 1999**, Informe de la Carta Geológica-Minera y Geoquímica, Carta Guadalcázar F14-A65 escala 1:50, 000; Consejo de Recursos Minerales, Instituto de Geología UASLP.
- Touret, J. L. R. (1994)**, Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic environments. In Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Short course of the working group (IMA) “inclusions in minerals” Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena pp. 251-269.
- Van den Kerkhof, A. M., y Hein, U. F., 2001**, Fluid inclusions petrography. Lithos 55, pp. 27-47, Elsevier ed.

-
- Velasco, A. A., 1970**, Estudio Geológico del Área Huizache-Vallejo Municipios de Villa Hidalgo, Villa de Guadalupe y Guadalcázar San Luís Potosí: Tesis Profesional, Univ. Aut. De SLP, FAC. Ingeniería, pp. 1-48.
- Wilkinson, J. J., 2001**, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits: Lithos, v. 55, pp. 229-272.
- Zapata, Z. J y Pérez V. J., 1979**, Cartografía-Geología Hoja Peotillos, S.L.P., UASLP, Instituto de Geología y Metalurgia., Folleto técnico No. 63, pp. 30
- Zermeño, C. M., 1988**, Geología y Metalogénesis del Municipio de Guadalcázar, S.L.P. y su Relación con el Alineamiento Francisco Murguía, Zac.-Villa Juárez, S.L.P.; Trabajo Recepcional, Univ. Aut. De SLP, FAC. Ingeniería, pp. 73.

Referencia de Internet

<http://www.linkam.co.uk>

<http://www.coremisgm.gob.mx/>

<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/Dep%F3sitios%20Epitermales.pdf>

<http://www.gabrielbernat.es/colonia/mineria/html/obtencion.html#fundicion>