



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis geoquímico y
gemológico de los ópalos de la
concesión minera La
Guadalupana, Tequisquiapan,
Querétaro**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Elder Castañeda Álvarez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Victoria Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

Agradecimientos.

A mi familia por su amor, paciencia y todos los momentos de alegría compartidos.

Agradezco a mi asesor, el Ing. Alfredo Victoria, por haberme dado la posibilidad de desarrollar mi trabajo dentro del proyecto, Asesoría a pequeños mineros productores de ópalo en el estado de Querétaro, y sobre todo por su confianza y amistad.

A los Ingenieros, Juan Carlos Cruz Ocampo y José Luis Arcos, por sus enseñanzas, observaciones y comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo. La adquisición e interpretación de datos no hubiera sido posible sin el constante apoyo de la Quím. Patricia Girón y a la Fis. Leticia A. Alva.

Al laboratorio de Caracterización espectroscópica (LUCE) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo tecnológico (CCADET) de la UNAM.

Agradezco a Héctor Montes y Lucio Nieto, por facilitarnos el acceso a las minas de ópalo y por hacer nuestra estancia en las minas una experiencia agradable. A Emmanuel, Francisco y Antonio, les doy las gracias por acompañarme durante el trabajo de campo.

Hago extenso mi agradecimiento a, Orestes, Alam, Yoalli, Miguel, César y Magdaleno, por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de este trabajo, a ustedes mi sincero agradecimiento.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería ¡Gracias!

Tabla de contenido

<i>Relación de figuras</i>	I
<i>Relación de tablas</i>	IV
<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII

Capítulo 1. Introducción

1.1. Importancia del ópalo.....	1
1.2. La minería del ópalo en México.....	1
1.3. Planteamiento del problema.....	4
1.4. Objetivos generales.....	5
1.4.1. Objetivo secundario.....	5
1.5. Localización y acceso.	6

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Geología Regional.....	6
2.2. El grupo de la sílice.....	8
2.2.1 Vidrios naturales.....	8
2.2.2. Definiciones de ópalo.....	8
2.3. Clasificación mediante Difracción de rayos X.....	9
2.4. Clasificación mediante Espectroscopia Raman.....	10
2.5. Clasificación genética.....	11
2.6. Clasificación gemológica.....	11
2.6.1. La belleza.....	11
2.6.1.1. Juego de colores.....	12
2.6.1.2. El color del ópalo y su transparencia.....	13
2.6.2. Rareza.....	15
2.6.3. Durabilidad.....	15
2.6.4. Talla o corte en ópalos.....	15
2.6.4.1. Dobletes.....	18
2.6.4.2 Tripletas.....	18
2.6.4.3 Ópalos en resina.....	19
2.6.5 Peso (carat).....	19

Capítulo 3. Campo y Geoquímica

3.1. Metodología.....	19
3.2. Relaciones de Campo.....	20
3.3. Petrografía.....	24
3.4. Geoquímica de las Riolitas La Trinidad.....	30
3.4.1. Mineralogía de alteración.....	31
3.5. Geoquímica de los ópalos.....	35
3.5.1. Elementos mayores y menores.....	35
3.5.2. Elementos traza.....	38
3.6. Difracción de rayos X en ópalos.....	41

Capítulo 4. Propiedades gemológicas de identificación.

4.1. Propiedades gemológicas de identificación.....	44
4.2. Juego de colores (fenómeno óptico).....	44
4.3. Inclusiones.....	45
4.4. Peso específico.....	48
4.5. Índice de Refracción.....	48
4.5.1. Reflexión y refracción.....	48
4.5.2. Angulo crítico y reflexión total.....	49
4.6. Espectroscopía Raman.....	51
4.6.1. Ópalos C-T.....	53
4.6.2. Ópalos C.....	54
4.6.3. Señales Raman pertenecientes a inclusiones.	55

Capítulo 5. Discusión de resultados y conclusiones.

5.1. Discusión de resultados.....	58
5.2. Conclusiones.....	60

Bibliografía.....	62
-------------------	----

Relación de figuras.

- Figura 1.** Ubicación de las concesiones opalíferas del Distrito Minero de Tequisquiapan, mapa integrado con base en, Sistema de Administración Minera (2015).....2
- Figura 2.** Localización de la concesión minera la Guadalupana. La concesión queda delimitada por las coordenadas UTM 14Q (397,240 a 397,740 mE) y 14Q (2, 266,780 a 2, 267,180 mN). Imagen modificada de Google Earth.....6
- Figura 2a.** Principales vías de acceso a la concesión minera La Guadalupana.....7
- Figura 3.** Mapa geológico de la región ópalífera de La Trinidad. Integrado con base en información del Servicio Geológico Mexicano (2003) Carta San Juan del Rio F14-C77 y Servicio Geológico Mexicano (1998) Carta Tequisquiapan F14-C76.....7
- Figura 4.** a) Difracción de la luz blanca, cuando la ranuras por donde penetra la luz son objetos macroscópicos el efecto de difracción es menor, pero se convierte en importante cuando las dimensiones del objeto son comparables a la longitud de la luz. b) Rejillas de difracción compuestas por esferas de sílice. c) Ópalo noble que exhibe diversos colores del espectro electromagnético.12
- Figura 5.** Perfiles de la talla tipo cabujón y sus variantes. En México la principal talla de ópalo es en forma de cabujón, que resalta sus propiedades ópticas. La elección de la variante es en función del grado de transparencia.16
- Figura 5a.** Objetos ornamentales zoomorfos formados por la matriz riolítica con ópalo, lagarto, puma y rana de provenientes de la zona opalífera de la Trinidad.....16
- Figura 6.** Dobletes formados por una base y ópalo. a) Doblete compuesto por una base plana y ópalo plano, b) Base plana y parte superior abovedada, c) Base y parte superior abovedada.18
- Figura 7.** Tripletes formados por una base, ópalo y una cubierta a) Triplete compuesto por formas planas. b) Triplete compuesto de una base plana, ópalo y cubierta abovedada. c) Triplete compuesto por base y ópalo planos y cubierta abovedada. d) Triplete visto con microscopio gemológico.18
- Figura 8.** Ópalos en resina. a) Doblete compuesto por una base plana y ópalo plano. b) Base plana y parte superior abovedada. c) Base y parte superior abovedada.....18
- Figura 9.** Ópalos de diferente coloración dentro de su roca encajonante.....21

Figura 10. Muestras recolectadas de ópalos comunes y nobles.....	22
Figura 11. a) Bloques de lava riolítica afectadas por fracturamiento, las diferentes coloraciones pertenecen a las diferentes alteraciones en la roca. b) A la izquierda de la imagen se observa un intensa alteración por óxidos de hierro, a la derecha de la imagen se observa texturas vesiculares causadas por el escape de gases.	21
Figura 12. A) Principales tajos activos dentro de la concesión minera La Guadalupana, B) Diagrama de densidad de polos y diagrama de rosa de las principales fracturas.....	25
Figura 13. Fotomicrografías de texturas en las riolitas, con luz paralela (izquierda) y nicoles cruzados (derecha).....	26
Figura 14. Fotomicrografías diversas.	27
Figura 15. Fotomicrografías de Ópalos.....	28
Figura 16. Texturas de alteración.	29
Figura 17. Detalle del diagrama de clasificación TAS, sílice contara álcalis (Le Bas et al., 1986), se incluye la línea propuesta por Irvine y Baragar (1971) para diferenciar la seria alcalina de la Subalcalina.	30
Figura 18. Difractograma de la alteración MARO, las faces presentes son: hematita, goethita –limonita, caolinita y cuarzo.	31
Figura 18a. Difractograma de la alteración MA, las faces minerales son de caolinita y cuarzo.	32
Figura 19. Diagramas Harker de Sílice contra elementos mayores (% en peso). La línea continua representa una aproximación de la movilidad de los elementos mayores entre la riolita y la alteración argílica (MA),la línea discontinua representa la movilidad de los elementos de la riolita y la alteración Hematita-Goethita (MARO).	34
Figura 20. Diagrama multi-elementos mayores y menores, expresado como porcentaje en peso. A) Relación del ópalo de fuego y su roca caja. B) Relación del ópalo de fuego y las alteraciones presentes.....	36

Figura 21. Diagrama Harker de Sílice contra elementos mayores y menores en ópalos. Las líneas representan una aproximación a la variación de los elementos mayores en muestras de ópalo de fuego respecto al ópalo incoloro. Existe un aumento en contenido de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , y Na_2O y K_2O de ópalo incoloro a los ópalos girasol y de fuego.	37
Figura 22. Gráfica multi-elementos Traza expresada en ppm. La línea punteada roja, denota la división entre ópalos de origen volcánico y ópalos sedimentarios.....	39
Figura 22a. Gráfica comparativa de las principales concentraciones de elementos traza en ppm de ópalos de origen sedimentario (Australia y Brasil) y volcánico (México, Etiopía, Kazajistán, Madagascar). Las concentraciones de Zr y Nb en ópalos de La Trinidad destacan de los ópalos de distintos países.	40
Figura 23. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común anaranjado tipo C-T.....	42
Figura 24. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común anaranjado tipo C-T con inclusiones de cuarzo.....	43
Figura 24a. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común incoloro tipo C-T con inclusiones de cuarzo.	43
Figura 25. Inclusiones protogenéticas sólidas en ópalos .A) Cristal acicular pseudomorfoseado por óxidos de hierro, cubierto con ópalo-C, B) Inclusión de óxidos e hidróxidos de hierro en ópalo cantera. C) Cristales prismáticos hexagonales de cuarzo en ópalo cantera. D) Agregados aciculares de cristales de cristobalita que crecen en los bordes de una vesícula rellena de ópalo. E - F) Cristales aciculares de en especímenes zoomorfo y en cabujones.....	47
Figura 26. Refracción de la luz.	49
Figura 27. Bosquejo que muestra el diseño óptico de un refractómetro moderno.....	50
Figura 28. Diagrama de los diversos polimorfos de sílice en función de su temperatura de formación y la velocidad de enfriamiento).....	51
Figura 29. Espectros Raman de ópalos de fuego C-T y ópalos nobles incoloros C- T.....	53
Figura 30. Espectros Raman de ópalos tipo C-T y ópalos tipo C. Las líneas punteadas representan las principales líneas de dispersión de Cristobalita- α (Azul), Tridimita (verde) - α , vidrio (rosa).	54

Figura 31. Espectros Raman del ópalo de fuego y Hematita. En línea punteada se muestran las principales líneas de dispersión de la hematita de las que existe una relación con las de ópalo de fuego en 226, 411, 612, y 656 cm^{-1}55

Relación de Tablas

Tabla 1. Concesiones Mineras en el Distrito Minero de Tequisquiapan, integrado en base a Sistema de Administración Minera (2015).....	2
Tabla 2. Grados de transparencia en ópalos. La transparencia depende de la cantidad de impurezas y el grosor de la talla.	13
Tabla 3. Nombre de las principales variedades de ópalos en base a la presencia o no de juego de colores, color y transparencia.....	14
Tabla 4. Composición química de los elementos mayores de la riolita La Trinidad, determinada por Fluorescencia de rayos x.....	30
Tabla 5. Composición química de los elementos mayores y menores de las alteraciones presentes en la riolita La Trinidad, determinada por Fluorescencia de Rayos x.....	35
Tabla 6. Concentración de elementos traza en ppm, en un ópalo noble- anaranjado y un ópalo noble de fuego provenientes de La Trinidad.	38
Tabla 7. Principales distancias interplanares e intensidades relativas de los polimorfos de sílice de baja temperatura.	41
Tabla 8. Bandas de dispersión Raman. Principales líneas de dispersión para cristobalita- α , tridimita- α , hematita, vidrio de sílice y H ₂ O. Los datos fueron tomados de Handbook of Raman spectra (2015), disponible en internet.	52
Tabla 9. Caracterización gemológica, mediante DRX y espectroscopia Raman de los ópalos de La Trinidad.....	56

Resumen

Una serie de ópalos nobles y comunes procedentes de actividad hidrotermal post-volcánica, cartografiados y recolectados como nódulos dentro de vesículas y fracturas, pertenecientes a la zona opalífera de La Trinidad en Querétaro, fueron analizados mediante Difracción y Fluorescencia de rayos X, Microscopia Óptica (Microscopio Petrográfico y Microscopio Gemológico) y Espectroscopia Raman, con el propósito de conocer sus características geoquímicas y propiedades gemológicas, esto, con el fin de establecer criterios para su clasificación gemológica y establecer relaciones entre estas propiedades y su composición química, también se presenta la caracterización petrológica de la roca encajonante y sus alteraciones.

El orden promedio decreciente de la composición química en los ópalos en porcentaje en peso es como sigue: el contenido de Sílice es de (93.838 a 95.707 %), Al_2O_3 (0.36 a 2.05%), Fe_2O_3 (0.19 a 0.64%), CaO (0.148 a 0.173%), Na_2O (.001 a 0.13%), K_2O (0.035 a 0.517 %), y dentro de las principales elementos traza el contenido de Zr (112-157ppm) es característico de este yacimiento. Los resultados de difracción en ópalos comunes y nobles exhiben patrones formados por fases polimorfas de sílice de baja temperatura, Tridimita- α y cristobalita- α en una matriz de sílice amorfa. Los datos de espectroscopía Raman obtenidos de ópalos nobles muestran dos fuertes bandas de dispersión Raman, una de los 150 a los 550 cm^{-1} , cuyas principales líneas de dispersión pertenecen a ópalo-C y ópalo C-T, y otra de los 3000 a los 3600 cm^{-1} generada por vibraciones del enlace O-H. Los análisis realizados con el microscopio petrográfico y fluorescencia de rayos X muestran tres alteraciones presentes en la riolita: una argilitización, una silicificación y otra formada por óxidos de hierro.

Las observaciones mediante el microscopio gemológico revelan inclusiones sólidas protogenéticas de cuarzo de baja temperatura y hematita en muestras de ópalo matriz, la transparencia de los ópalos nobles es de semitransparente a translúcido y presentan juego de colores, estas características son las principales atractivos gemológicos que han cautivado a coleccionistas, mineralogistas, gemólogos y que han permitido su permanencia en el mercado mundial de las gemas.

Abstract

A series of nobles and common opals from post-volcanic hydrothermal activity mapped and collected as nodules within vesicles and fractures, belonging to the area rich in opals of La Trinidad in Querétaro, were analyzed by diffraction and X-ray fluorescence, Optical Microscopy (Microscope petrographic and Microscope Gemological) and Raman spectroscopy, in order to know their geochemical and gemological characteristics, that, in order to establish criteria for gemological grading and establish relationships between these properties and chemical composition, also petrological characterization is presented an its alterations.

The decreasing average order of the chemical composition in opals in weight percent is as follows: the silica content is (96.15 to 98.04%), Al₂O₃ (0.37 to 2.1%), Fe₂O₃ (0.19 to 0.65%), CaO (152-173%), Na₂O (.001 to .13%), K₂O (036-0529%), and within the main trace elements, Zr content (112-157ppm) is characteristic of this deposit. Diffraction results in common and noble opals exhibit polymorphic phase patterns formed by low-temperature silica, tridymite- α and cristobalite- α , in a matrix of amorphous silica. Raman spectroscopy data obtained noble opals show two strong bands of Raman scattering, one of 550cm⁻¹ to 150 to-1, whose main lines belong to opal-CT, and another of 3000 to 3600cm⁻¹ generated by vibrations of O-H bond.

Analyses performed with petrographic microscope and X-ray fluorescence show three alterations in Rhyolite: An argilitización, a silicification and another formed by iron oxides. Observations by gemological microscope show protogenetic inclusions of quartz and hematite in samples of matrix opal. Transparency of noble opals is transparent to translucent and display play-of-colors, these features are the attractions that have captivated collectors, mineralogists, gemologists and which enabled them to stay in the gems market.

Capítulo 1. Introducción.

La definición de Plinio del ópalo hace 2000 años reza así:

En él, hay un fuego más delicado que en el piropo, tienen el púrpura brillante de la amatista, el verde mar de la esmeralda, todos brillando conjuntamente en una unión increíble....

1.1 Importancia del ópalo.

Se tienen reconocidas 5091 especies mineralógicas (IMA, 2015) de las cuales 240 por sus cualidades se consideran especies gemológicas, en México las más representativas son: el topacio $\text{Al}_2\text{SiO}_4 (\text{F}, \text{OH})_2$, el ámbar (resina fósil, compuesta por sustancias inorgánicas), el cuarzo variedad amatista (SiO_2), la calcedonia variedad ágata de fuego (SiO_2) y el ópalo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). De ellas únicamente el ópalo y el ámbar son objeto de una explotación regular orientada a su explotación como gemas (Ocampo *et al.*, 2007).

La importancia económica del ópalo en la región de La Trinidad, radica en que es una fuente de ingresos para la gente que vive directa o indirectamente de su extracción, aunado a ello, a los ópalos se le puede dar un valor agregado, una talla para elaborar gemas o lapidaria para crear esculturas como objetos ornamentales, también son de gran interés para coleccionistas, mineralogistas y gemólogos por la belleza que algunos especímenes muestran. Giuliani *et al.* (2000) también señala la utilidad de las gemas para la arqueometría ya que cuando es posible determinar su origen geográfico se desempeñan como trazadores de las antiguas rutas de comercio.

1.2 La minería de ópalo en México.

México posee una gran riqueza mineral asociada a distintos yacimientos minerales portadores de una gran diversidad de especies y variedades minerales, que son apreciadas por coleccionistas a nivel mundial. En México existen diversos yacimientos de ópalo ubicados en los estados de: Jalisco, Hidalgo, Guanajuato, Guerrero, Michoacán, Nayarit, y Querétaro. Tequisquiapan, Colón y Ezequiel Montes, representan los municipios con mayor número de concesiones opalíferas en Querétaro, La figura 1 muestra la ubicación de las concesiones mineras en el distrito opalífero de Tequisquiapan y la tabla 1 su superficie en Km^2 .

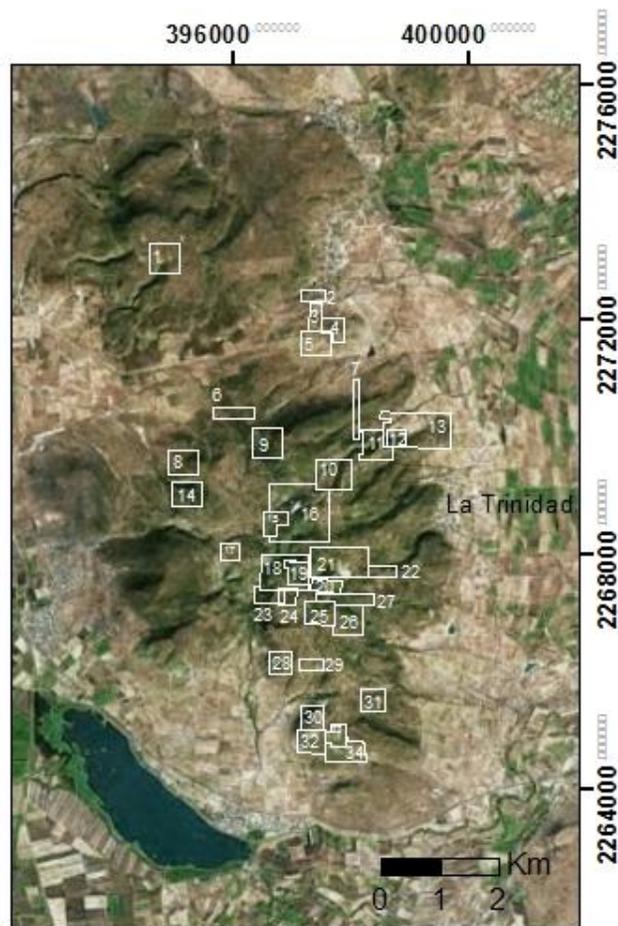


Figura 1. Ubicación de las concesiones opalíferas del Distrito Minero de Tequisquiapan, mapa integrado con base en, Sistema de Administración Minera (2015).

Tabla 1. Concesiones Mineras en el Distrito Minero de Tequisquiapan, integrado en base a Sistema de Administración Minera (2015).

Lote	Superficie Km ²	Lote	Superficie Km ²	Lote	Superficie km ²
1.-El sitio	.25	12.-La flor	.9	23.-La única	.121
2.-Lajitas	.08	13.-Veronica	.59	24.-Colorada	.9
3.-Bonita	.1	14.-Conchita	.2	25.-La Guadalupana	.2
4.-El rosal	.1295	15.-La Joya	.12	26.-La palma	.237
5.-La luz	.20	16.-Orito	.89	27.-San Joaquín	.174
6.-El pavorreal	.14	17.-Milagroso	.9	28.-La Humilde	.16
7.-Mina la Grulla	.1	18.-Mariana	.334	29.-El Coyote	.8
8.-La Bondadosa	.2	19.-La Cañada	.145	30.-Espiritu Santo	.16
9.-Mina del Vulito	.25	20.-Sin nombre	.10	31.-El rosal	.109
10.-El milenio	.3	21.-La Porfia	.4	32.-San Felipe C.V	.2
11.-La Dolores	.2239	22.-La Trinidad	.369	33.-El rosal	.1095

El uso del ópalo en México se remonta de acuerdo con datos históricos a los siglos XIII-XV, donde los aztecas extraían, cortaban, pulían y utilizaban la piedra como ornamento en ritos ceremoniales, el conocimiento del ópalo por los aztecas queda evidenciado por dos términos en náhuatl: *quetza litzle pyolitli*, que significa "piedra que cambia de color con el movimiento" y *huitzitziltecpatl* "Colibrí de piedra" recordando el juego de colores del ópalo similar al color que muestra el plumaje del ave (Ramírez, 1884). Con la llegada de los españoles se pierden las localidades conocidas del ópalo. A principios del siglo XIX, Andrés Manuel del Río, en su obra elementos de orictognosia, establece siete divisiones para ópalos: ópalos finos, ópalo común, semiópalo, jaspeópalo, xilópalo, hialita, menilia y menciona al ópalo de fuego, la descripción de este último, fue publicada en la Gaceta de México en el año de 1802. A mediados del siglo XIX geólogos mencionan yacimientos opalíferos en los estados de Hidalgo, Guerrero, San Luis Potosí, Querétaro (Ramírez, 1884). En el año de 1840, Don José María Siurab comenzó a trabajar la mina Santa María Iris, en la Hacienda Esmeralda (Ramírez, 1884), 15 años después se descubre otro depósito importante en la zona correspondiente a La Carbonera. A principios del siglo XX, las minas fueron trabajadas por extranjeros y en los años sesentas el Distrito Minero de Tequisquiapan alcanza su apogeo debido a la alta demanda de ópalos por países europeos y Japón.

Actualmente la minería del ópalo se lleva a cabo de una manera intensa en canteras a cielo abierto, utilizando métodos manuales, dinamita, herramientas neumáticas y la experiencia de los mineros para encontrar ópalos de buena calidad, las cifras de producción precisas son difíciles de saber ya que la mayoría de estos depósitos son trabajados por grupos mineros pequeños y algunas de las piezas encontradas son vendidas en el mercado informal, en términos de geología económica son de bajo tonelaje pero con un alto valor intrínseco con muestras de ópalos individuales.

1.3 Planteamiento del problema

En México existe una carencia de sensibilidad en cuanto al mercado de las gemas y si bien es cierto que Países como Australia acaparan el mercado del ópalo con el 95 % de la producción mundial (Gaillou., *et al*/2008), en México existe gran potencial de extracción, en los estados de Querétaro, Jalisco y Nayarit. La falta de tecnología e investigación limita la competitividad a nivel mundial, esta falta de investigación deriva en una carencia de planeación y un bajo aprovechamiento de los recursos disponibles. Por tal motivo, este trabajo forma parte del programa de Servicio Social "Asesoría a pequeños mineros productores de ópalo en el estado de Querétaro", con clave DGOSE: 2016-12/81-1927, que tiene por objetivos: efectuar estudios geológicos en minas del distrito opalífero de Tequisquiapan para conocer las condiciones de formación del ópalo, realizar levantamientos geológicos de las minas, para determinar guías de exploración y realizar análisis gemológicos de muestras de ópalos, también se trata de orientar a los mineros con medidas de seguridad y métodos de explotación más redituables. En este programa participan estudiantes de las carreras de Ingeniería en Minas y Metalurgia e Ingeniería Geológica.

La clasificación gemológica de los ópalos está ligada a su valor económico y científico, por ello surge la necesidad de contar con estudios que permitan conocer cómo se clasifican gemológicamente y determinar la relación que existe entre esta clasificación y sus características geoquímicas, a esta necesidad se le suma la carencia de trabajos geológicos previos, que estén enfocados a entender de las condiciones de formación del ópalo, por ello surge el interés por investigar la roca encajonante y las alteraciones presentes en la zona opalífera de Tequisquiapan.

1.4 Objetivos Generales

Determinar las propiedades gemológicas y características geoquímicas de ópalos provenientes de la Concesión minera La Guadalupana, para clasificarlos correctamente y establecer relaciones entre su composición química y sus propiedades gemológicas, que permitan diferenciar a estos, de ópalos de otras localidades y ópalos sintéticos.

Para estos fines se analizará:

- a) Propiedades gemológicas convencionales.
- b) Patrones de espectroscopia Raman.
- c) Patrones de Difracción de rayos x.
- d) La Composición química mediante Fluorescencia de rayos X.

Realizar estudios petrológicos y geoquímicos en la roca que contiene a los ópalos, que revelen las condiciones geológicas de su formación. Para estos fines se llevará a cabo:

- e) La cartografía de las minas de ópalo dentro de la concesión minera La Guadalupana.
- f) El análisis petrológico y geoquímico de las muestras recolectadas en campo.
- g) La caracterización de las alteraciones presentes en la roca encajonante de la zona de estudio.

1.4.1 Objetivos secundarios

Mediante la cartografía de las minas de ópalo dentro de la concesión minera La Guadalupana y datos estructurales medidos en campo, generar un mapa a detalle de la concesión minera La Guadalupana que sirva como guía de exploración a los mineros que ahí laboran.

1.5 Localización y Acceso

Fisiográficamente, la zona de estudio se encuentra dentro de La mesa Central y pertenece a la sub-provincia geomorfológica de Planicies y Sierras Volcánicas (Lugo y Córdova, 1990) y se localiza dentro de la Sierra de la Llave (Figura 2). La zona pertenece a la concesión minera La Guadalupana limitada por las coordenadas UTM 14Q (397,240 a 397,740 mE) y 14Q (2, 266,780 a 2, 267,180 mN). La principal vía de acceso es por la carretera federal 120 (San Juan del Río-Jalpan de Cerra) que comunica a los municipios de San Juan del Río y Tequisquiapan, si se accede desde San Juan del Río es necesario virar a la izquierda en el poblado llamado Bordo Blanco y continuar hasta el poblado de La Trinidad donde el acceso a las minas de ópalo es por un camino de terracería. (Figura 2a).



Figura 2. Localización de la concesión minera la Guadalupana. La concesión queda delimitada por las coordenadas UTM 14Q (397,240 a 397,740 mE) y 14Q (2, 266,780 a 2, 267,180 mN). Imagen modificada de Google Earth.

Capítulo 1. Introducción

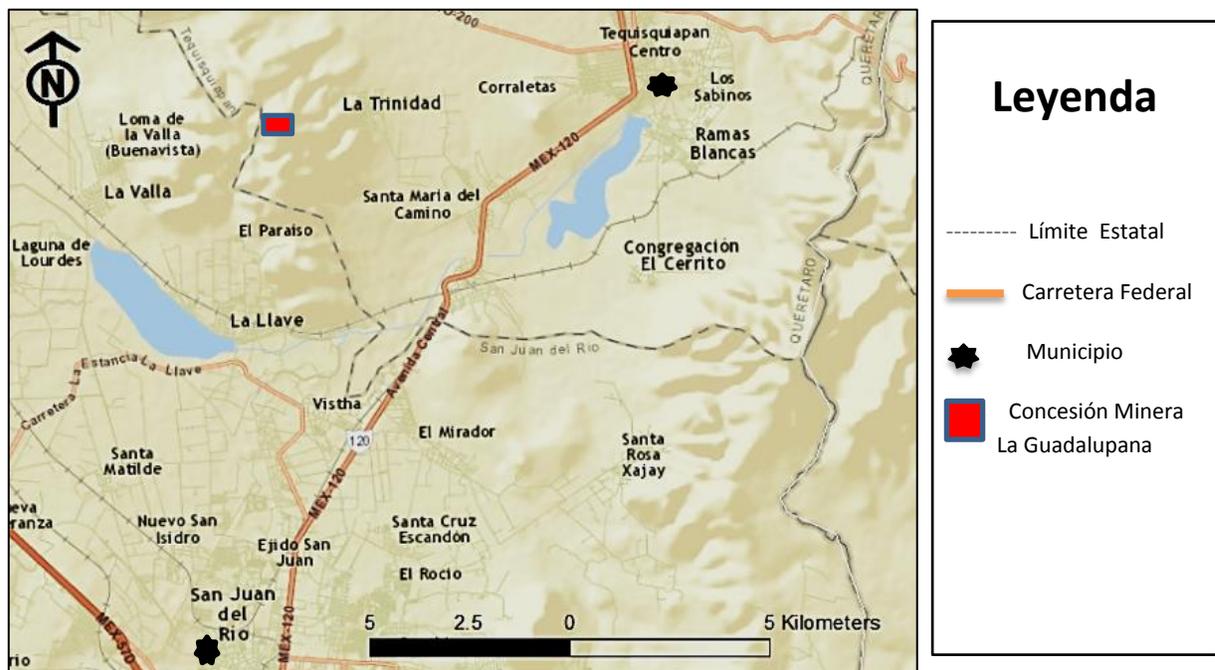


Figura 2a. Principales vías de acceso a la concesión minera La Guadalupana.

Capítulo 2. Marco teórico.

“Si consigo ver más lejos, es porque he conseguido auparme a hombros de gigantes”.

Isaac Newton.

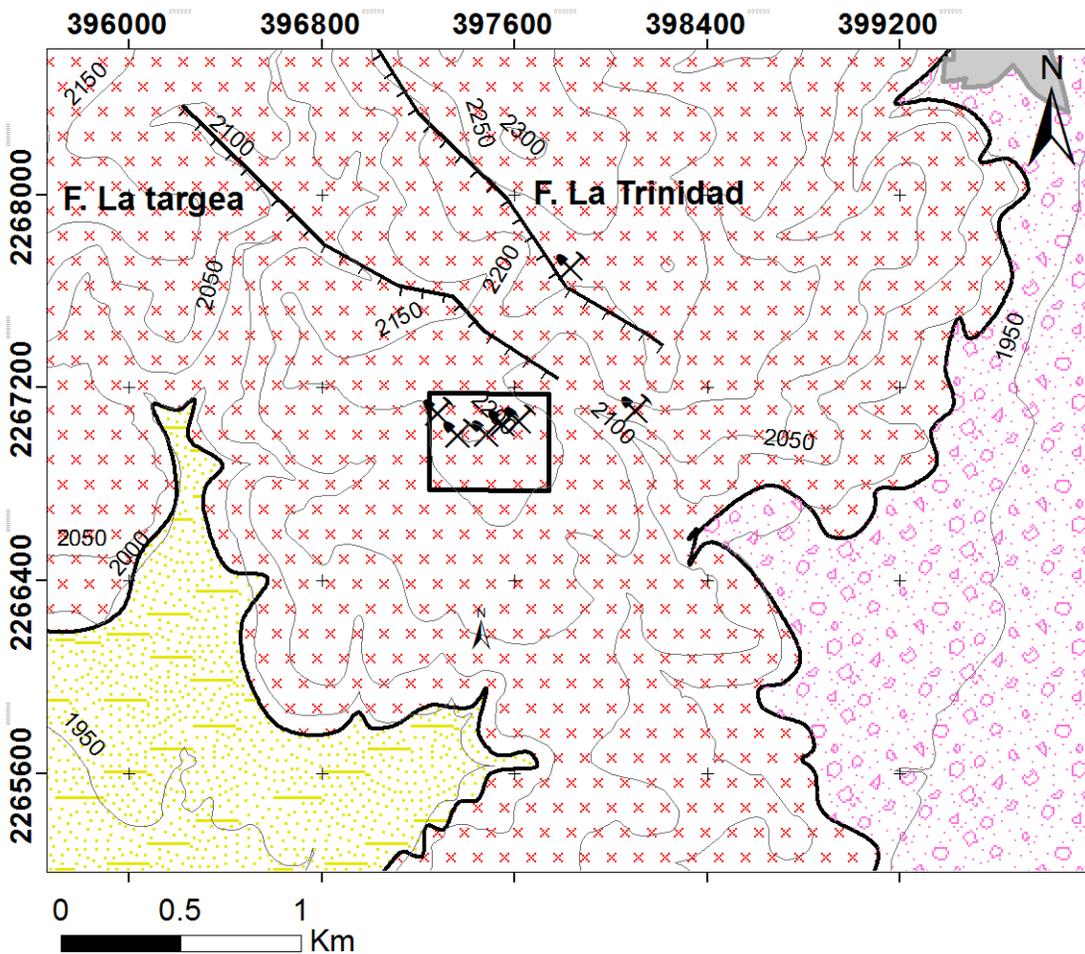
2.1 Geología regional.

La unidad litodémica más antigua que se conoce en la porción central del Estado de Querétaro está conformada por el Complejo El Chilar constituidas por cuarzoarenitas y lutitas ricas en cuarzo, dichas rocas contienen bloques de tamaño diverso (500 metros a pocos centímetros) de la misma arenisca, y un bloque de gran dimensión de pedernal que contiene rocas ígneas básicas. Los bloques y matriz se encuentran intensamente deformados llegando a formar zonas de *mélange* tectónico, localmente metamorfizados a facies de esquisto verde, cuyas edades pertenecen al Pérmico (Dávila *et al.*, 2009).

El Mesozoico lo constituyen rocas continentales y marinas de la formación Huizachal del Triásico superior y base del Jurásico inferior constituida por lutitas; y la formación Trancas del Jurásico superior constituida por grauvacas intercaladas con lutitas y calizas. Sobreyaciendo a esta formación descansan calizas del Alptiano-Cenomaniano las que subyacen a la formación Soyatal –Mezcala del Cretácico superior (COREMI, 1992).

El Cenozoico se encuentra constituido por el fanglomerado El Morro constituido por fanglomerados, calizas, pedernal y lutitas. La Secuencia de rocas volcánicas terciarias está constituida principalmente por riolitas e ignimbritas, así como andesitas, dacitas y tobas que descansan en discordancia erosional sobre rocas cretácicas y grupo El Morro. El grupo El Morro sobreyace por discordancia a secuencias de rocas marinas Mesozoicas y se interdigita lateralmente con la secuencia de rocas volcánicas terciarias (COREMI, 1992).

La Región correspondiente a la concesión La Guadalupana pertenece a la secuencia de rocas volcánicas terciarias (Figura 3) que ocupan la porción centro sur del estado de Querétaro y se encuentran relacionadas genéticamente con el vulcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental (Cruz *et al.*, 2007), en la actualidad no existen datos de fechamiento para el domo riolítico de La Trinidad. Estas rocas constituyen estructuras dómicas, las cuales se hallan intensamente afectadas por fracturas de dirección predominante NW-SE (Cruz *et al.*, 2007). En la porción centro sur del estado de Querétaro existen 2 sistemas de lineamientos que según COREMI (1992) corresponden a fallas normales, es decir a 2 fases de deformación extensional durante el Cenozoico cuyos conjuntos se orientan al NW-SE y E-NE y en menor proporción al NE- SW los cuales se encuentran relacionados a deformaciones regionales producto de la actividad volcánica.



Simbología

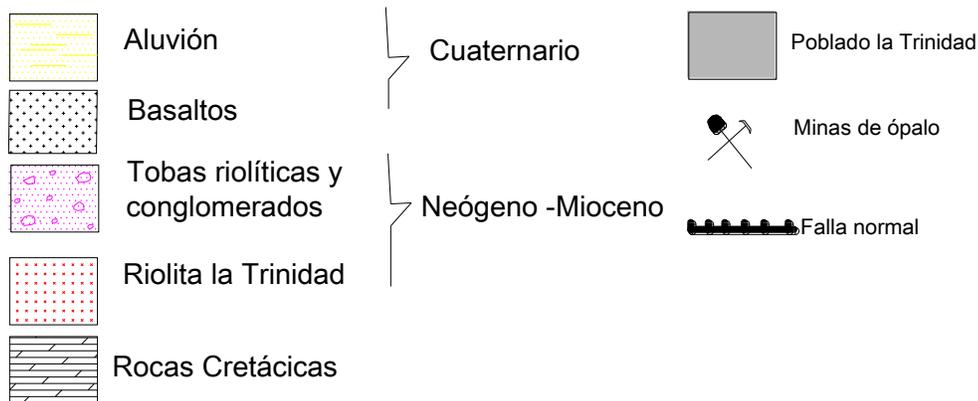


Figura 3. Mapa geológico de la región opalífera de La Trinidad. Integrado con base en información del Servicio Geológico Mexicano (2012) Carta San Juan del Río F14-C77 y Servicio Geológico Mexicano (2007) Carta Tequisquiapan F14-C76.

2.2 El grupo de la sílice

El grupo de la sílice está compuesto por un armazón constituido de SiO_2 , donde hay un átomo de oxígeno entre cada par de átomos de Silicio, el cual no contiene ninguna otra unidad estructural, sin embargo existen 9 maneras diferentes en las cuales los tetraedros enlazados pueden compartir todos sus oxígenos formando redes tridimensionales, estas nueve formas de disposiciones geométricas constituyen los polimorfos conocidos de sílice, llamados cuarzo, tridimita, cristobalita, stishovita, coesita y keatita (sintética) de las cuales, además existen 2 formas consideradas dentro del grupo de la sílice que mantienen similar composición química definidas como mineraloides, la lechatelierita que es una variedad totalmente amorfa y el ópalo que es una variedad-criptocristalina y que posee en su estructura cantidades variables de agua (Klein y Hurlbut, 1997).

2.2.1 Vidrios naturales

Los vidrios naturales son una variedad de materiales que incluyen vidrio volcánico, tectitas, vidrio diaplético, fulguritas, geles naturales (donde se incluye el ópalo), existen problemas de nomenclatura que son derivados de su compleja estructura y la composición de las fases que los componen, estos materiales consisten de una matriz compuesta de vidrio y microcristales. Para su estudio es necesario la combinación de técnicas de difracción y espectroscopia para entender su estructura, composición y las implicaciones en ciencias de la tierra (Mckeown y Zotov, 1994). Todos los vidrios naturales son inestables bajo condiciones de la superficie terrestre y tienden al intemperismo químico y a una recristalización (devitrificación).

2.2.2 Definición de ópalo

El término ópalo se ha utilizado en la literatura mineralógica para designar diversas formas de sílice hidratada ya sea amorfa o microcristalina con un alto grado de desorden estructural (Jones y Segnit, 1971), es dióxido de silicio hidratado, cuya fórmula química es $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, donde n representa el contenido de agua la que puede variar de 2% al 21% (Hatipoğlu, 2010). El origen de la palabra ópalo proviene del latín *opalus*,

palabra que se deriva del sánscrito *upala* que significa piedra preciosa. En la actualidad existen diversas formas de clasificar a él ópalo, con base en: sus propiedades gemológicas, su patrón de difracción de rayos X (clasificación mineralógica) y mediante sus espectros Raman.

2.3 Clasificación mediante Difracción de Rayos X

El análisis mediante difracción de rayos x se basa en las propiedades de los rayos x de penetrar en la materia y de difractarse de acuerdo con la ley de Wulf-Bregg desde los planos atómicos de la red cristalina (Ostrooumov, 2009). La arquitectura de las redes cristalinas se basa en la distribución periódica de átomos, iones o moléculas en una red tridimensional. Se trata de distribuciones regulares separadas por distancias constantes y características (Besoain, 1985).

La ecuación de Wulf –Bregg define las condiciones bajo las cuales ocurre la difracción y tiene la siguiente forma:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\text{sen}\Theta$$

Donde n es un número entero (orden de la reflexión), λ es la longitud de onda de la radiación, d_{hkl} es la distancia interplanar donde ocurre la difracción, Θ es el ángulo de difracción o ángulo de Bragg. Esta ecuación permite para el valor λ y los ángulos Θ medidos experimentalmente, determinar las distancias interplanares (d_{hkl}) características de un material dado. La identificación de especies a partir de su diagrama de difracción se basa en la posición de las líneas (en términos de 2Θ), y en sus intensidades relativas. El análisis para determinar las faces mineralógicas presentes se puede evaluar mediante un software correspondiente de difracción de rayos x, comparando los difractogramas obtenidos con una base de datos establecida.

La clasificación mineralógica de los ópalos se basa en los patrones de difracción de rayos X que presentan. Jones y Segnit (1997) definen 3 principales tipos de ópalos según las fases polimorfas de sílice encontradas.

- Ópalo C, formado por Cristobalita- α ordenada con cantidades menores de Tridimita- α .
- Ópalo C-T, formado por Cristobalita- α desordenada y Tridimita- α .
- Ópalo A, variedad amorfa.

De esta forma los ópalos se encuentran constituidos ya sea por una fase amorfa y/o varias fases microcristalinas o por una fase amorfa (Oustroumov, 1999), atribuyéndose el grado de cristalinidad a la génesis de los ópalos (Jones y Segnit, 1971).

2.4 Clasificación mediante Espectroscopia Raman

Las técnicas espectrométricas se basan en la interacción de la luz con la materia, los espectros Raman se obtienen al irradiar una muestra con una fuente potente de rayos laser de radiación monocromática visible, la dispersión producida al irradiar la muestra depende de la estructura química de las moléculas y cristales, una pequeña porción de la luz es dispersada experimenta ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independientes de la frecuencia de la luz incidente. La dispersión Raman, es un proceso inelástico de la luz, debido a modos de vibración internos en una molécula, en los cuales, la energía se pierde o se gana durante los procesos de dispersión (comunicación personal con la física Leticia A. Alba, 2016).

Se trata de una técnica de análisis que se realiza directamente sobre el material a analizar sin necesitar éste ningún tipo de preparación especial y que no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza el análisis. Durante el proceso se registra el espectro de la radiación dispersada, cuyas intensidades de las bandas Raman son, cuando mucho, un 10^{-5} % de la intensidad de la fuente. El uso de la espectroscopia Raman en investigaciones gemológicas ha aumentado en los últimos años a medida que las bases de datos aumentan.

La espectroscopia Raman ha sido recientemente establecida como un método no destructivo para la caracterización de la estructura de diferentes materiales, y entre estos, las gemas, siendo un método propicio para distinguir las modificaciones polimórficas debido a su sensibilidad para detectar frecuencias vibracionales, los iones y átomos enlazados químicamente para formar moléculas y redes cristalinas, están sometidos a constantes movimientos vibracionales y rotacionales; estas oscilaciones se realizan a frecuencias bien determinadas en función de la masa de las partículas que intervienen y del comportamiento dinámico de los enlaces existentes, de este modo permite determinar cambios débiles en las estructura cristalinas. (Smallwood *et al.*, 1997; Ostroumov *et al.*, 1999).

2.5 Clasificación Genética

La clasificación genética propuesta por Rondeau *et al.* (2004) se basa en temperatura de formación de los ópalos, agrupándolos en 2 categorías:

- a) Ópalos de alta temperatura, de origen volcánico con temperaturas máximas de 170 °C. (México, Etiopía, Kazajistán, Eslovaquia).
- b) Ópalos de baja temperatura, de origen sedimentario con temperaturas máximas de formación de 45 °C. (Australia, Brasil).

2.6 Clasificación Gemológica.

El término gema se aplica a aquellos materiales que después de ser tallados y pulimentados poseen el suficiente atractivo para ser usados como adorno personal, las cualidades primarias que un material debe de tener cuando se hace la valoración gemológica son la belleza, rareza y durabilidad. Los criterios que nos permiten evaluar la calidad de un ópalo son: Belleza (el juego de colores, color, transparencia (clarity), corte (cut) y peso (carat).

2.6.1 La belleza

La belleza es un término subjetivo y depende del criterio del observador, sin embargo, en los ópalos la belleza recae en el color. En los ópalos existen tres componentes relacionados al color; el juego de colores, el color del ópalo y su transparencia (clarity).

El primer criterio es el fenómeno óptico llamado juego de colores de tal forma que se les puede dividir en nobles y comunes dependiendo de la presencia o no de dicho fenómeno. Los ópalos con juego de colores son más valiosos como gemas que los que no presentan este fenómeno, sin embargo, algunos ópalos comunes son utilizados como gemas o como material para lapidación por su transparencia y por su color.

2.6.1.1 Juego de colores

La física óptica provee la más convincente interpretación de los colores generados por varios mecanismos que involucran cambios en la dirección de la luz (Nassau, 1980). El juego de colores de los ópalos nobles es atribuido a nano-esferas con un arreglo regular que permiten la difracción de la luz visible (rejillas de difracción), la luz incidente que penetra un ópalo es disipada en todas direcciones por las hendiduras que forman las nano-esferas, los rayos de luz dispersados sufren interferencias constructivas que refuerzan ciertas longitudes de onda produciendo así el juego de colores en los ópalos, (Figura 4) (Nassau, 1980; Darrag y Sanders, 1965). El color espectral que se observe depende del ángulo de visualización y del tamaño de las esferas las que varían de 200 a 300nm, un ópalo con esferas de 300nm puede reforzar la luz que tiene una longitud de onda de hasta el doble de esta dimensión es decir de rojo a violeta (Read, 2005), en los ópalos comunes la ausencia del juego de colores es debido a la no homogeneidad de los diámetros de las esferas imposibilitando así la dispersión de la luz (Nassau, 1980).

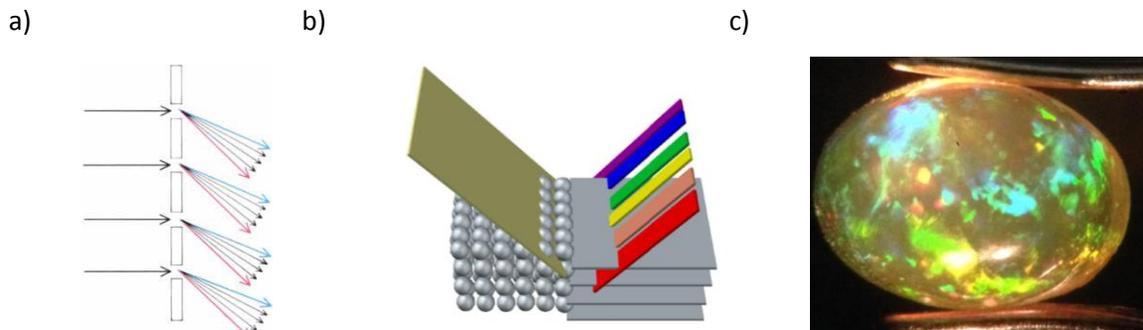


Figura 4. a) Difracción de la luz blanca, cuando la ranuras por donde penetra la luz son objetos macroscópicos el efecto de difracción es menor, pero se convierte en importante cuando las dimensiones del objeto son comparables a la longitud de la luz visible. b) Rejillas de dispersión compuestas por esferas de sílice. c) Ópalo noble que exhibe diversos colores del espectro electromagnético.

2.6.1.2 Color del ópalo y su transparencia.

El color del ópalo abarca los colores del espectro electromagnético de la luz visible, y es atribuida a la absorción selectiva causada por impurezas en su interior, la luz blanca está constituida por una mezcla de todas las longitudes de onda, cuando observamos una gema con luz blanca el color que observamos es el resultado de la absorción de la piedra de varias longitudes de onda (Read, 2005). McOrist (1994 citado por Gaillou et al., 2008) intenta establecer diferencias geoquímicas entre ópalos de diferentes colores, en sus estudios pone en evidencia altas concentraciones de Cu y Mg en ópalos verde y azules, y Al y Mg para ópalos rosas. A la vez Fritsch (2004), liga el color del ópalo a inclusiones de Paligorskita un filosilicato cuya fórmula química es $(Mg, Al)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 4(H_2O)$ para los ópalos rosas de México y Perú, Crisocola un ciclosilicato con fórmula química $(Cu, Al)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ para ópalos azules, de tal forma que los ópalos se caracterizan por ser gemas alocromáticas. La transparencia (tabla 2), es la capacidad de una gema de transmitir la luz visible, es función de la cantidad de impurezas en la gema y del grosor de la talla, el ópalo de Querétaro es con frecuencia distinguido de otros ópalos por su alto grado de transparencia, por su particular juego de colores rojo-verde y por su color rojo.

Tabla 2. Grados de transparencia. La transparencia depende de la cantidad de impurezas y el grosor de la talla

Transparente	Un objeto puede ser visto claramente a través de la gema.
Semitransparente	La imagen de un objeto visto a través de la piedra será borrosa, pero aún reconocible.
Translucida	La gema transmite algo de luz pero no se distinguen los objetos.
Semitranslucida	Parte de la luz todavía puede penetrar la piedra, pero sólo a través de los bordes.
Opaco virtual	Solo se logra la transmisión de la luz por láminas muy finas, pero para fines gemológicos son opacos.
Opaco real	La piedra es ópticamente densa para impedir el paso de cualquier luz.

Capítulo 2. Marco teórico.

Si las impurezas afectan el color del ópalo de forma positiva, la belleza de la gema aumentará, sin embargo las impurezas también pueden afectar a los ópalos de forma negativa, restándoles valor comercial. La transparencia, el color del ópalo y el juego de colores son las principales características que definen las distintas variedades conocidas de ópalo. En la actualidad existe un gran número de términos comerciales empleados para describirlos, en la tabla 3 se enlistan los términos más comunes encontrados en la literatura para ópalos mexicanos.

Tabla 3. Nombre de las principales variedades de ópalos mexicanos en base a la presencia o no de juego de colores, color y transparencia.

Nombre gemológico	Juego de colores	Color	Transparencia
Ópalo de Fuego	Con o sin juego de Colores	Rojo, naranja o pardo.	Traslúcido-Semitranslúcido
Ópalo Cereza	Con o sin juego de Colores	Rojo cereza	Translúcido
Ópalo Naranja	Con o sin juego de colores	Anaranjado	Semitransparente
Ópalo de agua o lloviznado	Con Juego de colores	Incoloro	Transparente-Semitrasparente
Ópalo de miel	Con o sin juego de colores	Amarillo, Ámbar	Semitransparente
Ópalo Girasol	Con juego de colores	Anaranjado, Lechoso	Semitranparente
Ópalo Hialita	Con Juego de colores	Incoloro.	Trasparente
Ópalo Lechoso	Con o Sin Juego de Colores	Blanco lechoso	Semitrasmparente Semitraslúcido
Ópalo Arlequín	Con Juego de colores, esta variedad presenta todos los colores del espectro electromagnético	Puede presentar cualquier color del espectro electromagnético	De transparente a Semitraslúcido
Ópalo Matriz	Con o sin juego de colores	Todos los colores de espectro electromagnético	Todos los rangos

2.6.2 Rareza

La rareza es otra de las cualidades para que un material obtenga el nombre de gema, la ocurrencia en la naturaleza de ópalos de fuego y ópalos nobles con multi-juego de colores es raro relacionado a los ópalos comunes (Hatipoğlu, 2010). El ópalo noble es el único material natural que presenta juego de colores por lo que es denominado material natural raro. Existen al menos 12 países en los cuales se extrae el ópalo: Perú, México, Etiopía, Honduras, Brasil, Australia, Kazajistán, Tanzania, Eslovaquia, USA, Madagascar e Italia, sin embargo no todos los ópalos presentan juego de colores y/o colores atractivos para ser utilizados como gemas.

2.6.3 Durabilidad

La durabilidad es la tercera cualidad que una gema debe tener y se encuentra asociado a las propiedades físicas del material como la dureza y la tenacidad. Los ópalos calidad gema presentan dureza de 5.5 a 6.5 en la escala de Mohs, y una tenacidad frágil. A pesar de que el ópalo es blando comparado con otras gemas, la durabilidad no representa un factor determinante a la hora de juzgarlos ya que su riqueza deriva en su fenómeno óptico. Fritsh (1999 citado por Aguilar et al., 2005) reconoce 2 maneras en que los ópalos pueden desestabilizarse: a) por fisuras, al formarse una red de fracturas que es muy común en ópalos tipo-A; b) por blanqueamiento que aparece con mayor frecuencia en ópalos tipo C-T, respecto a dichos fenómenos Aguilar *et al.*, (2005) concluye que estos procesos se encuentran relacionados a cambios estructurales dentro del ópalo debido a una pérdida de agua.

2.6.4 Talla o corte en ópalos

El principal objetivo de la talla es resaltar las propiedades ópticas del material gemológico a tallar, la pérdida de material que tiene lugar al pasar del ópalo en bruto a la gema finalizada debe ser tan reducida como sea posible. La talla del ópalo consiste en reducir la matriz mediante una cortadora, después se reducen las aristas de la matriz que contiene al ópalo empleando un esmeril y agua con jabón para lubricar, para el acabado final los especímenes se montan con goma laca en un portagemas de madera llamado dop, para manipularlos y facilitar el terminado de la gema (Comunicación

Capítulo 2. Marco teórico.

personal con Héctor Montes, 2014). Las principales tallas que se le da al ópalo con juego de colores en las minas de Querétaro son de tipo cabujón y sus variantes (figura 5), este tipo de talla en ópalos tiene por objetivo resaltar las características superficiales como el lustre y obtener mejores ángulos visión del juego de colores, cuando se presentan muestras de ópalos colores vividos también son tallados en facetas o en objetos ornamentales zoomorfos (Figura 5a).

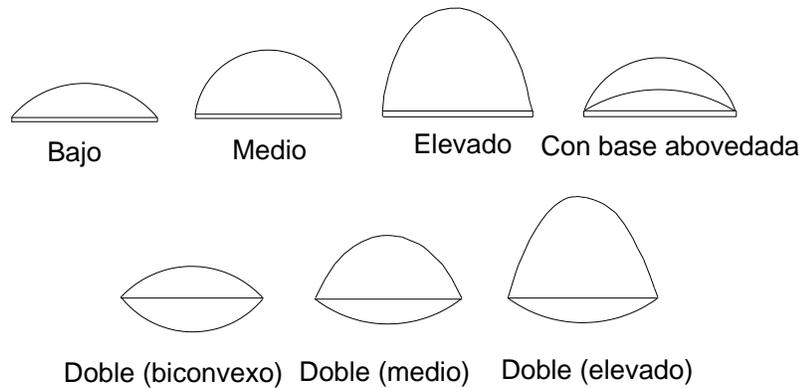


Figura 5. Perfiles de la talla tipo cabujón y sus variantes. En México la principal talla de ópalo es en forma de cabujón, que resalta sus propiedades ópticas. La elección de la variante es en función del grado de transparencia.



Figura 5a. Objetos ornamentales zoomorfos formados por la matriz riolítica con ópalo, lagarto, puma y rana provenientes de la zona opalífera de la Trinidad.

Ópalos compuestos.

2.6.4.1 Dobletes

Un doblete se encuentra compuesto de un material base generalmente de plástico obscuro que puede ser plano o abovedado, en el que se fija una sección milimétrica de ópalo con juego de colores, cuya forma puede ser plana o en forma abovedada (figura 6). La detección de dobletes se hace al inspeccionar un lado de la piedra con lupa de 10x.

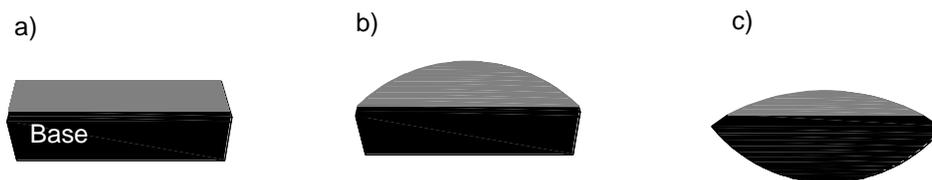


Figura 6. Dobletes formados por una base y ópalo. **a)** Doblete compuesto por una base plana y ópalo plano, **b)** Base plana y parte superior abovedada, **c)** Base y parte superior abovedada.

2.6.4.2 Tripletas

La creación de dobletes de ópalo dio paso al desarrollo de ópalos compuestos por 3 capas de material o tripletas (figura 7), la técnica comenzó cuando la sección milimétrica de ópalo en los dobletes fue recubierta con cuarzo, en la actualidad se utiliza plástico o vidrio. Las ventajas de recubrir los dobletes es que se evita el deterioro de las muestras.

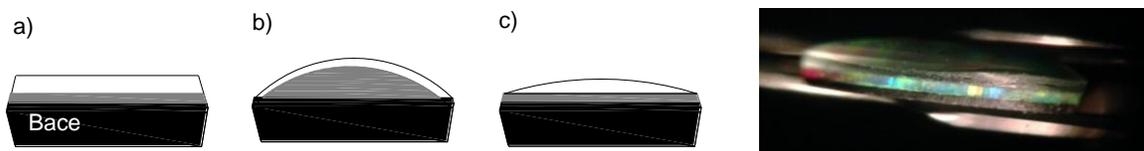


Figura 7. Tripletas formados por una base, ópalo y una cubierta **a)** Triplete compuesto por formas planas. **b)** Triplete compuesto de una base plana, ópalo y cubierta abovedada. **c)** Triplete compuesto por base y ópalo planos y cubierta abovedada. **d)** Triplete visto con microscopio gemológico.

2.6.4.3 Ópalos en resina

Son pequeños fragmentos de ópalo con juego de colores embebidos en plástico, existe una variante en la que los fragmentos son sustituidos por una delgada placa de ópalo (Figura 8).

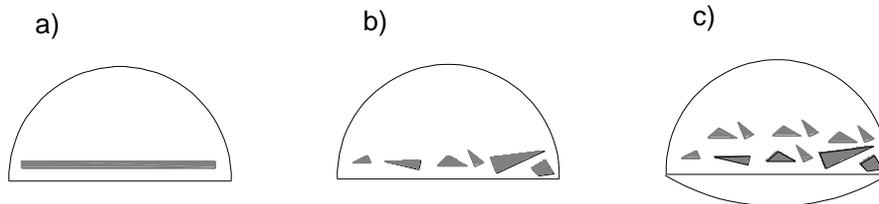


Figura 8. Ópalos en resina. **a)** Doblete compuesto por una base plana y ópalo plano. **b)** Base plana y parte superior abovedada. **c)** Base y parte superior abovedada.

2.6.5 Peso (carat).

Este es quizá el más simple de los parámetros para evaluar la calidad de una gema, sin embargo, es directamente proporcional al valor comercial de cualquier piedra preciosa, es una unidad de masa aceptada internacionalmente como peso estándar para gemas, se denomina quilate, (ct) siglas en inglés, y corresponde a la quinta parte de un gramo (0.2g o 200mg).

Capítulo 2. Campo y Geoquímica.

No sé qué imagen tendrá el mundo de mí, pero yo, al mirar atrás, me veo como un niño jugando en la playa, entreteniéndome en encontrar de vez en cuando una piedra más pulida o una concha más bonita de lo normal, mientras el gran océano de la verdad permanece insondable ante mí.

Isaac Newton.

3.1 Metodología

En este capítulo se describen las relaciones de campo, que incluyen la cartografía de los principales tajos activos dentro de la concesión minera La Guadalupana (figura 12A), así como la descripción de la litología y las alteraciones presentes, también se describen las principales estructuras que controlan el yacimiento de ópalos. Con base en los datos de campo se generó un mapa a detalle que muestra un patrón estructural local, los datos estructurales se analizaron mediante métodos estadísticos tradicionales de la geología estructural, para mostrar la densidad de los polos de las superficies planares se utilizó la red de Schmidt con el programa Stereonet.

Las observaciones petrográficas se realizaron a 12 muestras de roca recolectadas en 4 tajos dentro de la concesión minera, las observaciones en el campo se realizaron mediante una lupa 10x y para el análisis de gabinete se prepararon 12 láminas delgadas por la empresa Petroanálisis S.A, cuyas observaciones se realizaron mediante microscopio petrográfico marca Carl Zeiss modelo AXIOLAB y software Axio Vision con una cámara fotográfica digital acoplada, se seleccionó una muestra de roca para su análisis mediante difracción y fluorescencia de rayos X como análisis complementarios, también se presentan los resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración realizada mediante Difracción de Rayos X y complementada con análisis de elementos mayores cuantitativos por Fluorescencia de Rayos X. Los análisis de difracción y fluorescencia de rayos x fueron llevados a cabo en el Instituto de Geología de la U.N.A.M.

Se analizaron 8 muestras de ópalos nobles y 3 de ópalos comunes provenientes de la concesión minera La Guadalupana mediante Espectroscopia Raman con un láser de 532nm, los análisis se llevaron a cabo en el Centro de Ciencias Aplicadas y desarrollo Tecnológico (C.C.A.D.E.T) de la U.N.A.M. Los 3 ópalos comunes se analizaron mediante Difracción de rayos x, y Fluorescencia de rayos x de elementos mayores y traza.

Las observaciones gemológicas se realizaron con un microscopio gemológico marca Leica, modelo Stéreo Zoom, el índice de refracción se midió utilizando un refractómetro marca Gem-A, con una fuente de luz monocromática de sodio (590nm) y un líquido de contacto $n_D^{25^\circ C} = 1.81 \mp .005$

3.2 Relaciones de campo

Las estructura de las rocas en el campo pertenecen a estructuras dómicas, formadas por flujos de lava con bandas fluidales de minerales félsicos producto de extrusiones efusivas, las texturas presentes en las muestras de roca fresca es afanítica, moderadamente vesicular. Las vesículas, productos de la exsolución de volátiles preservadas como burbujas durante el enfriamiento de las lavas, presentan formas esféricas y ovaladas, algunas de ellas se observan deformadas a causa del flujo lávico, presentan longitudes de milímetros hasta 2 y 3 cm, algunas se encuentran interconectadas alcanzando superficies ovaladas de 4 a 5 cm y presentan tonalidades rojizas debido a la presencia de óxidos de hierro. El ópalo se encuentra como masas coloidales rellenando fracturas y vesículas dentro de la roca, presenta textura fluidal, lo que sugiere que este ha sido depositado por fluidos posteriores a la solidificación y fracturamiento de las lavas. Las muestras de ópalo recolectadas en campo presentan colores rojizos, anaranjados, incoloros, lechosos y varían de translúcidos a semitranslúcidos. La mayoría de los ópalos recolectados se encontraron en rocas con algún grado de alteración, es decir no se encontraron ópalos dentro de su roca encajonante que se encuentren inalteradas (Figura 9 y 10). La alteración de las rocas en campo es evidenciada por cambios en su textura, mineralogía y color, en campo se identificaron 3 alteraciones, la primera de ellas es una silicificación que se introduce en los plano de falla permeando las roca e introduciéndose en vesículas, depositándose en forma de ópalo, esta silicificación se encuentra acompañada por minerales blancos de grano fino (MA), la intensidad de esta alteración varia cualitativamente de una alteración fuerte a moderada en los planos de fractura y decrece en intensidad hacia las zona menos afectadas por el fracturamiento. En zonas donde el fracturamiento de la roca es mayor se observan halos de óxidos de hierro (MARO), la naturaleza de estas alteraciones será discutida en los capítulos de geoquímica y petrografía. Las discontinuidades en las lavas no presentan desplazamientos que indiquen que se trata de fallas (Figura 11), se trata de discontinuidades estrechas caracterizadas como fracturas, su naturaleza es atribuida a esfuerzos internos de origen local provocados por la contracción de las lavas al enfriarse, el diagrama de densidad de polos con n=23, refleja una variación sistemáticas en los patrones de fracturamiento, este patrón se muestra en diagrama de rosa (Figura 12B), la dirección preferencial es NE-SW.

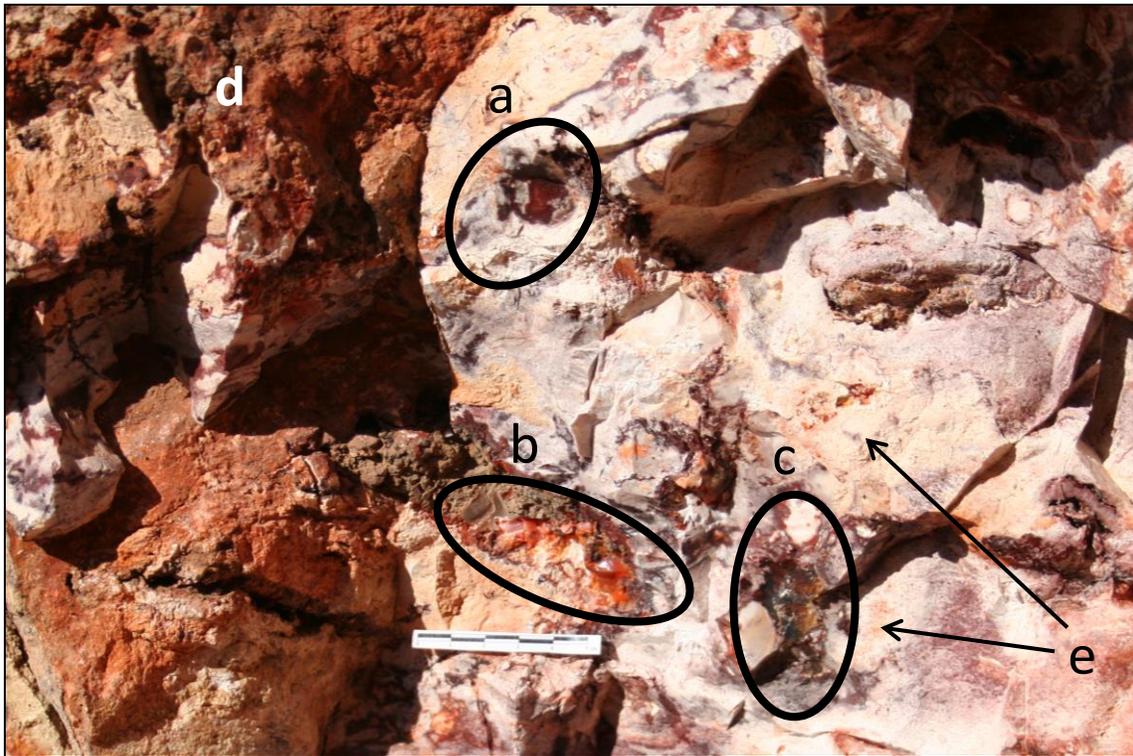


Figura 9. Ópalos de diferente coloración dentro de su roca encajonante. (a y c) Estructura fluidal de ópalos de miel relleno de cavidades, rodeado por riolitas alteradas. (b) Estructura fluidal mostrada por un ópalo girasol. (d) Alteración formada por óxidos de Fe. (e) Alteración formada por la descomposición de los feldespatos-K.

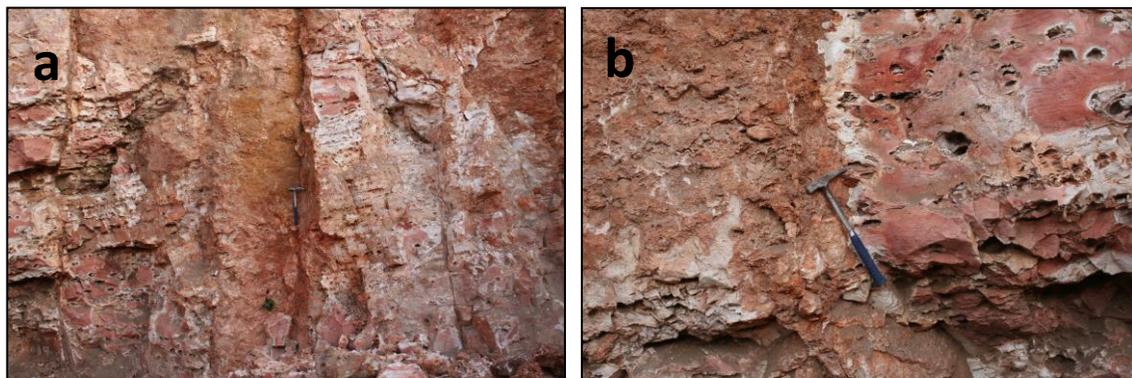


Figura 11. a) Bloques de lava riolítica afectadas por fracturamiento, las diferentes coloraciones pertenecen a las diferentes alteraciones en la roca. Fotografía tomada en el tajo Los cochinitos. b) A la izquierda de la imagen se observa un intensa alteración por óxidos de hierro, a la derecha de la imagen se observa texturas vesiculares causadas por el escape de gases. Fotografía tomada en el tajo El redentor.

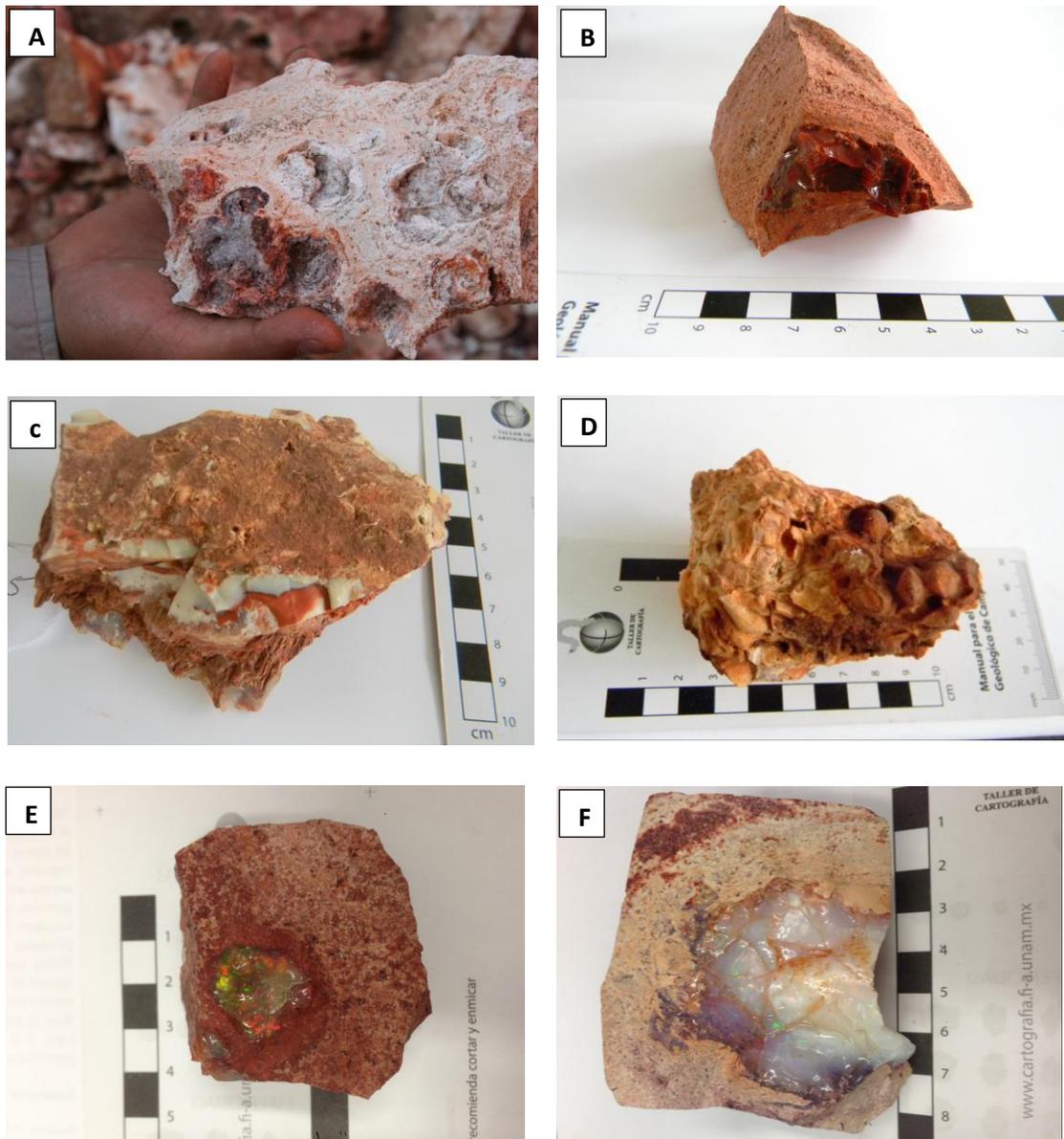


Figura 10. Muestras recolectadas de ópalos comunes y nobles. A) Ópalos comunes, variedad hialita dentro de vesículas. B) Ópalo común-rojo con ligero juego de colores de aproximadamente 3 cm de longitud. C) Diferentes coloraciones de ópalo en una muestra. d) Ópalos con Habito coloforme cubiertos por óxidos de hierro. E) Ópalo noble con juego de colores en matriz. F) Ópalo noble lechoso.

A) Mapa Geológico de la Concesión Minera la Guadalupeana, Tequisquiapan, Querétaro.

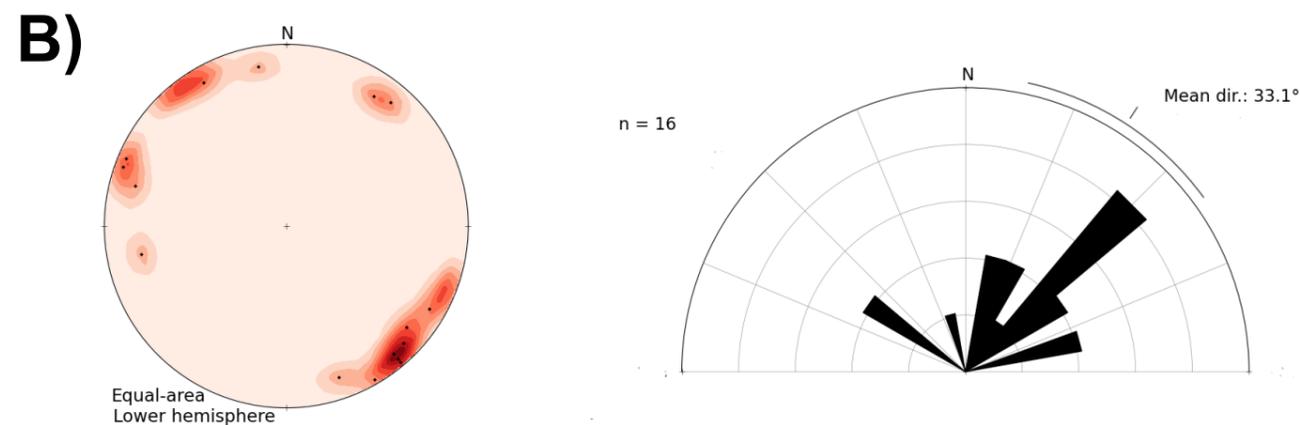
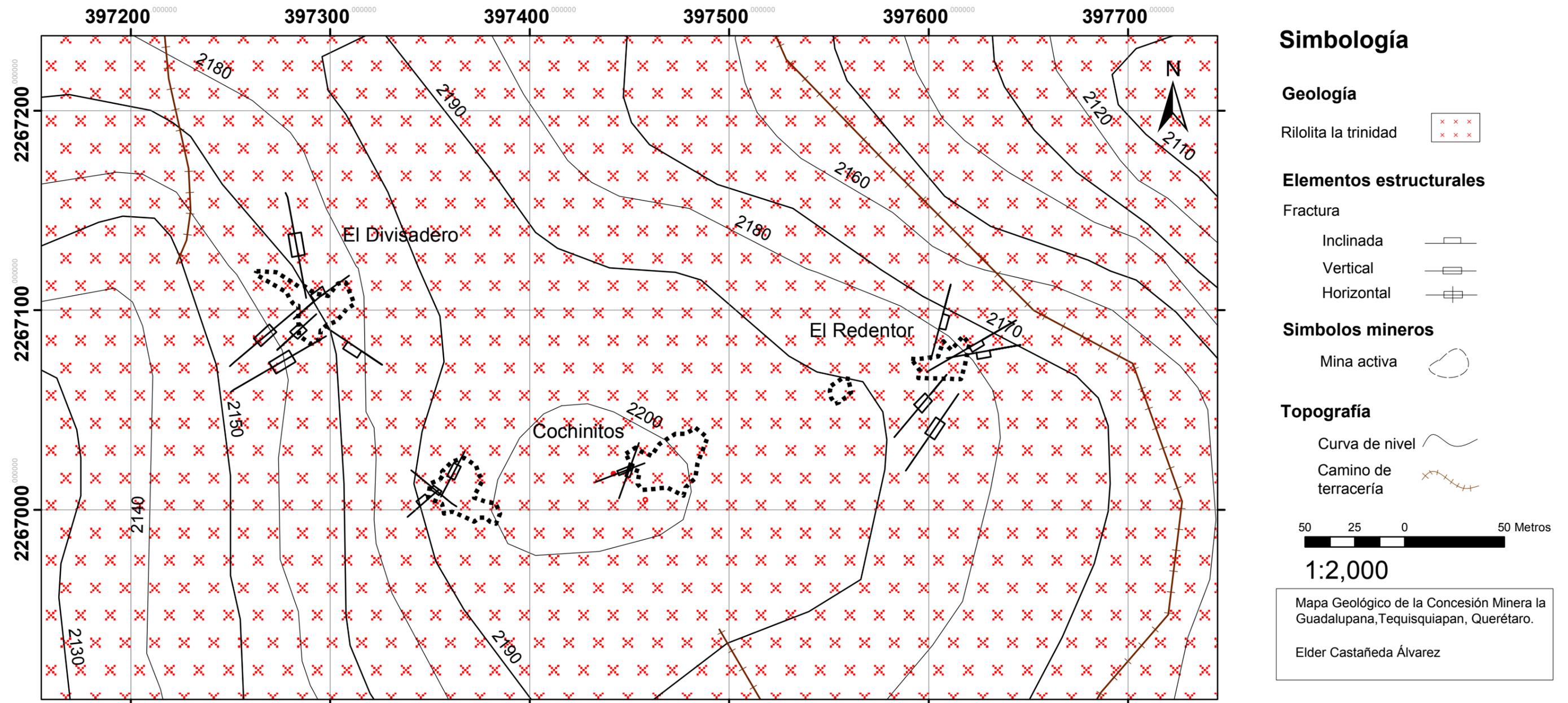


Figura 12. A) Principales tajos activos dentro de la concesión minera La Guadalupeana, B) Diagrama de densidad de polos y diagrama de rosa de las principales fracturas.

3.3 Petrografía

Bajo el microscopio petrográfico las muestras de roca sin alteración presentan textura porfídica, los minerales esenciales de las muestras son microfenocristales de Cuarzo (45%), microfenocristales maclados de sanidina (40%) y plagioclasas (albita) (15%), cristales de zircón, biotita y minerales opacos (¿pirita?) conforman los minerales accesorios. Las muestras alteradas presentan como minerales post-magmáticos, caolín, limonita y hematita de origen secundario, el ópalo se encuentra en la roca como un mineraloide de origen hidrotermal. Los microfenocristales de las muestras frescas se encuentran contenidos en una matriz de grano fino formada por esferulitas de cuarzo y plagioclasas. Los cristales tabulares de sanidina exhiben maclado tipo Carlsbad y se encuentran dentro de la matriz como cristales aislados, sin embargo en algunas zonas se observan glomerocristales de sanidina y cuarzo, este último también se encuentra como cristales subhedrales de grano medio y también como cristales de grano fino dentro de la matriz. El zircón se presenta como cristales ehedrales de grano fino, y se observa dentro de la matriz en forma diseminada. La biotita solo se observó en una lámina delgada. Los minerales opacos (<1mm) presentan bordes de alteración formada por óxidos de hierro. Las esferulitas forman intercrecimiento de cristales de grano muy fino que irradian desde un punto en común y se encuentran formando la matriz de las muestras estudiadas (Figura 13, 14 y 15). Algunas muestras de roca exhiben lineamientos de los cristales esenciales dentro de la matriz y dan cuenta del flujo de las lavas, las texturas vesiculares en las rocas sanas son precursoras de las texturas amigdaloides contenedoras de ópalo.

En las muestras alteradas (Figura 16) las esferulitas presentan un aspecto turbio debido al reemplazamiento del feldespato-K por cristales de grano fino de caolín, el mismo aspecto presentan los fenocristales aislados de sanidina, el cuarzo no exhibe muestras de alteración por lo que la alteración de la roca es de tipo previsiva selectiva, la hematita ocurre como halos de alteración de los minerales opacos y en forma diseminada en la mayoría de las muestras alteradas, también se encuentran en los bordes de amígdalas rellenas de ópalo. El ópalo se observa relleno de vesículas y presenta un carácter óptico isótropo, el cual se discutirá en el apartado de difracción de rayos x, en algunas muestras es posible observar cristales de cuarzo subhedrales de grano fino que crecen en los bordes de las amígdalas.

Capítulo 3. Campo y geoquímica

Existen 2 etapas principales relacionados a la erupción de las riolitas con base a su textura y observaciones petrográficas, el primer evento se forman minerales esenciales y accesorios de la riolita, durante la cristalización, el escape de gases forma las vesículas. Las etapas posteriores generan las alteraciones, en donde fluidos hidrotermales desprenden el contenido de Al, K, Na, Fe, de la roca para formar caolinita, óxidos de Fe y ópalo principalmente, (ver capítulo de geoquímica).

Las abreviaturas utilizadas en la descripción de las fotomicrografías se tomaron a partir de Whitney y Evans, (2010): **NX**=nicoles cruzados, **L.P.P**=luz polarizada paralela, **Qz**=cuarzo, **Sa**=sanidina, **Zrn**=zircón, **Opl**=ópalo, **Kln**=caolinita, **Opq**=mineral opaco **Pl**=plagioclasa, **Oh**=óxidos de hierro.

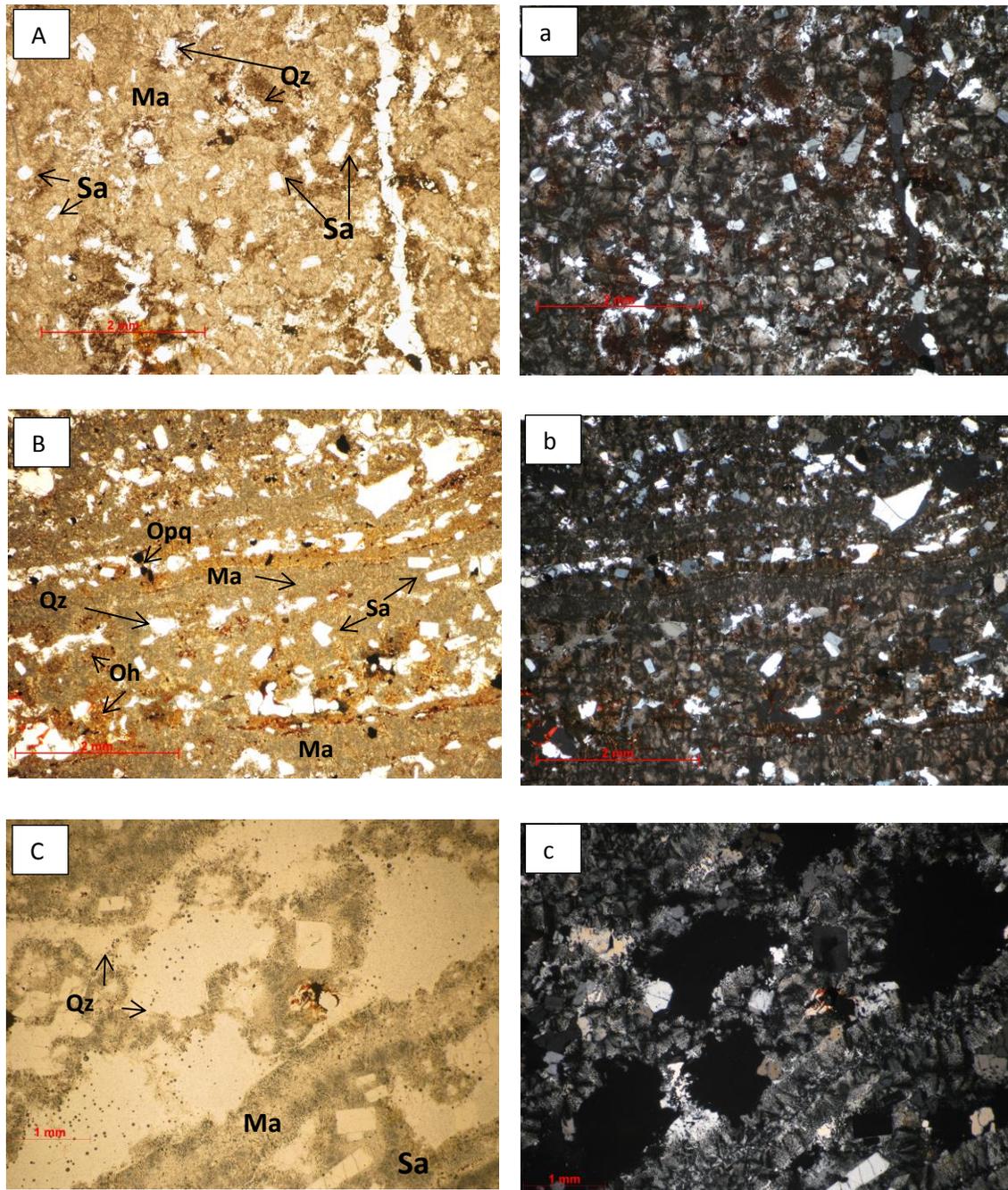


Figura 13. Fotomicrografías de texturas en las riolitas, con luz polarizada paralela (izquierda) y nicols cruzados (derecha). A-a) Textura porfídica, microfenocristales de cuarzo y sanidina embebidos en matriz de grano fino formada por esferulitas. B-b) Cristales alineados según el flujo de las lavas riolíticas, en la imagen con L.P.P es posible observar cristales de minerales opacos. C-c) Textura vesicular en la roca sana, en la fotografía con luz paralela se observan vesículas de 1 a 2 mm de longitud, con N.X se aprecian algunos cristales de cuarzo que crecen en los bordes de las vesículas, en la zona inferior derecha se aprecian cristales tabulares de sanidina.

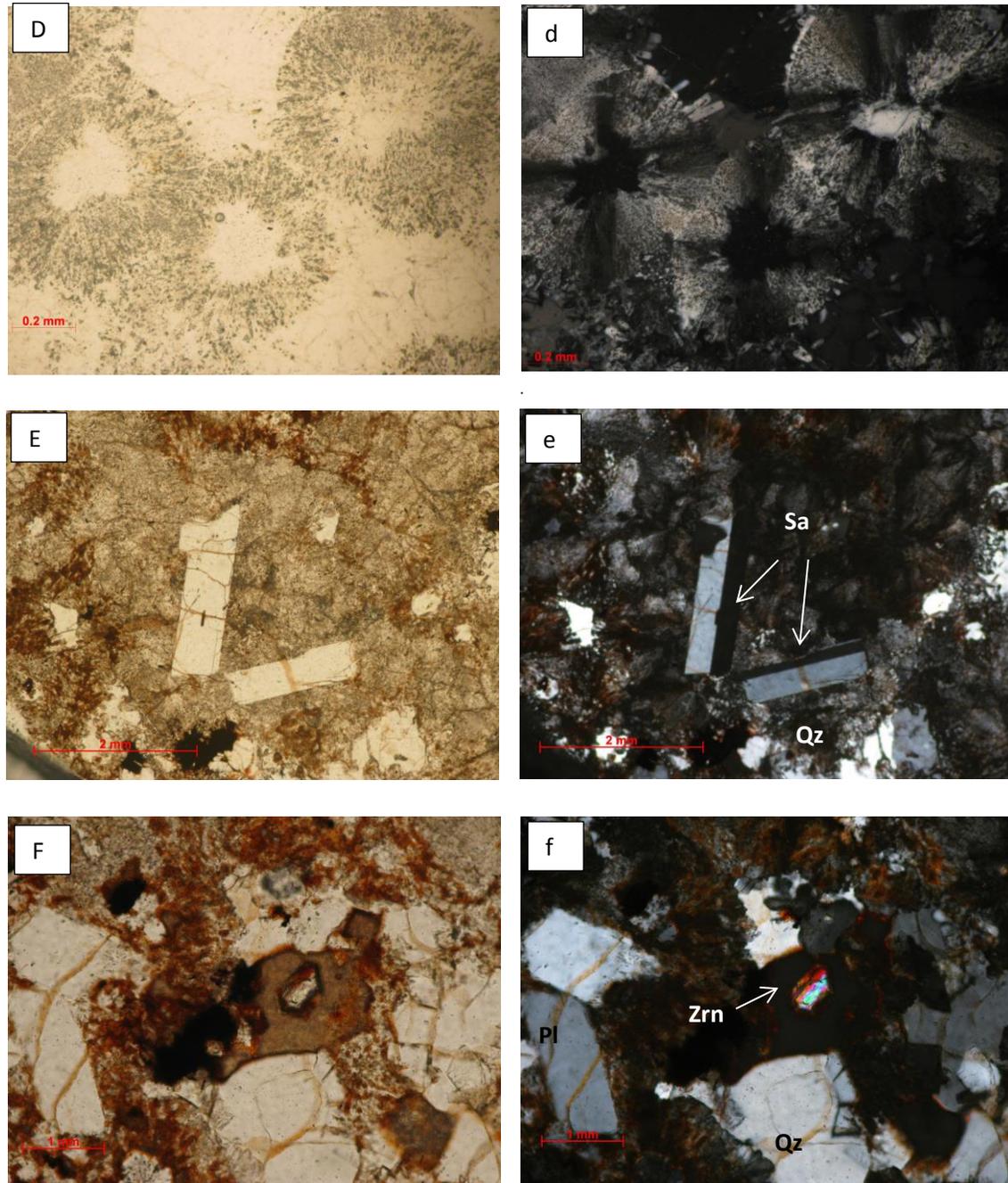


Figura 14. Fotomicrografías diversas. D-d) Textura esferulítica, la microfotografía muestra en detalle esferulitas, consisten en un crecimiento radial de cristales de grano muy fino, la formación de esferulitas adyacentes conforman la matriz de las riolitas, en la parte inferior izquierda de la imagen se observan cristales de cuarzo. E-e) Cristales prismáticos ehuedrales de sanidina rodeados por las matriz esferulítica, con N.C se aprecia el maclado de carlsbad típico de las sanidinas. F-f) Cristal ehuedral de Zircón, con L.P.P se aprecian óxidos de hierro arriba y a la izquierda de la imagen y minerales opacos en la parte inferior, con N.C se observan cristales de plagioclasa y cuarzo rodeando el zircón.

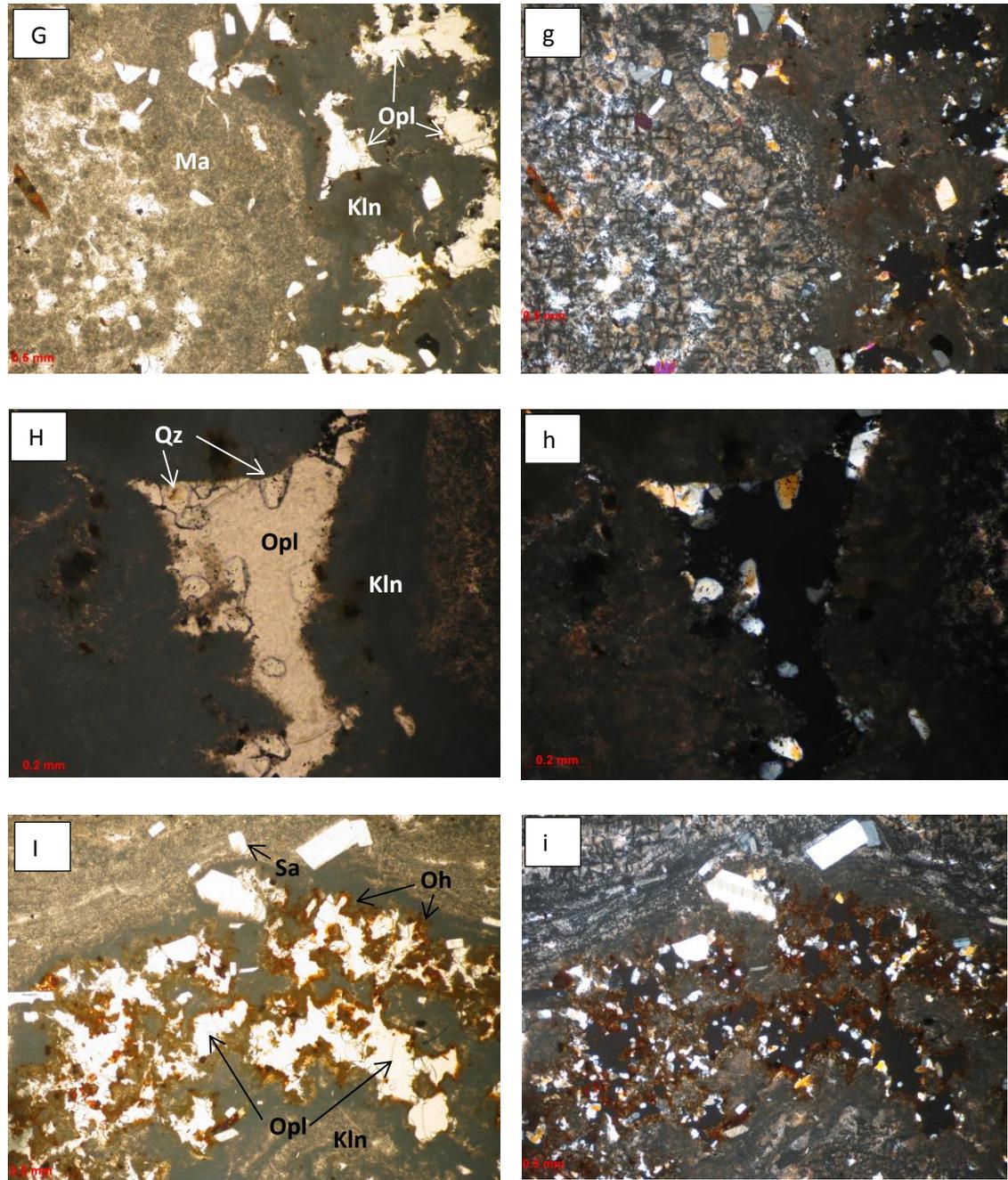


Figura 15. Fotomicrografías de Ópalos. G-g) Ópalos relleno vesículas, rodeados por caolinita y óxidos de hierro, a la izquierda de la imagen con L.P.P se observa la matriz de la riolitas sin alteración y con N.X los ópalos muestran su carácter isotrópico. H-h) Inclusiones de cuarzo dentro del ópalo de aproximadamente 0.1mm, las inclusiones crecen de los bordes de la vesícula, con L.P.P se distinguen por su forma y relieve diferentes al del ópalo. I-i) Ópalos dentro de la matriz totalmente alterada a caolinita, con L.P.P se distinguen minerales opacos diseminados dentro de la matriz y óxidos de hierro rodeando los ópalos.

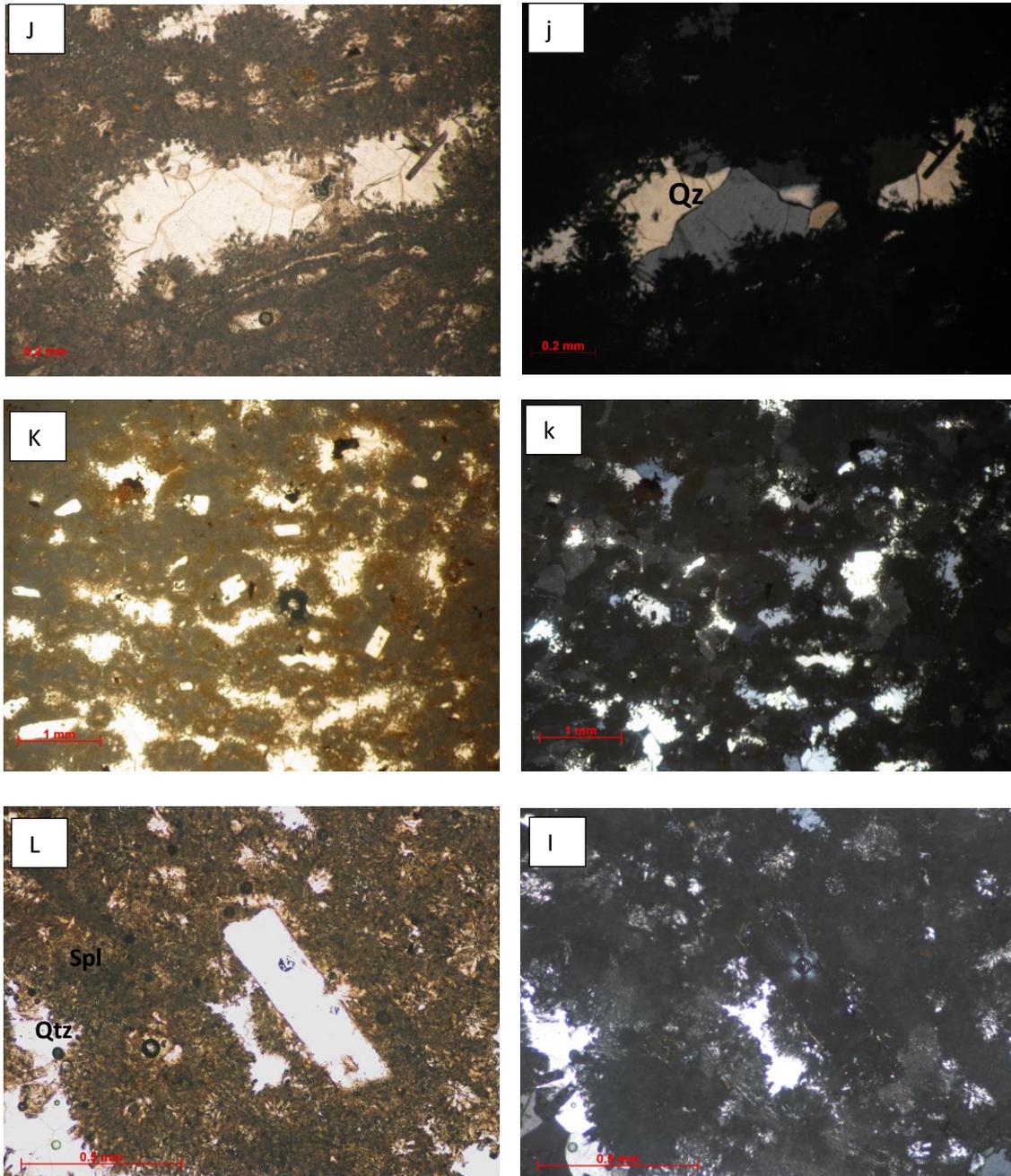


Figura 16. Texturas de alteración. J-J) Alteración pervasiva, con L.P.P la matriz exhibe un aspecto turbio debido al reemplazamiento de feldespato por caolinita, al centro de la imagen cuarzo inalterado. K-k) Marcas de cristales, con el analizador insertado las marcas de cristales de feldespato se oscurecen independientemente de su orientación. L-l) Marca de cristal de sanidina, rodeado por esferulitas.

3.4 Geoquímica de las riolitas

Un modo simple de visualizar la composición química de una roca es como una mezcla de óxidos que por lo general conforman la química mineralógica de la roca. Los elementos cuyos óxidos se presentan en cantidades mayores al 1% en peso se denominan mayores, y aquellos que van del .1 al 1% se les llama menores. Aquellos elementos cuya presencia es menor al .1% en peso se denominan traza y se expresan en ppm (partes por millón) donde 1%=10,000ppm. En la tabla 4 se muestra la composición química de los elementos mayores de la riolita La Trinidad.

Tabla 4. Composición química de los elementos mayores de la riolita La Trinidad, determinada por Fluorescencia de rayos x.

Elementos mayores (% en peso)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PxC	Total
76.3	0.124	11.963	2.52	0.011	0.136	0.019	2.69	4.19	0.01	2.01	99.887

Nota: Los valores utilizados en las gráficas fueron ajustados al 100%; PxC=Perdida por calcinación.

Las características químicas que presentan la roca son las siguientes (dadas como porcentaje en peso): el contenido de SiO₂ es de 76.3 %, Al₂O₃ (11.963%), Na₂O+K₂O (6.88%), Fe₂O₃ (2.52%), MgO (0.136%), MnO (0.011%) y CaO (0.019). De acuerdo a este contenido en sílice y su contenido total en álcalis, la roca es clasificada geoquímicamente como riolita subalcalina (Figura 17). Los valores promedio de SiO₂ y álcalis (K₂O+ Na₂O) para una riolita según Best (2003), son de 73.95% y 6.5% respectivamente, tomando en cuenta estos datos, el alto contenido de SiO₂ de la riolita La Trinidad, es debido a una silicificación.

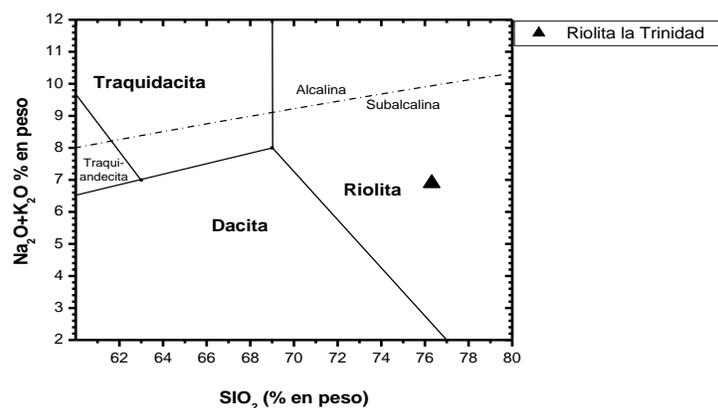


Figura 17. Detalle del diagrama de clasificación TAS, sílice contara álcalis (Le Maitre *et al.*, 2002), se incluye la línea para diferenciar la serie alcalina de la Subalcalina.

3.4.1 Mineralogía de Alteración.

Thompson (1996) enfatiza el estudio de la mineralogía de alteración como una herramienta para entender los procesos generadores de depósitos formados por actividad hidrotermal, en un sentido práctico dicho estudio documenta la post-formación de la roca, la alteración secundaria de las rocas refleja la interacción de un fluido dominado por agua, en la que la temperatura del fluido oscila entre los 100 a los 500 °C, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre. Respecto al origen de los fluidos que generan sistemas hidrotermales Pirajno, (1987) concluye que los magmas que consolidan cerca de la superficie son afectados por fluidos de origen meteórico-magmático, donde la sílice es removida de la roca encajonante, es transportada y subsecuentemente depositada en respuesta a cambios de temperatura, esta puede ser introducida en los espacio de la roca por los fluidos ya enriquecidos en sílice, y depositada en los espacios de la roca en un estado plástico gelatinoso (gel de sílice) (Koivula *et al.*, 1983).

La mineralogía de alteración en las rocas de la concesión minera La Guadalupana es de tres tipos: la primera de ellas (MARO) es dominada por Hematita - goethita - caolinita - cuarzo (Figura 18) y la segunda (MA) por caolinita-cuarzo (Figura 18a) y la tercera corresponde a una silicificación, de acuerdo a datos de difracción de rayos X.

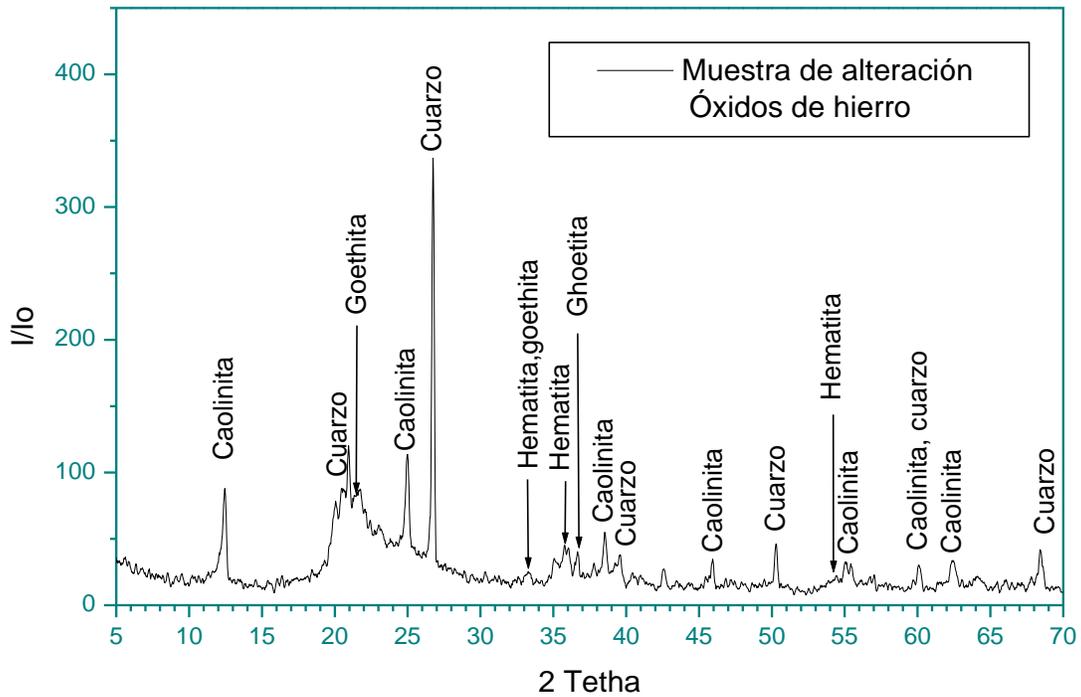


Figura 18. Difractograma de la alteración MARO, las fases presentes son: hematita, goethita –limonita, caolinita y cuarzo.

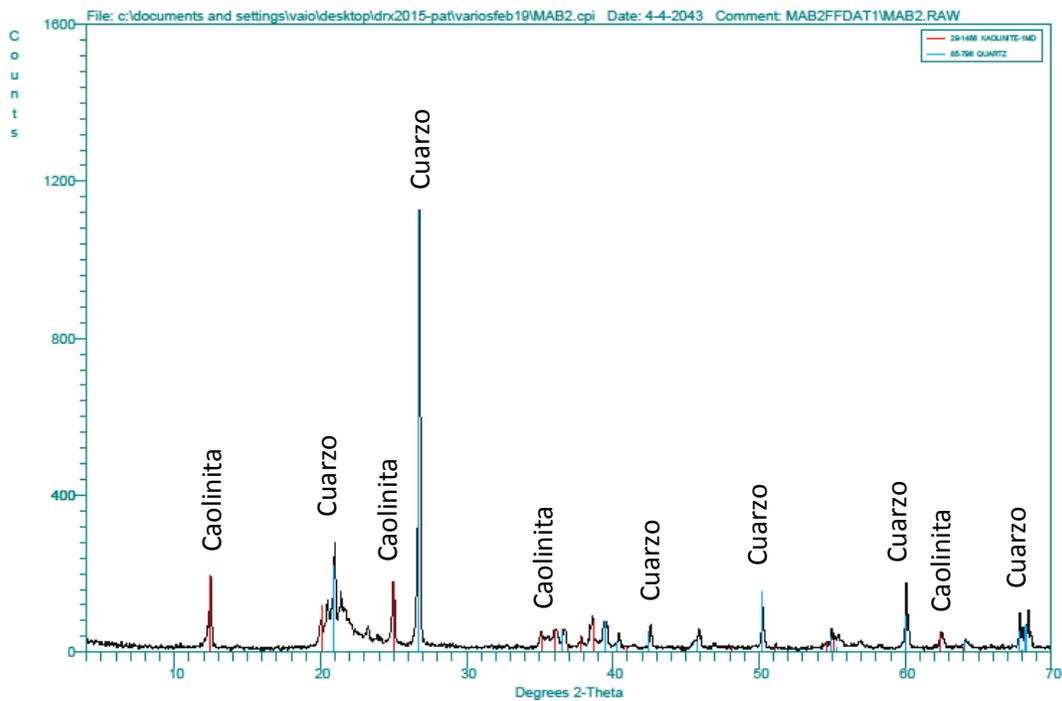


Figura 18a. Difractograma de la alteración MA, las fases minerales son de caolinita y cuarzo.

Capítulo 3. Campo y geoquímica

La composición química de los elementos mayores y menores de las alteraciones presentes en las rocas de la concesión minera La Guadalupana se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química de los elementos mayores y menores de las alteraciones presentes en la riolita La Trinidad, determinada por Fluorescencia de rayos x.

<i>Elementos mayores y menores (% en peso)</i>											
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PxC	Total
<i>Alteración Argílica (MA)</i>											
77.951	0.146	10.54	2.363	0.021	0.064	0.16	3.918	4.305	0.03	0.501	100.044
<i>Alteración compuesta por óxidos e hidróxidos de hierro (MARO)</i>											
75.339	0.305	15.912	3.087	0.014	0.164	0.162	0.001	0.12	0.044	2.26	95.191

Nota: Los valores utilizados en las gráficas fueron ajustados al 100%; PxC=Perdida por calcinación.

Las alteraciones presentes en las rocas La Trinidad están representadas en los diagramas de variación Harker de sílice contra elementos mayores (Figura 19), y no obstante la geoquímica es diferente para cada una de las alteraciones, ambas tienen en común la roca de procedencia, es por ello, para fines comparativos, y de interpretación, que se graficaron en un solo diagrama. Los diagramas Harker de la alteración MA, muestran que existe un aumento en el contenido de SiO₂ de la alteración respecto a las riolitas, un enriquecimiento en el contenido de álcalis y una disminución en el contenido de Al₂O₃, que de acuerdo a Thompson (1996) es característico de la alteración argílica, aunado a ello también existe una disminución en el contenido de MgO, mientras que no se observan cambios en el contenido de óxidos de hierro. Para la alteración MARO se observa una ligera disminución en el contenido de sílice, un aumento en el contenido de Al₂O₃, TiO₂, MgO y óxidos de Fe, mientras que el contenido de álcalis es disminuido, el contenido de CaO aumenta.

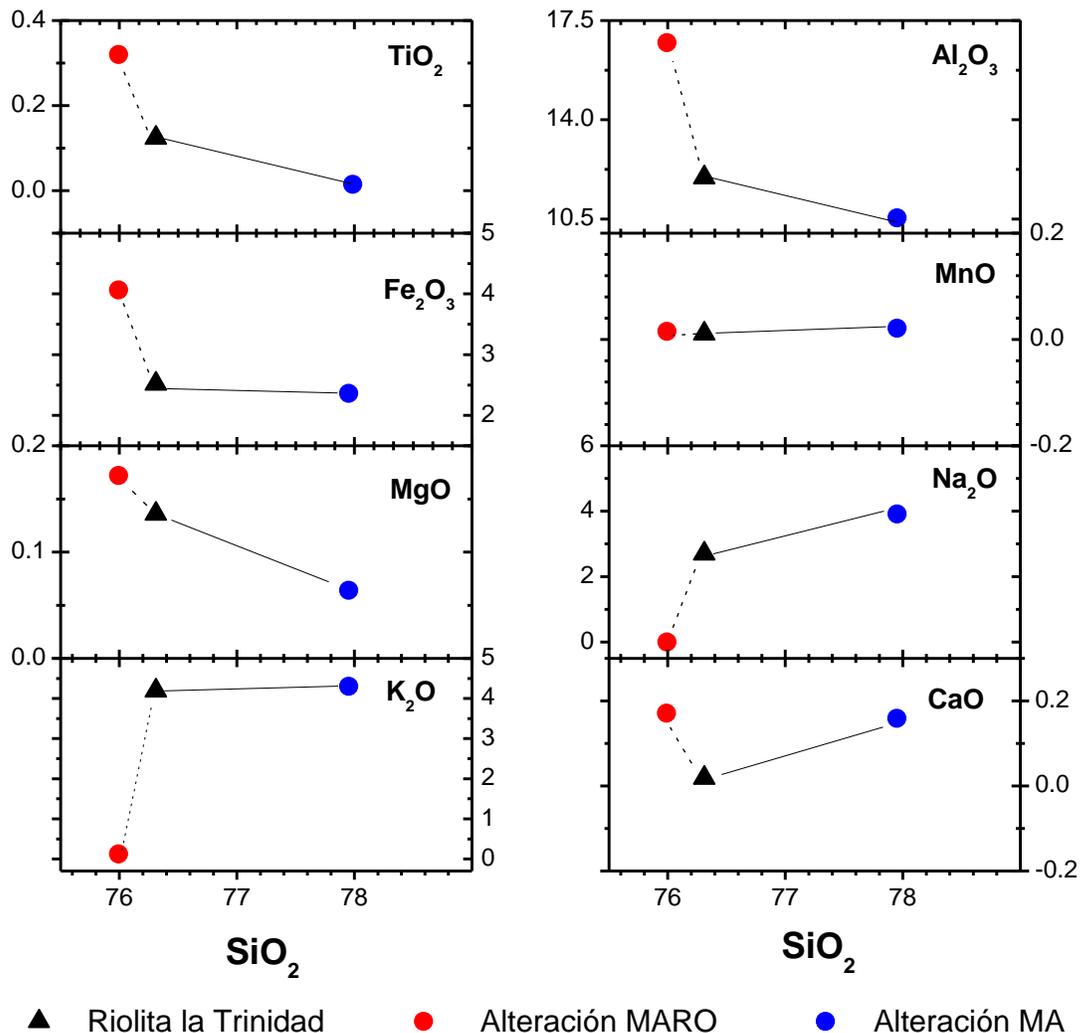


Figura 19. Diagramas Harker de Sílice contra elementos mayores (% en peso). La línea continua representa una aproximación de la movilidad de los elementos mayores entre la Riolita y la alteración argílica (MA), la línea discontinua representa la movilidad de los elementos de la riolita y la alteración Hematita-Goethita (MARO).

3.5 Geoquímica de los ópalos

El ópalo no es una forma pura de SiO₂, contiene agua, algunas impurezas y elementos traza pueden entrar en su estructura, a pesar de una ausencia de estructura cristalográfica bien definida y por consiguiente las ausencia de una estequiometría, existen relaciones de sustitución en los ópalos. Los Átomos de silicio pueden ser sustituidos por átomos de aluminio o por átomos de hierro (III), el reemplazamiento de Si⁺⁴ por Al⁺⁴ o por Fe⁺³ induce un desequilibrio de cargas, la cual es compensada por el aporte de iones monovalentes de Na⁺, K⁺ o iones divalentes de Ca⁺², Ba⁺² o Mg⁺². (Gaillou., *et al*/2008).

3.5.1 Elementos mayores y menores.

En la tabla 5 se muestra la composición química de los elementos mayores y menores de 3 ópalos.

Tabla 5. Composición química de los elementos mayores y menores de 3 ópalos proveniente de la concesión minera La Guadalupana, determinada mediante Fluorescencia de rayos x.

<i>Elementos mayores y menores (% en peso)</i>											
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PxC	Total
<i>Ópalo incoloro C-T</i>											
95.707	0.016	0.361	0.187	0.013	0.015	0.148	0.001	0.035	0.014	1.12	97.61
<i>Ópalo C-T Girasol</i>											
95.696	0.075	1.119	0.375	0.009	0.193	0.171	0.01	0.126	0.015	0	97.76
<i>Ópalo común C-T de fuego</i>											
93.838	0.056	2.057	0.642	0.01	0.155	0.169	0.131	0.517	0.011	0	97.58

Nota: Los valores utilizados en las gráficas fueron ajustados al 100%; PxC=Perdida por calcinación.

El orden promedio decreciente de las principales impurezas en los ópalos en porcentaje en peso es como sigue: el contenido de Sílice es de (93.838 a 95.707 %), Al₂O₃ (0.361 a 2.05%), Fe₂O₃ (0.19 a 0.64%), CaO (0.148 a 0.171%), Na₂O (0.001 a 0.13%), K₂O (0.035 a 0.517 %). En diagrama Multi-elementos mayores (Figura 20), se graficó la relación entre el ópalo de fuego-riolita y ópalo de fuego-alteraciones, se

excluyó de los diagramas a el SiO₂ para una mejor visualización de los elementos mayores restantes.

Las líneas que representan el contenido en elementos mayores en la figura 20-A (ópalo-riolita) muestran patrones similares en los óxidos de Al, Fe, Na, y K, las línea en el diagrama Ópalo-Alteración argílica (Figura 20-B) muestra que existe una tendencia similar para los óxidos de Al, Fe, K , y en menor medida para el Na, mientras que las líneas Ópalo –Goethita (Figura 20-B) muestra un patrón similar para los elementos Al, Fe, y en menor medida para el K. En los tres patrones analizados, las concentraciones en los ópalos son menores respecto a las riolitas, lo que nos indica que estas provienen de la dilución de la roca encajonante, es decir que existe una estrecha relación de la geoquímica del ópalo y su roca caja.

Siguiendo esta línea de pensamiento se graficaron en diagramas Harker las distintas composiciones esenciales de los 3 ópalos, con el propósito de conocer si existe una relación de la geoquímica con el color de los mismos. En el diagrama Harker, Sílice contra elementos mayores y menores (Figura 21), se observan tendencias de las 3 muestras graficadas, en general existe una disminución progresiva respecto al contenido de SiO₂ de las muestra ópalo-común-rojo a la muestra ópalo común-incoloro, esta pérdida de SiO₂ es compensada por un aumento progresivo en el contenido de Fe₂O₃, Al₂O₃, y Na₂O y K₂O. En este trabajo se ha puesto especial énfasis en el contenido de hierro por ser un elemento de transición que actúa como agente colorante en gemas.

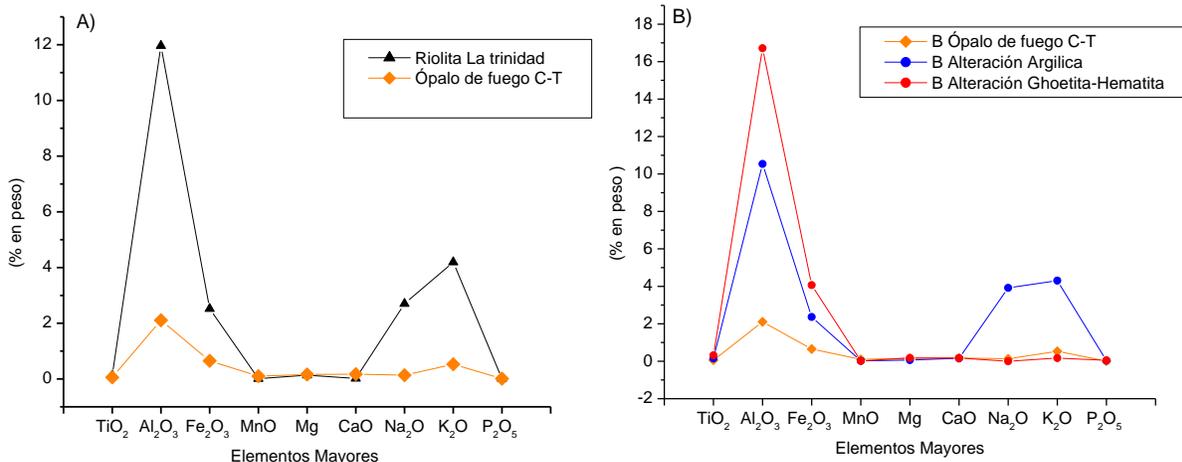


Figura 20. Diagrama multi-elementos mayores y menores, expresado como porcentaje en peso. A) Relacion del ópalo de fuego y su roca caja. B) Relacion del ópalo de fuego y las alteraciones presentes.

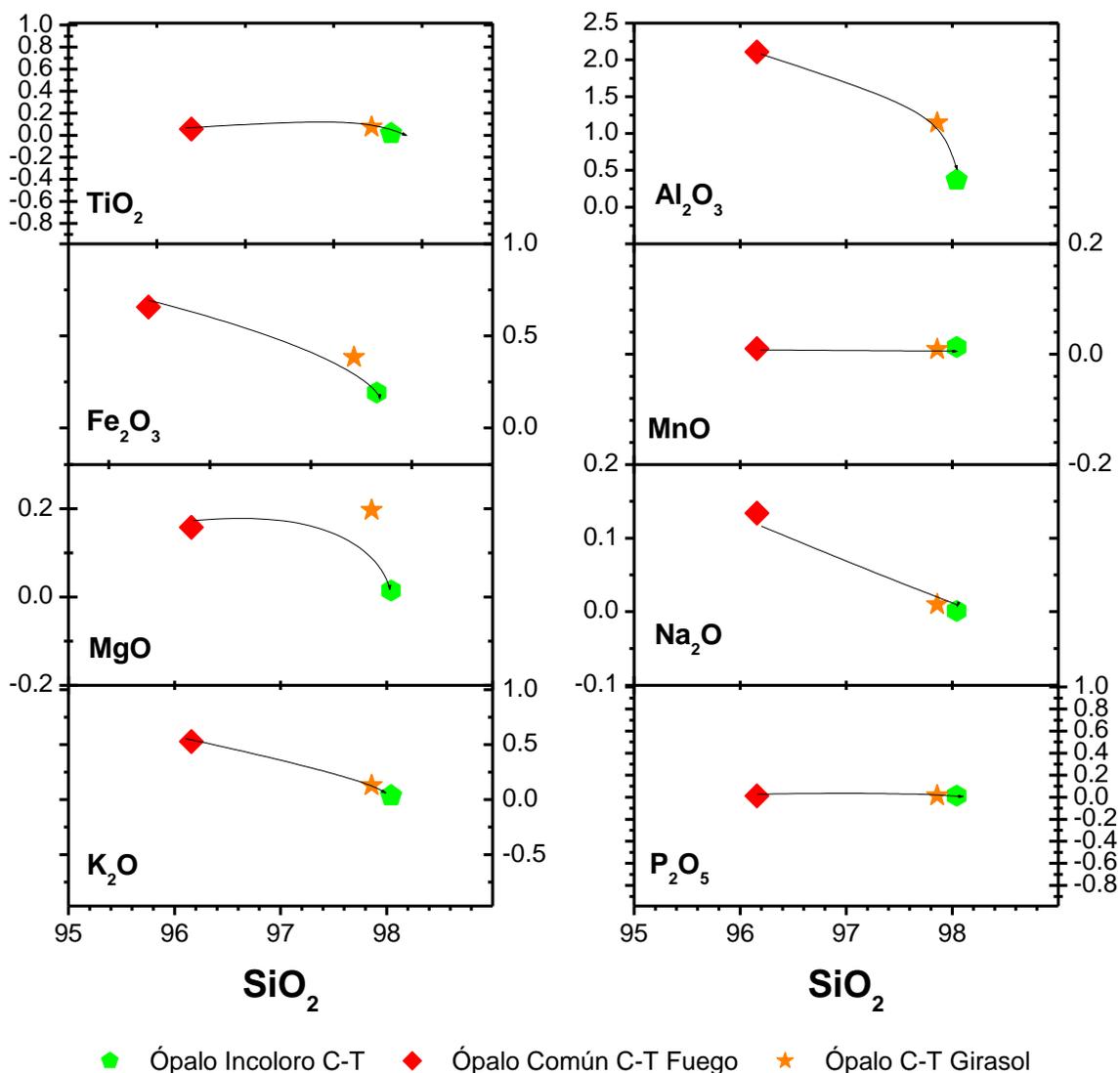


Figura 21. Diagrama Harker de Sílice contra elementos mayores y menores en ópalos. Las líneas representan una aproximación a la variación de los elementos mayores en muestras de ópalo de fuego respecto al ópalo incoloro. Existe un aumento en contenido de Fe₂O₃, Al₂O₃, y Na₂O y K₂O de ópalo incoloro a los ópalos girasol y de fuego.

3.5.2 Elementos Traza

Las concentraciones de elementos traza en ppm, en un ópalo C-T Girasol y un ópalo común C-T de fuego provenientes de la concesión minera La Guadalupana, son mostradas en la tabla 6. Entre los elementos traza más importantes en los ópalos de coloración rojo -anaranjada dados en ppm, se encuentran, en orden decreciente: Zr(112-157ppm), Ba(112-127ppm), Rb(16-14ppm), Nb(9-13ppm), Y(9-12ppm), Pb(6-18ppm), Zn(5-10ppm), Cu(4-14ppm), Th(5ppm), Sr(3-4ppm) y V(2-4ppm), los que de acuerdo a Gaillou (2008), son impurezas típicas de los silicatos.

Tabla 6. Concentración de elementos traza en ppm, en un ópalo noble- anaranjado y un ópalo noble de fuego provenientes de la Trinidad.

	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	Elementos Traza (ppm)													
<i>Ópalo C-T Girasol</i>	16	3	112	12	112	9	4	3	0	6	14	10	5	18
<i>Ópalo común C-T de fuego</i>	14	4	127	9	157	13	2	2	0	6	4	5	5	6

Las altas concentraciones de Ba en los ópalos puede ser utilizado como un criterio para distinguir entre un ambiente volcánico o uno sedimentario, Gaillou (2008) propone para ópalos de origen ígneo concentraciones de Ba menores a 120 ppm, para el caso de las muestras Ópalo Rojo-común C-T dicha concentración es 127 (ppm), ligeramente mayor a la establecida, mientras para la muestra Ópalo anaranjado la concentración es de 112 ppm y cae dentro del rango. Las altas concentraciones de Ba en este trabajo son atribuidas a la movilidad de este elemento durante el recorrido de la sílice a través de las riolitas, porque el Ba se caracteriza por pertenecer a los elementos más móviles bajo condiciones de alteración hidrotermal e interperismo, ya que forma iones muy grandes para ajustarse a los sitios catiónicos y es excluido de las fases cristalinas (Rollinson, 1993; Gill, 2015).

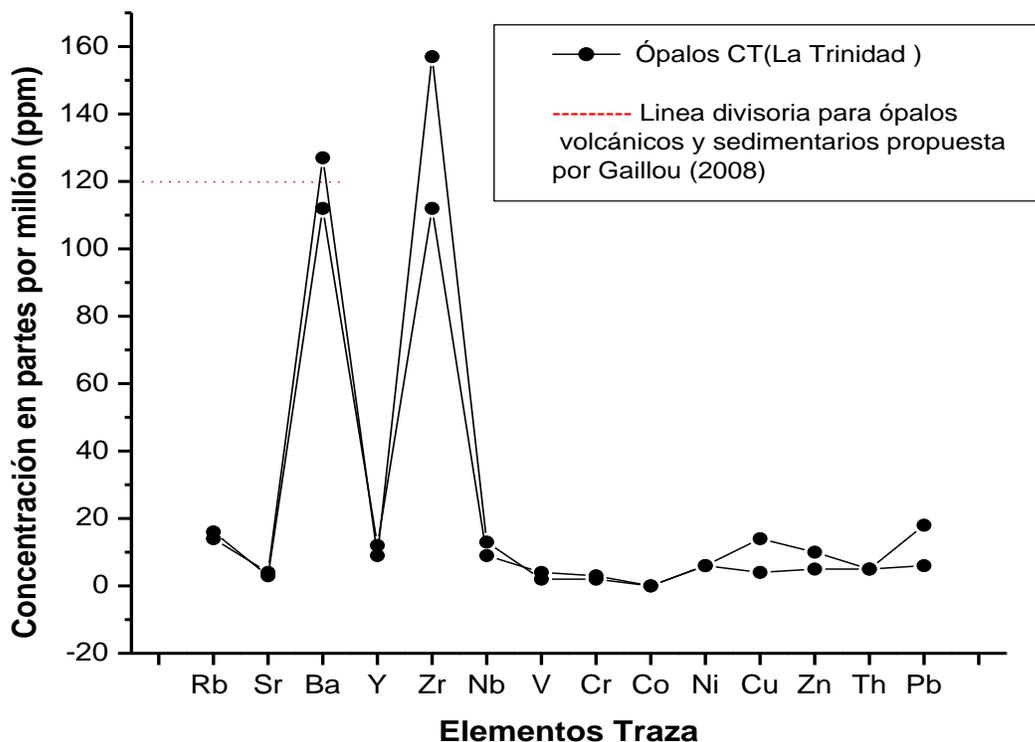


Figura 22 .Gráfica multi-elementos Traza expresada en ppm. La línea punteada roja, denota la división entre ópalos de origen volcánico y ópalos sedimentarios.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos de las concentraciones de elementos traza, se graficaron (Figura 22a), y se cotejaron con ópalos de origen volcánico y sedimentario, los datos se tomaron según: Kazajistán, Australia y Brasil, Gaillou *et al.*, (2008); Etiopía, Rondeau *et al.*, (2010); Madagascar, Simoni *et al.*, (2010). Las concentraciones de Zr y Nb en ópalos de La Trinidad son relativamente grandes respecto a los ópalos de las diferentes localidades, mientras que no se observan cambios notables para los demás elementos.

Capítulo 3. Campo y geoquímica

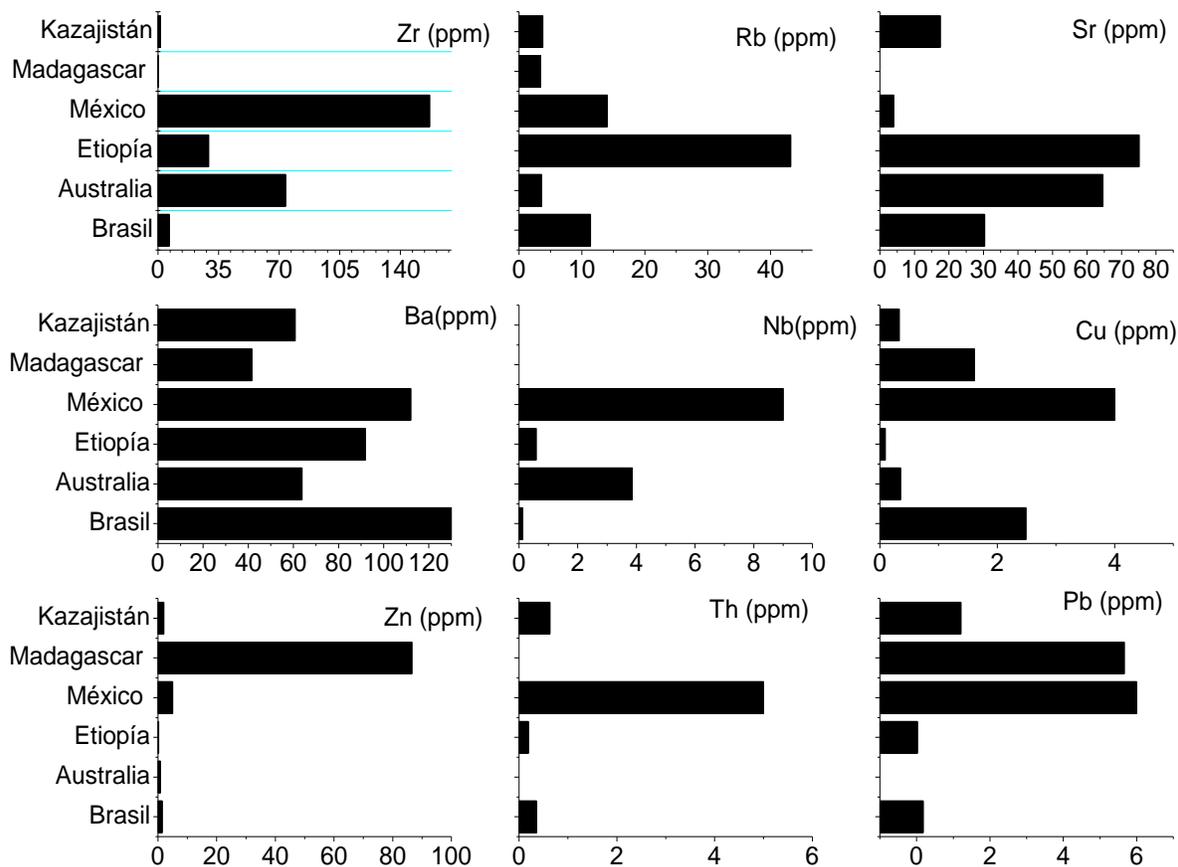


Figura 22a. Gráfica comparativa de las principales concentraciones de elementos traza en ppm de ópalos de origen sedimentario (Australia y Brasil) y volcánico (México, Etiopía, Kazajistán, Madagascar). Las concentraciones de Zr y Nb en ópalos de La Trinidad destacan de los ópalos de otras localidades.

3.6 Difracción de Rayos en ópalos

Los patrones de difracción de rayos X para ópalo C-T se caracterizan por tres bandas intensas de difracción, la más intensa de ellas ocurre alrededor de los 4.11 a los 4.05 Å (21.74 a 22.00 para el ángulo 2Θ), que corresponden a la superposición de cristobalita- α y tridimita- α , con un hombro a alrededor de 4.32 (20.72) que corresponde a tridimita- α , y también existe un pico de 2.50 Å para un ángulo 2Θ a 35.90° (Wilson, 2014). La forma para distinguir entre el ópalo-C del Ópalo C-T, es que para este último existe un pico subsidiario u hombro que ocurre en un ángulo 2Θ de 20.5, cuya distancia interplanar d es 4.33 y corresponde con la de la tridimita- α , además existe un pico adicional de 2.50 para un ángulo 2Θ de 35.86 (Elzea y Rice, 1996)

Los patrones de difracción de rayos X fueron comparadas con las tarjetas 11-695 y 18-1170 correspondientes a Cristobalita- α (tetragonal) y tridimita- α (monoclínica). Las principales bandas de difracción y sus intensidades relativas son mostradas en la tabla 7.

Tabla 7 Principales distancias interplanares e intensidades relativas de los polimorfos de sílice de baja temperatura

Tridimita- α	D	4.11	4.33	3.82	4.82
	I/i	(100)	(90)	(50)	(90)
Cristobalita- α	D	4.05	2.50	2.84	4.05
	I/i	(100)	(20)	(14)	(100)
Cuarzo	D	3.34	4.25	1.82	1.54
	I/i	(100)	(22)	(14)	(9)

El patrón de difracción de rayos x de los ópalos analizados, muestran una banda de difracción amplia que va de los 19 a los 24 para el ángulo 2Θ , en esta banda se superponen las principales líneas de difracción que corresponden con cristobalita y tridimita de baja temperatura. Los patrones de DRX de la 3 muestras analizadas, muestran una banda de difracción amplia que va de los 19° a los 24° para el ángulo 2Θ , donde existen 2 picos que definen al ópalo C-T, el primero de ellos ocurre en 21.71° cuyo valor d es 4.1 \AA , y el segundo es de 21.93° cuyo valor d es de 4.05 \AA , se observan un hombro de 4.3 \AA para un ángulo 2Θ de 20.63 que corresponde a tridimita- α , y otro pico a 35.83° con un valor $d= 2.50$ correspondiente a cristobalita- α .

Los difractogramas de la muestra de ópalo común-rojo y ópalo común incoloro además de las principales líneas de difracción que definen al ópalo C-T, muestra 3 picos adicionales que corresponden a cuarzo (Figura 24 y 24a), los cuales no son observados para la muestra de ópalo anaranjado (figura 23), por lo que en este trabajo se le considera como inclusión anterior a la formación del ópalo (ver capítulo de petrografía) dentro de la estructura del ópalo. El ensanchamiento que presenta los patrones de difracción de rayos X para ópalos C-T ha sido atribuido a la superposición de capas de tridimita y cristobalita apiladas en una matriz de sílice amorfa a bajas temperaturas ya que los materiales totalmente cristalinos producen picos de difracción muy bien definidos cuyas anchuras se relacionan con el índice de la cristalinidad. La estructura a corto alcance que poseen los ópalos es la razón principal para la isotropía que exhiben cuando se analizan con luz polarizada.

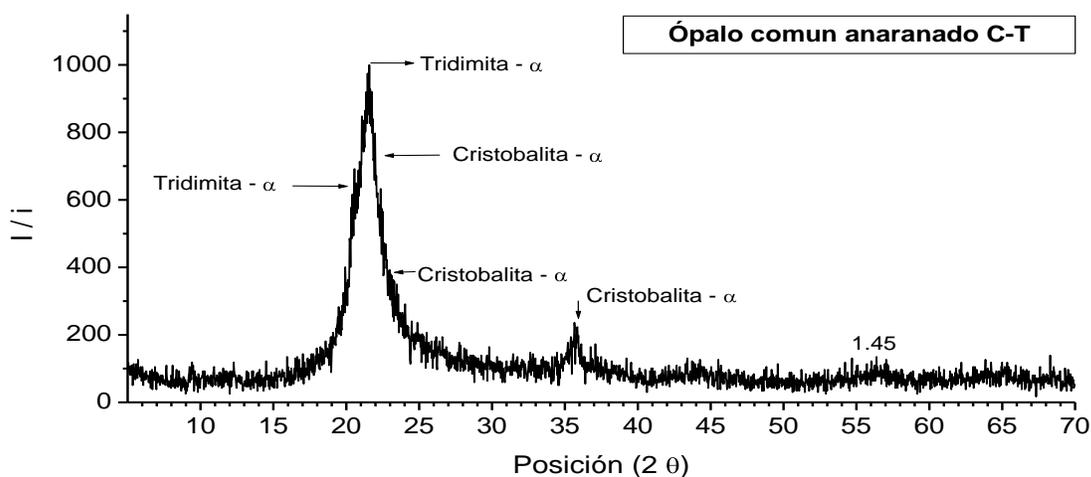


Figura 23. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común anaranjado tipo C-T. Los principales picos de difracción corresponden a cristobalita y tridimita de baja temperatura.

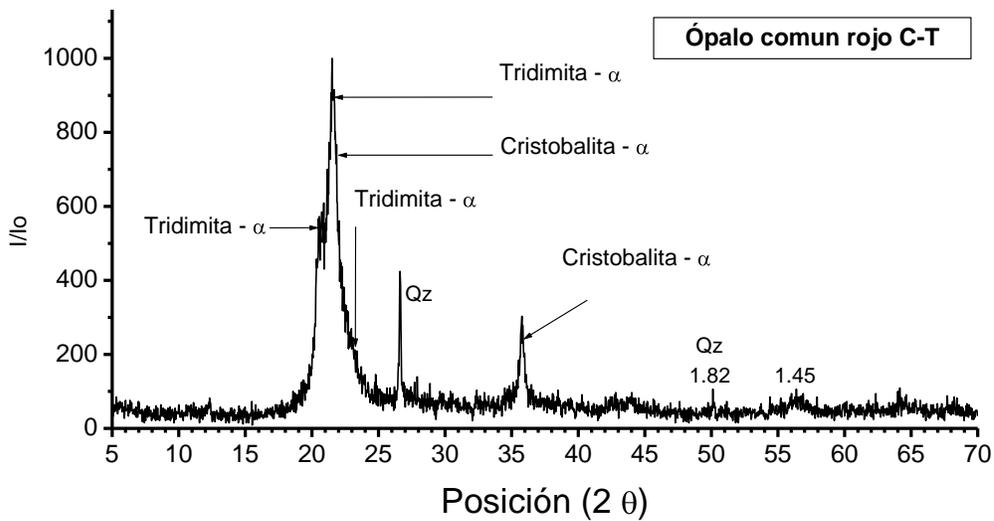


Figura 24. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común anaranjado tipo C-T con inclusiones de cuarzo. Los principales picos de difracción corresponden a cristobalita y tridimita de baja temperatura, existen picos adicionales pertenecientes a inclusiones de cuarzo dentro de la estructura del ópalo.

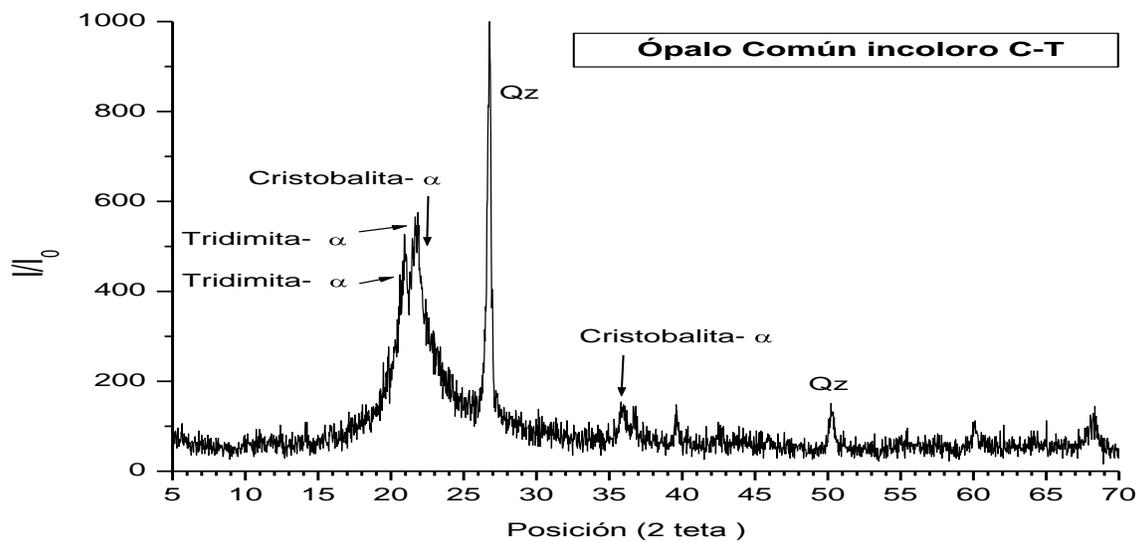


Figura 24a. Patrón de difracción de rayos x de un ópalo-común incoloro tipo C-T con inclusiones de cuarzo. Los principales picos de difracción corresponden a cristobalita y tridimita de baja temperatura, con picos adicionales pertenecientes a inclusiones de cuarzo dentro de la estructura del ópalo.

Capítulo 4. Propiedades gemológicas.

De aquella gota en prisión, en celdas rojizas rocas, ópalo en aparición, de aquel mar de piedras rotas.

José Gilberto Herrera.

4.1 Propiedades Gemológicas de identificación.

Las diferentes propiedades y características que se emplean en la identificación de una piedra preciosa son todos aquellos rasgos visibles o medibles, entre las propiedades no destructivas las principales son: color, índice de refracción, peso específico, carácter óptico, efectos ópticos, inclusiones y su espectro Raman. En este apartado se discuten: el juego de colores, el índice de refracción, el peso específico, inclusiones y los espectros Raman en ópalos, y final del mismo se presenta una tabla con estas características y la evaluación de su calidad en términos de su color, Transparencia (clarity), corte (cut) y peso (carat) (ver tabla 9).

4.2 Juego de colores (efecto óptico).

El efecto óptico consiste en destellos de diferentes colores del espectro de luz visible, causados por la difracción de la luz (ver página 12), en los ópalos este fenómeno puede variar en intensidad, rango y patrón. La intensidad se mide mediante una inspección visual y va de: débil, intermedia a alta. El rango es variable y está en función del color o colores que presenta la gema al moverla o rotarla. El patrón o arreglo es la forma que presentan los destellos, existen cuatro patrones principales para describir el arreglo del juego de colores, estos son:

- a) Mosaico.- Manchas de color, con formas angulosas y adyacentes entre sí.
- b) Flama.- Bandas de colores, principalmente rojizas, que se disparan a través de la piedra.
- c) Puntos.- Puntos de colores que destellan desde el interior de la piedra.
- d) Pavo real.- En forma de mosaico, predomina el color azul y verde.

La intensidad del juego de colores de los ópalos analizados de la trinidad es de intermedia a alta, en ellos no existe un rango predominante y es posible encontrar todos los colores del espectro visible, los patrones son en forma de mosaico, en flama y en puntos (ver tabla 9 al final de este capítulo).

4.3 Inclusiones

Se llaman inclusiones a diversas sustancias que se encuentran en el interior de la gemas, su estudio permite identificar la localidad o procedencia geográfica, ya que los distintos tipos de inclusiones están relacionados a su ambiente de formación y son características de cada yacimiento (O'Donoghue, 1988; Hulburt y Kammerling, 1993), conocer el origen de las gemas es útil a los comerciantes ya que las de ciertas localidades son más valiosas que otras por ejemplo, ópalo de fuego de México es más conocido, y por lo tanto más valioso, que cualquier otro ópalo de fuego en el mundo, y en función de esto son más fáciles de vender .

Las inclusiones en gemas naturales pueden ser divididas en 3 grupos:

Protogenéticas o preexistentes: Consisten en minerales (algunas veces pequeños cristales ehedrales) los cuales estaban presente antes de la formación del material huésped.

Singenéticas o contemporáneas: Son inclusiones formadas al mismo tiempo que el material huésped, pueden haber crecido de la misma solución que el cristal huésped. Se clasifican según el material que alojen en su interior:

- Monofásicas (solo líquido o solo gas)
- Bifásicas (líquido y gas)
- Trifásica (líquido, gas y sólido cristalino)

Epigenéticas (posterior): Inclusiones que se formaron después del crecimiento del cristal y estas pueden estar formadas por alteración química, o por penetración de material en grietas.

Esta clasificación resulta de gran interés científico, sin embargo algunas veces no es posible distinguir si la inclusión observada se trata de protogenética, singenética o epigenética y por lo tanto no tiene un valor práctico. Para propósitos descriptivos es más adecuado dividir las inclusiones en las siguientes categorías:

- 1.-Inclusiones sólidas. Pueden estar formas por material cristalino de la misma composición de la gema huésped o de otro material diferente.
- 2.-Cavidades rellenas de líquido, gas o ambos.
- 3.- Grietas y fisuras rellenas de gas, líquidos o sólidos.

Las observaciones de las inclusiones se realizaron en ópalos tipo matriz, y ópalos zoomorfos, y cabujones.

Las inclusiones encontradas en los ópalos matriz son sólidas, la primera de ellas se encuentra formada por cristales protogenéticos aciculares pseudomorfoseados por óxidos de hierro, estos cristales se encuentran cubiertos por ópalo hialita tipo-C (ver espectroscopía Raman). Se observaron cristales con formas prismáticas terminados en pirámides trigonales, estas inclusiones son sólidas protogenéticas, crecen de las paredes de las vesículas y se observaron en muestras de ópalo matriz, en cabujones y en especímenes ornamentales zoomorfos, son cristales de cuarzo los cuales son consistentes con los datos de difracción de rayos X (ver capítulo de difracción). Cristales con hábitos granulares de color rojizo-anaranjados se presentan como inclusiones protogenéticas dentro de algunas muestras de ópalo matriz, y en muestras zoomorfas, estas inclusiones se encontraron en mayor medida en muestras con colores rojos-anaranjados y están formadas por óxidos e hidróxidos de hierro. Los dos tipos de inclusiones se encuentran presentes en la todas las muestras de ópalo matriz y en las muestras zoomorfas. Agregados de cristales aciculares protogenéticos se encontraron en muestras de ópalo matriz y en muestras zoomorfas, con base en su morfología y su modo de ocurrencia se determinó que se trata de cristales de cristobalita (ver figura 25). La figura 25-E muestra cristales aciculares tabulares marrones que crecen de los bordes de una vesícula, la caracterización de inclusión semejantes fue realizada mediante DRX por Koivula (1983), quien determinó que se trata de cristales de hornblenda.

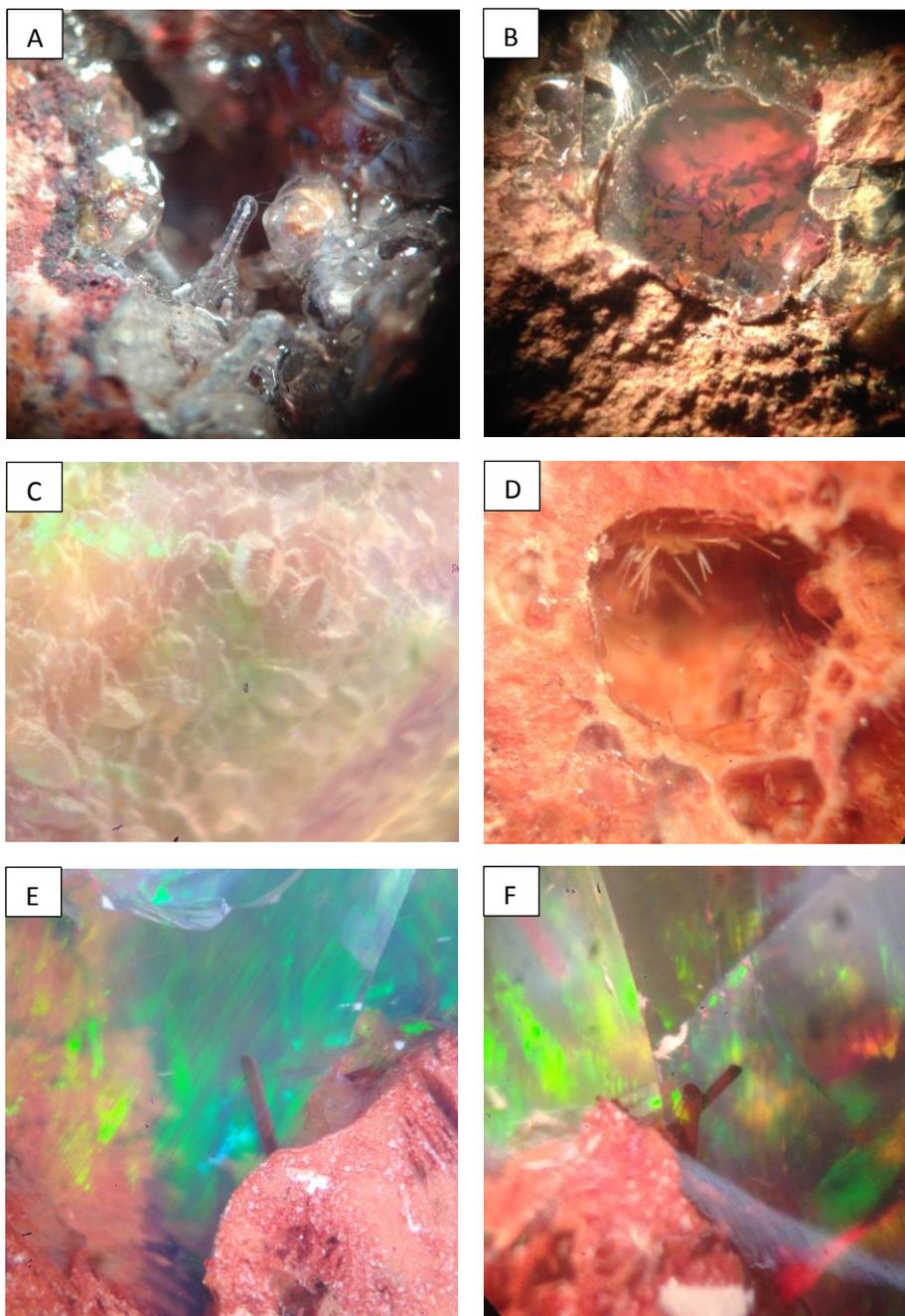


Figura 25. Inclusiones protogenéticas sólidas en ópalos .A) Cristal acicular pseudomorfoseado por óxidos de hierro, cubierto con ópalo-C, B) Inclusión de óxidos e hidróxidos de hierro en ópalo cantera. C) Cristales prismáticos hexagonales de cuarzo en ópalo cantera. D) Agregados aciculares de cristales de cristobalita que crecen en los bordes de una vesícula rellena de ópalo. E - F) Cristales aciculares de en especímenes zoomorfo y en cabujones.

4.4 Peso Específico.

El peso específico o gravedad relativa es una constante que puede ser de gran ayuda en la identificación gemas no montadas, es un número que expresa la relación entre su peso y el peso de un volumen igual de agua a 4 °C a esta temperatura la densidad del agua es máxima. En términos generales, para obtener el peso específico mediante una balanza hidrostática es el siguiente: La gema se pesa en el aire (W_a), se sumerge en el agua y se vuelve a pesar (W_w) la diferencia de ($W_w - W_a$) es igual a la pérdida de peso producida por la inmersión en agua o el peso de un volumen igual de agua, por lo tanto la expresión $\frac{W_a}{W_w - W_a}$ dará un número adimensional que el valor del peso específico. Los valores medidos en los ópalos estudiados van de 2.16-2.20, estos valores son semejantes a los obtenidos en ópalos naturales de 1.98-2.20 por O'Donaghue, 2006 y de 2.09-2.15 por Fritsch *et al.*, 2006.

4.5 Índice de refracción

Reflexión Y Refracción

En muchas gemas el índice de refracción es la propiedad más importante de las usadas para su identificación y a diferencia del peso específico puede ser medida en gemas montadas. Cuando un rayo de luz blanca pasa a través de un medio ligero a otro más denso parte de la luz se refleja en la superficie y parte de ella se transmite en la gema, la dirección de la luz transmitida es distinta a la de la luz incidente, se dice entonces que la luz se ha refractado, o que ha cambiado de dirección, este hecho es causado por que la luz viaja a diferente velocidad en medios diferentes, el ángulo de incidencia i y el ángulo de reflexión r son iguales y se miden respecto a la normal o perpendicular a la superficie, la porción de luz que entra en la piedra se *dobla* o refracta de la dirección del rayo incidente acercándose a la normal (Figura 26).

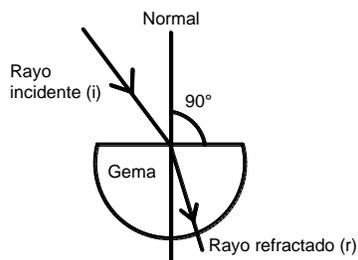


Figura 26. Refracción de la luz. La luz que se refracta cambia de dirección, este hecho es causado por que la luz viaja a diferente velocidad en medios diferentes

El ángulo de refracción r medido también respecto a la línea normal perpendicular es siempre menor que el ángulo de incidencia i . La cantidad de refracción depende de las diferencias de densidad entre los dos medio, cuanto mayor sea la diferencia de densidades y mayor el ángulo de incidencia mayor será la refracción. La ley óptica más importante en gemología es la ley de Snell, que relaciona el ángulo de incidencia (i) con el de refracción (r) y estipula que, *para dos medios constantes la relación $\text{sen } (i) : \text{sen } (r)$ es siempre constante, a esta constante se denomina índice de refracción, y se expresa generalmente como $n = \text{sen } (i) / \text{sen } (r)$.*

4.5.1 Ángulo crítico y reflexión total.

Cuando la luz pasa de un medio poco denso a uno con mayor densidad, la luz refractada se desvía hacia la normal, si por el contrario las condiciones se invierten y la luz pasa del medio más denso al menos denso el rayo refractado se aleja de la normal, el ángulo de incidencia (i) en este caso, es menor que el de refracción (r) y cuanto más oblicuo es el rayo incidente mayor es el ángulo de refracción. Cuando el ángulo de refracción es de 90° (rayo C en la Figura 27), los rayos refractados se mueven paralelamente a la interfase, esto se conoce como ángulo crítico y es una forma fácil de medir el índice de refracción ya que para cada gema este ángulo crítico es único, el índice de refracción de la gema es determinado por el índice de refracción del prisma (medio más denso) y el seno del ángulo crítico bajo la siguiente relación: IR de la gema = (Seno del ángulo crítico) x (IR del prisma). Los refractómetros están ópticamente diseñados para utilizar el ángulo crítico para proporcionar medidas directas en una escala graduada.

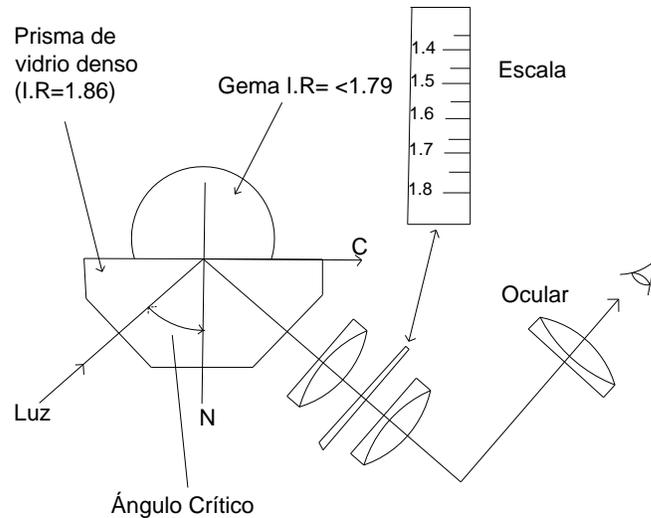


Figura 27. Esquema que muestra el diseño óptico de un refractómetro moderno. Cuando el ángulo de refracción es de 90 (rayo c), los rayos refractados se mueven paralelamente a la interface, esto se conoce como ángulo crítico y es una forma fácil de medir el índice de refracción ya que para cada gema este ángulo crítico es particular.

Los valores del índice de refracción obtenidos en los ópalos-nobles incoloros va de 1.38 a 1.41, y en los ópalos de fuego es de 1.40 a 1.44, estos datos se muestran consistentes con los publicados en la literatura para ópalos naturales (1.37 a 1.46; O'Donaghue, 2006; Fritsch *et al.*, 2006), los ópalos de fuego muestran índices ligeramente más altos, estas diferencias son causados probablemente por heterogeneidades dentro de su estructura.

La identificación de estas gemas naturales hasta hace algunos años fue llevada a cabo sin problemas utilizando valores del IR y el peso específico, sin embargo los nuevos productos sintéticos presentan propiedades que son similar a los naturales, un ejemplo de ello son los ópalos sintéticos Mexifire (Choudhary y Bhandari, 2010), que poseen un índice de refracción de 1.47, y un peso específico de 2.19, a pesar de estas propiedades, ninguno de los índices medidos en este estudio sobrepasa valores de IR de 1.46

4.6 Espectroscopía Raman.

La espectroscopia Raman constituye uno de los métodos más adecuados para la caracterización de las propiedades cristaloquímicas en muestras heterogéneas, los espectros Raman representan información complementaria indispensable para la determinación de la estructura cristalina y las diferentes modificaciones polimórficas en muestras sintéticas y naturales (Ostrooumov, 2009). Un espectro Raman es una gráfica de la radiación dispersada Raman, como función de la diferencia de frecuencia de la radiación incidente en unidades de número de onda (cm^{-1}), cada banda del espectro representa una forma de vibración de la molécula o cristal, estas vibraciones pueden ser de estiramiento o flexión (comunicación personal con la Física Leticia A. Alba, 2016). La espectroscopia Raman permite investigar la estructura de los silicatos formados por algunos tetraedros de silicio-oxígeno, independientemente de un orden al largo alcance (Ostrooumov *et al.*, 2009). Dentro de los métodos de investigación genética para depósitos de baja temperatura Walter (2011) incluye el estudio de las transiciones polimórficas de minerales, debido a que estas ocurren a temperaturas específicas, la formación de estas fases polimórficas cae en un rango de temperatura de 230 C° para la cristobalita y 150 C° para tridimita (Ottonello, 1997), la transición entre estas se encuentra dentro de estos valores (figura 28).

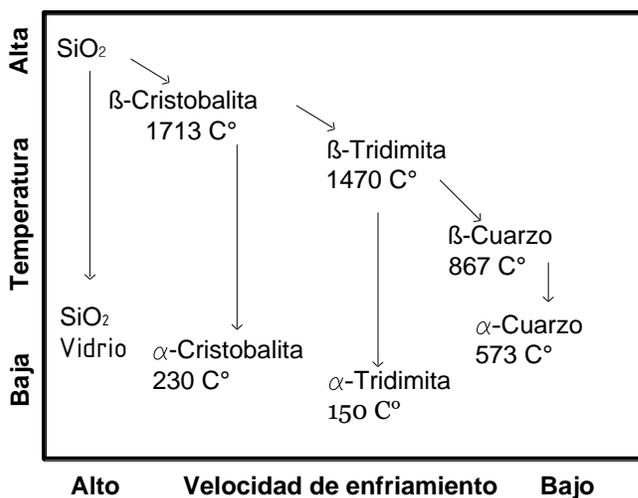


Figura 28. Diagrama de los diversos polimorfos de sílice en función de su temperatura de formación y la velocidad de enfriamiento. La transición entre cristobalita- α y tridimita- α ocurre a temperaturas de $230\text{-}150\text{ C}^{\circ}$, acorde a Ottonello (1997).

Las principales bandas de dispersión Raman de: Tridimita- α , Cristobalita- α , y Cuarzo- α , vidrio de sílice, H₂O son mostradas en la tabla 8.

Tabla 8. Bandas de dispersión Raman. Principales bandas de dispersión para cristobalita- α , tridimita- α , hematita, vidrio de sílice y H₂O. Los datos fueron tomados de Handbook of Raman spectra (2015), disponible en internet.

<i>Cristobalita-α</i>	<i>Tridimita-α</i>	<i>Vidrio de sílice</i>	<i>Hematita</i>	H ₂ O
114	-----			----
230	210		226	----
273	304		245	----
286	349	440	292	----
420	431	490	299	970
780	799	600	411	1645
792			497	3225
1075	1073		612	3450
			655	
			1310	

4.6.1 Ópalos C-T

Los espectros de las muestras estudiadas, muestran dos fuertes bandas de dispersión Raman, una entre los 150 y 550 cm^{-1} , la cual es típica de los silicatos, y otra de los 3000 a los 3600 cm^{-1} generada por vibraciones de especies hidratadas, se realizó un corte en los espectros de la figura 29, de los 1500 cm^{-1} a los 3000 cm^{-1} ya que en esas regiones no se observaron bandas de dispersión considerables. Las muestras de ópalo de fuego y ópalo noble-girasol, presentan bandas de dispersión Raman en los 114, 230, 286, 780, y 1075 cm^{-1} , que son atribuidas cristobalita- α (líneas punteadas azules en la figura 29), también existen bandas de dispersión en 304, 349, 431, 799 y 1073 cm^{-1} que corresponden a Tridimita- α (líneas punteadas lilas en la figura 29), las bandas en 3450 y 3225 son atribuidas a especies moleculares hidratadas (H_2O), atendiendo a sus espectros Raman estos dos ópalos nobles son caracterizados como ópalos C-T, además de las líneas principales que definen al el ópalo C-T existen líneas en 611, 656 y 1311 cm^{-1} , el análisis de estas líneas se presenta en el siguiente apartado. Las muestras de ópalo noble 1 y 2 incoloros muestran espectros Raman muy similares a los del ópalo de fuego (C-T), sin embargo en estas muestras no existen las bandas en 611, 656 y 1311 cm^{-1} , por lo que pueden ser interpretadas como pertenecientes a vibraciones de facetas colorantes en los ópalos rojizos- anaranjados.

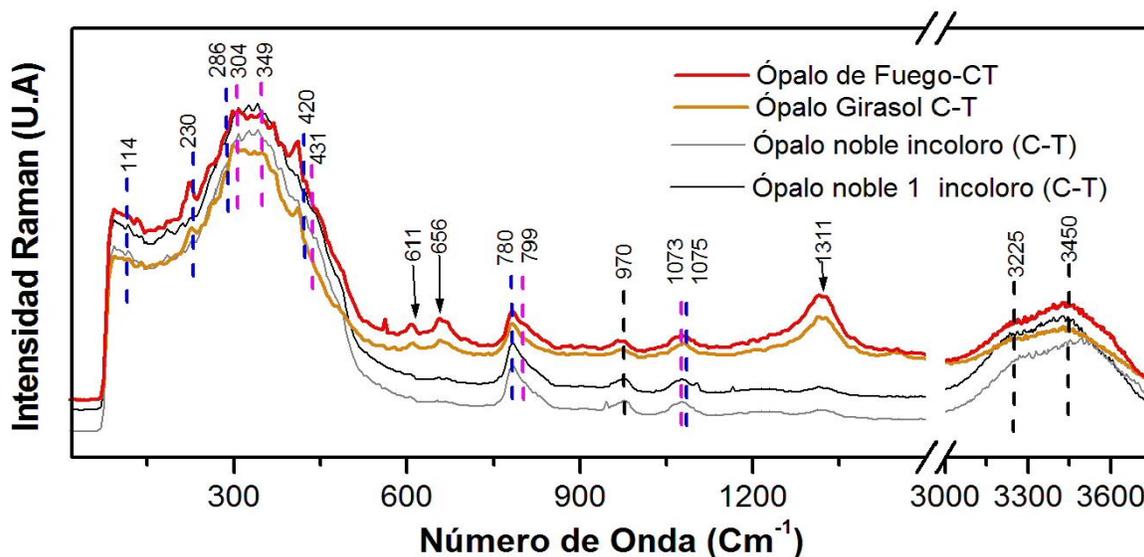


Figura 29. Espectros Raman de ópalos de fuego C-T y ópalos nobles incoloros C- T. Las bandas de dispersión Raman en 611, 656 y 1311 cm^{-1} de los ópalos de fuego no aparecen en los ópalos nobles incoloros.

4.6.2 Ópalos tipo –C

Las principales bandas de dispersión Raman para las muestras Ópalo-Hialita y Ópalo Hialita 1, son mostradas en la figura 30, y para fines comparativos se incluyen los espectros de una muestra de ópalo C-T y un espectro correspondiente a vidrio de sílice.

Las principales bandas de dispersión para las dos muestras de ópalo hialita son: 114, 230, 420 y 780 cm^{-1} correspondientes a vibraciones moleculares de cristobalita de baja temperatura, existen dos bandas que caracterizan al vidrio totalmente amorfo, las cuales ocurren en 440 y 490 cm^{-1} , ellas son más evidentes en las muestras de ópalos hialita que en las muestra de ópalo C-T, las principales bandas características de Tridimita- α no ocurren en las muestras de ópalo hialita. La formación de ópalo-C es rara en la naturaleza y pertenece a una serie continua entre ópalo C y ópalo C-T, cuyo origen está asociado a transformaciones polimórficas reconstructivas de baja temperatura.

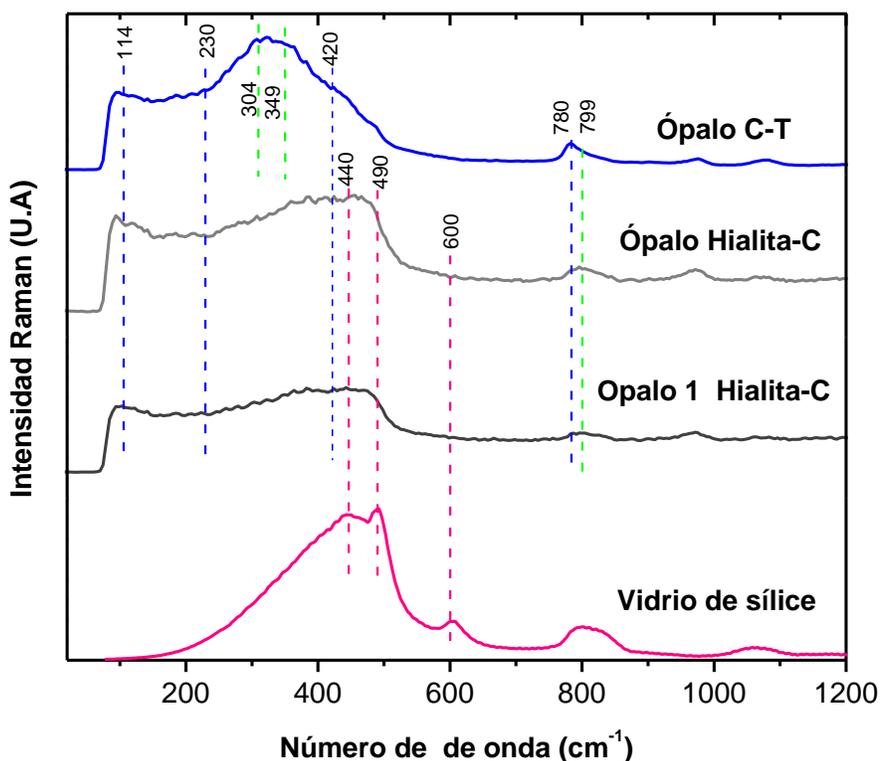


Figura 30. Espectros Raman de ópalos tipo C-T y ópalos tipo C. Las líneas punteadas representan las principales bandas de dispersión de Cristobalita- α (Azul), Tridimita (verde) - α , vidrio (rosa).

4.6.3 Señales Raman pertenecientes a inclusiones.

Las muestras de ópalo que presentan un color rojo-anaranjado presentan bandas adicionales de dispersión Raman en los 226, 290, 411, 497, 612, 656, y 1310 cm^{-1} , que pueden ser atribuidas a vibraciones del componente principal que aporta la coloración al ópalo de fuego, ya que estas bandas no se observan en los ópalos incoloros. Las bandas adicionales que exhiben los ópalos de fuego y las principales bandas del óxido férrico son mostradas en la figura 31. Las bandas en 226, 411, 612 y 556 cm^{-1} características de la hematita se encuentran presentes en la muestra de ópalo de fuego analizada.

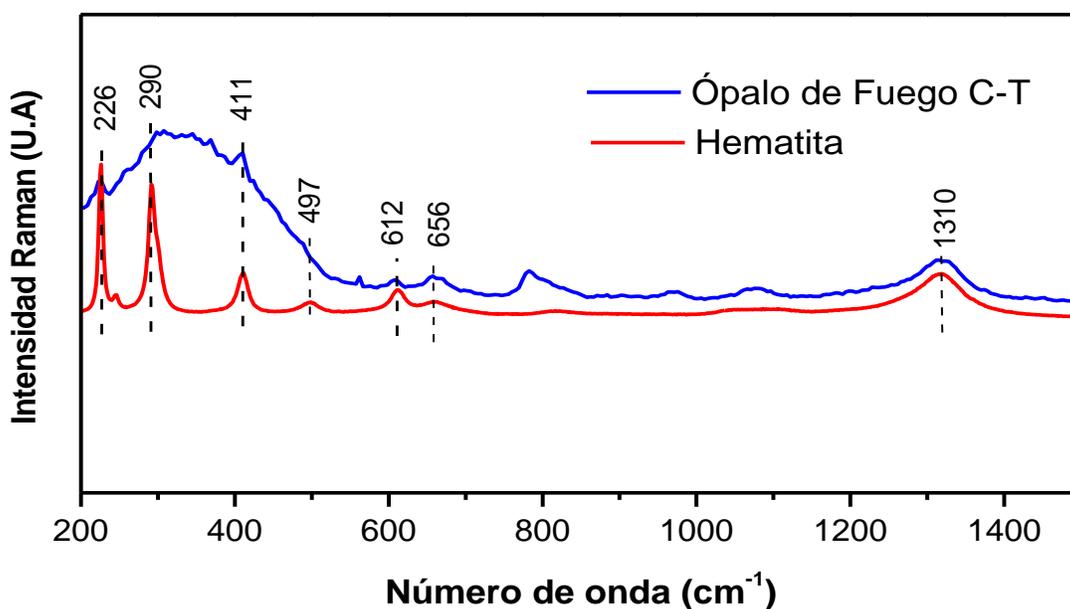


Figura 31. Espectros Raman del ópalo de fuego y Hematita. En línea punteada se muestran las principales bandas de dispersión de la hematita de las que existe una relación con las de ópalo de fuego en 226, 411, 612, y 656 cm^{-1} .

Capítulo 4. Propiedades gemológicas

Tabla 9. Caracterización gemológica, mediante DRX y espectroscopia Raman de los ópalos de La Trinidad.

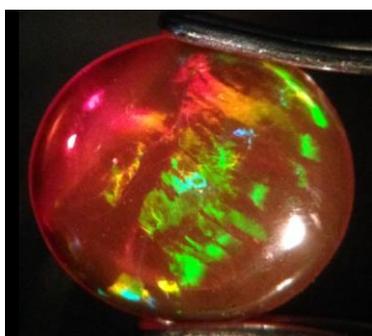
Muestra	Nombre común	J.C	I.R	Ct.	E.R	DRX
	Descripción	Ran			Principales	Principales
	Color	Int.	S.G		bandas de	distancias
	Transparencia	Pat.			dispersión	interplanares
	Talla				(Cm ⁻¹)	(d) en Å
	Inclusiones					
		Np				4.10 4.05 3.34 433 2.50 2.24 3.82 2.84 1.82 4.82 4.05 1.54
						Tipo C-T
	Ópalo Naranja Común	Np	1.43			4.10 4.05 433 2.50 3.82 2.84 4.82 4.05
	Anaranjado Semitranslucido					Tipo C-T
	Con inclusiones de cuarzo					
	Ópalo de Fuego Común	Np	1.43			4.10 4.05 3.34 433 2.50 2.24 3.82 2.84 1.82 4.82 4.05 1.54
	Rojo Semitranslucido con inclusiones de cuarzo					Tipo C-T
	Ópalo Lloviznado Noble incoloro	TC	1.41	8	114 304 3225 230 349 3450 286 431 780 799 1075 1073	Tipo C-T
	Semitransparente Tallado en cabujón biconvexo(doble)	Alt. Mos	2.17			

Las abreviaturas utilizadas son: **JC**=Juego de colores, **IR**=Índice de refracción, **Ta.**=Tamaño, **E.R**=Espectroscopia Raman, **DRX**=Difracción de rayos x, **T.C.**= Todos los colores del espectro electromagnético de luz visible, **Np.**=No presenta, **Int.**=Intensidad **Deb**=Débil, **In.**=Intermedio, **Alt.**=Alto, **Pa**=Patrón **Pr.**=Pavo real, **Mos.**=Mosaico, **Ban.**=Bandas, **Pun**=Puntos, **Ran.**=rango, **Vi.**=Violeta, **Az.**=Azul, **Ve.**=Verde, **Am.**=Amarillo, **An.**=Anaranjado, **Ro.**=rojo.

Capítulo 4. Propiedades gemológicas

	Ópalo de agua	TC	1.41		114	304	3225
	Noble				230	349	3450
	incoloro	Alt	---		286	431	
	Semitransparente				780	799	
	Tallado en gota montado en un dije de plata	Pun			1075		
Tipo C-T							
	Ópalo de miel	TC	1.41	1.1	114	304	3225
	Noble				230	349	3450
	Incoloro	Alt	2.16		286	431	
	Translúcido				780	799	
	Tallado en Cabujón elevado	Mos			1075		
Tipo C-T							
	Ópalo girasol	Az	1.43	.9	114	304	3225
	Noble	Ve			230	349	3450
	Anaranjado	Am	2.15		286	431	
	Translúcido	An			780	799	
	Tallado en Cabujón elevado	Alt			1075		
		Pun					
	Tipo C-T						
	Ópalo girasol	Ve	1.44		114	304	226 3225
	Noble	An			230	349	290 3450
	Anaranjado	Ro	----		286	431	411
	Translúcido				780	799	612
	Tallado en Cabujón medio montado en dije de plata, con impurezas de Hematita	Deb			1075	1073	656
		Ban					1310
	Tipo C-T						
	Ópalo de fuego	Ver	1.38	1	114	304	226 225
	Noble	Am			230	349	290 3450
	Rojo	An	2.20		286	431	411
	Translúcido	Ro			780	799	612
	Tallado en Cabujón medio, con impurezas de Hematita	Int			1075	1073	657
		Ban					1310
	Tipo C-T						

Capítulo 4. Propiedades gemológicas



Ópalo de fuego	Az	1.4	1.1	114	304	226	225
Noble	Ve			230	349	290	3450
Rojo	Am	2.18		286	431	411	
Translúcido	An			780	799	612	
Tallado en	Ro			1075	1073	657	
Cabujón bajo con impurezas de Hematita	In						1310
	Ban						

Tipo C-T



Ópalo de fuego Común Anaranjado	NP	1.39	4.10				
Translúcido							
Corte <i>Marquise</i> .							

Tipo C-T



Ópalo-vidrio (sintético). Rojo	NP	1.47	13.0	A partir de los 1200cm ⁻¹ señal intensa de fluorescencia.			
Translúcido							
Corte en Escalera Triangular							
Inclusiones sólidas oscuras dispersadas.							



Ópalo Hialita Común incoloro	Np			114	440		
Semitransparente		---		230	490		
En matriz recubriendo inclusiones protogenéticas.				420			
				780			

Tipo C

Capítulo 5. Discusión y conclusiones.

5.1 Discusión

Las estructuras medidas en campo, que controlan y canalizan los fluidos generadores de ópalo tienen una orientación preferencial NO-SE, y es compatible con los datos obtenidos por Cruz *et al.* (2007) y COREMI, (1992). Las principales estructuras, pueden utilizarse como vectores hacia las zonas con ópalo.

La existencia de patrones de comportamiento similar de las concentraciones de elementos mayores y traza en ópalos y la riolita, sugieren que existe relación entre los fluidos hidrotermales generadoras del ópalo y su roca encajonante, estos datos son correlacionables a los obtenidos por Gaillou (2008), quien atribuye esta similitud de comportamiento a una dilución. Ópalos con coloración rojo-anaranjado muestran contenidos de Fe mayores respecto a los incoloros, estos datos son consistentes con los datos espectrometría Raman donde el agente colorante es causado por inclusiones de hematita (Fe_2O_3), Fritsch *et al.*, 2006, concluye que, en caso de que la sustitución de Fe^{3+} por Si^{4+} exista, el Fe puede ser incorporado también en forma de Óxidos e hidróxidos a escala nanométrica en la estructura del ópalo, lo que es consistente con los datos de espectroscopía Raman obtenidos en este trabajo, por ello, estas inclusiones de Hematita son los responsables de la absorción de la luz que provoca la coloración rojiza en ópalos de fuego de la concesión minera La Guadalupana

El alto contenido en Zr, puede explicarse por el contenido del mineral accesorio zircón (ZrSiO_2) presente en la roca encajonante, el Zr al ser un elemento inmóvil bajo condiciones de alteración hidrotermal, refuerza la idea de múltiples ciclos de interacción entre roca-fluido propuesta por Koivula *et al.* (2003). El contenido en Ba en muestras de la Concesión minera la Guadalupana, puede ser utilizado como criterio propuesto por Gaillou (2008), para discriminar estos de los de origen sedimentario, mientras que el alto contenido en Zr es característico de este yacimiento.

Los diferentes tipos de ópalos analizados mediante microscopía óptica, muestran una clara isotropía característica de materiales amorfos, mientras que los datos de espectroscopía Raman y DRX, muestran que se trata de materiales pobremente cristalizados (ópalos C-T), es decir, a escala atómica son sistemas intermedios entre sílice amorfa y variedades cristalinas de sílice de baja temperatura, con estos datos, no es posible clasificar a los ópalos como minerales, por esto, deben ser clasificados como mineraloides.

De acuerdo a datos experimentales obtenidos por Ottonello, (1997), la formación de tridimita- α y cristobalita- α , cae en rangos de 150 a 200 $^{\circ}\text{C}$ y su formación se encuentra en función de la velocidad de enfriamiento, estos datos y las relaciones de campo, indican que se trata de un yacimiento hidrotermal de baja temperatura.

Las inclusiones protogenéticas de cuarzo, hematita, cristobalita, fueron verificadas mediante DRX, Espectroscopía Raman y con Microscopía Óptica, lo que demuestra que estas técnicas son complementarias en el análisis gemológico. Estas inclusiones son características de este yacimiento y su presencia en ópalos indica que se trata de gemas naturales, mientras que para identificar ópalos de fuego naturales de ópalos sintéticos Mexifire, el índice de refracción y peso específico son las principales herramientas. Los ópalos nobles analizados presentan cortes tipo cabujón, medio a bajo, la transparencia es de semitransparente a translúcido y todos presentan juego de colores (todos los colores del espectro visible), el color varía de: incoloro a anaranjado y rojo, estas características son las principales atractivos que han permitido su permanencia en el mercado de las gemas.

5.2 Conclusiones

- El yacimiento opalífero de La Trinidad es de tipo hidrotermal de baja temperatura.
- Las riolitas sub-alcálinas presentan 3 tipos de alteración. Una silicificación, argilitización y una formada por óxidos e hidróxidos de hierro.
- Se generó un mapa geológico a escala 1:2000 de la concesión minera La Guadalupana.
- Las estructuras que controlan y canalizaron los fluidos generadores de ópalo, son fracturas con orientación SE-NO.
- Los ópalos con o sin juego de colores se encuentran en domos riolíticos subalcalinos en formas coloformes, rellenando vesículas y fracturas, presentan estructuras fluidales.
- Las principales impurezas en los ópalos desde punto de vista geoquímico son: Al, Fe, Ca, Na, K.
- La coloración de los ópalos de fuego está relacionada al incremento en la concentración de Fe, en forma de iones Fe^{+3} .
- Los ópalos con o sin juego de colores muestran espectros y difractogramas característicos de ópalos C-T, mientras que ópalos variedad hialita sin juego de colores exhiben patrones de ópalo tipo C.
- La combinación de un alto contenido de Zr, espectros tipo C-T e inclusiones, son las principales características que nos permiten evaluar la procedencia de ópalos de La Trinidad.
- La concentraciones de Ba en ópalos de la concesión minera La Guadalupana puede ser utilizado dentro de la gráfica propuesto por Gaillou y sus colegas para para diferenciar a estos, de ópalos de origen sedimentario.

- Los valores del índice de refracción obtenidos en las muestras analizadas en ópalos de fuego varían de 1.40 a 1.44 y el peso específico de 2.18 a 2.20, estos datos permiten diferenciar a estos de otros ópalos.
- Los ópalos nobles analizados muestran cortes tipo cabujón medio a bajo, la transparencia que va de semitransparente a translúcido, juego de colores (todos los colores del espectro visible), los patrones son en forma de mosaico, en flama y en puntos, el color varía de: incoloro a anaranjado y rojo, estas características son las principales atractivos que han permitido su permanencia en el mercado de las gemas.

Bibliografía

Bibliografía

Aguilar, B.O., Ostrooumov., Fritsch, E., 2005. Estudio Mineralógico de la desestabilización de ópalos mexicanos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), p.391-400.

Besoain, E., 1985. *Mineralogía de arcillas de suelos*, Serie de libros y materiales educativos IICA. Costa Rica, 1205p.

Best, M.G., *Igneous and metamorphic petrology.*, 2003. UK, Blackwell Science Ltd, 2nd ed. p. 20-22.

Consejo de Recursos Minerales (COREMI)., 1992. *Monografía geológico-minera del estado de Querétaro: México*, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, p.219-290.

Cruz, J. C., Canet, C., Peña, D., 2007. Las gemas de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 9-18.

Choudhary, G., Bhandari R., 2010. Update on mexifire synthetic fire opal. *Gems and gemology*.

Darragh P. J., Sanders J. V., 1965. The origin of color in opal based on electron microscopy [Abstract]. *Gems and Gemology*, 11(10): 291-298.

Dávila-Alcocer, V.M., Centeno-García, E., Valencia, V., Fitz-Díaz, E., 2009. Una nueva interpretación de la estratigrafía de la Región de Tolimán, Estado de Querétaro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 61, núm. 3, 2009, p. 491-497.

Elzea, J. M., Rice, S. B., 1996. TEM and X-ray diffraction evidence for cristobalite and tridymite stacking sequences in opal: *Clays and Clay Minerals*. 44(4), 492-500.

Fritsch, E., Gaillou, E., Ostroumov, M., Rondeau, B., Devouard, B., Barreau, A., 2004. Relationship between nanostructure and optical absorption in fibrous pink opals from Mexico and Peru. *European Journal of Mineralogy*, 16, 743–752.

Fritsch, E., Gaillou E., Rondeau B., Barreau A., Albertini D., Ostroumov M., 2006. The nanostructure of fire opal. *Journal of Non Crystalline Solids*. vol. 352, pp. 3957-3960.

Bibliografía

Gaillou, E., Delaunay, A., Rondeau, B., Bouhnik le Coz, M., Fritsch E., Cornen, G., Monnier, C., 2008. The geochemistry of gem opals as evidence of their origin. *Ore Geology Reviews* 34,113–126.

Gill, R., 2015. *Chemical Fundamentals of Geology and Environmental Geoscience*. London: Chapman & Hall. 2nd ed. P-155.

Giuliani, G., Chaussidon, M., Schubnel, H.J., Piat, D., Rollion, C., France, C., Giard, D., De Narvaez, D., Rondeau, B., 2000. Oxygen isotopes and emerald trade routes since antiquity. *Science*, 287, 631–633.

Handbook of Raman Spectra, 2015. (En línea). Recuperado en diciembre de 2015. Disponible en <<http://www.enslyon.fr/LST/Raman/spectrum.php?nom=tridymite>>

Hatipog˘lu. M., 2009. Moganite and quartz inclusions in the nano-structured Anatolian fire opals from Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 54, 1–21.

Hurlbut C.S., Kammerling R.C., 1993. *Gemología*, 2nd ed. Wiley & Sons, New York, p. 122-223.

IMA, 2014. The New IMA List of Minerals- A Work in Progress - Updated: November 2015. (En línea). Disponible en <http://ima-cnmnc.nrm.se/IMA_Master_List_2015-05.pdf>

Jones J.B., Segnit E.R., 1971. The nature of opal I. nomenclature and constituent phases, *Journal of the Geological Society of Australia: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, 18(1), 57-68.

Klein, C., Hurlbut, C.S., 1997. *Manual of Mineralogy*. Canada: John Wiley & Sons, p.524-530.

Koivula, J.I., Fryer, C., Keller, P.C., 1983, Opal from Queretaro, Mexico: Occurrence and Inclusions. *Gems and Gemology* 19, 87–96.

Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, G., Dudek A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorenen, H., Woolley, A.R., 2002. *Igneous rocks, A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press. p 33-38.

Bibliografía

Lugo, H.J., Córdova, F. 1990. Regionalización geomorfológica, esc. 1:12 000 000, en Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía. UNAM. México

Mckeown, D.A., Zotov, N., 1994. Natural Glasses. In A.S. Marfunin (Ed.). *Advanced Mineralogy, Composition, Structure, and Properties of Mineral Matter: Concepts, Results, and Problems.* (pp. 239-254).

Nassau, K., 1980. The causes of color. *Scientific American* v. 242 n. 10, 124-154.

O'Donoghue, M., 2006. *Gems*, 6th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, p. 314-320.

Ostrooumov, M., Fritsch, E., Lefrant, S., 1999. Primeros datos sobre la espectrometría Raman de los ópalos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 16(1), 73-80.

Ostrooumov, M., 2004. Ópalo mexicano: localización y breve descripción (en línea): Sociedad Mexicana de Mineralogía, <<http://www.geocities.com/smexmineralogia/.htm>>

Ostrooumov, M., 2009. *Mineralogía analítica avanzada*, Universidad michoacana de San Nicolas Hidalgo, México, p.209-230

Ottonello, G., 1997. *Principles of Geochemistry*, Columbia University Press, New York, 894 p.

Pirajno, F., 1992. *Hydrothermal Mineral Deposits*. New York: Springer-Verlag, p.44-46

Ramírez, S., 1884. *Noticia Histórica de la Riqueza minera de México*. México: Oficina Topográfica de la secretaria de Fomento. P.238-243.

Read, P., 2005. *Gemmology*. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, p.72-77.

Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical. New York, 351 pp.

Rondeau, B., Fritsch, E., Mazzero, F., Gauthier, J.P., Cenki-Tok, B., Bekele, E., Gaillou, E., 2010. Play of color opal from Wegeltena, Wollo province, Ethiopia. *GEMS & GEMOLOGY*, 46, 90-105.

Bibliografía

Rondeau B., Fritsch E., Guiraud M., Renac C., 2004. Opals from Slovakia ("Hungarian" opals): a reassessment of the conditions of formation. *Eur. J. Mineral.*, vol. 16, pp. 789-799.

Sanders, J.V., 1964. Color of precious opal. *Nature*, 204, 4964, 1151-1153.

Servicio Geológico Mexicano., 2007. Carta Tequisquiapan F14-C76.

Servicio Geológico Mexicano., 2012. Carta San Juan del Rio F14-C77.

Sistema de Administración Minera, 2015. (En línea). Recuperado en diciembre del 2015. Disponible en <<http://www.cartografia.economia.gob.mx/cartografia/>>

Simoni, M., Caucia, F., Adamo, I., Galinetto, P., 2010. New occurrence of fire opal from Bemia, Madagascar. *GEMS & GEMOLOGY*, 46 ,2 ,114-21.

Smallwood, A.G., Thomas, P.S., and Ray, A.S., 1997. Characterisation of sedimentary opals by Fourier transform Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A*, 53, 2341.2345.

Thompson, A. J. B., Thompson J. F. H., 1996. Atlas of Alteration: A Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals. Newfoundland, Canada. Geological Association of Canada. Mineral Deposits Division, p. 1-8.

Walther, E. P., 2011. Economic Geology Principles and Practice Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbon. Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits. UK,Wiley-Blackwell. p-45.

Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, pages 185–187, 2010.

Wilson, M.J., 2014. The structure of opal-CT revisited. *Journal of Non-Crystalline Solids* 405, 68–75.