



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería

Caracterización geoquímica y gemológica de los  
granates del skarn de la sierra de Tlayca, Morelos.

T e s i s

Para obtener el grado de

Ingeniero Geólogo

P r e s e n t a

Rainier Uriel Mares Tepanhaya

Director: Ing. Alfredo Victoria Morales

Sinodales: Dra. Claudia Cristina Mendoza Rosales

Dra. Adela Margarita Reyes Salas

Ing. Juan Carlos Cruz Ocampo

Dra. Laura Mori

Ing. Oscar Irazaba Ávila

Ciudad universitaria, Marzo de 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

La razón de la sinrazón  
que a mi razón se hace.

Miguel de Cervantes

## Agradecimientos

A mis padres Marco y Margarita doy gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y brindarme siempre su confianza, guía y apoyo en todo lo que he querido hacer y que este trabajo es la parte final de una etapa por la que hemos luchado juntos; a mi manita y verdugo particular, Sigrid quien siempre será parte muy importante en mi vida y quien la hace alegre y llena de expectativa y con mucho cariño a mi abuelo Lorenzo quien me apoyó y del que aprendí muchas cosas.

Le tengo una enorme gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por todo el conocimiento, valores y experiencias que viví en mi estancia en este majestuoso lugar de sabiduría e igualdad al que siempre tendré presente y buscaré ser un digno representante.

Agradezco al proyecto PAPIME 103912 titulado “Diseño de guías de aprendizaje de Petrología Metamórfica con base en la integración de colecciones de rocas y preparación de guías para prácticas de campo, que permitan al alumno integrar conocimientos teóricos con trabajo de campo y laboratorio” por brindar el apoyo para realizar esta tesis y deseo que el presente trabajo sirva de apoyo para el aprendizaje de nuevas generaciones de Geólogos.

Tengo una singular gratitud a la Dra. Claudia Cristina quien me enseñó el gusto por el campo y las herramientas para enfrentarlo, al Ing. Juan Carlos por la enseñanza y confianza que me ha tenido, a la Dra. Margarita por su paciencia y guía durante este trabajo, al Ing. Oscar por su tiempo y apoyo al igual que a la Dra. Laura quien siempre estuvo para solucionar dudas; muchas gracias a ustedes quienes fueron un gran apoyo durante la elaboración de esta tesis.

Alfredo Victoria te doy gracias por tu apoyo y consejo durante la carrera y la gran cantidad de cosas que he aprendido y me ha apoyado a lograr muchas cosas, incluyendo este trabajo, y quien ahora no solo se es mi profesor sino un amigo al que quiero y estimo.

Hago extensa mi gratitud a la Ing. Consuelo Macías, a la Q. Patricia Giron, a la Fis. Leticia Alva y a la Mtra. Sonia Ángeles por ser parte de este trabajo.

En un especial agradecimiento a la familia Gutierrez Anrubio quienes me permitieron entrar a su hogar y quienes fueron parte importante para realizar este trabajo, en especial a Alvaro, Alejandro y Amando quienes hicieron posible la exploración de en este lugar y me acompañaron siempre en las salidas al campo que es la parte inicial y muy importante en cualquier trabajo geológico.

Le agradezco al Instituto de Geología y al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), ambas de la U.N.A.M. por brindar el apoyo, materiales y personal para la realización de este trabajo.

Con un cariño muy especial les agradezco a los “Palmeritas” por ser los que me recibieron en una ciudad diferente a la que crecí y juntos aprendimos y moldeamos de acuerdo a las exigencias que piden los primeros semestres de ingeniería, afrontamos juntos estos embates y ¡oh sorpresa! la gran mayoría de nosotros los hemos superado con bien, ustedes me apoyaron a tomar la decisión de hacer lo que me gusta y apasiona que es la aventura geológica, en especial a Nizi por siempre estar cerca y brindarme tu cariño y confianza.

A ustedes los “Bertos”; Alberto, Roberto, Maryberta, Vagoberto, Monoberto, Angel, Norma y Elí, me dio mucho gusto compartir esta etapa con ustedes, y no creo haber encontrado mejor compañía, ya que somos igual de ñoños; recordaré todos nuestros prácticas y viajes, sobre todo los viajes no realizados, las bromas, las comidas y el apoyo durante este tiempo, con ustedes no solo compartí una parte de mi vida, sino también me han ayudado a saber lo que quiero para un futuro.

Marybeth, eres de las mujeres que más admiro por su fortaleza, claridad, templanza y conocimientos, siempre has sido de gran apoyo e impulso para mí, por lo que estoy agradecido.

Fer encontré en ti un compañero, un amigo y pronto un colega en la geología, aprendimos juntos que no siempre lo que creemos cierto lo es, y que las decisiones deben tomarse con sabiduría y cierta cautela, compartimos las dificultades de final de carrera y planes de vida y espero las cumplamos con mucho bien.

A Daniel Ruiz por compartir conmigo el trabajo de campo para esta tesis, para mí fue un gran apoyo tener a alguien que se apasiona tanto por la geología, además de compartir las sorpresas con cada paso que dimos.

A mi brigada Karen y Memo con los que compartí lo bello que es salir a lo desconocido y sorprenderte con la geología y aún más con la historia que nos permite interpretar.

Les agradezco a Alessita, Evelin, Laura, Ziegler, Talivan, Miguelón bombon, Elder, Millán, Enrique, Tapia y muchos más por compartir parte de esta maravillosa etapa conmigo.

A la banda del 400, Adán, Mayumi, Adriana, Axel, Ivonne, Naye, Emanuel, Orestes y Alex, con los que pase momentos muy divertidos que aligeraron el trabajo, y no iba a olvidar al que ha sido un gran compañero y del que he aprendido y compartido mucho sobre rocas metamórficas, además de ser el único que conozco que quiere ser “piritólogo”, David, a todos ustedes sé que les va a ir muy bien porque cada uno tiene algo que a todos sorprende.

A todos les deseo el mejor de los éxitos y espero, en un futuro, volver a compartir con ustedes los míos.

Caracterización geoquímica y gemológica de los granates del skarn de la sierra de Tlayca,  
Morelos

Índice

	Página
Resumen	1
I. Introducción	2
I.2 . Localización y vías de acceso	1
I.3 . Antecedentes	4
I.4 . Planteamiento del problema	5
I.5 . Objetivos	6
I.6 . Marco teórico	7
I.6.1. Skarns y su clasificación general	7
I.6.2. Especies de Granates	12
II. Geología regional	15
III. Geología local	20
III.1. Petrología y petrografía	20
III.2. Geoquímica	35
IV. Geoquímica de los granates	42
IV.1 Características cristalográficas	42
IV.2 Características petrográficas	43
IV.3 Variaciones en su composición	45
IV.3.1 Muestra XAGr15	47
IV.3.2 Muestra XA-25	49
IV.3.3 Muestra Xa-41	50
IV.3.4 Muestra XaGr-1	51
IV.4 Composición y estructura	52
V. Características gemológicas de los granates	56
V.1. Propiedades gemológicas de las piedras de color	56
V.1.1 Color (Color)	56
V.1.2 Calidad o pureza (clarity)	58

V.1.3 Corte (cut)	59
V.1.4 Peso (carat)	60
V.2. Propiedades gemológicas de los granates de la sierra de Tlayca	60
VI. Discusión de resultados	64
VII. Conclusiones	67
VIII. Referencias bibliográficas	68
Apéndice.	
Mapa geológico y secciones geológicas	A
Petrografía de granates	B
Tablas de composición porcentual de los granates analizados	C
Tabla de composición porcentual de los granates graficados	D

Relación de figuras		
fig.	Descripción	página
fig. 1	Diagrama de las principales carreteras del oriente del estado de Morelos	3
fig. 2	Ubicación del área de estudio	3
fig. 3	Stock con una zona de skarn	9
fig. 4	Esquema de los modelos de ambientes tectónicos idealizados de la formación de Skarns	11
fig. 5	Formas del sistema cúbico que pueden presentar los granates	12
fig. 6	Mapa geológico del oriente del estado de Morelos	18
fig. 7	Esquema de columna estratigráfica propuesta en este trabajo con base en recopilación bibliográfica para la región centro-oriental del estado de Morelos	19
fig. 8	Estratos de calizas del cerro de Xalostoc	21
fig. 9	Caliza con algunos rudistas	21
fig. 10	Caliza de la Formación Morelos en sección delgada	22
fig. 11	Conglomerado de calizas de la Formación Balsas	23
fig. 12	Metaconglomerado de la Formación Balsas	23
fig. 13	Derrame de composición andesítica de la Formación Tlayca	24
fig. 14	Fotografía, detalle de una toba lítica de la Formación Tlayca	24
fig. 15	Monzodiorita con fracturas rellenas de cuarzo y granate	26
fig. 16	Diorita brechada	26
fig. 17	Autolito dentro de la diorita	26
fig. 18	Detalle del granito álcali-feldespático	26
fig. 19	Fotografías en sección delgada en luz paralela y con nicoles cruzados de las muestras XA-1, XA-20 y XA-22	27
fig. 20	Fractura rellena de granates verdes y cuarzo lechoso	27
fig. 21	Veta de granates de color oscuro dentro de la diorita, zona sur de la Sierra	27
fig. 22	Granate de seis centímetros de diámetro	28
fig. 23	Bloque dentro de la brecha de skarn	28
fig. 24	Muestra XA-47, fotografía con nicoles cruzados	30
fig. 25	Muestra XA-23, fotografía con luz paralela	30
fig. 26	Muestra XA-48 piroxenos rodeando a plagioclasas y a cristales de sulfuros.	30
fig. 27	Superficie meteorizada del Exoskarn del cerro Tencuancualco	31
fig. 28	Exoskarn de granate y vesubianita	31
fig. 29	Intercrecimiento de cristales de granate rosa con cristales de vesubianita	32
fig. 30	Veta de granates color blanco dentro de un skarn de wollastonita y granate	32
fig. 31	Fotografías en sección delgada de muestras de skarn.	34
fig. 32	Muestra XA-37 se muestran cristales de cuarzo, wollastonita, titanogaugita y diopsida.	34
fig. 33	Vesubianita sobre granate de 4x1.5x1.5 cm, colección Alfredo Victoria, se puede observar la formación de la vesubianita a partir del granate	34
fig. 34	Diagrama de álcalis total vs. Sílice de cox et. Al. 1979 para la muestra XA-1	36
fig. 35	Diagrama $Na_2O+K_2O-CaO$ Vs $SiO_2$ para la clasificación de tipos de granitos	37
fig. 36	Relación entre la composición del plutón y el tipo de skarn asociado.	38
fig. 37	Diagramas de variación de elementos mayores de muestras de Skarn de la Sierra de Tlayca	39



fig. 38	Graficas de variación de elementos traza presentes en los skarn posibles causantes de la coloración de los granates	41
fig. 39	Diferentes colores de las grosularitas de la Sierra de Tlayca, se puede observar la simetría del sistema cúbico.	43
fig. 40	Cristal de grosularita negra cubierta por silicatos, presenta simetría del sistema tetragonal.	43
fig. 41	Crecimiento paralelo de grosularita, 1x1.1x0.8 cm.	43
fig. 42	crecimiento paralelo de grosularita, 2x2x1.5 cm.	43
fig. 43	Diagrama de composición porcentual de los granates de la Sierra de Tlayca	45
fig. 44	Diagramas de variación de elementos de los granates de la Sierra de Tlayca	46
fig. 45	Fotografía con microscopio electrónico de barrido con electrones retro dispersados, y diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de la inclusión y las bandas que la rodean, muestra XaGr-15 a	47
fig. 46	Fotografía con microscopio electrónico de barrido y diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de bandas de crecimiento dentro de la muestra XaGr-15	48
fig. 47	Muestra Xa-25	49
fig. 48	Diagrama Ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de los puntos analizados, Muestra Xa-25.	49
fig. 49	Fotografías muestra Xa41	50
fig. 50	Diagrama Ternario de composición grosularita-Piralspita-andradita de los puntos analizados de la muestra Xa41.	50
fig. 51	Fotografías de la muestra XaGr1	51
fig. 52	Diagrama Ternario de composición grosularita-Piralspita-andradita de los puntos analizados de la muestra XaGr1.	51
fig. 53	Grafica de espectros Raman de granates de la serie andradita-grosularita-uvarovita, modificada de Bersani et al., 2009.	53
fig. 54	Graficas de espectro Raman obtenidas para los distintos colores de grosularita encontrados en la sierra de Tlayca.	54
fig. 55	Graficas de espectro Raman para bandas de granate en color blanco y negro	54
fig. 56	Graficas de bandas Raman de una secuencia de grosularita negra-rosa-negra-rosa	55
fig. 57	Modelo cromático tridimensional "árbol de Munsell"	57
fig. 58	Secciones de Munsell matiz-valor utilizadas para la determinación de color de los granates tallados.	60
fig. 59	Muestras de grosularitas talladas y pulidas; (a) Grgm1, ( b) Grgm4, (c) Grgm5, (d) Grgm6, (e) Grgm2, (f) Grgm3	61
fig. 60	Inclusiones encontradas en los granates pulidos y tallados	62

## Relación de Tablas

Tabla	Descripción	Página
Tabla 1	Especies según la composición química del grupo del granate	13
Tabla 2	Composición de elementos mayores obtenidos de la fluorescencia de rayos X de las rocas encontradas	35
Tabla 3	Composición de elementos traza de las muestras de skarn	40
Tabla 4	Composición química porcentual de óxidos de los diferentes colores de grosularitas de la Sierra de Tlayca.	53
Tabla 5	Características gemológicas de los granates de la Sierra de Tlayca	60

## Resumen

Se presentan las características geoquímicas y gemológicas de los granates de la Sierra de Tlayca, Morelos, lugar donde anteriormente se extraían una variedad rosa con valor gemológico y se les conocía con el nombre de Xalostocita. En este lugar se presentan granates en coloraciones blancas, rosas, oscuras y verde amarillento; se encontró con base en análisis químicos que los granates de esta zona corresponden a las variedades de grosular-andradita, estas variaciones provocan anisotropía óptica y evitan que se lleve a cabo un crecimiento paralelo entre las capas, además los granates presentan un enriquecimiento en itrio el cual puede ser causante de anisotropía óptica; dentro de la composición del granate negro se encontró un enriquecimiento en titanio, mientras que el granate verde tiene mayor contenido de magnesio, en el caso del granate rosa el contenido de manganeso es mayor comparado con los de otros colores y la grosularita blanca es pobre en hierro; se analizaron las variaciones zonales de color presentes y los cambios estructurales en estas bandas mediante espectroscopia Raman.

Se clasificaron los colores con mayor atractivo que son el 5RP4, 1GY y 6GY según la escala de Munsell, los granates seleccionados se presentan en tallas faceteadas y en cabujón, presentan un índice de refracción entre 1.72 y 1.74 y como inclusiones se encontraron cristales de cuarzo y de granates de menor tamaño al igual que fracturas y burbujas de gas.

Se presentan las características geoquímicas de las rocas que les dieron origen al metasomatismo de contacto y del skarn donde se encuentran alojados estos granates, así como la clasificación petrográfica de estas rocas y su distribución mediante un mapa geológico.



## I. Introducción

### I.1. Localización y vías de acceso

La sierra de Tlayca se encuentra en la región centro-oriental del estado de Morelos, en los municipios de Villa de Ayala y Jonacatepec. Se encuentra ubicada a 18 Km al sureste de la ciudad de Cuautla, Morelos; se puede llegar partiendo de este lugar dirigiéndose por la carretera México 160(carretera México-Oaxaca) en dirección a Oaxaca y tomar la desviación a Tlayca o Tlayecac (ver fig. 1), los poblados cercanos a esta son: Jalostoc al oeste, Atotonilco al sur, Amayuca y Jonacatepec al este.

La zona de estudio se encuentra limitada por las coordenadas UTM 511000 a 516 000 mE y 2067000 a 2073200 m.N. (fig. 2); la altura en esta sierra varía desde los 1240 m hasta 1700 m.

Las vías de acceso se encuentran por los pueblos que rodean la sierra y son los siguientes: Tlayca al este, Tlayecac al noroeste y Jalostoc al suroeste, en estos lugares se encuentran caminos de terracería que parten de estas poblaciones y llevan a los campos de cultivo y hasta el pie de monte.

Fisiográficamente se encuentra ubicado en la provincia del Cinturón Neovolcánico transversal, según la clasificación de Lugo (1990),y pertenece a la región hidrológica Balsas dentro de la subcuenca del río Cuautla y la cuenca del río Amacuzac.

Esta zona es de propiedad comunal de los pueblos que la rodean siendo en su mayoría de Tlayca además de Tlayecac y Jalostoc; en el caso de Tlayecac la zona es propiedad privada con límites definidos; la porción perteneciente a Tlayca es considerada como Unidad de manejo para la Conservación de la vida silvestre (Uma) “El colorado” por la SEMARNAT con 919.99 hectáreas según el avisos que se encuentran en la zona, para el caso de Jalostoc y Tlayca es usado para el pastoreo de ganado.



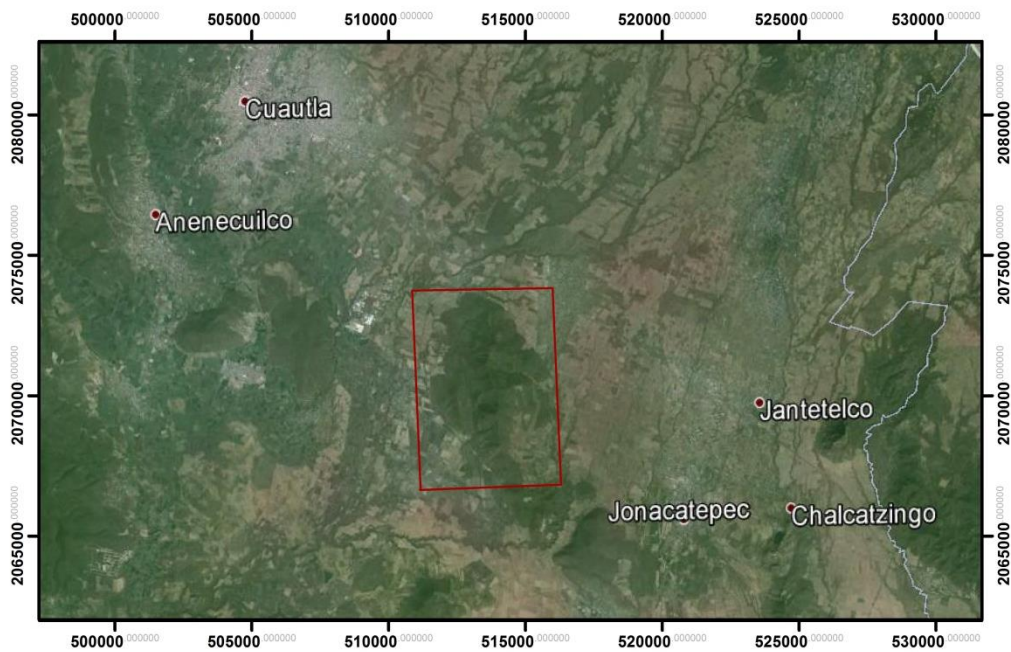
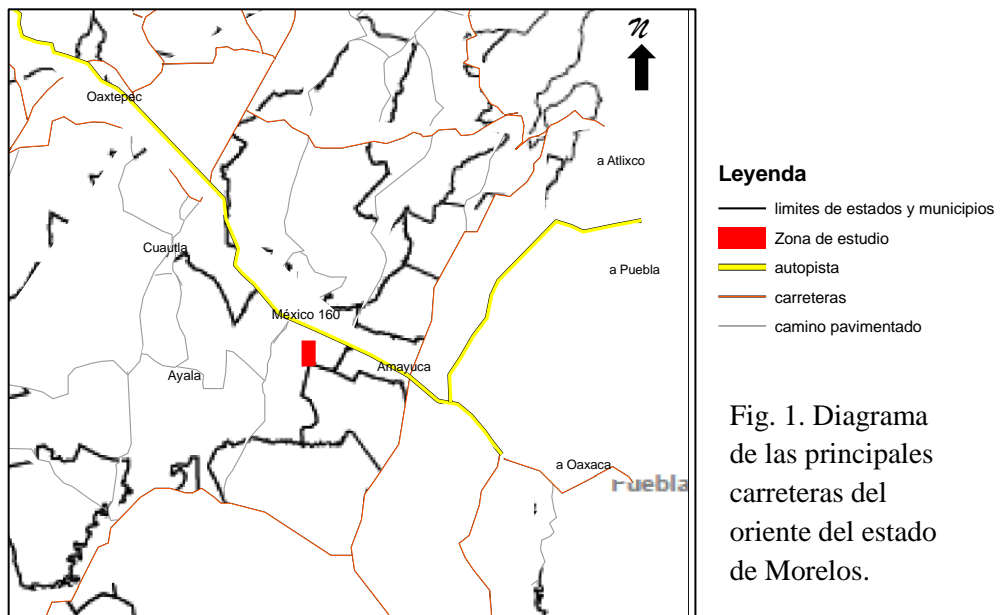


Fig. 2 Ubicación del área de estudio, imagen tomada de Google earth, 2013.

### I.2. Antecedentes.

Los granates han sido de los minerales más estudiados en la geología ya que permiten conocer características de presión, temperatura empleándose como geotermómetros y geobarómetros para conocer el ambiente de formación de la roca donde se encuentran, además que es el mineral con mayor variación de color lo que le permite que tenga un atractivo para su aplicación gemológica y mediante la incorporación a metales preciosos en la joyería, y es precisamente esta actividad la que permitió se conociera en un principio la Sierra de Tlayca.

Esta zona es conocida desde tiempo atrás, se hablaba de un mineral encontrado en este lugar al que llamaron Xalostocita, variedad rosa con valor gemológico, en 1907 se llegó a la conclusión de que en realidad se trataba de grosularita rosa y el nombre cayó en desuso mineralógico pero, aunque poco común, se sigue utilizando para especies gemológicas.

Es posible encontrar a lo largo de la sierra antiguos vestigios mineros, de los que no existen registros del material que se extraía ni de la edad de estos, por los vestigios que se encuentran en estos lugares, posiblemente se hayan explotado sulfuros de metales base, óxidos de hierro, granate o vesuvianita.

En el periódico de la Universidad de Cornell en 1895 se menciona la presentación del viaje que realizó el Dr. A. C. Gill de 1893 a 1894 a la Sierra de Tlayca sin dar información detallada.

En 1933 con el material recolectado por Gill, Duncan Mccownll publica algunos análisis químicos de los granates, donde los clasifica como grosularita, además reporta dentro de la composición de estos, manganeso y fierro, elementos que posiblemente son la causa de las variaciones de color en los granates, así como la presencia de titanio como posible elemento traza, calculó también su peso específico y el índice de refracción.

Fries, (1960), describe al intrusivo de Tlayca como un cuerpo granítico que intrusiona a la caliza del Cretácico inferior (formación Morelos), a areniscas y lutitas del Cretácico superior (formación Mexcala) y al conglomerado (formación Balsas) del Eoceno.



De Cserna y colaboradores (1974) obtuvieron una edad de  $30 \pm 3$  Ma (Oligoceno tardío), por el método plomo-alfa, en una muestra proveniente de la parte baja de la ladera occidental del cerro El Mirador, situado a 2.5 km al SSW del poblado de Tlayca.

Grajales-Nishimura y Sánchez-Hernández en 1979 realizan trabajos en esta área, donde proponen secuencias mineralógicas que contienen wollastonita, vesuvianita, diópsido, esfalerita, analcima y andesina, propusieron las diferentes etapas de evolución de la Sierra de Tlayca, donde una secuencia de rocas carbonatadas es afectada por dos etapas de intrusión magmática, una de composición diorítica y otra cuarzomonzonítica, permitiendo la formación de mármol y de skarn acompañada de una superposición de óxidos y sulfuros seguida de una etapa hidrotermal tardía evidenciada por la presencia de zeolitas (analcima) en condiciones de baja temperatura y baja presión. Como constituyentes del skarn mencionan la presencia de tres tipos de granate con base en su color que son grosularita  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ , andradita  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$  y uvarovita  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ .

Aguilar-Murillo en 2012 presentó una cartografía más detallada de la zona, delimitando zonas mineralógicas y de alteración, realizó estudios de difracción de rayos X a muestras de skarn donde confirma la presencia de grosularita, mencionó además, que el metasomatismo se llevó a cabo en un ambiente somero ya que el skarn tiene poca extensión y se pueden encontrar rocas encajonantes frescas a poca distancia del contacto con el cuerpo intrusivo.

### I.3. Planteamiento del problema.

McCownellen 1933 publicó algunos resultados de espectrogramas de emisión realizados a tres cristales de granates de esta zona, Grajales-Nishimura y Sánchez-Hernández en 1979 mencionan la presencia de grosularita  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ , andradita  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$  y uvarovita  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$  estos minerales fueron clasificados por el color que presentan.

Con la información con la que se cuenta hasta el momento no existen trabajos recientes relacionados con la química de los granates de esta zona y a raíz de esto surge el interés por



## Capítulo I Introducción

realizar estudios químicos con métodos que permitan definir con mayor certeza su composición, sumando el interés que estos cristales pueden tener con fines gemológicos.

Se selecciona esta zona como un sitio de interés para estudiarla dentro del proyecto PAPIME 103912 titulado “Diseño de guías de aprendizaje de petrología metamórfica con base en la integración de colecciones de rocas y preparación de guías para prácticas de campo, que permitan al alumno integrar conocimientos teóricos con trabajo de campo y laboratorio”, considerando que se trata de una zona de metamorfismo de contacto de una secuencia carbonatada, donde se puede analizar también el proceso metasomático.

### I.4. Objetivos.

Generar un mapa geológico que sirva como apoyo a la guía de trabajo de campo y laboratorio que forma parte del proyecto PAPIME 103912.

Realizar análisis por fluorescencia de rayos X a rocas seleccionadas para conocer su composición química y relacionarla con la evolución durante el proceso metasomático que afectó a esta zona.

Realizar estudios para conocer la composición química de los distintos granates encontrados, diferenciados por su color, para clasificarlos y relacionar el color con la composición química.

Identificar las características gemológicas que presentan algunos de los granates de la Sierra de Tlayca, para saber si pueden ser utilizados como gemas.





### I.5. Marco teórico.

#### I.6.1 Skarns y su clasificación general

Los skarns son rocas metamórficas formadas por minerales cristalizados a partir de litologías carbonatadas que sufrieron metasomatismo provocado por la intrusión de una roca ígnea, a este proceso se le conoce como metamorfismo de contacto.

Este evento geológico se lleva a cabo en su parte inicial como un proceso isoquímico con un metamorfismo termal progresivo donde solo existe un cambio textural de la roca, en esta fase se lleva a cabo una des-volatilización del sistema, permitiendo la formación de calcita, y según las impurezas del protolito permite la formación de wollastonita, diópsida y feldespato potásico, la cristalización de estos minerales depende de la composición del protolito y de la temperatura presente, permitiendo la formación de rocas metasedimentarias en un bajo grado de metamorfismo y mármol en un alto grado.

En la siguiente fase de metamorfismo de contacto ocurre un incremento en el metamorfismo térmico, hasta llegar a fundirse la roca encajonante y mezclarse con el intrusivo originando un fundido de composición diferente, que al enfriarse permitirá la cristalización de los minerales característicos del skarn como son wollastonita, granate y piroxenos como diópsido, hedenbergita, johanesita y fassaita; los granates y los piroxenos presentes permiten clasificar el tipo de skarn desarrollado, en estos minerales además quedan registrados los cambios de los fluidos hidrotermales durante esta fase. Pirajno(2009) y Fettesy Desmons(2007) mencionan que este proceso se lleva a cabo a temperaturas entre 400 a 900°C y 0.5 a 4 kbar.

En la última fase de formación, se lleva a cabo una alteración hidrotermal retrograda que puede llegar a destruir el skarn y depositar minerales arcillosos como caolinita y montmorillonita además de clorita, calcita, cuarzo, hematita y pirita, en esta fase también se altera el intrusivo mediante el escape de fluidos por las fracturas presentes en este, así como del skarn, algunas de estas fracturas pueden quedar rellenas por minerales formados a partir de estos fluidos, según Pirajno (2009) esta fase se lleva a cabo a temperaturas que van de 700 a 200 °C y a presiones de 0.3 a 3 kbar, y el ClNa equivalente en rangos de 10 a 45%wt.

Enaudi (1982) clasificó a los skarn en dos tipos con base en la roca que sufrió metasomatismo, el endoskarn se refiere al skarn formado por el metasomatismo de rocas



## Capítulo I Introducción

ígneas intrusivas o aluminosilicatadas, y el exoskarn formado por el metasomatismo de rocas carbonatadas y a estos últimos los dividió con base en su mineralogía en calci-skarn y los skarns de magnesio, los primeros formados por el metasomatismo de calizas de alta a media temperatura, con mineralogía que incluye granate (andradita-grosularita), clinopiroxenos (diopsida-hedembergita), wollastonita, escapolita, epidota y magnetita; mientras que los skarns de magnesio formados a una alta temperatura se forma a partir de dolomía y sus minerales característicos son: diópsido, forsterita, serpentina, magnetita, tremolita-actinolita.

La sucesión típica de facies en un calciskarn es: el endoskarn al interior de cuerpo y en el exterior el exoskarn, esto se puede diferenciar por las zonas de mineralización que partiendo del centro del cuerpo se encuentra dada por una zona de asociación bi-mineral de andesina o escapolita, o feldespato potásico asociado con grosularita o epidota; la segunda zona mono mineral de granate o clinopiroxeno cálcico, después una zona bi-mineral de granate-clinopiroxeno, esta zona puede o no estar seguida de una zona de wollastonita (ver fig. 3), esta zonación depende de las condiciones de presión y temperatura al igual que la actividad química de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ , según Fettes y Desmons, (2007), las formas que pueden presentar son de una veta, o tubos que cortan rocas tanto carbonatados como rocas silicatadas formando vetas.



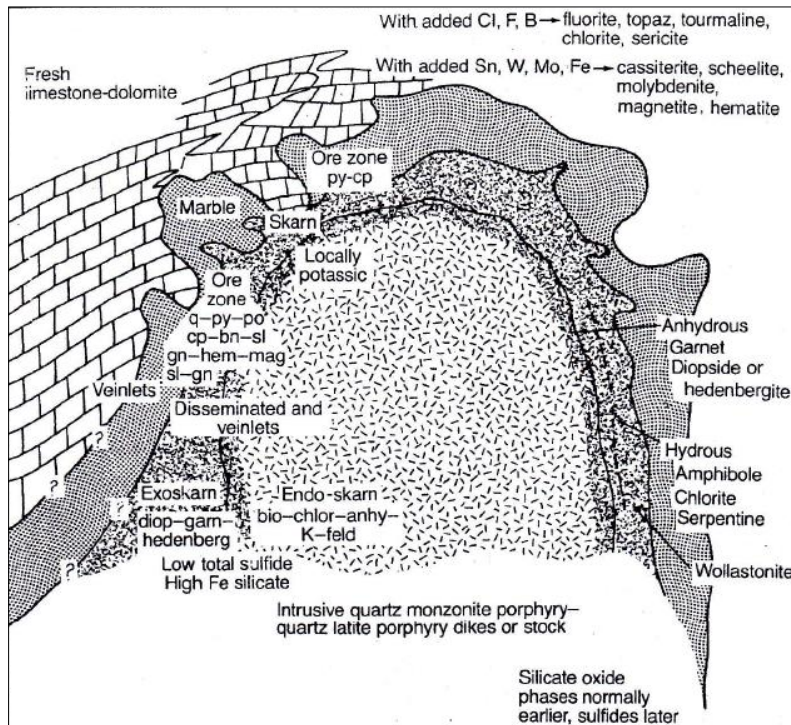


Fig. 3 Stock con una zona de skarn, muestra la secuencia de minerales propuesta por Gilbert y Lowell en 1974, tomado de Guilbert, 1996

La mayoría de los skarns se encuentran asociados a zonas de subducción entre una placa continental y una placa oceánica (ver fig. 4), formando cuerpos intrusivos de composición diorítica a granítica, granitos tipo-I, o en una zona de apertura continental formando granitos tipo-S. Otra clasificación de los skarns y probablemente la más utilizada se realiza con base en el metal económicamente explotable con esto se pueden clasificar diferentes skarn, como son: skarn de oro (Au), tungsteno (W), cinc (Zn), molibdeno (Mo), cobre (Cu) y fierro (Fe).

### Skarn de oro (Au)

Los skarns con grandes cantidades de oro son raros ya que este mineral se encuentra junto con metales base como son el cobre, plomo y zinc, estos depósitos se encuentran asociados con cuerpos intrusivos de composición diorítica a granodiorítica acompañados de complejos de diques y sills, estas rocas presentan indicadores de fusión parcial de la corteza terrestre o fundición de material sedimentario de la corteza, en estos skarns la mineralogía predominante consta de piroxenos ricos en hierro, abundante granate del grupo grandita,

## Capítulo I Introducción

feldespato potásico, escapolita, vesuvianita, apatita y anfíboles ricos en aluminio, estos skarns son de textura fina, con arsenopirita y pirrotita como sulfuros dominantes además de minerales de bismuto y telurio (Meinert, 1992).

### Skarn de tungsteno (W)

Estos depósitos son encontrados dentro del continente asociados a plutones calci-alcálicos en cinturones orogénicos, los intrusivos pueden ser batolitos equigranulares o pegmatíticos con zonas de exoskarn cercanas, formados por hornfels calco-silicatados y skarnoides derivados de la fusión y mezcla de secuencias carbonatadas y pelíticas; la mineralogía dominante es hedembergita, y en menor cantidad granate principalmente andradita, biotita, pirrotita, sheelita, esfalerita, arsenopirita y en ocasiones molibdenita (Enaudi, 1982).

### Skarn de zinc (Zn)

Los skarns de cinc se encuentran asociados a zonas de subducción o apertura continental, en estos yacimientos no solo se explota el cinc sino también plomo y plata a partir de sulfuros, se encuentran asociados a rocas como son dioritas hasta granitos o también a complejos volcánicos que pueden ser distantes al depósito, formando mantos o chimeneas; la mineralogía presente en estos skarns es variada y se puede encontrar granate, olivino, piroxenos, ilvaíta, piroxenoides, anfíboles, clorita y serpiente.

### Skarn de cobre (Cu)

Este es el tipo de skarn más distribuido, se encuentra relacionado a granitos tipo I, asociados a un arco magmático formado por una zona de subducción entre una placa de corteza continental y otra oceánica, estos depósitos minerales están relacionados a plutones porfídicos calco-alcálicos, muchos de los cuales tienen rocas volcánicas cogenéticas; en el plutón se pueden encontrar vetas, fracturamiento o brechamiento y una alteración muy desarrollada; estos skarns se encuentran comúnmente zonados, con granate variedad grosularita masiva cercano al cuerpo intrusivo, mientras conforme se aleja del plutón incrementan los piroxenos y más alejado de esta se encuentra en el skarn vesuvianita y wollastonita cercanos al contacto con el mármol.



### Skarn de hierro (Fe)

Estos tipos de skarns son minados por contener altos valores de magnetita, principal mena de hierro, y en menor proporción cobre, cobalto y níquel además puede presentarse oro (Grigoryev et al., 1990). Los skarns cálcicos ricos en hierro se localizan en arcos de islas y son asociados con plutones ricos en hierro que intrusionan a calizas y a rocas volcánicas, en estos skarns la mineralogía predominante es granate y piroxenos con menor presencia de epidota, ilbaita y actinolita. La alteración del intrusivo es común y suele ser extensa con presencia de albita, ortoclasa y escapolita en vetas. Los skarns magnésicos ricos en hierro están asociados a una diversidad de plutones y de ambientes tectónicos.

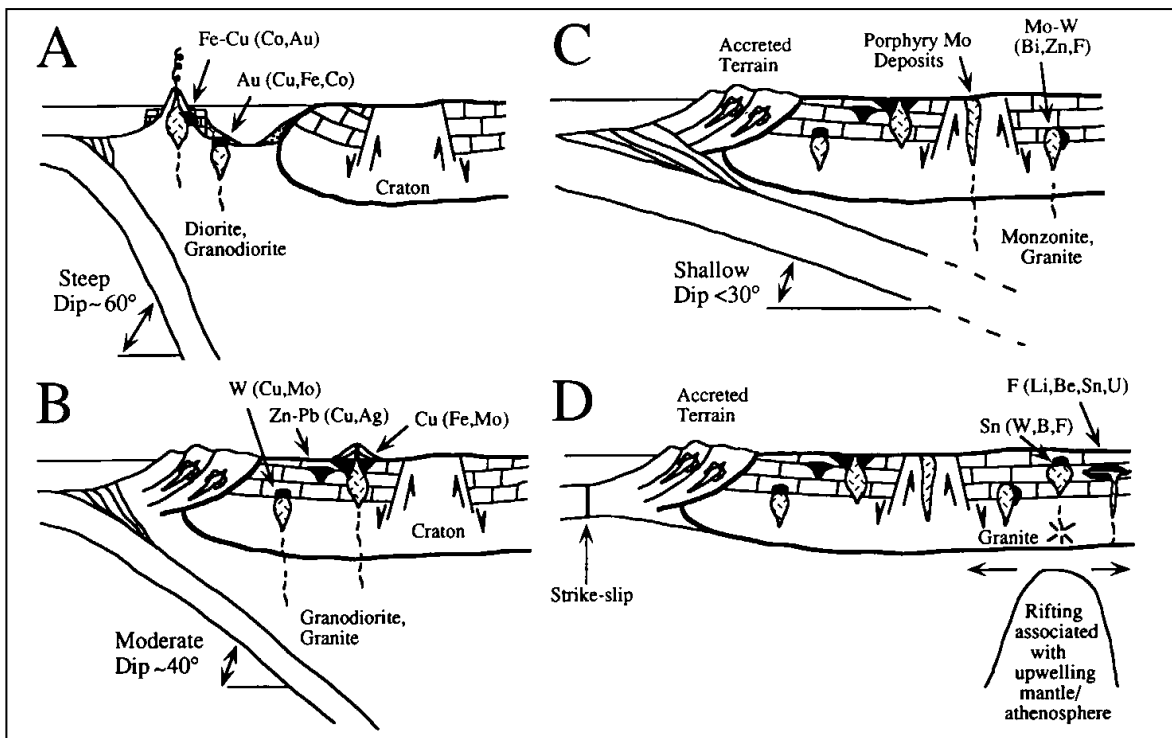


Fig. 4. Esquema de los modelos de ambientes tectónicos idealizados de la formación de Skarns; A) subducción de corteza oceánica y cuenca de tras-arco, B) subducción de corteza oceánica con acreción de terreno, C) subducción con un bajo ángulo, D) zona de apertura continental. (Tomado de Meinert, 1992).

### I.6.2. Especies de Granates

Los granates son un grupo mineral con gran variedad de especies, estas en su mayoría pertenecen al sistema cúbico y usualmente forman dodecaedros y trapezoedros, cristales bien desarrollados (euhedrales), se forman en rocas ígneas y metamórficas y se les puede encontrar también como minerales de placer; se utilizan en la gemología, debido su dureza (6-7 ½ según la escala de Mohs) al igual por la amplia gama de colores que presentan, exceptuando el color azul, se utiliza también en la industria de los abrasivos por su dureza.

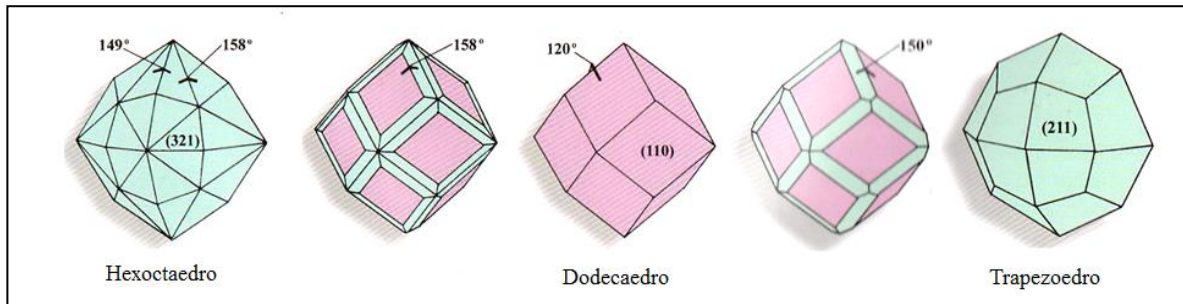


Fig. 5 Formas del sistema cúbico que pueden presentar los granates.

Los granates son soluciones solidas por lo cual su composición química es variada, por ello se emplea una fórmula donde se pueden sustituir estas variaciones para definir la cristalografía del mineral, esta Fórmula es definida como  $A_3B_2(SiO_4)_3$ , donde el lugar de A puede ser ocupado por los iones  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ , o  $Mn^{2+}$ ; y el lugar de B puede ser sustituido por  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $V^{3+}$  o  $Zr^{3+}$ , ocasionalmente se puede llevar a cabo la sustitución de  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ , o  $Ti^{4+}$  en el lugar del sílice en un arreglo tetragonal en algunas especies raras de granates. Con base en esta composición existen dos series de granates, la primera se encuentra formada por especies donde se encuentra el  $Al^{3+}$  tomando el lugar de B y constituyen la serie PIRALSPITA (piropo, almandino, espesartina), la otra serie es la de los granates cálcicos donde se realiza la sustitución del ion  $Ca^{2+}$  en el lugar de A y constituyen la serie UGRANDITA (Uvarovita, grosularita y andradita), estos últimos son los más comunes en metamorfismo de contacto; en ambas series existen soluciones sólidas por lo que es raro tener una composición química exacta.

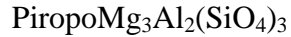


## Capítulo I Introducción

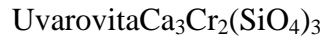
Existen un tercer grupo constituido por la sustitución del sílice, aunque es muy rara, estos cambios en los cationes de elementos forman una gran cantidad de especies las cuales se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especies según la composición química del grupo del granate

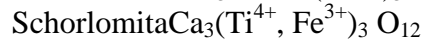
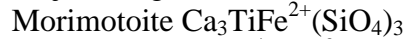
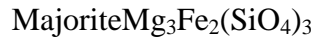
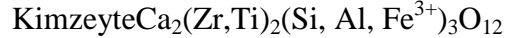
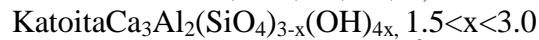
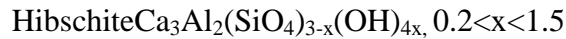
### Serie PIRALSPITA



### Serie UGRANDITA



### Especies raras



(Datos tomados de Back, M.E, 2008)

Como se mencionó los granates presentan una gran variedad de colores, estos pueden ser causados por elementos en proporciones pequeñas dentro de su estructura, una pequeña cantidad del ion  $\text{Fe}^{+2}$  en una coordinación en una estructura cúbica distorsionada causa el color rojo en la mayoría de los granates, el  $\text{Mn}^{+2}$  produce un color naranja en la espesartitas, mientras en la andradita el color amarillo verdoso puede ser causado por el  $\text{Fe}^{3+}$  en un arreglo octaedral, pero junto con el Titanio oscurece el cristal, en tanto los colores verdosos en algunas grosularitas pueden ser provocados por bajas concentraciones de  $\text{V}^{3+}$  y en la andradita o en la uvarovita por el  $\text{Cr}^{3+}$ ; las combinaciones de los iones antes mencionados causan una gran variedad de colores y aún mayor si se les combina, como en el caso del



## Capítulo I Introducción

$\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  que causan tonos púrpuras mientras que la combinación de  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$  y usualmente acompañados por  $\text{Mn}^{2+}$  causan el efecto alexandrita en estos minerales (Fritsh y Rossman, 1993).

Las inclusiones dentro de los granates son comunes como respuesta a las condiciones bajo las que se forman, para el caso de los granates variedad grosularita formados en condiciones de metamorfismo de contacto, se pueden encontrar inclusiones de actinolita, apatita, calcita, diópsida, grafito, piritita y escapolita en diferentes tamaños (Koivula, 1993). Estas inclusiones pueden causar algunos efectos ópticos en estos minerales al ser tallados como ejemplares gemológicos.





## II. Geología regional

El Estado de Morelos se encuentra ubicado en dos provincias geológicas, (Ferrari et. al., 2007) una de ellas es la del Cretácico sedimentario, formada por rocas sedimentarias marinas cretácicas y continentales cenozoicas presentes en estructuras alargadas orientadas norte-sur; las estructuras plegadas y falladas en esta provincia representan la continuación de la deformación Laramídica en el sur de México, esta provincia presenta la mayor cobertura en el Estado. La otra provincia que se encuentra en el Estado es la Faja Volcánica Transmexicana, se orienta oeste-este, constituida por rocas ígneas del Mioceno inferior, aflora en la parte norte del Estado de Morelos.

Las formaciones ubicadas en el centro-oriente del estado de Morelos son de edad Cretácica a Cuaternaria, a continuación se describen sus características principales y puede ser observada su distribución en la figura 6.

### Formación Morelos

(Cretácico Temprano)

Aflora en la zona oriental del Estado al norte de Atotonilco y en las inmediaciones de Tlayca. Es una sucesión de capas de caliza y dolomía interestratificadas, según Fries (1960) la dolomitización de esta unidad ocurrió en el fondo del mar antes y durante la diagénesis, presenta cantidades variables de pedernal en forma de nódulos, lentes, granos y fragmentos de fósiles silicificados.

Esta formación se encuentra en contacto inferior con el esquisto Taxco y el complejo metamórfico Acatlán, este contacto es de tipo tectónico. Fries (1960) menciona que la edad de esta formación es variable en sus distintas localidades, debido a que esta unidad fue depositada sobre una superficie irregular, además de la erosión que sufrió principalmente en la parte superior, sin embargo, menciona que la presencia de foraminíferos como *Dicyclina schlumbergeri* y miliólidos como *Nummuloculina heimi* que permiten ubicar a esta unidad dentro del Albiano medio-Cenomaniano. El espesor de la unidad es muy variable, según Cabral-Cano et al. (2000) determinaron un espesor de 380 m, mientras que García-Díaz (2004) registra un espesor de más de 700 m.

La llamada formación Cuautla se considera de parte de la Formación Morelos y es considerada el límite transicional entre la formación Morelos y la formación Mexcala



## Capítulo II Geología regional

(Zamudio-Ángeles 2005). Se presentan calizas que van disminuyendo el espesor de sus estratos hasta convertirse en calizas clásticas (conglomerado intraformacional).

### Formación Mexcala

(Cretácico Tardío)

Definida por Fries (1956 y 1960), la litología de esta unidad es muy variable, incluye una sucesión de capas interestratificadas de arenisca, limolita y lutita calcáreas con escasos lentes de caliza clástica. Aguilera-Franco (2000), mencionó que la base de la unidad Mexcala se encuentra dominada por caliza arcillosa clasificada como *packstone-wackestone* de bioclastos, hacia la cima la litología pasa a una intercalación de lutita, limolita y arenisca que se vuelven conglomerado. A esta unidad se asigna una edad de Cenomaniano-Mastrichtiano. Su contacto inferior es de tipo transicional con la formación Morelos, mientras el contacto superior de esta formación es con las formaciones Balsas y Cuernavaca en la región de Taxco y, según Fries el espesor total de esta formación no puede ser medido ya que ha sufrido erosión, aunque reportan espesores de 600 m a 2000 m de espesor.

### Formación Balsas

(Paleógeno)

Fries (1960) propuso el nombre de Grupo Balsas para una sucesión de rocas que comprende una gran variedad de tipos litológicos, todos ellos de edad cuaternaria de espesor variable que va de 300 m a 600 m, se presentan en la cuenca del río Mexcala-Balsas en el centro austral y el suroeste de México.

La formación Balsas consiste en conglomerados formados por clastos de calizas, rocas volcánicas y/o metamórficas, con interestratificaciones de margas, arenisca, limolita, lutita, brecha y tobas volcánicas, intercalados con derrames lávicos (andesita y basalto), caliza lacustre y/o yeso (Moran-Zenteno et al, 2007). En algunos sitios la estratificación es difícilmente perceptible; en otros, los estratos pueden variar de delgados a masivos. Otro tipo litológico de la formación Balsas, consiste en capas ligeramente endurecidas de limo, arena y arcilla, con una proporción menor de interestratos de conglomerado de calizas de grano fino y con mezcla considerable de material tobáceo.

### Riolita Tilzapotla

(Eoceno)

Según Moran-Zenteno et al. (2004) esta formación está compuesta por tobas con abundantes fragmentos de calizas y fragmentos de rocas volcánicas y sub-volcánicas soportados por matriz.



## Capítulo II Geología regional

La caracterización general de esta formación corresponde a una toba vítrea-cristalina con masas cripto- a microcristalina de cuarzo y plagioclasa que incluye fantasmas de esferulitas y pequeños cristales de óxidos de Fe-Ti y circón, de composición dacítica, el espesor de esta unidad es variable, Moran-Zenteno (2004) menciona que para la facies de extra caldera puede medir hasta 1000 m de espesor, su límite inferior se encuentra en inconformidad con el conglomerado de la formación Balsas, su formación corresponde a la actividad de la caldera Tilzapotla.

Formacion Tlaica

(Oligoceno tardío)

El nombre de formación Tlaica fue utilizado por Fries (1966) para describir a una secuencia de rocas volcánicas como ignimbritas, flujos de lava y brechas tobaceas de composición riolítica. Litológicamente varían en textura, color y composición, asociadas a un mismo evento volcánico del Eoceno, pero las separó con base en el lugar donde afloran, Fm. Tlaica al este y riolita Tilzapotla al oeste del estado de Morelos. Fries (1960) agrupa a estas formaciones en el Grupo Buenavista, estas se encuentran asociadas al evento volcánico de la caldera Tilzapotla. Moran-Zenteno (2004) describe al grupo Buenavista en la facies de extra caldera como una sucesión volcánica compuesta por corrientes lávicas, brechas y toba de composición andesítica, predominantemente, aunque se distinguen también tobas líticas y brechas volcánicas interestratificadas con los derrames, en Morelos llega a tener espesores de 600 a 1000 metros de espesor. Considera a la andesita Buenavista como producto de la fase resurgente de la caldera Tilzapotla cuyo producto inicial fue la riolita Tilzapotla.

Granodiorita.

(Oligoceno tardío)

También conocido como intrusivo Tlayca (Fries, 1960), corresponde a una roca ígnea intrusiva de textura porfídica de grano medio, presenta variaciones composicionales partiendo del centro con composición diorítica a sienítica. En la zona de contacto con la caliza de la formación Morelos y el conglomerado de la formación Balsas se presenta una aureola de metasomatismo caracterizada por una zona de skarn de granate y epidota. De Cserna y et. al. (1974) obtuvieron una edad de  $30 \pm 3$  Ma que lo sitúa en el Oligoceno tardío.



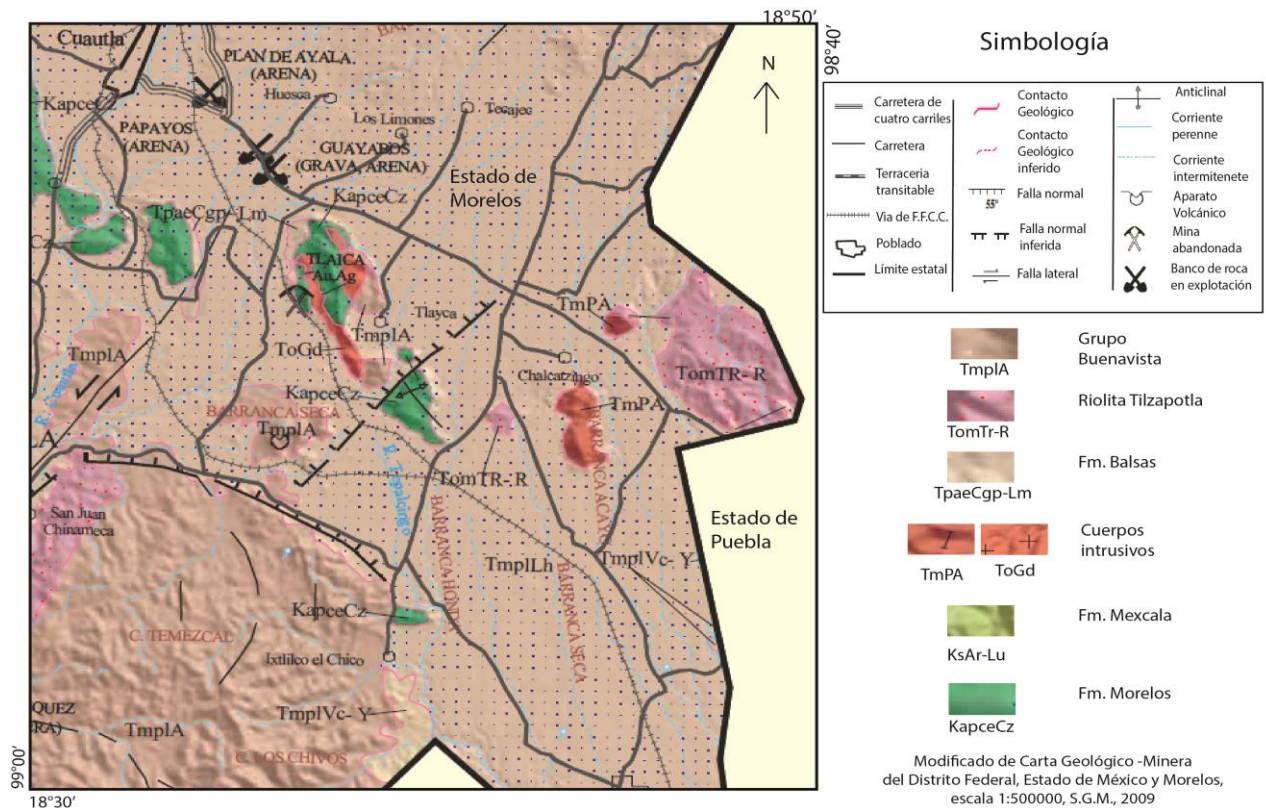
## Capítulo II Geología regional

Grupo. Buenavista

(Mioceno)

Fries (1960) propuso el nombre de Grupo Buenavista. Esta formación es una sucesión volcánica compuesta por coladas de lava, brechas y tobas de composición andesítica, este grupo aflora ampliamente en la región sur oriental del estado de Morelos. Los niveles dentro del grupo varían en composición desde basalto a dacita además de rocas de composición riolítica, sin embargo, estudios geoquímicos de Morán-Zenteno et. al. (1998) indicaron que predomina la dacita sobre la andesita, su límite inferior está caracterizado por una discordancia angular. Las capas basales descansan sobre la Riolita Tilzapotla, el espesor observado en el estado de Morelos de esta formación, varía de 600 a 1,000 m. La columna litológica de las formaciones antes mencionadas puede observarse en la figura 7.

Fig. 6 Mapa geológico del oriente del estado de Morelos



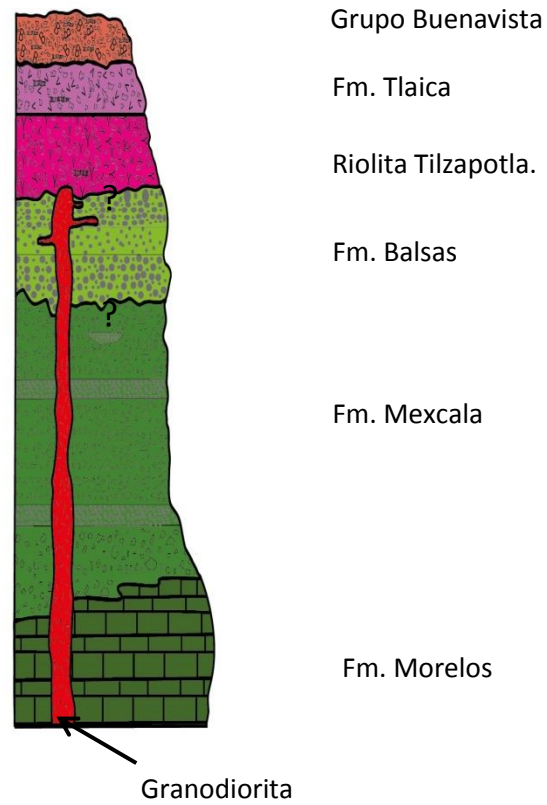


Fig. 7 Esquema de columna estratigráfica propuesta en este trabajo con base en la literatura para la región centro-oriental del estado de Morelos.

### III. Geología Local

En este capítulo se presentan las descripciones petrológicas, petrográficas y análisis geoquímicos de muestras representativas colectadas en campo de las unidades encontradas, todas las muestras fueron descritas petrológicamente, 19 de estas muestras fueron seleccionadas para realizarles sección delgada y analizarlas con un microscopio y a seis de estas últimas se realizaron análisis químicos mediante fluorescencia de rayos X.

El mapa geológico resultado del trabajo de campo y la ubicación de las muestras colectadas, pueden ser consultados en el Apéndice A así como las secciones geológicas generadas a partir del mapa.

Las descripciones petrológicas se realizaron con muestras de mano, tomando en cuenta la textura que presentan así como la mineralogía observable con una lupa de 10X. Las descripciones petrográficas se realizaron con un microscopio petrográfico marca Carl Zeiss modelo AXIOLAP, y software Axio Vision con una cámara fotográfica digital acoplada marca Canon, las láminas delgadas fueron preparadas por la empresa Petroanálisis S.A. y el Taller de laminación del área de edafología del Instituto de Geología de la U.N.A.M.

Los análisis de fluorescencia de rayos X se realizaron con un espectrómetro secuencial de FRX Siemens SRS3000, calibrado con muestras de referencia geoquímica, en el laboratorio de fluorescencia de rayos X del Instituto de Geología de la U.N.A.M.

#### III.1. Petrología y petrografía.

##### Formación Morelos

Esta formación se encuentra en el flanco este del cerro Xalostoc (Ver mapa geológico, Anexo A), también llamado cerro San Juan, en la zona de estudio no se observa su contacto inferior, el contacto superior se encuentra al noroeste del cerro Xalostoc en discordancia angular erosiva con la formación Balsas; aflora en estratos delgados tabulares de calizas tipo *mudstone* a *packstone* de 15 a 20 centímetros de espesor en color gris claro, afectados por vetillas de calcita perpendiculares a la estratificación, los límites entre estratos se encuentran formados por estilolitas con dirección del echado de 85° al 250° (fig.



### Capítulo III Geología local

8), en algunos lugares se observa la presencia de bancos de rudistas (fig. 9); los estratos presentan estructuras de disolución como *lapiaz* y algunas pequeñas cavidades.

La formación Morelos se encuentra afectada por el metamorfismo de contacto, ya que en la parte superior de esta zona se puede observar la formación de un mármol de textura granoblástica de grano fino a un mármol de grano grueso, muestras XA-43 a XA-46, se observa el aumento en el metamorfismo del mármol gracias al cambio del tamaño de grano creciente hacia la cima, este cambio en la textura se debe a cambios en la intensidad del metamorfismo térmico. El mármol, al igual que las calizas, presenta estructuras de disolución como *lapiaz* y algunas pequeñas cavidades, en el mármol de grano fino aún se pueden observar restos de rudistas. Cercana a la zona de skarns la calcita presenta una coloración azul.

Petrográficamente en la caliza (fig. 10), se puede observar la presencia de micrita en una proporción cercana al 90%, la roca presenta foraminíferos y fragmentos de rudistas de tamaño medio en una proporción del 8 %, además de algunos cristales de esparita de tamaño medio cercanas al 2%, se aprecia también la presencia de micro fracturas rellenas de calcita; con base en estas características se clasificó a la roca como una caliza *wackestone* de bioclastos.



Fig. 8 Estratos de calizas del cerro de Xalostoc, con dirección del echado de 85° al 250°.



Fig. 9 Caliza con algunos rudistas.



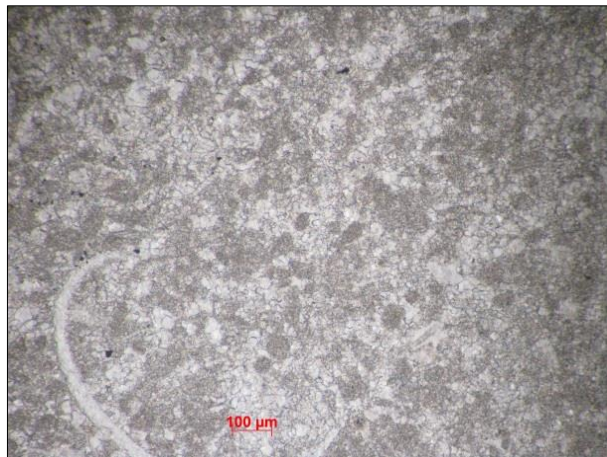


Fig. 10 Caliza de la Formación Morelos en sección delgada, se observan bioclastos (fragmentos de rudistas y foraminíferos).

#### Formación Balsas

Esta formación está representada en la zona por conglomerados de calizas intercalados con estratos delgados de caliza en su parte baja, el límite inferior se encuentra en contacto con la formación Morelos al noroeste del cerro Xalostoc por una discordancia angular erosiva, su contacto superior es angular erosivo con las tobas de la formación Tlaica, tiene una distribución bastante amplia desde el noroeste del cerro Xalostoc hasta las cercanías del poblado de Tlayecac, al norte de la sierra, y al este forma parte de una porción del cerro Viejo en las cercanías de Tlayca.

Los conglomerados se encuentran formados en su mayoría por fragmentos sub-redondeados a sub-angulosos de calizas de textura *mudstone*, *wackestone* y *packstone* en tamaños de 1 a 5 cm, muestra XA-40, en otro conglomerado los clastos presentan formas tabulares a discoidales sub-redondeados con tamaños de 0.5 a 1cm, se presentan en estratos delgados con matriz arenosa de grano medio; en ambos casos la mayoría se encuentra soportado por los clastos, los tamaños de los clastos están relacionadas con el espesor de los estratos que van de 10 a 50 cm, en la parte superior de la unidad se encuentran clastos de areniscas de 1





### Capítulo III Geología local

a 3 centímetros tabulares y sub-angulosos (fig. 11). Los clastos en algunos casos presentan contactos lineales y suturados, signos de que fueron sometidos a compresión.

En los clastos del conglomerado se encuentran fósiles de rudistas y algunos tintínidos; esta unidad se meteoriza en forma tabular y no presenta disolución aparente, excepto en la parte que es afectada por el intrusivo, transformándose en meta-conglomerado (fig. 12) y posteriormente en skarn, esto se puede observar al poniente de cerro Tencuancualco, en algunas zonas presenta huellas de silicificación.



Fig. 11 Conglomerado de calizas de la Formación Balsas, flanco noroeste del cerro Xalostoc.



Fig. 12 Metaconglomerado de la Formación Balsas, flanco oeste del cerro Tencuancualco.

#### Formación Tlaica

Esta formación se encuentra constituida por secuencias de rocas volcánicas de composición riolítica como son ignimbritas y flujos de lava (fig.13). Esta formación aflora en Cerro Viejo, Cerro Tenayo Chico, Cerro el Mirador y sobre el Cerro Tencuancoalco (ver mapa geológico, Anexo A), en todos estos lugares se presenta como afloramientos de ignimbritas. Esta roca presenta textura fluidal con bandas de colores naranja, amarillo, rojo y lila (fig.14), se puede observar la dirección del flujo, gracias a algunos cristales de cuarzo y fragmentos de roca orientados paralelos a la dirección de flujo. Se pueden observar feldespatos, cuarzo, biotita y rocas volcánicas y calizas.





Fig. 13 Derrame de composición andesítica de la Formación Tlaica, con bloques de 30 a 50 cm, Cerró Viejo.



Fig. 14 Fotografía, detalle de una toba lítica de la Formación Tlaica, Cerro Viejo.

### Cuerpo intrusivo

Fueron identificados al menos tres tipos de rocas intrusivas, la primera de composición diorítica, se encuentra ampliamente extendida por la Sierra de Tlayca y es afectada por metamorfismo de contacto, la segunda observada es de textura porfídica, presenta aglomeraciones de materiales máficos en formas circulares (autolitos) de 5 mm a 30 cm, esta roca afecta a la primera. Y la tercera de composición félsica que afecta a las anteriores, estas rocas pueden observarse al sur este del cerro Xalostoc en la barranquilla de los Sabinos.

El intrusivo de composición diorítica megascópicamente (muestra XA-01) presenta textura fanerítica de grano medio, se puede observar abundantes cristales euhedrales y subhedrales de anfíboles, plagioclasas y en menor cantidad cuarzo, además de arsenopirita, en campo se encuentra en las partes altas con meteorización diferencial en exfoliación, y en las partes



### Capítulo III Geología local

bajas solo con una delgada capa de oxidación, presenta un contacto transicional con el intrusivo porfídico y en algunas zonas esta roca es brechada por vetas de skarn que no siguen una dirección preferencial (fig.15).

En sección delgada presenta una textura hipidiomorfa, constituida por cristales de plagioclasas (andesina) 50%, clinopiroxeno (25%), hornblenda (10%), la roca se encuentra cloritizada (2%) y presenta de forma diseminada finos cristales de pirita (5%), con base en estas características se clasificó a esta roca como una monzodiorita (fig. 19 A y B).

La segunda roca intrusiva observada es de textura porfídica (fig.16) de grano medio (3 a 5 mm) con cristales subhedrales de anfíboles en cristales solos y aglomerados (autolitos) (ver fig.17), plagioclasas y poca presencia de cuarzo, presenta además pequeños cristales subhedrales de arsenopirita, pirita y cobre nativo anhedral (muestra XA-22), presenta una meteorización de una pequeña capa rojiza con zonas grises oscuras, este cuerpo intrusivo se encuentra en contacto difuso con el primero.

Petrográficamente presenta textura porfídica con cristales subhedrales de cuarzo (30%), plagioclasas (andesina y labradorita, 30%), diópsida (10%), esfena (3%), titanogaugita (10%) y clorita (10%) además de pirita (5%) y arsenopirita (2%), con estas características se clasificó a la roca como un pórfido diorítico (fig.19 E y F).

La tercera roca identificada de composición félsica presenta textura porfídica con gran cantidad de cristales de feldespatos y plagioclasas con porfidolitos de cuarzo subhedral (fig. 18), esta roca afecta a los anteriores intrusivos en forma de diques de 80 a 170 cm (muestra XA-20).

Petrográficamente presenta cristales subhedrales de cuarzo (50%) de tamaño grueso, cristales de tamaño medio de sheridanita (3%), esfena (1%), clinopiroxeno (10%) y ortoclasa (30%), además de cristales de tamaño fino de rutilo (1%) y hematita (1%), presenta también material arcilloso (4%) (Ver Fig.19 C y D), con base en las proporciones de los minerales presentes se llegó a la conclusión que se trata de un granito alcali-feldespático.





Fig. 15 Monzodiorita con fracturas rellenas de cuarzo y granate, barranquilla de Los Sabinos.



Fig. 16 Diorita brechada, en las fracturas se desarrolló el endoskarn, barranquilla de Los Sabinos.

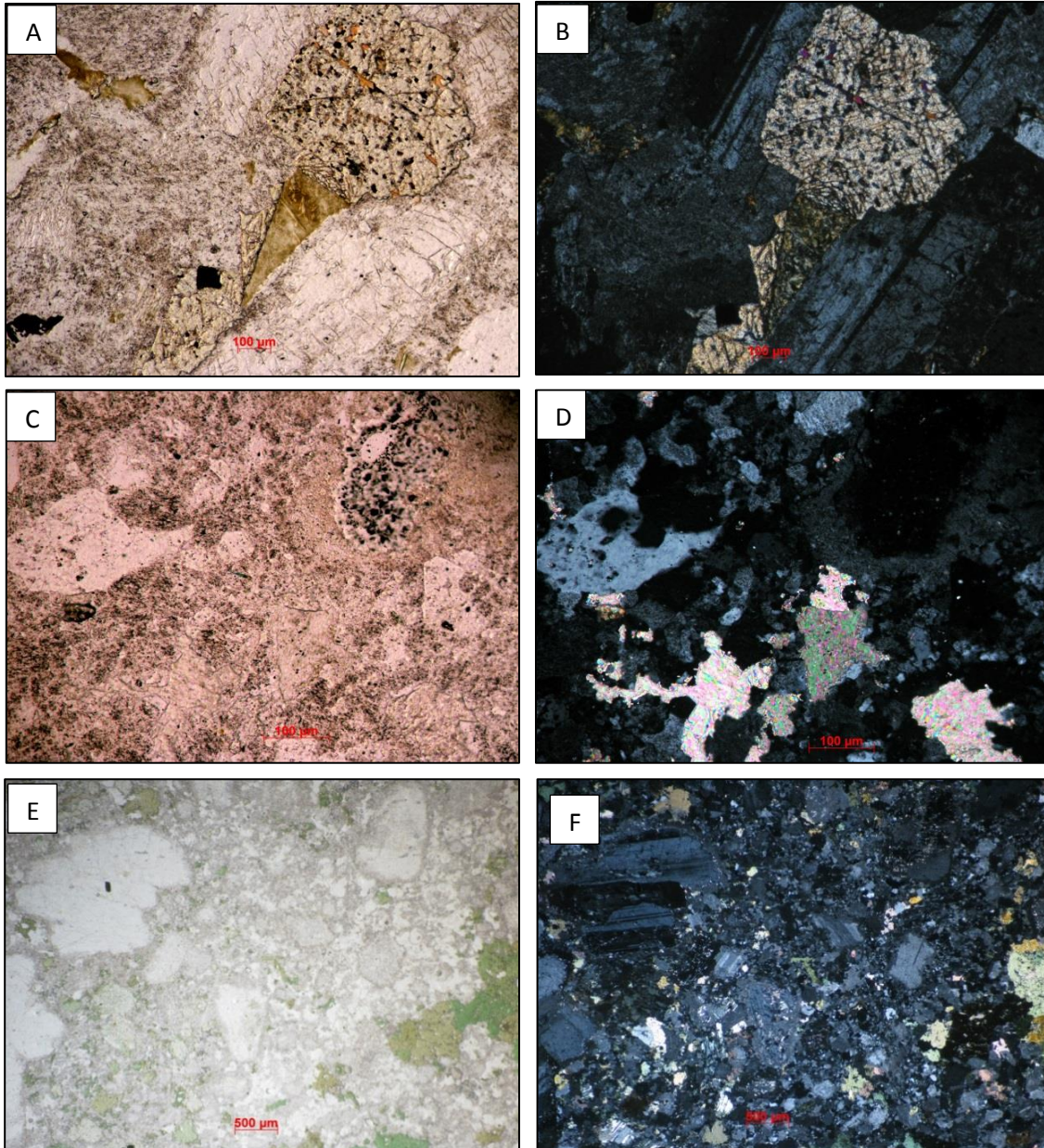


Fig. 17 Autolito dentro de la diorita, barranquilla de Los Sabinos.



Fig. 18 Detalle del granito álcali-feldespático, barranquilla de Lo.

Fig. 19 Fotografías en sección delgada en luz paralela y con nicols cruzados de las muestras XA-1, XA-20 y XA-22



A y B fotografías de la diorita (XA-1) se puede observar plagioclasas, hornblenda, piroxenos y piritita; C y D pórfido diorítico XA-20 se puede observar feldespato, cuarzo, titanita, calcita y rutilo además de arcillas producto de la alteración de feldespatos; E y F muestra XA-22 plagioclasas y cuarzo con aglomeraciones de diopsido rodeados de clorita.



#### Skarns

En la zona se encontraron dos tipos de skarn, uno producto del metasomatismo e hidrotermalismo de la diorita y monzodiorita representado por una zona de endoskar ampliamente desarrollada, el segundo formado por el metasomatismo de las calizas de la formación Morelos y conglomerados de la formación Balsas.

El endoskarn se encuentra en la parte central de la sierra, formando vetas y brechas, se presenta en un color amarillento con granates de color oscuro y en algunas ocasiones con zonas blancas. Se formó, además, un endoskarn en las fracturas del cuerpo intrusivo quedando rellenas de cuarzo y granates verdes (muestra XA-26), ver fig. 20, los granates pueden alcanzar tamaños de 5 mm a 6 cm (ver fig.21 y 22), dentro de la brecha se pueden encontrar bloques de skarn con bordes de reacción, donde se puede observar el crecimiento de granates a partir de estos bloques (ver fig.23 ), existe además un skarn de piroxenos que se encuentra en pequeños afloramientos, en el cerro Jumilar y cercanos a la cañada Doña María, esta roca se presenta en un color gris claro con hábito fibroso en bloques de tamaño medio.



Fig. 20 Fractura rellena de granates verdes y cuarzo lechoso, flanco oeste de la cañada Doña María.



Fig. 21 Veta de granates de color oscuro dentro de la diorita, zona sur de la Sierra de Tlayca.





Fig. 22 Granate de seis centímetros de diámetro encontrado en la zona sur de la Sierra de Tlayca.



Fig. 23 Bloque dentro de la brecha de skarn, se puede observar un una corona de reacción de formación de granates, cerro el Jumilar.

En el area de San Juan en la brecha de endoskarn ademas de los minerales antes mencionados, se encuentran cristales de calcita, pirita, esfalerita y magnetita la zona presenta una intensa oxidación.

En lámina delgada se observa en la brecha de skarn una textura porfidoblástica (muestra XA-47, fig. 24), con cristales gruesos de cuarzo subhedral (30%), granate anhedral color pardo (30%), diopsida (20%), espurrita(10%), cristales finos y medios de calcita (5%), clinopiroxenos de grano medio (5%), pirita subhedral en cistales finos (5%) y óxidos de hierro rodeando a la pirita (5%). Mientras el skarn de piroxenos (muestra XA-23, fig. 25) en sección delgada presenta una textura fibrosa con una composición regida por piroxenos (70%) que se están alterando a diópsida (20%), se observa también cuarzo anhedral en cristales gruesos y medios (5%), actinolita (4%) y calcita como relleno de fracturas.

El endoskarn (muestra XA-48 y XA-30) se encuentra compuesto de piroxenos (50%), plagioclasas (bytownita y anortita, 20%) en tamaños finos y medios rodeados de los cristales de piroxenos, hornblenda en cristales de tamaño medio subhedrales (10%), clinozoisita (5%) y óxidos (5%), ver fig. 26.



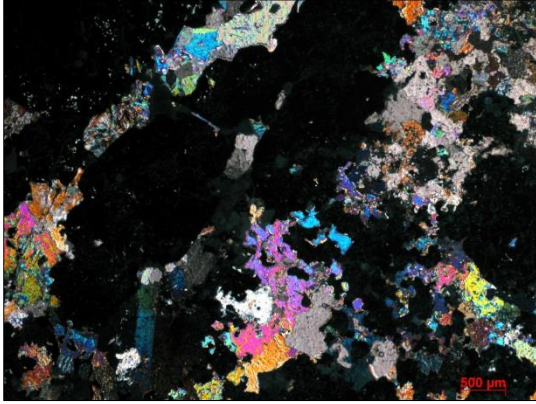


Fig. 24 Muestra XA-47, fotografía con nicoles cruzados, se puede observar granate, cuarzo, pirrotita, diópsida y piroxenos.

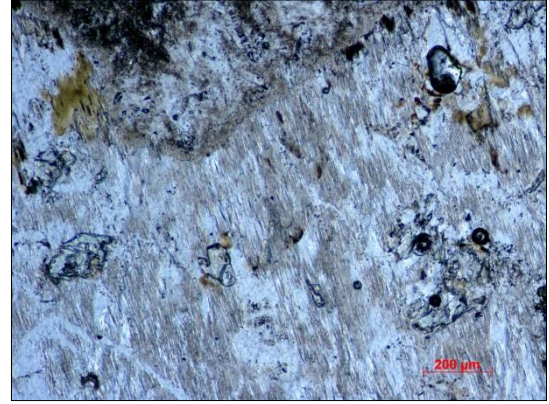


Fig. 25 Muestra XA-23, fotografía con luz paralela, presentan textura fibrosa los cristales de ortopiroxenos, entre ellos se observan cristales de diopsida.

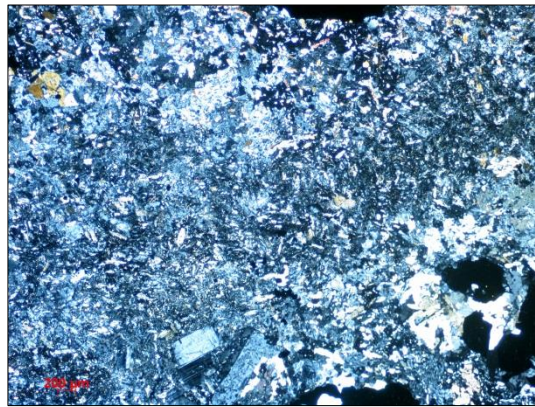


Fig. 26 Muestra XA-48 piroxenos rodeando a plagioclasas y a cristales de sulfuros.

El exoskarn se encuentra distribuido indistintamente, en la parte sur de la Sierra de Tlayca en pequeños afloramientos en las partes bajas y en lo alto de los cerros Xalostoc, Iglesia vieja, y parte del cerro Tencuancualco donde se desarrolló con un amplio espesor y extensión.



### Capítulo III Geología local

En la mayoría de los casos presenta textura porfidoblástica, la parte meteorizada se presenta en color gris con fragmentos rosas, mientras que en superficie fresca es de color blanco con zonas rosas y verdes (ver fig. 27 y 28 ), se encuentra compuesto de cristales de granate anhedrales a euhedrales con tamaños que van de 0.5 a 2 cm de diámetro, además de cristales subhedrales de wollastonita, vesubianita, calcita azul, y magnetita anhedral (muestra XA-40), en el caso de la cañada Doña María es fácil de apreciar el zoneamiento de color en los granates ya que en esta localidad se pueden encontrar granates de 1 a 3 cm con el centro verde y capas de crecimiento de granate rosa.



Fig. 27 Superficie meteorizada del exoskarn del cerro Tencuancualco.



Fig. 28 Exoskarn de granate y vesubianita, en tonos grises las parte meteorizada y la parte blanca la superficie fresca, presenta textura porfidoblástica, cañada Doña María.

El skarn se presenta como un intercrecimiento de granates rosas, negros y con variaciones de colores en un mismo cristal, los tamaños que presentan son de 3 mm a 4 cm de diámetro, estos granates se encuentran acompañados de cristales de vesubianita euhedrales y subhedrales de 1 a 5 cm de largo, estos aglomerados de cristales se presentan en una matriz de óxidos y caliche (fig.29), los granates rosas presentan un centro negro poroso rodeados con bandas de crecimiento color rosa, estos granates presentan tamaños de 3 mm a 1 cm, esto se observa principalmente en lo alto del cerro el Jumilar.





Fig. 29 Intercrecimiento de cristales de granate rosa con cristales de vesuvianita en una matriz de óxidos, localidad La Torre.

El exoskarn presenta signos de una segunda skarnificación representada por vetas de granates que lo cortan (fig.30); estas vetas miden de 10 a 15 cm de espesor, tienen forma tabular y son fáciles de diferenciar gracias a que el granate que las forma es de diferente color a los del skarn original, estos colores pueden ser amarillo verdoso o blanco.



Fig. 30 Veta de granates color blanco dentro de un skarn de wollastonita y granate, cañada Doña María.

Petrográficamente estos skarns presentan textura porfidoblástica siendo los cristales de granate los porfidoblastos, dependiendo de la localidad varía el tamaño de los granates y la proporción mineralógica, a continuación se presentan las observaciones de las secciones más representativas de esta roca.

### Capítulo III Geología local

La muestra XA-17 pertenece al cerro San Juan, en sección delgada presenta textura porfidoblástica con el 40% de granates en tamaño grueso, estos granates presentan un zoneamiento, el centro es granate isotrópico y con textura poikiloblástica, en las periferias del cristal se presentan bandas de crecimiento anisotrópicas, además de granate se pueden observar cristales de calcita (15%), wollastonita (20%), vesubianita con textura poikiloblástica (10%), espurrita (2%), dentro del granate y, en la vesubianita se puede encontrar cuarzo subhedral (5%) y diópsida (8%), ver. fig.31 A.

La muestra XA-25 pertenece a la cañada Doña María, en esta sección delgada se pueden observar cristales euhedrales de wollastonita (40%), calcita (10%), cuarzo (6%), plagioclasas (anortita y bytownita, 2%) clinozoisita ? (2%) y granate (40%) con textura poikiloblástica con inclusiones finas de cuarzo, clinozoisita y calcita, en sección delgada no es apreciable la zonación de colores verde y rosa de estos granates, ver fig.31 B.

La muestra perteneciente al skarn del cerro Tencuancualco (XA-37) presenta textura porfidoblástica con cristales de cuarzo (50%), wollastonita (10%), granate euhedral y subhedral de tamaño medio sin inclusiones (20%), titanogaugita en cristales de tamaño medio (6%), rutilo (1%), clinozoisita (1%), circón de tamaño fino (1%), diópsida (1%) y óxidos de hierro diseminados (5%), ver fig.32.

La muestra XA-42 presenta calcita anhedral (20%) wollastonita (25%), cuarzo (10%), vesubianita (2%), ortopiroxeno (2%), espurrita (2%), tremolita (5%), granate euhedral y subhedral con textura poikiloblástica (30%) con inclusiones de diópsida (2%) y cuarzo subhedral (2%).



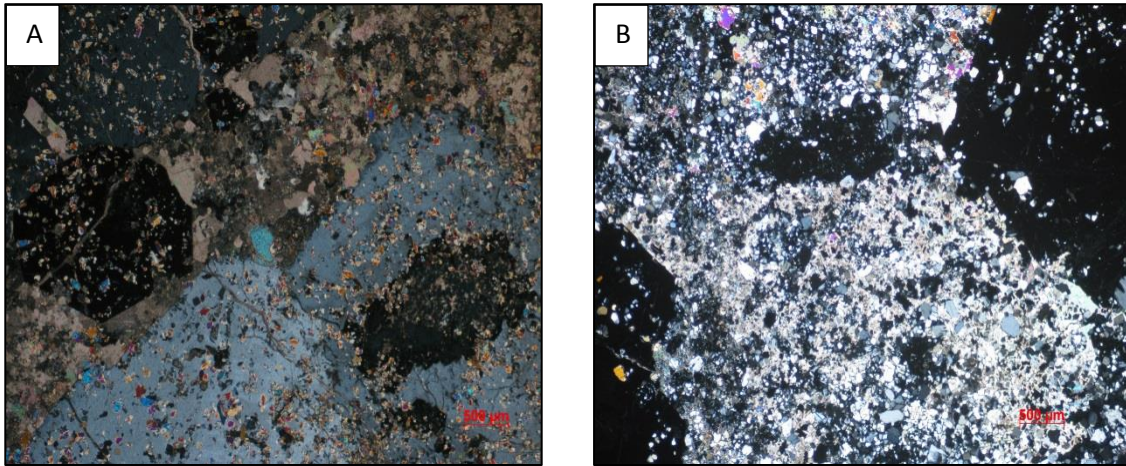


Fig. 31 Fotografías en sección delgada de muestras del exoskarn.

A) Muestra XA-17 se observa dos fases de formación de granates, la primera fase se presenta de forma anhedral y se está transformando en vesubianita (gris azulado), la segunda fase es euhedral y se encuentra dentro de los cristales de calcita, B) muestra XA-25 textura porfidoblástica de grano fino, los granates presentan textura poikiloblástica evidenciada por las inclusiones presentes.

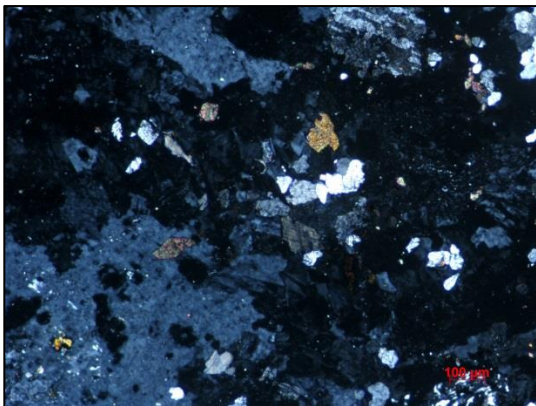


Fig. 32 Muestra XA-37 se muestran cristales de cuarzo, wollastonita, titanita y diópsida.



Fig.33 Vesubianita sobre granate de 4x1.5x1.5 cm, colección Alfredo Victoria, se puede observar la formación de la vesubianita a partir del granate.



## III.2. Geoquímica

A continuación se presentan los resultados obtenidos de elementos mayores y traza de muestras seleccionadas (Tabla 2), los análisis se realizaron mediante fluorescencia de rayos X, se presentan las clasificaciones geoquímicas de dos de los cuerpos intrusivos, que pueden no ser la misma que la clasificación petrográfica, debido a las condiciones de alteración que pudieron haber modificado la composición química de los elementos móviles como es el caso de Ca, Na y Mg, se presenta también la interpretación de estos resultados.

Tabla 2. Composición de elementos mayores obtenidos de la fluorescencia de rayos X de las rocas encontradas

Clasificación petrográfica	Monzodiorita	Caliza	Mármol	Exoskarn	Endoskarn	Exoskarn
	XA-1	XA-19	XA-44	XA-25	XA-30	XA-42
<b>SiO<sub>2</sub></b>	56.15	3.312	7.33	41.542	44.752	45.389
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1.051	0.027	0.145	0.099	0.088	0.098
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	15.894	1.346	0.002	12.826	8.883	8.939
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> t</b>	7.333	0.078	0.052	1.201	0.0839	0.895
<b>MnO</b>	0.112	0.01	0.016	0.092	0.62	0.245
<b>MgO</b>	4.343	0.574	0.495	0.682	5.166	1.35
<b>CaO</b>	7.228	52.7	54.78	37.85	36.31	38.45
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3.829	0.021	0.025	0.002	0.104	0.08
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2.544	0.063	0.002	0.102	0.018	0.046
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.22	0.012	0.016	0.015	0.024	0.016
<b>PxC</b>	1.21	41.7	37.48	5.46	3.87	4.29
<b>total</b>	99.914	99.843	100.343	99.871	99.9189	99.798

En los resultados de los análisis de elementos mayores de las rocas identificadas en la zona (Ver Tabla 2), se observan los cambios en el contenido de algunos de estos elementos en la caliza y la monzodiorita, rocas que reaccionaron durante el proceso metasomático para formar los skarns. Por otro lado se aprecia que los cambios de los elementos no son tan evidentes al ser comparados los valores obtenidos para la caliza y el mármol, lo que evidencia un proceso isoquímico para la formación del mármol.



### Capítulo III Geología local

El sílice en la caliza se debe a la cantidad de rudistas silicificados presentes, al igual que en el mármol, los valores de este elemento no pueden ser comparados ya que se trata de horizontes de caliza diferentes.

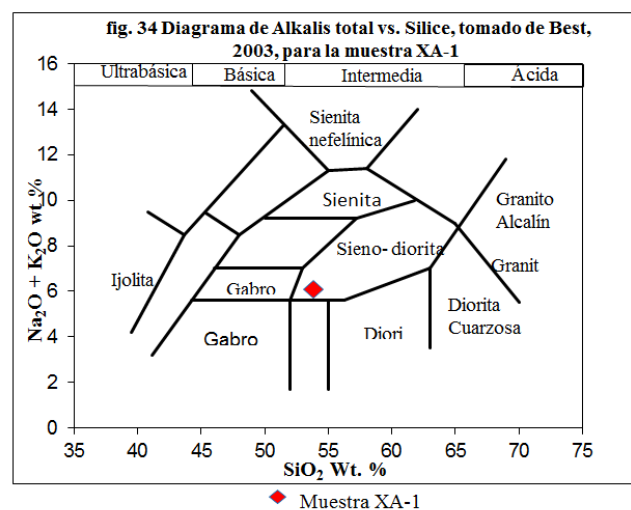
Los exoskarns presentan un alto contenido de sílice comparado con la caliza, sin llegar a tener en la misma proporción que en la monzodiorita, estos cambios permiten observar un aumento de sílice en la caliza para formar el skarn. Algo similar sucede con el contenido de hierro entre el mármol y la caliza, que varía muy poco en proporción, mientras que los skarns presentan una ganancia de este elemento.

El contenido del calcio entre la caliza y el mármol es similar, mientras que disminuye en los skarns comparado con la caliza y aumenta en proporción con respecto al valor del cuerpo intrusivo.

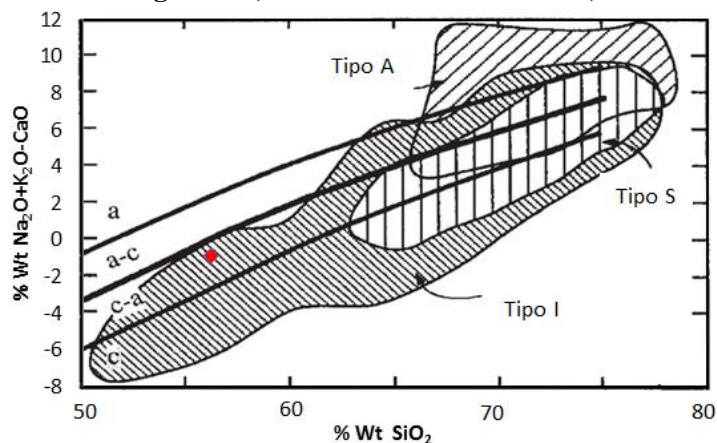
El contenido de aluminio decrece en los skarns, comparado con los valores reportados en la monzodiorita. El contenido de magnesio también aumenta en los Skarns comparado con el valor de la caliza, y siempre es menor al valor obtenido para el cuerpo intrusivo.

#### Geoquímica de la Monzodiorita

A continuación se presentan los gráficos para la clasificación del cuerpo intrusivo con base en su composición química, así como el tipo de granito, para esto se toma en cuenta el diagrama de discriminación tectono-magnética de Pitcher donde los granitos tipo-I se encuentran relacionados a arcos de islas o arcos continentales, los tipo-S se encuentran relacionados a ambientes de colisión continental o zonas de cizalla dúctil, y los tipo-A relacionado a zonas post-orogénicas o anorogénicas.



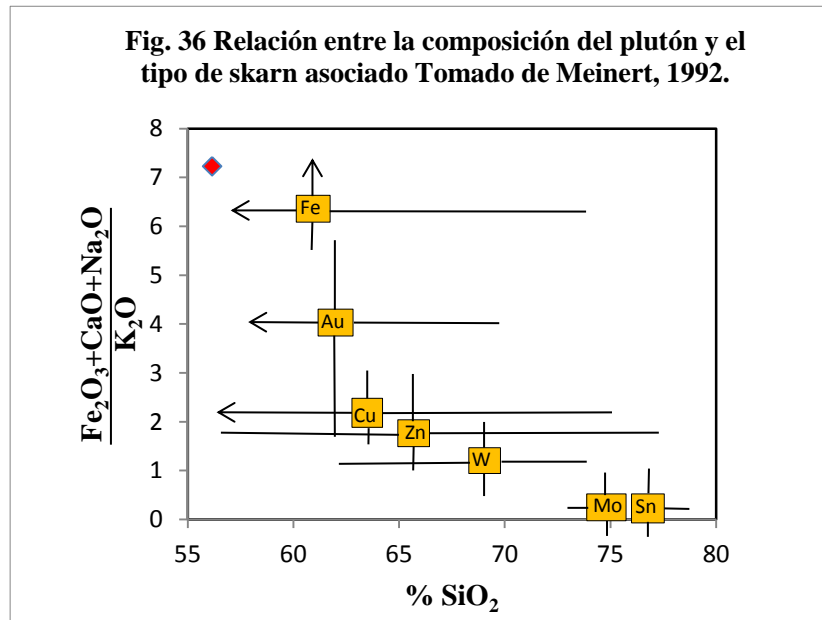
**Fig. 35 Diagrama  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  Vs  $\text{SiO}_2$  para la clasificación de tipos de granitos, modificado de Frost et al., 2001**



Relación álcalis y calcio a, Alcalis; a-c, álcali-cálcico; c-a, calco-alcalino; c, cálcico

◆ Muestra XA-1

Con el diagrama álcalis vs. Sílice (fig.34) se logró clasificar la roca como Sieno-diorita. Con base al diagrama  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  Vs  $\text{SiO}_2$  para la clasificación de tipos de granitos se clasificó como un tipo-I (fig.35), con relación calco-alcalina. Meinert en 1992 publicó una gráfica acerca de la relación que guardan los cuerpos intrusivos con el tipo de skarn formado (fig.36), utilizando esta relación se graficaron los datos de las muestras anteriores y se obtuvo que la muestra XA-1 se relacionada con la formación de un skarn de hierro.



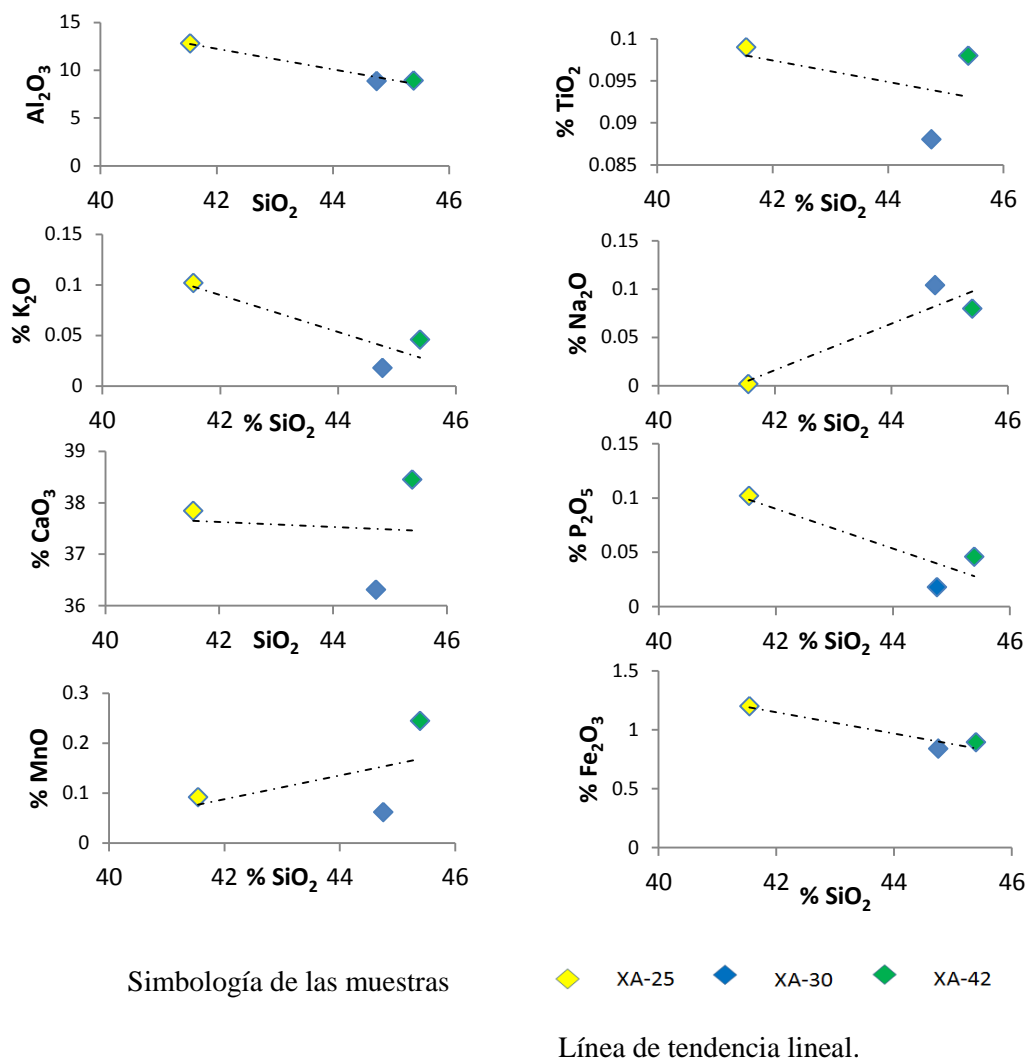
◆ Muestra XA-1

### Geoquímica de los Skarns

Se realizaron diagramas de variación de elementos mayores presentes, los resultados de los análisis de skarns (fig. 37), permiten observar el comportamiento de los elementos al graficarlos en diagramas de variación, estos muestran un comportamiento similar entre el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mientras el óxido de Potasio aumenta al disminuir el óxido de Sodio, un resultado interesante se observa entre el TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el MnO, ya que los dos primeros aumentan mientras el óxido de manganeso disminuye.



Fig. 37 Diagramas de variación de elementos mayores de muestras de Skarn de la sierra de Tlayca



OBSERVACIÓN: La línea de tendencia lineal no representa el comportamiento real debido a la baja cantidad de puntos tomados en cuenta, pero permite visualizar el comportamiento aproximado de los elementos.

### Elementos traza de los Skarns

Los elementos traza aunque se presentan en cantidades menores al 1% de la composición total del espécimen en análisis o en cantidades menores a 10 000 ppm, ya que no son constituyentes principales, estos elementos toman un papel importante en la composición de un mineral ya que en ciertos casos pueden sustituir a elementos constituyentes provocando ligeros cambios de color o en casos extremos de estructura, ver tabla 3. Debido



### Capítulo III Geología local

que en los skarn se presentan granates que varían de color se analizaron los elementos que pueden causar coloración en estos minerales, mencionados en el capítulo 1.

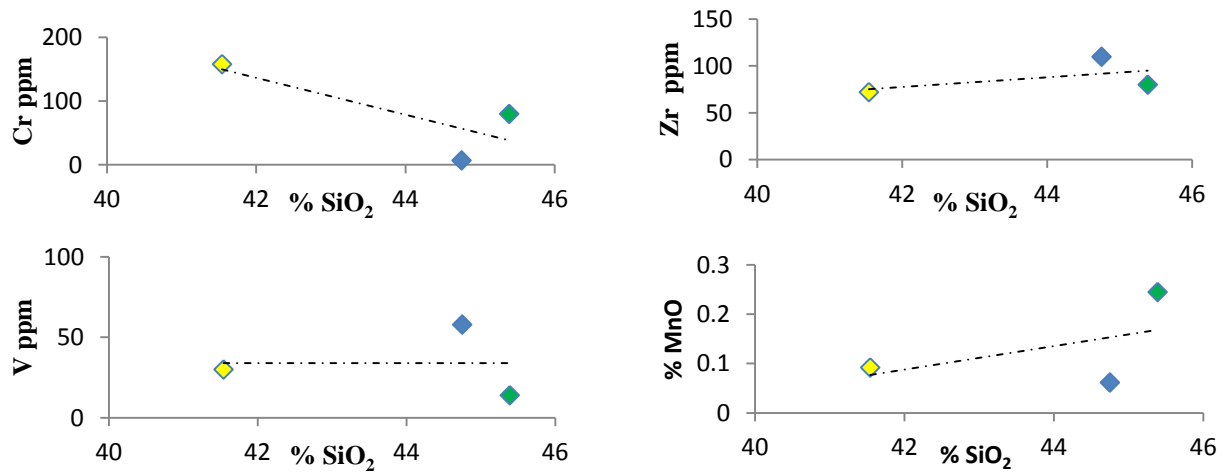
Tabla 3. Composición de elementos traza de las muestras de Skarn

<b>Clasificación petrográfica</b>	<b>Exoskarn</b>	<b>Endoskarn</b>	<b>Exoskarn</b>
	XA-25	XA-30	XA-42
<b>Rb</b> (ppm)	<2	<2	<2
<b>Sr</b> (ppm)	28	179	31
<b>Ba</b> (ppm)	<11	63	<11
<b>Y</b> (ppm)	4	4	8
<b>Zr</b> (ppm)	72	110	80
<b>V</b> (ppm)	30	58	14
<b>Cr</b> (ppm)	158	7	80
<b>Co</b> (ppm)	<3	<3	<3
<b>Ni</b> (ppm)	21	20	18
<b>Cu</b> (ppm)	<0.7	<0.7	<0.7
<b>Zn</b> (ppm)	4	76	334
<b>Th</b> (ppm)	6	8	16
<b>Pb</b> (ppm)	8	10	18

Tomando en cuenta la graficas de variación de elementos traza presentes en los skarn posibles causantes de la coloración de los granates (fig.38), podemos observar la relación existente entre el manganeso y el cromo, en la muestra XA-25 se obtuvieron valores ligeramente mayores de cromo comparados a las otras muestras, cabe recordar que en esta muestra se presenta una coloración rosa y verdosa en el centro de los granates, mientras la muestra XA-42 no presenta estas características, si es o no el cromo el elemento que le da el color verdoso se sabrá hasta conocer la geoquímica de granates.



Fig. 38 Gráficas de variación de elementos traza presentes en los skarn posibles causantes de la coloración de los granates



Simbología de las muestras

◆ XA-25   
 ◆ XA-30   
 ◆ XA-42

----- Línea de tendencia lineal.

**OBSERVACIÓN:** La línea de tendencia lineal no representa el comportamiento real debido a la baja cantidad de puntos tomados en cuenta, pero permite visualizar el comportamiento aproximado de los elementos.

## IV Geoquímica de los granates

En este capítulo se describen las características cristalográficas y petrográficas al igual de los resultados de los análisis químicos realizados a muestras de granate, los análisis químicos se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido mediante EDS (espectroscopia de dispersión de energía de rayos X característico), estos se realizaron en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL 6300 en el Instituto de Geología de la U.N.A.M.; con los resultados de estos análisis se realizaron las clasificaciones composicionales de los granates, al igual que diagramas de variación de algunos óxidos con un comportamiento relevante.

Se realizaron análisis mediante microscopia Raman para determinar cambios dentro de la estructura del granate, para esto se utilizó un microscopio con un láser de 532  $\mu\text{m}$  del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la U.N.A.M.

### IV.1 Características cristalográficas

Los granates de la sierra de Tlayca presentan formas euhedrales a subhedrales en tamaños que van de milímetros hasta algunos encontrados de 6 centímetros, presentan colores como son blanco, rosa, verde-amarillento, pardo y negro (ver fig.39), en su mayoría presentan simetría correspondiente al sistema cúbico en dodecaedros, aunque se encontraron casos en donde presentan características del sistema tetragonal (fig.40) e incluso del sistema ortorrómbico, estas características solo se observan en granates de color negro, además de maclas de contacto entre cristales con características del sistema tetragonal, se observó que algunos cristales de granate con características cubicas se encuentran formados por cristales de menor tamaño de este mineral orientados cristalográficamente para construir un cristal de granate de mayor tamaño, a esto se le conoce como crecimiento paralelo, ver fig. 41 y 42.





Fig.39 Diferentes colores de las grosularitas de la Sierra de Tlayca, se puede observar la simetría del sistema cúbico.



Fig. 40 Cristal de grosularita negra cubierta por silicatos, presenta simetría del sistema tetragonal.



Fig. 41 crecimiento paralelo de grosularita, 1x1.1x0.8 cm.



Fig. 42 crecimiento paralelo de grosularita, 2x2x1.5 cm.

## IV.2 Características petrográficas

Las muestras se observaron con microscopio petrográfico antes de ser analizadas bajo el microscopio electrónico, para notar variaciones e inclusiones que pudieran tener, a continuación se presentan las observaciones de seis muestras de granates cuyas fotografías pueden ser vistas en el Apéndice B.



## Capítulo IV Geoquímica de los granates

Se observó en algunos granates un cambio visible en la coloración de las bandas como en la muestra XAGr-15, donde el granate presenta bandas pardas de diferentes tonalidades intercaladas, estas bandas no presentan algún ritmo de crecimiento y presentan un espesor muy variable. En otras muestras seleccionadas por apreciarse un cambio de color en muestra de mano, al observarlas al microscopio no se apreciaron cambios, como es el caso de la muestra XA-25.

En sección delgada se puede apreciar en el núcleo de los granates una textura poikiloblástica, por el gran número de inclusiones que presenta, seguido de un bandeamiento de granate de comportamiento isotrópico y anisotrópico, el granate anisotrópico presenta un gran número de inclusiones de cuarzo que se encuentran orientadas a las líneas de crecimiento, estas inclusiones posiblemente son del material residual durante la cristalización de las capas de granate que quedaron atrapadas.

Hay una relación de tamaño de las inclusiones y el cristal de granates, ya que en el núcleo de la mayoría de los granates observados, las inclusiones decrecen en tamaño hacia las afueras del cristal, al igual de la variedad de inclusiones, ya que en el núcleo del cristal se observan cristales de calcita, cuarzo, clinopiroxenos subhedrales a euhedrales, mientras en las periferias solo se encuentran cristales anhedrales de cuarzo y calcita; en ambos casos se encuentran orientados a las bandas de crecimiento del granate.

Con estas observaciones en los granates, podemos decir que durante la formación del skarn las condiciones químicas del fluido no fueron constantes permitiendo la formación de estas bandas e inclusiones.



### IV.3 Variaciones en su composición

La composición porcentual de óxidos de los granates se obtuvo con microscopio electrónico de barrido por medio de EDS.

Los granates se clasificaron mediante un diagrama ternario tomando en cuenta la composición de la grosularita ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), la andradita ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) y de la serie de la piralspita ya que los contenidos de cromo reportados no exceden el 0.2% de las muestras analizadas. En la fig.43 se muestra la clasificación de los granates que van en su mayoría es de Gro 98 a 30%, los resultados de los análisis completos de estos cristales se presentan en el Apéndice C, se encontraron granates con porcentajes considerables de itrio de .3 % a 3.39 % , presentados en la gráfica en color verde, son interesantes estos valores ya que este elemento puede llegar a sustituir al calcio en la estructura de los granates provocando anisotropía petrográfica en ellos además, se encuentra relacionado con elementos de tierras raras como iterbio (Yb) y gadolinio (Gd) que pueden realizar el mismo efecto (Allen y Busek, 1988, Gaspar et. Al., 2008).

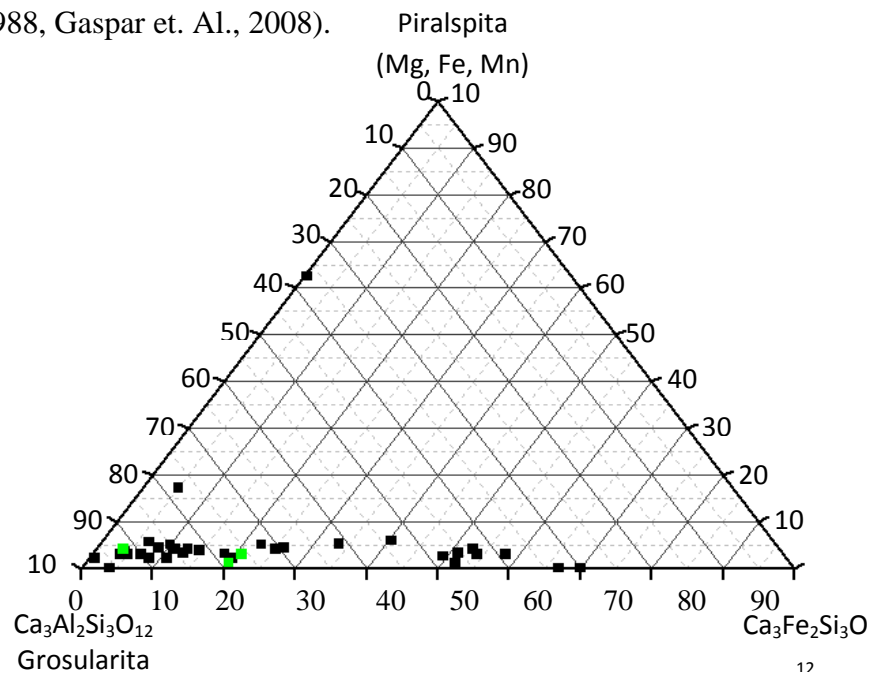
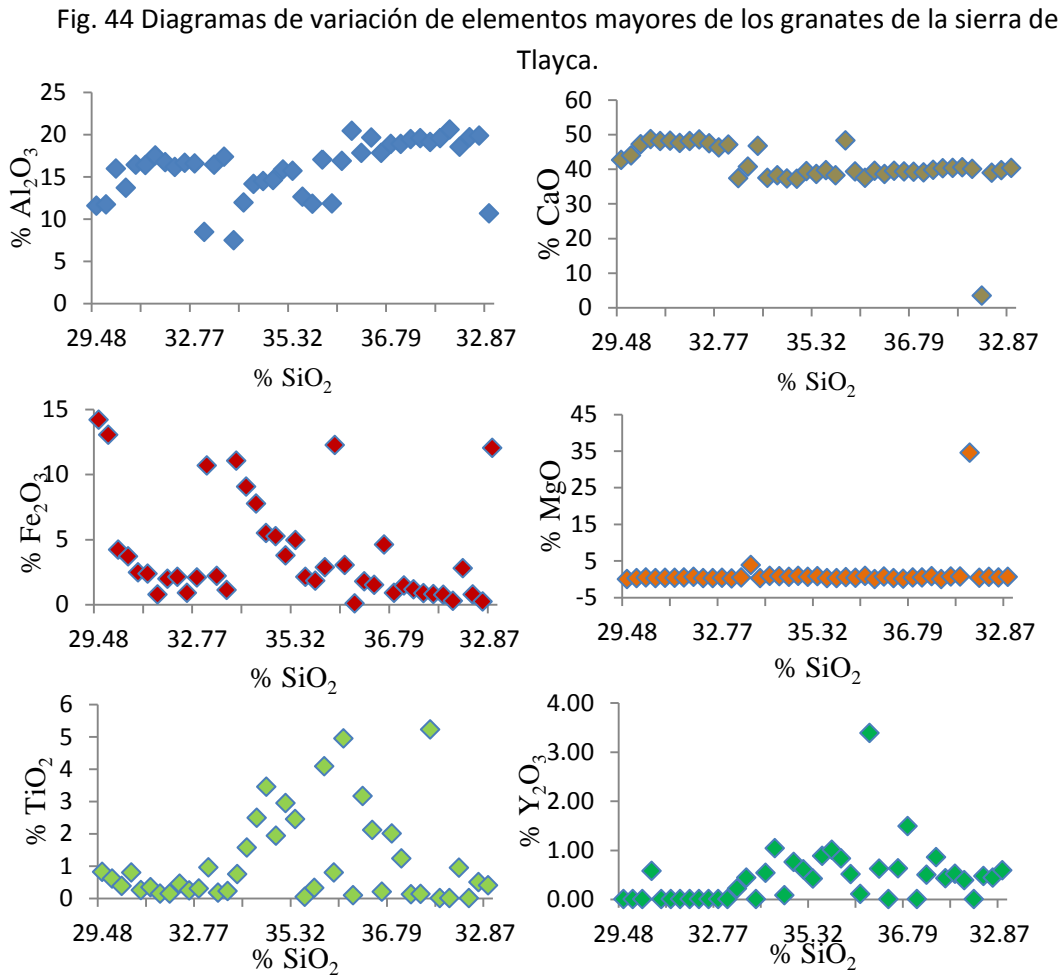


Fig. 43 diagrama de composición porcentual de los granates de la sierra de Tlayca, en los extremos inferiores corresponden a la serie de granates ricos en calcio y el extremo superior a la serie de granates ricos en aluminio, en verde los granates con valores de itrio superiores al resto.



## Capítulo IV Geoquímica de los granates

Los diagramas de variación de elementos mayores de los granates de la sierra de Tlayca (fig. 44) muestran relaciones entre el contenido de calcio, hierro, titanio e itrio, donde estos últimos disminuyen en proporción en cuanto el Calcio aumenta, otra relación observable es la que existe entre el aluminio y el hierro que uno aumenta conforme decrece el porcentaje del otro.





### Muestra XAGr15

Esta muestra de cristal de granate del cerro Tencuancualco, en muestra de mano presenta dos colores, el centro del cristal es negro y la parte exterior color blanco; en la tabla 4 los resultados marcados con “a” pertenecen a una inclusión dentro del granate, mientras las marcadas con la letra “b” corresponde a los puntos de composición del centro a las periferias del cristal, este cristal presenta isotropía petrográfica, los datos de los análisis completos de la muestra y los datos graficados se encuentran en el Apendice D.

En el punto XaGr15 a2 presenta composición de la serie de piralspita, esta composición con un valor alto de magnesio contrasta con los valores que lo rodean, este granate se encuentra como inclusión dentro de un granate de composición grosular-andradita, esta inclusión es indicio de las condiciones del fundido del que cristalizó el granate, se puede apreciar la evolución de pérdida de magnesio y hierro en la fig. 45.

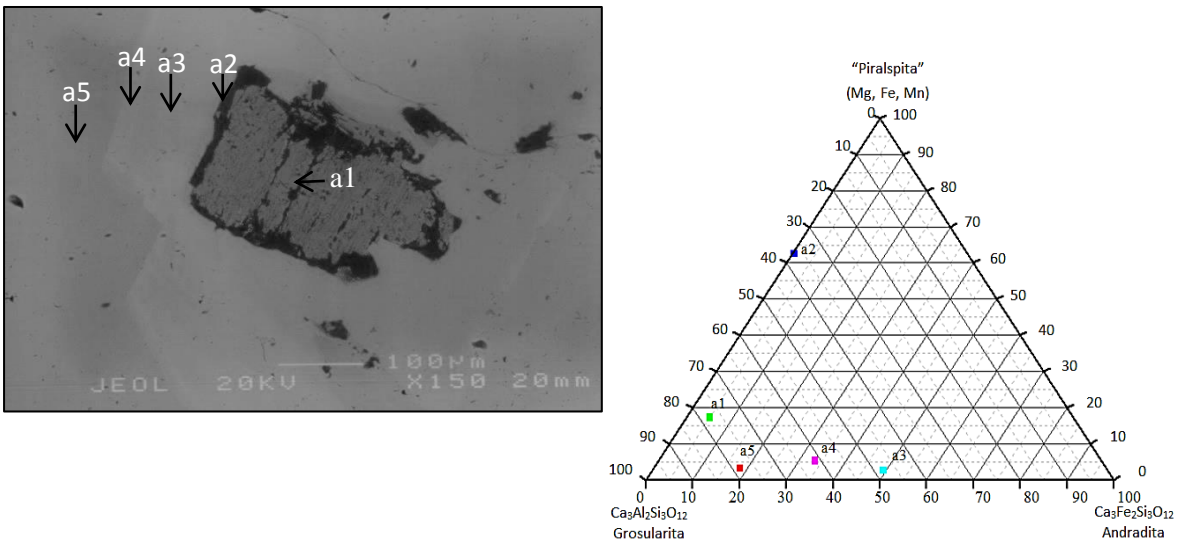


Fig.45 Fotografía con microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados, y diagrama Ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de la inclusión y las bandas que la rodean, muestra XaGr-15 a.

## Capítulo IV Geoquímica de los granates

En la muestra XaGr15 b se observa el bandeamiento en un cristal de granate fig. 46, se encontraron cambios rítmicos en la composición de estas bandas, variando en el contenido de hierro y aluminio, estos cambios posiblemente sean la causa de anisotropía óptica, ya que los radio iónicos de estos elementos son diferentes y pueden causar este efecto,  $0.57 \text{ \AA}$  para el  $\text{Al}^{3+}$  y  $0.67 \text{ \AA}$  para el  $\text{Fe}^{3+}$ , según Akizuki, (1984), al igual que marcan los cambios en la composición del fundido del cual cristalizó el cristal.

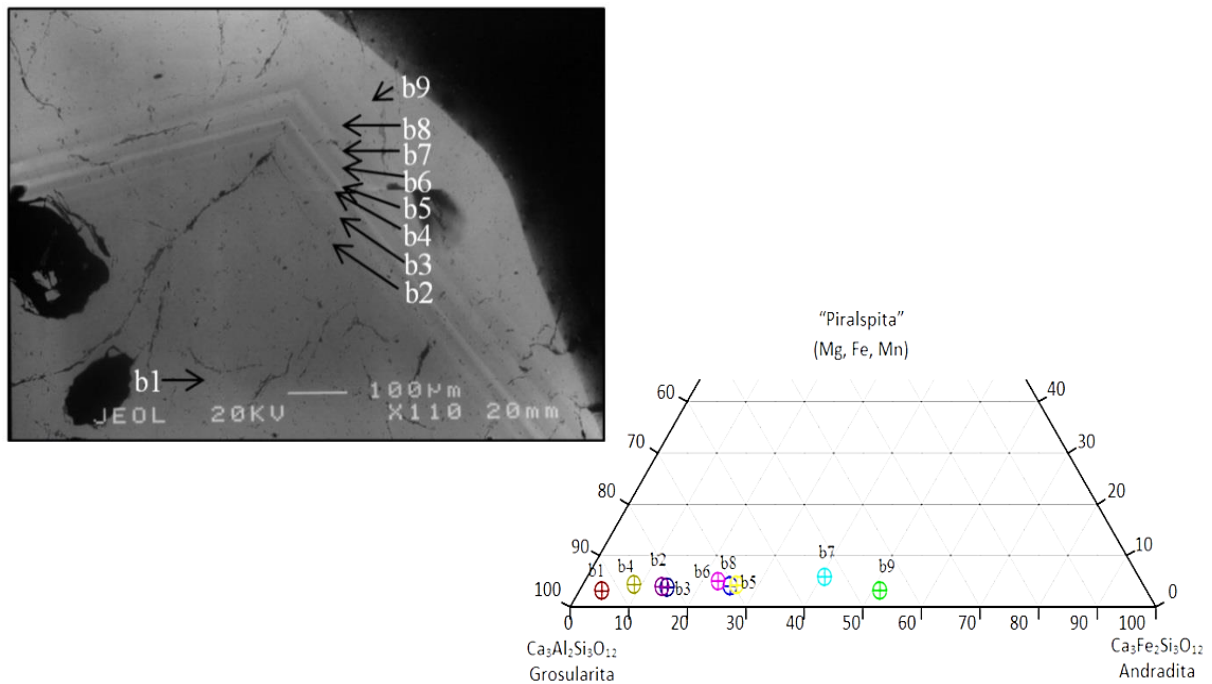


Fig. 46 Fotografía con microscopio electrónico de barrido y diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de bandas de crecimiento dentro de la muestra XaGr-15, se pueden observar que cada banda corresponde a un cambio en las condiciones de crecimiento.

Muestra XA-25

Esta muestra de cristal de granate fue colectada en la cañada Doña María, en muestra de mano presenta dos colores, el centro del cristal es verde mientras la parte exterior es color rosa. En la tabla 5 los análisis corresponden a los puntos de composición partiendo de la periferia al centro del cristal, presenta anisotropía óptica en bandas, fig. 47. En todos los casos se trató de grosularitas con más del 80% de su composición, lo que varió en estos análisis es el contenido de itrio que como ya se mencionó anteriormente puede ocasionar anisotropía. La clasificación de los análisis se puede observar en la fig. 48, los datos de los análisis completos de la muestra y los datos graficados se encuentran en el Apéndice D.

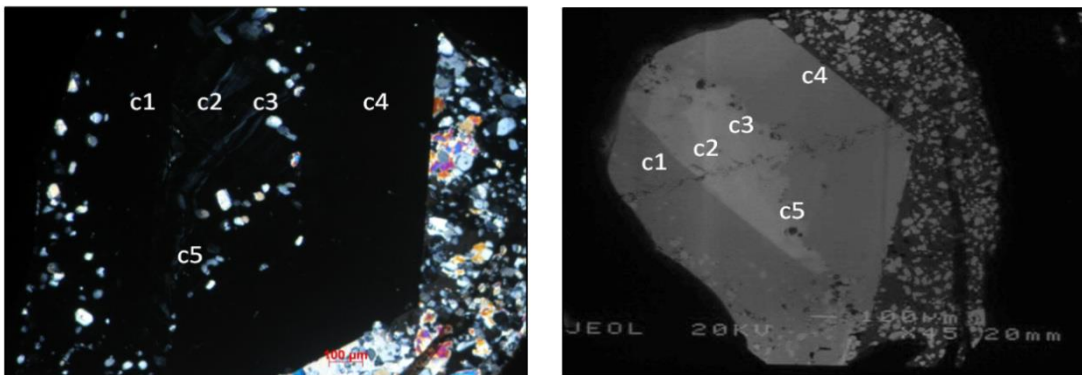


Fig. 47 Muestra Xa-25, izquierda, fotografía con microscopio petrográfico con nicoles cruzados, derecha fotografía con microscopio electrónico de barrido, con electrones retro dispersados, ambas de la misma zona.

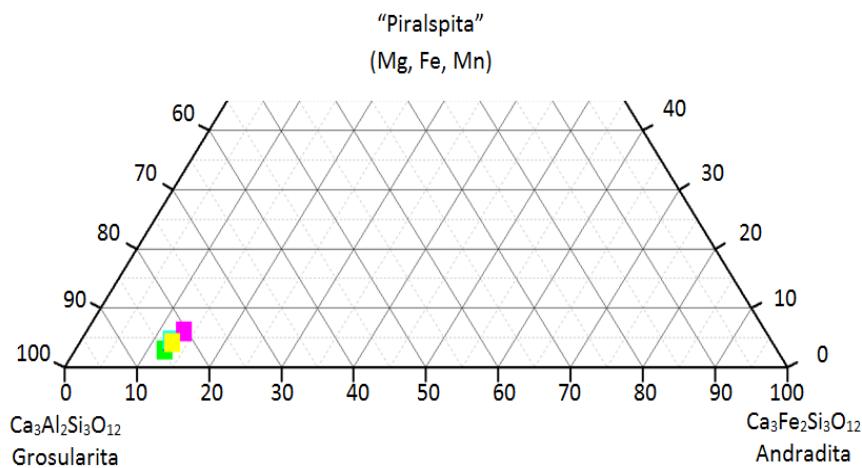


Fig. 48 Diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de los puntos analizados, muestra Xa-25.

**Muestra Xa-41**

Esta muestra pertenece al exoskarn de las cercanías de la barranquilla de los Sabinos, presenta anisotropía óptica y forma cristalina más característica del sistema tetragonal u ortorrómbico fig. 49. Los resultados de los análisis químicos demuestran que se trata de un cristal de grosularita rodeado de andradita fig. 50; lo que los hace diferentes es el valores en los óxidos de aluminio y hierro, además de la presencia de itrio y vanadio que presentan, ver apéndice D.

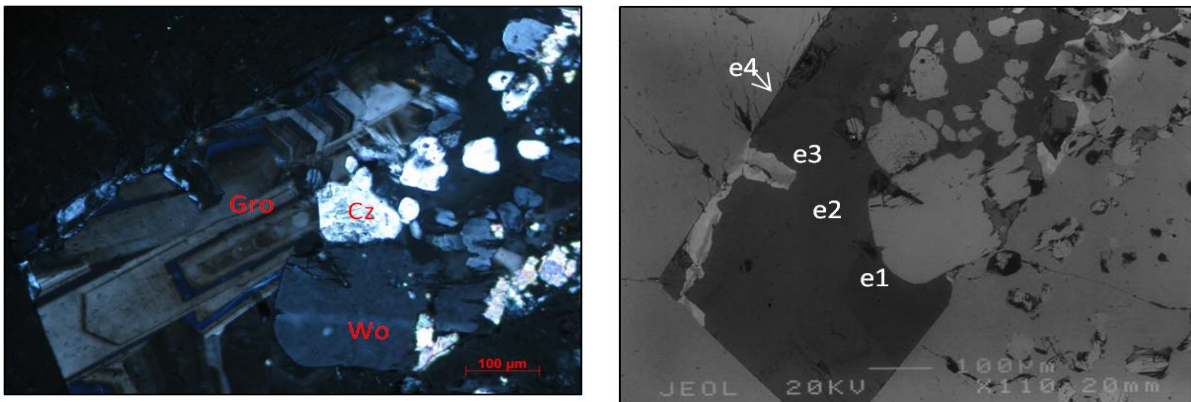


fig. 49 Fotografías muestra Xa41, izquierda fotografía con microscopio petrográfico con nicoles cruzados, derecha fotografía con microscopio electrónico de barrido, con electrones retro dispersados, de un granate anisotrópico.

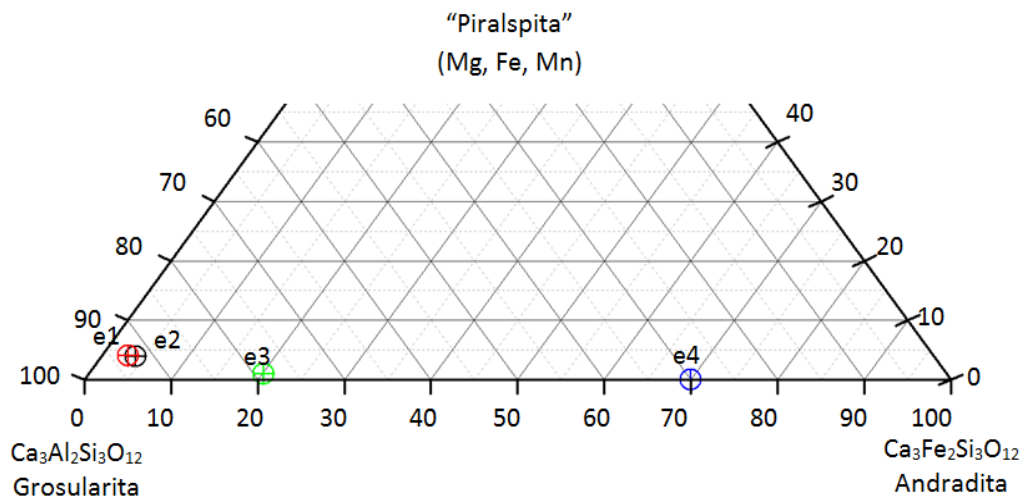


Fig.50 Diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de los puntos analizados de la muestra Xa41.

**Muestra XaGr-1**

Esta muestra fue colectada en el cerro el Jumilar el centro es color negro mientras que la parte exterior del granate presenta color blanco grisáceo, presenta anisotropía óptica en bandas de crecimiento visible en la figura 51, presenta inclusiones orientadas a las fracturas, cercano al centro se observan poros de los gases que se liberaron del cristal, los cambios en su composición más visibles son en los óxidos de hierro, titanio e itrio (ver Apéndice D).

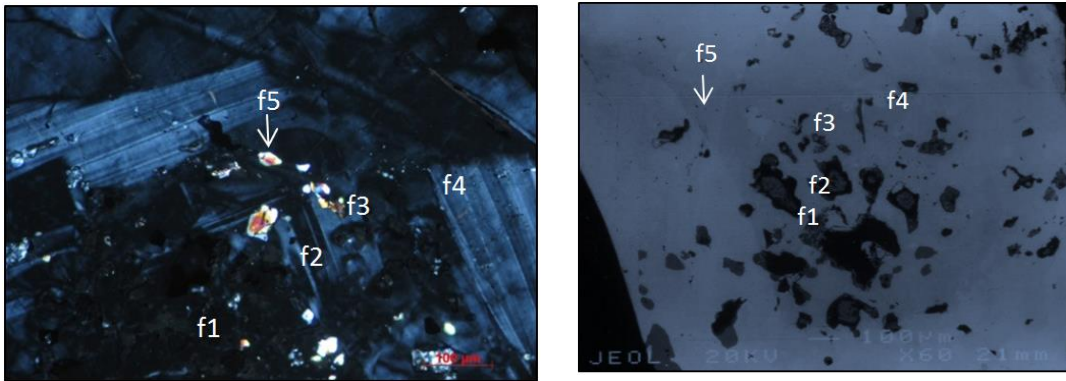


Fig. 51 Fotografías de la muestra XaGr1, izquierda fotografía con microscopio petrográfico con nicols cruzados, derecha fotografía con microscopio electrónico de barrido.

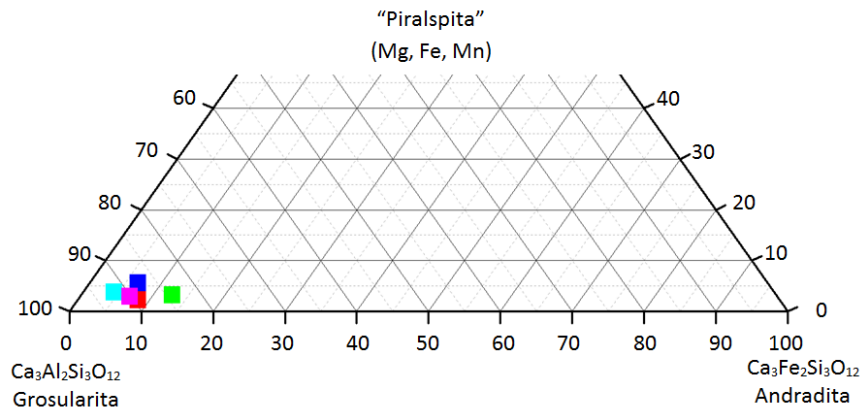


Fig.52 Diagrama ternario de composición grosularita-piralspita-andradita de los puntos analizados de la muestra XaGr1.

### IV.4 Composición y estructura

Para observar cambios estructurales se utilizó la Dispersión Raman, ya que brinda información espectral sobre el medio material que la produce, se utiliza principalmente en el estudio de la vibración y rotación molecular por lo que las bandas de absorción medidas es posible que su ensanchamiento indicara un aumento del desorden estructural de un mineral o de un material (Ostrooumov, 2009).

La composición química de los granates analizados es de grosularita-andradita, con variaciones en la proporción de aluminio y hierro (Ver Tabla 4), estas variaciones posiblemente sean la causa de anisotropía óptica, ya que es muy sensible al arreglo estructural, estos iones cambian la estructura de la molécula, ya que los radios son diferentes entre sí, 0.57 Å para el Al<sup>3+</sup> y 0.67 Å para el Fe<sup>3+</sup>, afectando las relaciones estructurales de la molécula y provocando que no se lleve a cabo un crecimiento paralelo entre las capas, según Akizuki (1984), sumado a esto el contenido de itrio, que es relativamente alto, puede causar anisotropía óptica al sustituir al calcio (Allen y Busek, 1988). Con ayuda del espectro Raman se pueden identificar estos cambios en la estructura para esto Bersani et al. (2009) publicaron gráficos para identificar los diferentes tipos de granate de la serie de Ugrandita, ver Fig. 53. Comparando estas graficas con las obtenidas de las grosularitas de la sierra de Tlayca, ver Fig.54, podemos observar pequeños cambios entre el pico A y B, y el pico D y E.



Tabla 4. Composición química porcentual de óxidos de los diferentes colores de grosularitas de la sierra de Tlayca.

	Xa-25 c1	Xa-25 c4	Xagr1 f1	Xagr1 f4
	G. verde	G. rosa	G. negro	G. blanco
<b>SiO<sub>2</sub></b>	31.82	32.85	36.69	36.79
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.44	0.25	2.11	2
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16.43	16.43	19.65	18.88
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.43	2.49	1.53	0.91
<b>MgO</b>	0.44	0.35	0.31	0.43
<b>MnO</b>	0.11	0.51	0.32	0.32
<b>CaO</b>	47.32	47.07	39.34	39.1
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.9	0	0.01	0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0.02	0.03	0
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.08	0	0	0.07
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04	0.03	0	1.49
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-
<b>ZnO</b>	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-
<b>P</b>	-	-	-	-
<b>total</b>	100	100	99.99	99.99
<b>Composición</b>				
<b>Grosularita</b>	66.46	71.06	95.11	81.66
<b>Andradita</b>	9.83	10.77	7.41	3.94
<b>Piralspita</b>	2.22	3.72	3.05	3.24

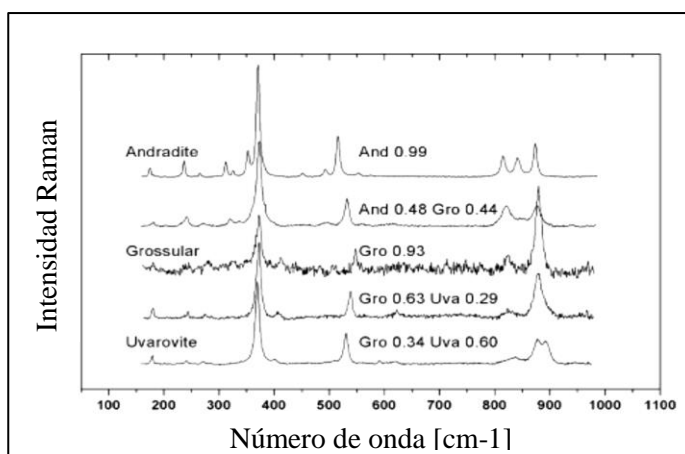


Fig. 53 Gráfica de espectros Raman de granates de la serie Andradita-Grosularita-Uvarovita, modificada de Bersani et al., 2009.

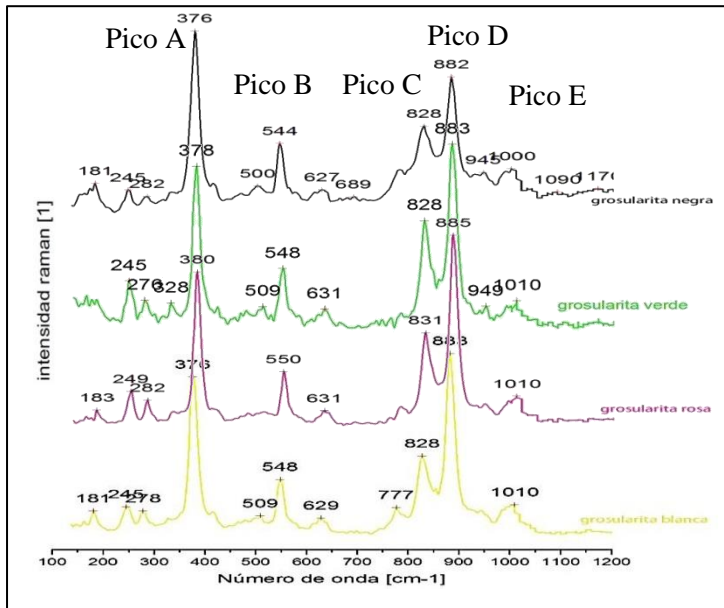


Fig. 54 Graficas de espectro Raman obtenidas para los distintos colores de grosularita encontrados en la sierra de Tlayca.

Estas variaciones en la estructura pueden deberse a que en el caso del granate negro está enriquecido más en titanio que el resto de los granates, mientras que el granate verde tiene mayor contenido de Magnesio que el resto. En el caso del granate rosa el contenido de manganeso es mayor y la grosularita blanca es el más pobre en Hierro, estos elementos permiten relacionarlos con cada uno de los colores presentes en los granates.

En los intercrecimientos de granate de diferentes colores se pueden distinguir una pequeña variación estructural observada en el ancho de la banda del espectro Raman, estas variaciones entre granates color blanco y negro se pueden observar en la fig. 55, y grosularita negra-rosa-negra-rosa, fig. 56, estos pequeños cambios apoyan la idea que la anisotropía óptica es generada por ellos.



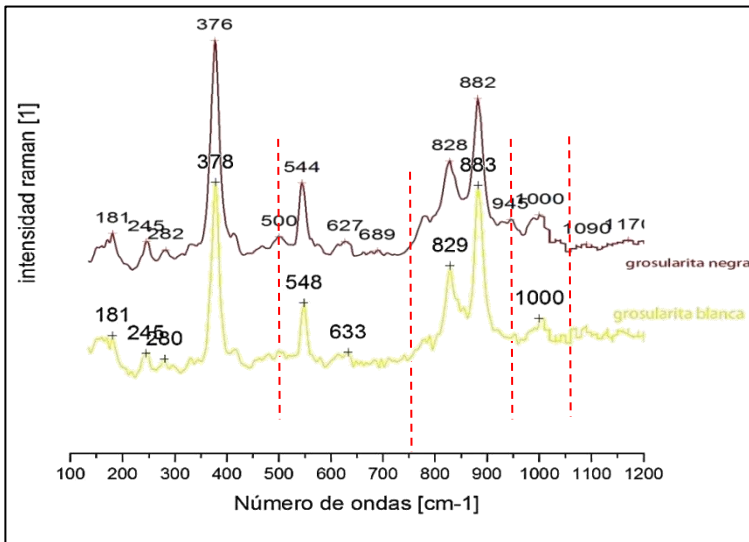


Fig. 55 Graficas de espectro Raman para bandas de granate en color blanco y negro donde se muestran los cambios de ancho de bandas registradas, estos cambios se encuentran señalados por las líneas punteadas en rojo.

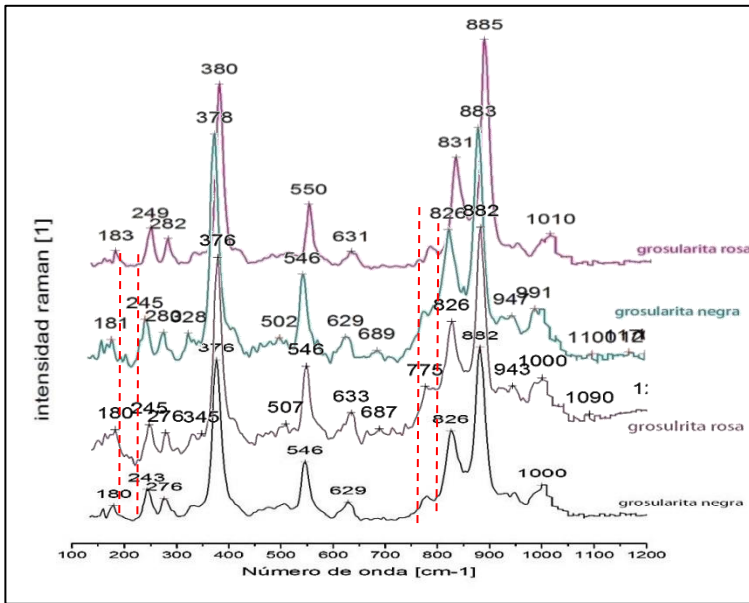


Fig. 56 Graficas de bandas Raman de una secuencia de grosularita negra-rosa-negra-rosa, donde se observan los cambios estructurales entre las distintas bandas.

## V. Características gemológicas de los granates

### V.1. Propiedades gemológicas de las piedras de color.

Una gema o piedra preciosa es un objeto que se caracteriza por tener una belleza sobresaliente, durabilidad y rareza. Aunque la primera de estas características es muy subjetiva, es la principal de todas, ya que sin belleza cualquier roca podría ser una gema. Además de estas características tradicionales se podría agregar una más, que es la popularidad de la gema, ya que puede ser muy bella pero si no se le conoce no será valorada de igual forma que una que goza de un mayor prestigio; la gemología es la ciencia encargada de estudiar estas características para mejorar, clasificar y valorar adecuadamente las gemas, para realizarlo tradicionalmente se hace uso de las “4 C’s”, derivadas de las palabras en inglés: *color*, *clarity*, *cut* y *carat*, que representan características gemológicas que deben cumplir. A continuación se explican estas características.

#### V.1.1 Color (Color)

El Color es la primera característica observada en una gema y depende de la percepción del ojo de las diferentes combinaciones del espectro de luz visible que va de rojo a violeta, con diversos tonos de marrón, blanco y gris (Matlins, 2012), estos últimos afectan al tono y son los que permiten la existencia de una gran variedad de color en las gemas, de estos colores los más valorados son los que se acercan al color del espectro considerado como puro (matiz), los colores son el azul, verde, amarillo y rojo, que se consideran como fundamentales, en algunas clasificaciones de color; de estas combinaciones y variaciones de color surgen definiciones que permiten especificar ciertos atributos como son la intensidad o saturación, tono y distribución del color.

La intensidad o saturación se relaciona con el brillo y lo bien definido del color gracias a los rayos de luz que lo tiñen y que capta el ojo humano. El tono hace referencia a que tanto influye el marrón, blanco o gris en la gema aclarándola u obscureciéndola. La distribución del color explica si el color tiene una distribución uniforme, si es simétrico o asimétrico.



## Capítulo V Características gemológicas de los granates

Otro factor que afecta al color de las gemas es la luz con la que es observada, al igual que el ambiente donde se lleva a cabo la observación, en algunos casos las espinelas, zafiros granates, alexandritas o turmalinas, entre otras pueden cambiar su color según la luz bajo la que son observadas. Al igual se usan ‘carpetas’ de ciertos colores que permitan maximizar en color de la gema o montarlas en ciertas estructuras que puedan resaltar sus cualidades.

Para determinar el color en las gemas se utiliza el sistema de colores de Munsell (fig. 57) el cual toma en cuenta tres características del color que corresponden al tono o matiz (H), la segunda variable que toma en cuenta es el valor o luminosidad (claridad u oscuridad, V) en el eje vertical, es neutro (gris), con intervalos que van del 0 (negro) al 10 (blanco) y la tercer variable es la saturación (intensidad o pureza, C); la notación que se utiliza para representar un color es la siguiente: HV/C.

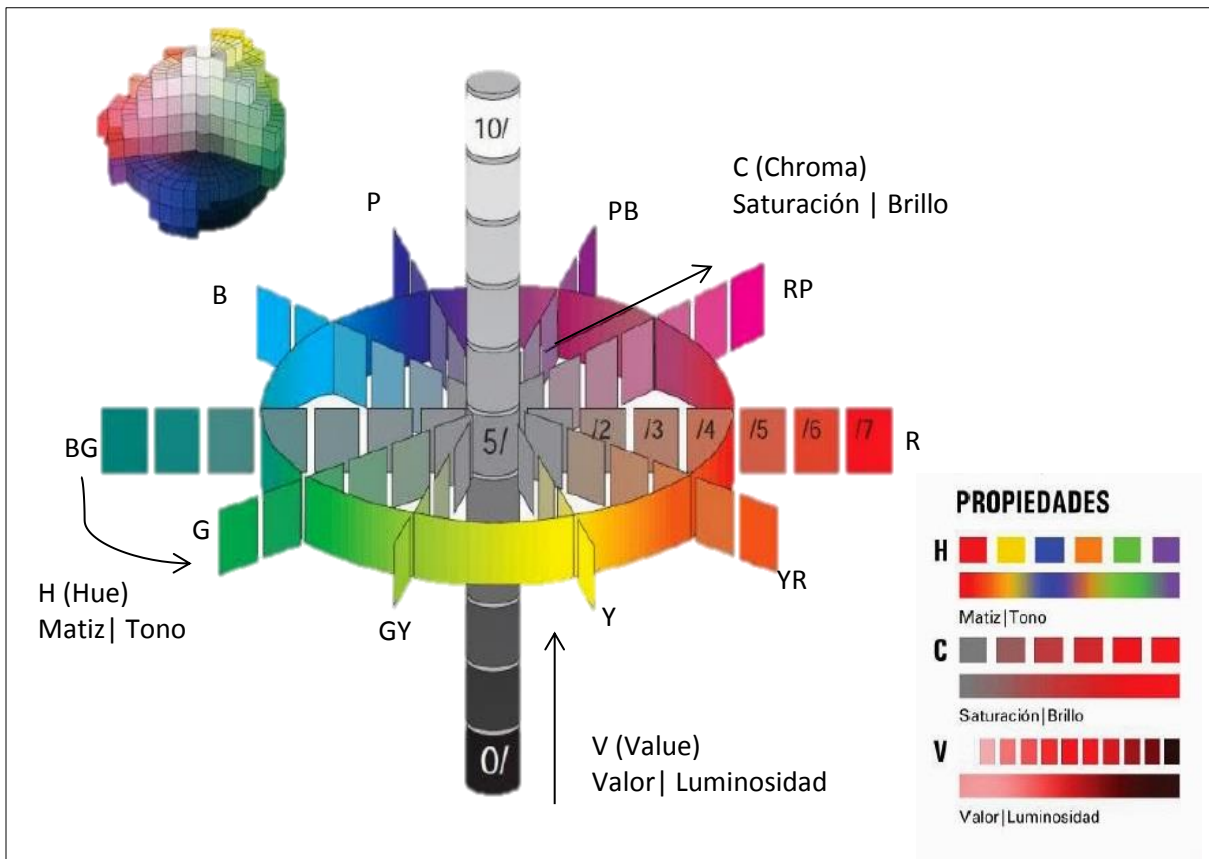


Fig. 57 Modelo cromático tridimensional “árbol de Munsell”, Modificado de: Beltran et al., 2013.



### V.1.2 Calidad o pureza (Clarity)

Esta característica se encuentra relacionada con la transparencia o diafanidad que pueda presentar la gema, esta difícilmente llega a ser del 100% debido a las imperfecciones internas o externas que pueda tener debido a las condiciones que le dieron origen a la gema, y estas imperfecciones pueden afectar el precio de la gema, por ello se lleva a cabo un análisis de estas imperfecciones para determinar el grado de claridad de la gema.

La diafanidad depende en gran medida de la cantidad de inclusiones y efectos ópticos que la gema posea, ya que influyen en la mayor o menor facilidad con la que la luz pueda atravesar el cuerpo de esta, otro factor que afecta a esta característica es el espesor de la piedra; tradicionalmente las gemas se clasifican en transparentes, translúcidas y opacas, siendo transparentes aquellas que permiten ver a través de ellas, translúcidas las que permiten observar una figura con poca definición y opacas las que no permiten ver a través de ellas.

Las imperfecciones que se estudian dentro de las piedras preciosas de color son los accidentes morfológicos internos que pueden ser vistos, estos accidentes reciben el nombre de inclusiones, es de mencionar que no siempre afectan de forma negativa ya que pueden crear efectos ópticos que le sumen valor a la piedra, pero en las gemas de color se aprecia más que tengan la menor cantidad de inclusiones posibles. Estas inclusiones pueden ser sólidas como pequeños cristales de otro mineral dentro de la gema formados antes del cristal (inclusiones protogenéticas) al mismo tiempo (inclusiones singenéticas) o posteriores a esta (inclusiones singenéticas), estas inclusiones pueden ser sólidas, líquidas, gaseosas, fracturas, líneas de crecimiento, clivaje, nube, entre otras.

Existen varias clasificaciones acerca de la claridad y pureza de las piedras preciosas de color, la GIA (Gemological Institute of America) las agrupa en tres tipos: Tipo I se forman en condiciones geológicas que no permiten el desarrollo de inclusiones apreciables a simple vista y cuyas piedras se denominan “limpias”, las piedras preciosas pertenecientes al Tipo II se forman bajo condiciones geológicas más severas propiciando la formación de inclusiones más visibles a simple vista, y en el Tipo III se agrupan las piedras que se



forman bajo condiciones geológicas que provocan que en la mayoría de los casos presenten inclusiones que se ven a simple vista y rara vez estén “limpias”, (tomado de Matlis, 2012).

### Efectos ópticos

Los efectos ópticos son generados por la dispersión de la luz en la superficie e internamente generados por la refracción; ejemplos son oriente, chatoyancia, labradorescencia, iridiscencia, entre otros.

Como se mencionó anteriormente las inclusiones no siempre deprecian el valor de gema ya que crean efectos ópticos que le suman belleza a la gema, a continuación se presentan algunos de estos efectos ópticos que pueden presentar los granates relacionados con inclusiones.

Otro efecto producido por inclusiones es la Aventurescencia, en este caso inclusiones pequeñas de mica o hematita producen pequeños resplandores al mover la piedra.

Asterismo, este es uno de los efectos ópticos más llamativos ya que finas Inclusiones aciculares que se encuentran orientadas en dos o tres direcciones reflejan la luz en ellas y producen un halo de luz en forma de estrella, el número de puntas se encuentra relacionado con la orientación de las inclusiones y que pueden generar cuatro o seis puntas.

Iridiscencia o también llamado efecto arco iris por la cantidad de colores que produce la interferencia de la luz producidos por clivaje, fracturas o fisuras dentro de la gema.

Cabe mencionar que para resaltar y aprovechar estas características la talla en cabujón es la más utilizada.

### V.1.3 Corte (Cut)

Esta característica de las gemas es muy importante ya que un buen corte y un buen pulido puede resaltar las características mencionadas anteriormente, para ello se hace un estudio para decidir cuál es el que conviene hacer al cristal que se tiene, además buscando conservar el mayor tamaño posible de esta, ya que influye en el peso de la piedra; existen al menos tres formas de cortar una piedra que son faceteado, donde la piedra es cortada para formar caras geométricas planas, dentro de estos cortes se encuentra los cortes en fantasía con formas poco comunes como corazones y hojas; el Cabujón o también llamada curva, en



donde a la gema se le da forma de almohadilla, y la talla grabada moderna donde se pueden hacer toda clase de formas según el lapidario o artesano lo desee. El pulido se hace en una piedra para brindarle un mayor brillo y resaltar la belleza de la gema.

### V 1.4. Peso (Carat)

El peso llega a ser una propiedad tan importante como las tres anteriores, ya que dependiendo de la piedra preciosa influirá directamente en el precio, además de la rareza que pueda implicar una gema de gran tamaño con una buena calidad.

El peso en las piedras preciosas se mide en quilates (ct), siglas en inglés, que es equivalente a la quinta parte de un gramo es decir 200 miligramos, en el caso del diamante se mide en puntos, esto es 2 mg.

## V.2. Propiedades gemológicas de los granates de la sierra de Tlayca.

En este capítulo se muestran las características observadas en granates cortados y pulidos, en corte cabujón y facetados, seleccionados buscando aprovechar las características gemológicas de las piezas antes de tallar, debido a la poca cantidad de cristales diáfanos se utilizaron cristales que tuvieran un color homogéneo y de un tamaño mayor a 5 mm. Se tomó en cuenta la escala de Munsell para caracterizar el color, se utilizaron las secciones matiz-valor que a continuación se muestran fig. 58:

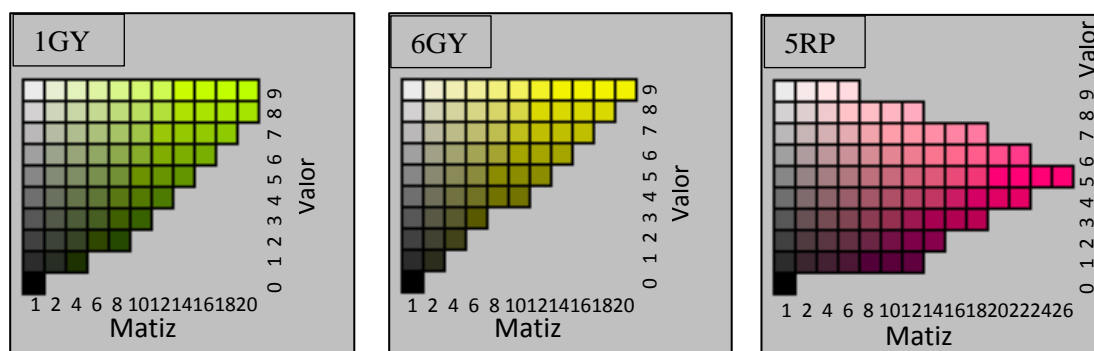


Fig. 58 Secciones de Munsell matiz-valor utilizadas para la determinación de color de los granates tallados.



## Capítulo V Características gemológicas de los granates

Se realizaron observaciones con microscopio gemológico marca Leico Stereo Zoom, de GIA GEM, logrando identificar las principales características gemológicas de los granates estudiados, ver tabla 5, al igual que se utilizó un refractómetro para medir su índice de refracción con ayuda de aceite de refracción con  $n_D^{25^\circ C} = 1.81 \pm .005$ .

Tabla 5. Características gemológicas de los granates de la sierra de Tlayca

Clave Gema	Color según sistema Munsell	Claridad	Inclusiones	Corte	Tamaño [mm]	índice de refracción	Efectos Ópticos	Peso [Ct]	
Grgm1	5RP4/8	translucida	gas, cuarzo y fracturas	cuadrado	6x6x5	1.73	Ninguna	2.5	Fig59a
Grgm4	5RP3/4	translucida	cuarzo y fracturas	oval facetado	12x9x6	1.73	iridiscencia en fracturas	6	Fig59b y fig.60b
Grgm5	5RP3/4	translucida	cuarzo	rosa de tres pétalos	11x11x6	1.72	ninguna	4.1	fig.59c
Grgm6	5RP4/2	translucida	gas, cuarzo y fracturas	cabujón	14x10x6	1.72	ninguna	8	fig.59d y fig.60c
Grgm2	1GY5/6	transparente	cuarzo, gas y fracturas	Poligonal facetado	17x20x9	1.74	iridiscencia en fracturas	25	fig.59e
Grgm3	6GY9/8	translucida	gas, cuarzo y fracturas	Poligonal facetado	15x18x8	1.72	ninguna	12.5	fig.59f y fig.60a

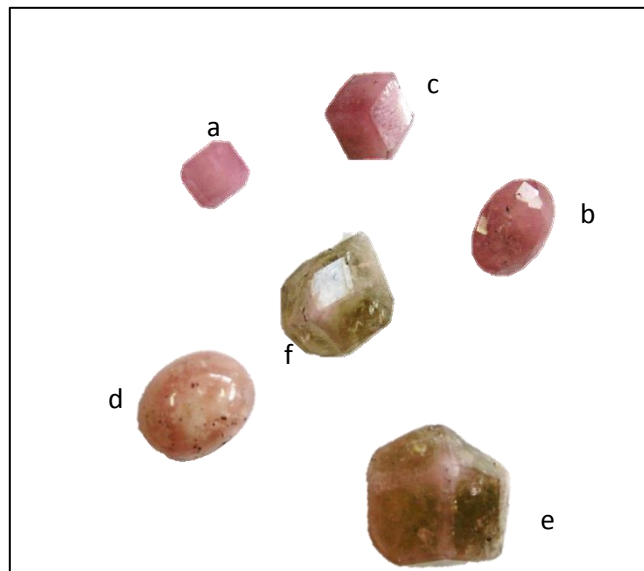


Fig. 59. Muestras de grosularitas talladas y pulidas; (a) Grgm1, ( b) Grgm4, (c) Grgm5, (d) Grgm6, (e) Grgm2, (f) Grgm3.



Las inclusiones mencionadas en la tabla anterior son de dos tipos, las primarias observados como cristales de cuarzo formados en algunos casos paralelos a las líneas de crecimiento del granate, en algunos casos perpendiculares al igual que los gases incluidos dentro del cristal; las secundarias se encuentran representadas por las fracturas posiblemente por algún agente mecánico, ver fig. 60.

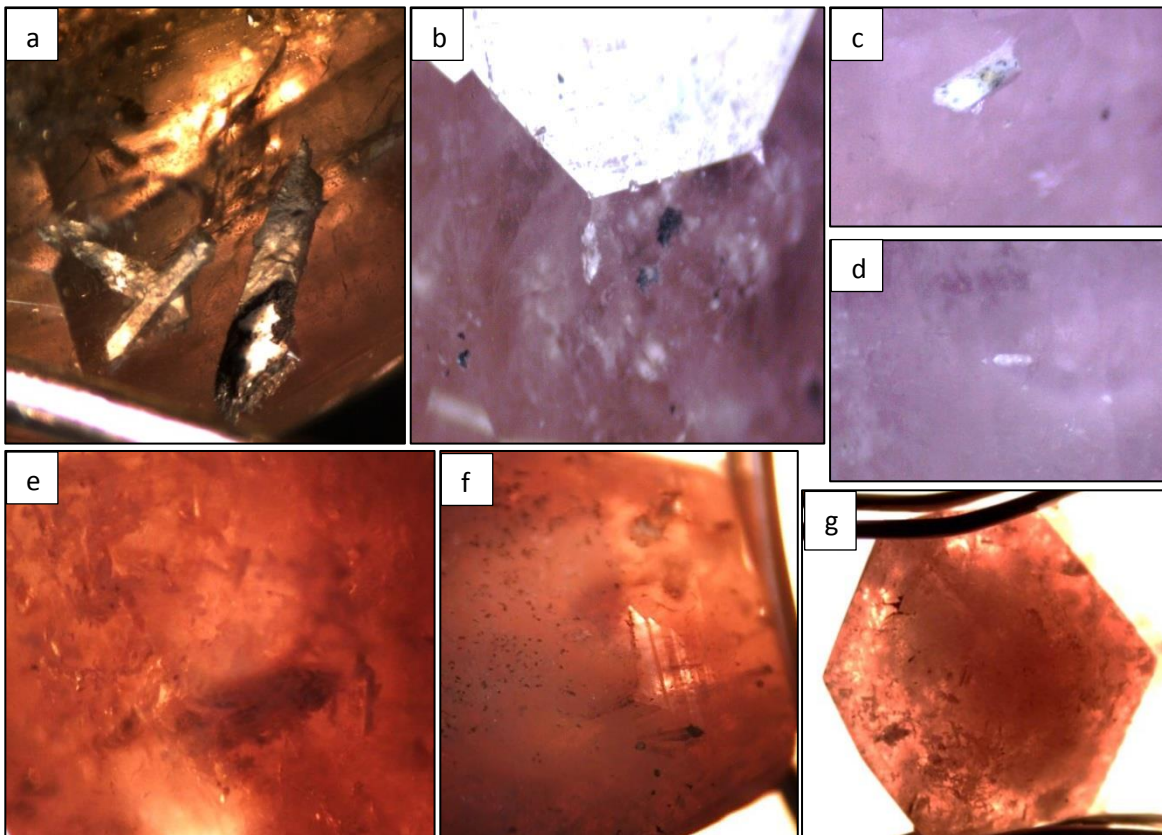


Fig. 60 Inclusiones encontradas en los granates pulidos y tallados; (a) cristales de cuarzo menores a 1mm, burbujas de gas y fracturas, muestra Grgm3; (b) y (c) cristal de cuarzo dentro del cristal de granate muestra Grgm4; (d) y (e) inclusiones de cuarzo y gas dentro del cristal de granates menores a 1mm, muestra Grgm5; (f) bandas de crecimiento en la muestra Grgm5, (g) vista de planta de la muestra Grgm5.



Con las características antes mencionadas se observó que se pueden realizar cortes facetados, con una pérdida pequeña de las dimensiones originales, además, se puede aprovechar la forma natural de los granates ya que la muestra Grgm5 se cortó solo la base perpendicular al eje ternario del cristal y las caras se utilizaron para formar las facetas, permitiendo que no se perdiera mucho del tamaño de la piedra original al no agregar facetas y solo pulir las caras.

El índice de refracción medido varía de 1.72 a 1.74 estos valores son muy cercanos al valor teórico para las grosularitas que es de 1.734 (Pohwat, 2008); se realizaron cortes cabujones con el cabujón perpendicular a las bandas de crecimiento en busca de asterismo, aunque desafortunadamente no se observó dicho efecto luminoso porque no se contienen minerales aciculares que lo permitan.



## VI. Discusión de resultados

Las relaciones de corte presentes en los cuerpos intrusivos, junto con las fracturas rellenas de granate dentro del exoskarn, demuestran que se llevaron a cabo al menos dos fases de formación de skarn, en la primera se formó el exoskarn por intrusión de un cuerpo intrusivo que afectó a las calizas y conglomerados, generando los granates de gran tamaño, durante esta etapa se llevaron a cabo cambios en las condiciones de formación quedando registrados en la estructura de los granates y marcados por la aparición de minerales como espurrita y óxidos de hierro dentro del skarn derivados de una pérdida en la  $fO_2$ , esto ya que estos minerales se producen en condiciones diferentes a la mineralogía que se encuentra junto a ellos.

La segunda fase de skarnificación se encuentra representada por las fracturas que afectan tanto al cuerpo intrusivo y al exoskarn, en el cuerpo intrusivo se formaron skarns de piroxenos, brechas de skarn y fracturas rellenas de granate, mientras en el exoskarn permitió la formación de fracturas rellenas de granate y cuarzo; en este caso se encontró también esfalerita, pirita, magnetita y óxidos de hierro, estos minerales indican una fase hidratada.

Los análisis de elementos mayores de la caliza y el mármol varían muy poco entre sí, marcando el metamorfismo isoquímico, mientras tanto los valores de sílice y magnesio aumentan en proporción en los skarns con respecto a las calizas, en el caso del aluminio y calcio decrecen en proporción en los skarns comparados con las calizas, el porcentaje de estos elementos no supera al porcentaje de la caliza y el cuerpo intrusivo que reaccionaron para darles origen.

Los granates fueron analizados con microscopio electrónico de barrido con detector de energía dispersiva de rayos X (EDS), ante la dificultad que se tuvo para poder trabajar con la microsonda por cuestiones de funcionamiento de esta, los resultados de los análisis son cualitativos y semicuantitativos que tratándose de minerales anhidros, son cercanos a la composición real, aunque es necesario realizar un análisis cuantitativo con microsonda



## Capítulo VI Discusión de Resultados

electrónica, midiendo la longitud de onda de los rayos X (WDS) para conocer la composición más cercana en siguientes trabajos.

Los granates analizados presentan composiciones dentro del rango de grosularita-andradita, presentando mayor afinidad a la grosularita, tomando en cuenta la fórmula  $A_3B_2(SiO_4)_3$ , podemos relacionar que en los casos que presentan enriquecimiento en magnesio se relacione a una posible sustitución del calcio en el lugar de A, proporcionando una composición afín de la serie de la piralspita, los análisis químicos permiten observar relaciones como la que forman el hierro, titanio e itrio, que disminuyen en proporción en función que el calcio aumenta esto por una posible sustitución en el lugar de A; entre el aluminio y el hierro uno aumenta conforme decrece el porcentaje del otro.

Los granates presentan anisotropía óptica, esto es común en el metamorfismo de contacto, en el caso de los granates de la sierra de Tlayca se encontró que esta anisotropía se observa solo en granates que presentan una composición de grosularita, intercalados con grosularitas con un contenido ligeramente mayor en hierro, los cambios de composición de grosularita- andradita que se encontraron se formaron durante los cambios composicionales del fundido, mientras cristalizaba el granate, provocaron que se dieran sustituciones entre el aluminio y hierro causando variaciones en la estructura de la molécula, estos cambios generaron crecimiento de compuestos similares (epitaxia) y crecimiento paralelo, que provocan en ambos casos anisotropía óptica causados por el cambio en la estructura, reflejados en los análisis de series de este bandeamiento con ayuda del Raman.

Se encontró también que la composición de dichos granates es de grosularita de 80 % a 90 % en el centro del cristal y en las periferias del cristal llega hasta ser 45 % de grosularita y 55% de andradita lo que brinda información de un aumento en las cantidades de Hierro en el tiempo.

Otra causa probable de la anisotropía de los granates es el contenido de itrio, este elemento junto con las tierras raras puede generar anisotropía óptica en los granates al sustituirse por el calcio, para verificar esto se tienen que realizar análisis de difracción de rayos X para



## Capítulo VI Discusión de Resultados

comprobar la presencia de elementos de tierras raras y la relación que guardan con la estructura de la molécula, ya que en los análisis con bandas Raman arrojaron cambios estructurales entre los diferentes colores de granates encontrados.

Los colores que presentaron mayor belleza y que pueden ser utilizados para la gemología son los colores que van del 5RP4, 1GY y 6GY según la escala de Munsell, los granates en estos colores presentan un índice de refracción entre 1.72 y 1.74. Se puede aprovechar la forma natural del cristal de granate para realizar el faceteado ya que los cristales euhedrales presentan mayor claridad. Se encontró iridiscencia causada por fracturas, e inclusiones de cuarzo y del mismo granate, al igual que bandas de crecimiento; se encontraron piezas con una claridad muy buena por lo que se necesita ampliar la búsqueda para encontrar un mayor número de estas y se pueda recuperar el mercado que tenía cuando se conocía como Xalostocita.



### V11. Conclusiones

Se generó un mapa geológico escala 1:25000 y en este la ubicación geográfica de las muestras colectadas de la sierra de Tlayca.

La evolución el metamorfismo de contacto comenzó con una etapa isoquímica, representada por la caliza a mármol, y otra marcada por los skarns donde hay un aumento en la proporción del sílice, manganeso y magnesio, sin llegar a ser igual al de las rocas que les dieron origen.

Se llevaron a cabo al menos dos fases de formación de skarn, la primera se formó el exoskarn en condiciones anhidras generando los granates de gran tamaño y la segunda una fase hidratada de formación del skarn donde aparecieron esfalerita, pirita, magnetita e hidróxidos de hierro.

Los granates presentan composiciones que varían de grosularita-andradita, con mayor afinidad a la grosularita.

Las sustituciones entre el aluminio y hierro causaron crecimiento de compuestos similares (epitaxia) y crecimiento paralelo.

La anisotropía óptica se observa solo en granates que presentan una composición de grosularita, intercalados con grosularitas con un contenido ligeramente mayor en hierro.

Se dio un aumento del hierro en el fundido conforme cristalizaban los granates, esto ya que los cristales de granate presentan composiciones de 80 % a 90 % de grosularita en el centro del cristal y en las periferias llega hasta ser 45 % de grosularita y 55 % de andradita.

Los colores presentes con mayor atractivo y que pueden ser utilizados para la gemología son los colores que van del 5RP4, 1GY y 6GY según la escala de Münsell.

Las inclusiones presentes no brindan un efecto óptico especial y decrecen la claridad de la piedra.

Las grosularitas presentan un índice de refracción entre 1.72 y 1.74.

Se puede utilizar la forma natural del cristal para el facetado.



## VIII. Bibliografía

Aguilar-Murillo C.A., 2012, Reconocimiento geológico de la zona de skarn de la sierra de Tlayca y Tlayecac en el Estado de Morelos, México, [tesis de licenciatura]: Sonora, Universidad de Sonora, 78 p.

Aguilera-Franco, N., 2000, High resolution Stratigraphy and Paleocology of the Cenomanian-Turonian succession, Southern Mexico, tesis doctoral, University of London, 239 p.

Akizuki, M., 1984, Origin of optical-variation in grossular-andradite garnet, *American Mineralogist*, v.69, p. 328-338.

Allen M., F., Buseck R.,P., 1988, XRD, FTIR and TEM studies of optically anisotropic grossular garnets, *American Mineralogist*, v. 73, p. 568-584.

Back, M.E., Mandrino, J.A., 2008, Fleischer's Glossary of minerals species 2008, The mineralogical record, p. 297.

Beltrán Ricardo, Maida Lia, Natale Nacho, Vargas Miguel, 2013, Tecnología Gráfica Bernadou, <http://entintados2013.blogspot.mx/>.

Bersani,D., Ando, S., Vignola, P., Moltifiori, G., Marino I.G., Lottici P. P., Diella, V., 2009, Micro-Raman spectroscopy as a routine tool for garnet analysis, *Spectrochimica Acta Part A 73: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, p. 484–491.

Best, Myron G., 2003, *Igneous and metamorphic petrology*, U.K., Blackwell publishing, 2nd ed., p. 32.

Cabral-Cano, E., Lang, H.R., Harrison, C.G.A., 2000, Stratigraphic assessment of the Arcelia-Teloloapan area, southern Mexico: implications for southern Mexico's post-Neocomian tectonic evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, 13, p. 443-457.



## Capítulo VIII Bibliografía

Cornell Daily Sun, 1895, Natural History Society, vol. XV, no. 144, en prensa.

De Cserna-Zoltan., Fries-Carl, Jr.; Rincón-Orta, C., Silver, L.T., Westley, H., Solorio-Munguía, J., y Schmitter-Villada, E., 1974, Datos geocronométricos terciarios de los estados de México, Morelos y Guerrero: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 26, p. 263–273 .

De Cserna, Z., Ortega-Gutiérrez, F., Palacios-Nieto, M., 1980, Reconocimiento geológico de la parte central de la cuenca del alto Río Balsas, Estados de Guerrero y Puebla: Libro guía de la excursión geológica a la parte central de la cuenca del Alto Río Balsas, estados de Guerrero y Puebla, Sociedad Geológica Mexicana, V Convención Geológica Nacional.

Enaudi, M.T., 1982, Description of Skarns associated with porphyry copper plutons, Advances in geology of the porphyry coppers deposits, Tucson, south western north America, university of Arizona Press, p. 139-184.

Ferrari-Pedraglio L., Morán-Zenteno D., González-Torres, E.A., 2007, Actualización y adaptación de la Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2,000,000 publicada por el Instituto de Geología de la UNAM y el Consejo de Recursos Minerales (Ortega-Gutiérrez et al., 1992).

Fettes, D, Desmons, J, 2007, Metamorphic rocks a classification and glossary of terms: U.K., Cambridge university press, p. 58-81.

Fries, C., 1956, Bosquejo geológico de la región entre México D.F. y Acapulco, Gro., Congreso Geológico Internacional, Excursiones A9 y C12, Vigésima sesión, p. 1-23.

Fries, C., 1960, Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región centro meridional de México: Boletín del Instituto de Geología, 60, 236 p.



## Capítulo VIII Bibliografía

Frost, B. Ronald., Barnes Calvin G., Collins William J., Arculus R.J., Ellis, D.J., Frost. C.D., 2001, A Geochemical Classification for Granitic Rocks, *Journal of petrology*, v. 42, n. 11, p. 2033-2048.

Fritsch E., Rossman G.R., 1993, The causes of color in garnets: abstract of 14<sup>th</sup> annual mineralogical symposium: *The mineralogical record*, v. 24, n. 1, p. 63.

García-Díaz, J.L., 2004, Étude Géologique de la Sierra Madre del Sur aux environs de Chilpancingo et d'Olinalá, Gro.: une contribution a la connaissance de l'évolution geodynamique de la marge pacifique du Mexique depuis le Jurassie, [tesis doctoral]: France, Université de Savoie, 148 p.

Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, L.D., Moretti, R., 2008, REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit, *Geochimica et Cosmochimica acta* 72, p. 185-205.

Grajales Nishimura J.M y Sánchez Hernández R., 1979, Estudio petrológico del metamorfismo de contacto en la zona de Tlaica, Morelos, [tesis de licenciatura]: Mexico D.F., Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura I.P.N., 75 p.

Guilbert, J.M., 1996, the geology of ore deposits: New York, freedman and company, p. 436-453.

Lugo-Hubp, J., 1990, El relieve de la república Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología, revista, vol. 9, n. 1, p. 82-111.

Matlins, A. 2012, Guía para comprar y vender piedras preciosas de color, tercera edición: Madrid, ediciones omega, p. 233.

McConnell, D., 1933, Garnets from Sierra Tlayacac, Morelos, Mexico: *Am. Miner.* 18, p. 25-29.





## Capítulo VIII Bibliografía

Meinert , L.D., 1992, Skarns and Skarns deposits, geoscience Canada, Journal of the geological association of Canada, v.19, n. 4., p. 145-162.

Monter-Ramírez, A., Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L.A., Centeno-García, E., 2004, Revisión de la estratigrafía del grupo Balsas en el área de Amacuzac, estados de Morelos y Guerrero (resumen), IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra: Juriquilla, Qro., México, México., UGM, SMM, SGM, SELPER, SMC, SGM e INAGEO, GEOS, 24(2), 223 p.

Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L.A., Martinez-Serrano R.G., Reyes-Salas M. A., 1998, Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the tertiary volcanic sequences of the Taxco-Quetzalapa región, southern Mexico: Revista Mexicana de ciencias geológicas, v.15, n.2, p. 167-180.

Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L.A., Solé J., Iriondo A., 2004, A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tilzapotla ignimbrite, Journal of Volcanology and Geothermal Research 136 ,p. 97– 119 .

Morán-Zenteno, D.J., Monter-Ramírez, A., Centeno-García, E., Alba-Aldave, L.A., Solé, J., 2007, Stratigraphy of the Balsas Group in the Amacuzac area, southern Mexico: relationship with Eocene volcanism and deformation of the Tilzapotla-Taxco sector: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24(1), p. 68-80 .

Ostrooumov, M.,2009, Mineralogía analítica avanzada, Universidad Michoacana de San Nicolas de hidalgo, México, p. 209-229.

Pirajno Franco, 2009, hidrotermal processes and mineral systems: Australia, ed. Springer, p. 538-545.



## Capítulo VIII Bibliografía

Pohwat P., 2008, The garnet group, lithographie, LLC, Garnet: Great balls of fire, No. 11, p. 4-7.

Rollinson, Hugh R., 1993, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Singapur , Pearson Prentice Hall, p. 72.

Servicio Geologico Mexicano, 2009, Carta geológico-minera del Distrito Federal, Estado de México y Morelos: Mexico, E14-5 S.G.M., escala 1:50 000.

Zamudio-Ángeles, J.D., Ferrusquía-Villafranca, I., 1996, Análisis lito y bioestratigráfico del Cretácico en el área de Mayanalán-Tulimán, Guerrero nororiental: una contribución al conocimiento geológico de la Sierra madre del Sur, XIII Convención Geológica nacional, Sociedad Geológica Mexicana: La Paz, Baja California, México, p. 55.



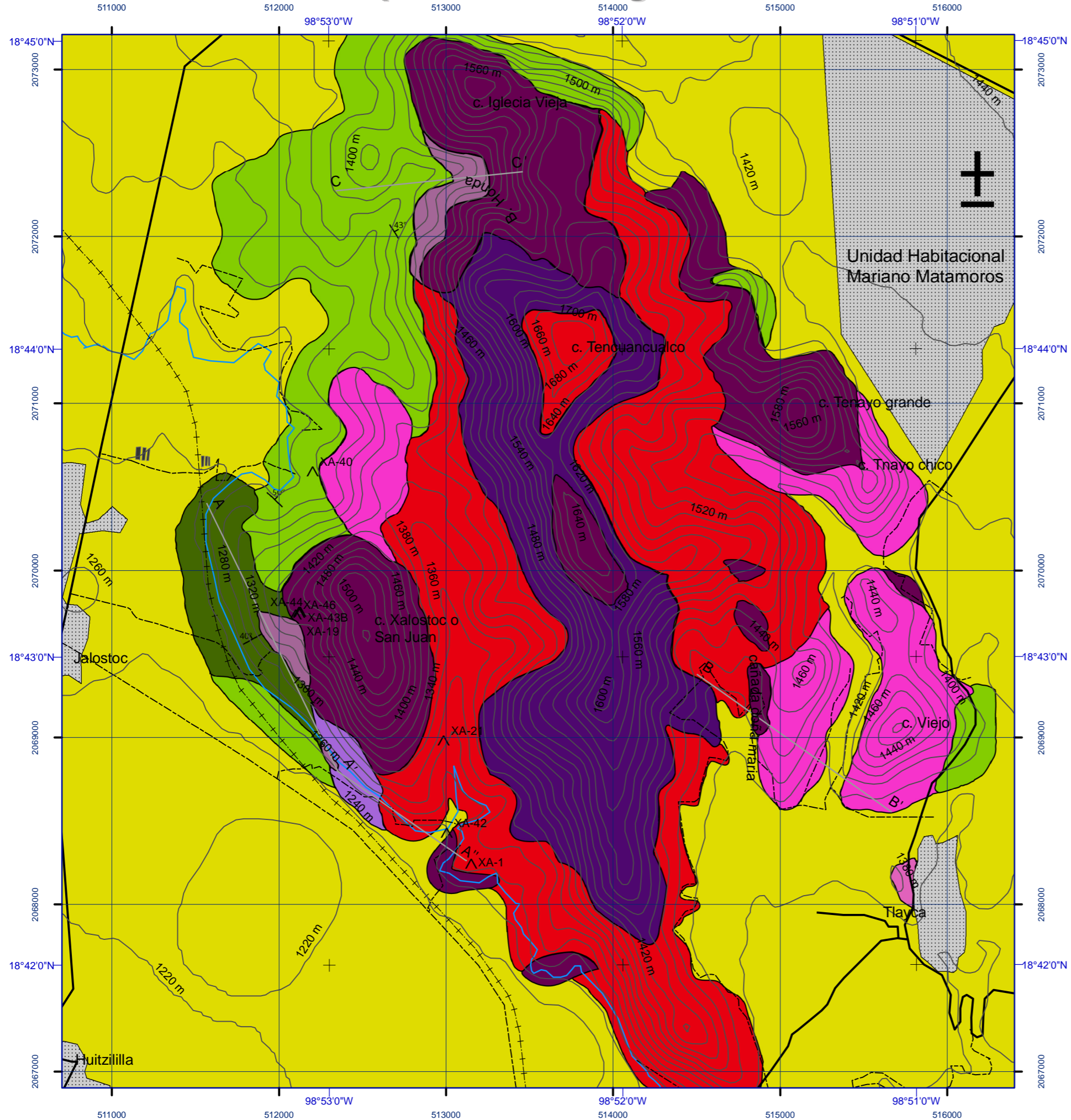
# Apéndices

Mapa geológico y secciones geológicas	A
Petrografía de granates	B
Tablas de composición porcentual de los granates analizados	C
Tabla de composición porcentual de los granates graficados	D

## Apéndice A

### Mapa geológico y secciones geológicas

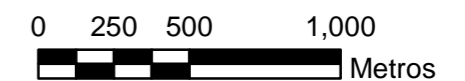
# Mapa Geológico de la Sierra de Tlayca



## Simbología

- Curva de nivel
- Vía del tren
- Carretera
- Camino o brecha
- Canal
- línea de Sección
- Granja
- Poblado
- Ubicación de la muestra
- Rumbo y echado de la estratificación
- Depósitos recientes y terrenos de labor
- Tobas y derrames, Fm. Tlayca
- Endoskarn
- Exoskarn
- Mármol, metacaliza y metaconglomerado
- Cuerpo intrusivo
- Conglomerado Fm. Balsas
- Calizas Fm. Morelos

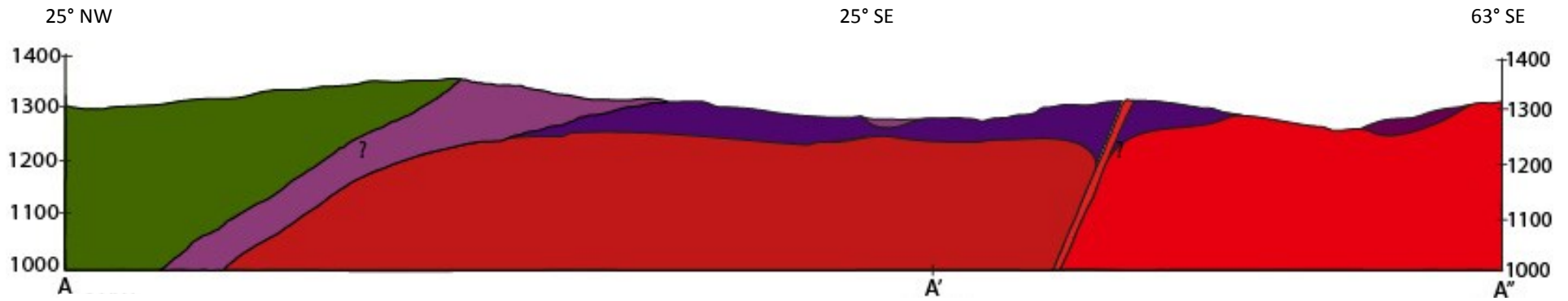
Escala Grafica



U.N.A.M.  
 Facultad de Ingeniería  
 Apéndice A Mapa Geológico  
 de la Sierra de Tlayca, Morelos  
 Rainier Uriel Mares Tepanhaya  
 Tesis de licenciatura 2014

# Sección Geológica del Cerro San Juan

Cerro San Juan



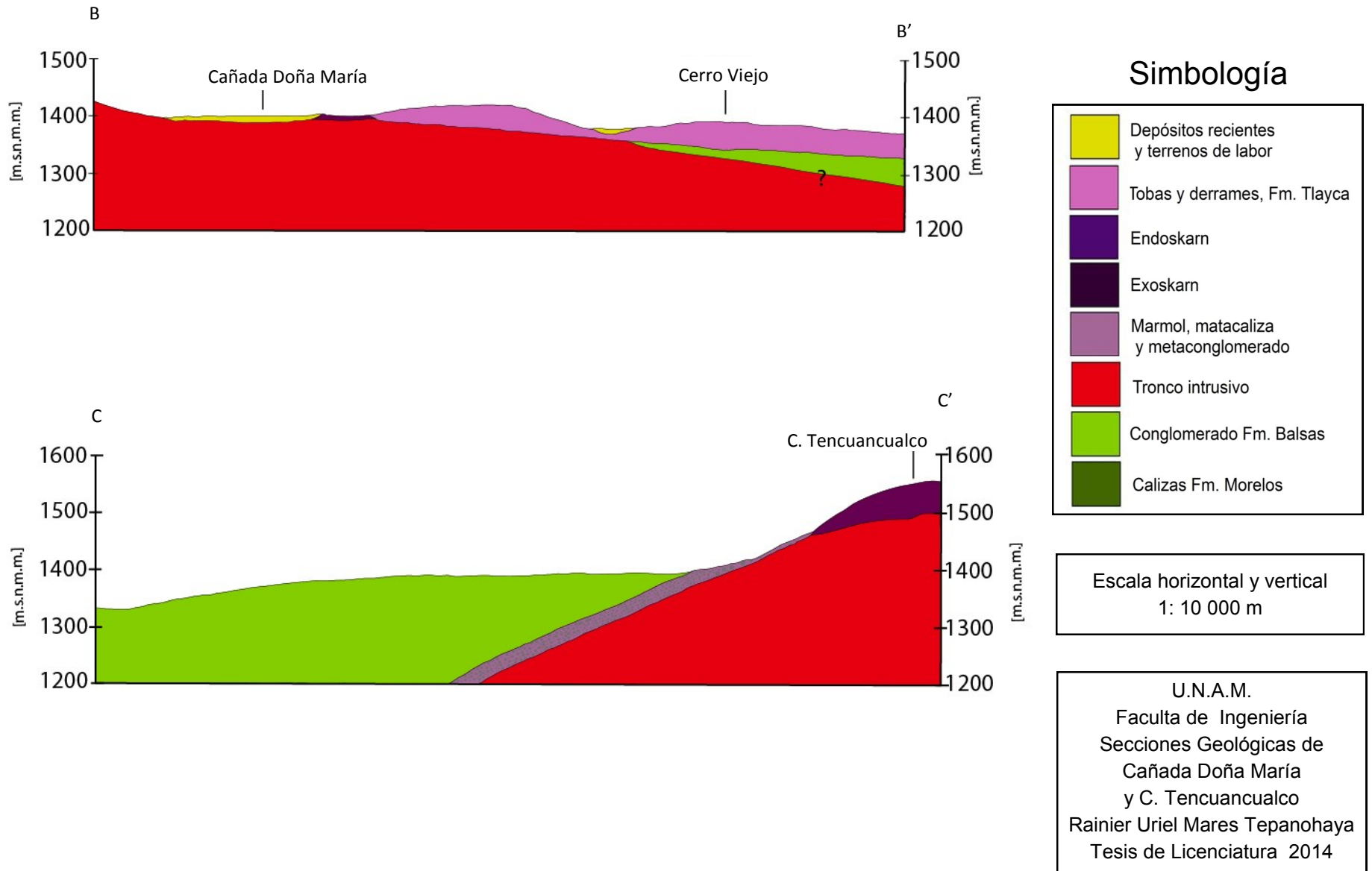
## Simbología

	Depósitos recientes y terrenos de labor
	Tobas y derrames, Fm. Tlayca
	Endoskarn
	Exoskarn
	Marmol, matalcaliza y metaconglomerado
	Tronco intrusivo
	Conglomerado Fm. Balsas
	Calizas Fm. Morelos

Escala horizontal y vertical  
1: 10 000 m

U.N.A.M.  
Faculta de Ingeniería  
Sección Geológica del  
Cerro San Juan  
Rainier Uriel Mares Tepanhaya  
Tesis de Licenciatura 2014

## Secciones Geológicas de Cañada Doña María y C. Tencuancualco



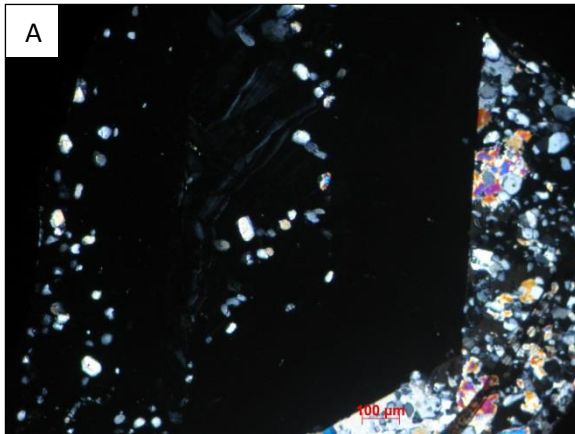
## Apéndice B

### Apéndice B

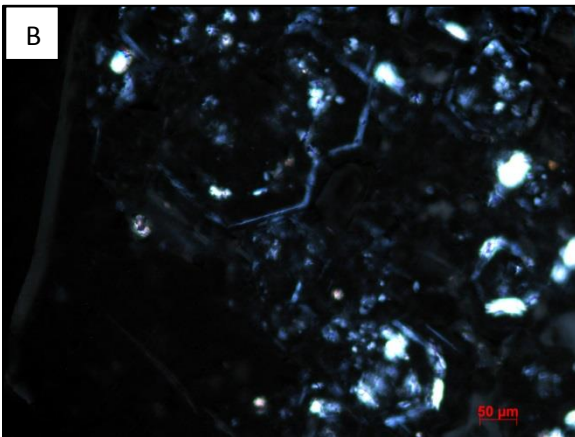
#### Petrografía de granates

En este anexo se presentan fotografías en microscopio petrográfico de muestras seleccionadas de granate donde se observan algunas características particulares.

#### XA-25 (fotografías con nicoles cruzados)



En la fotografía A se puede observar un granate con textura poiquiloblástica con bandas de granate isotrópico y bandas de granate anisotrópico, este granate presenta bandas de crecimiento oblicuas a las bandas de granate isotrópico que nos indica que se formaron en un proceso anterior a la formación de la banda donde se encuentran alojadas. Las inclusiones que se observan (zonas blancas) son cristales de cuarzo.



La fotografía B muestra el sobre crecimiento de granates, presentan un núcleo con textura poiquiloblástica mientras en la parte exterior del cristal desaparece esta textura y en su lugar aparecen bandas de crecimiento de granate isotrópico y en la parte exterior del cristal bandas de granate anisotrópico.

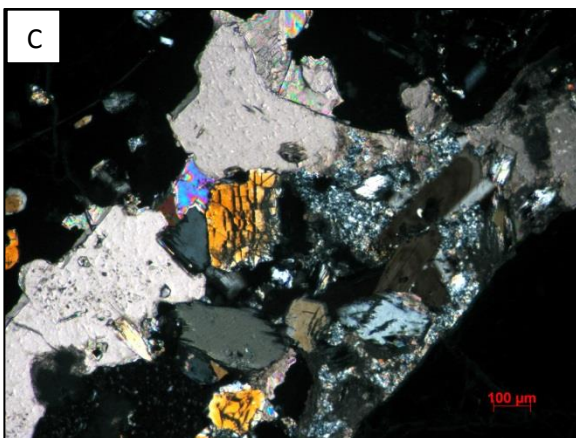


Figura C muestra un aglomerado de inclusiones dentro del granate estas inclusiones son de calcita, clinopiroxeno, clinozoicita, cuarzo.



## Apéndice B

### XA-36 (fotografías con nicoles cruzados)

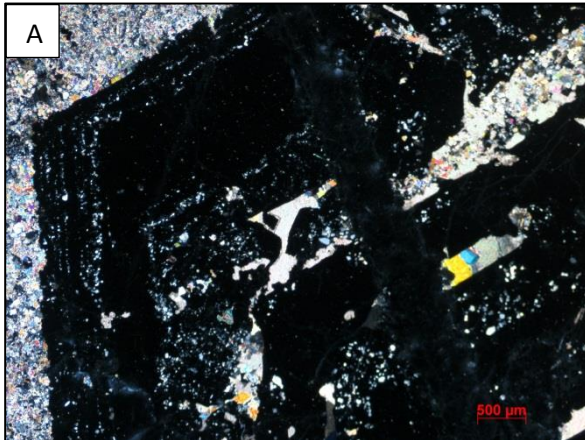
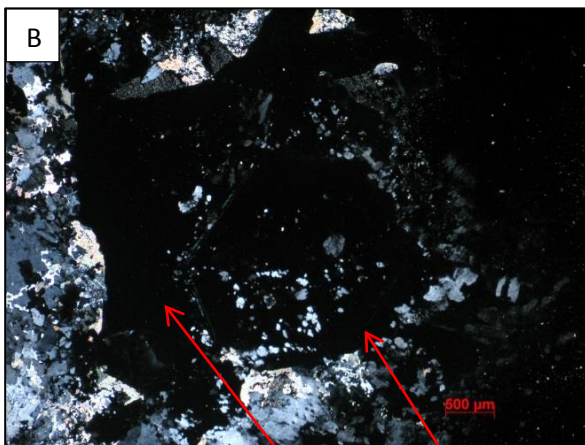


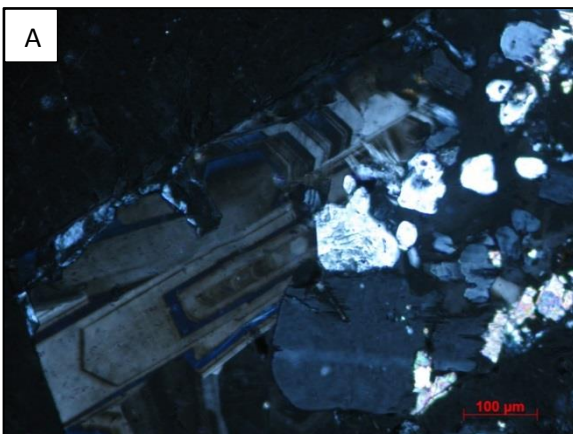
Figura A muestra un granate bandeado, las bandas presentan textura poiquiloblástica, en el centro se presentan inclusiones de mayor tamaño que en las periferias del cristal, estos cristales son de calcita Euedral, cuarzo y clinopiroxenos, estos se encuentran orientados paralelos a las bandas de crecimiento por lo que son contemporáneos a la banda donde se encuentra alojada esta inclusión.



La fotografía B muestra un cristal de granate con bandas de crecimiento, se encuentra formado por dos cristales, el primero se encuentra en el centro formado de un cristal con textura poiquiloblástica y el segundo cristal, en la parte exterior tiene una orientación diferente al del centro, los espacios vacíos entre ellos se encuentran rellenos de cristales de cuarzo y granate anhidral.

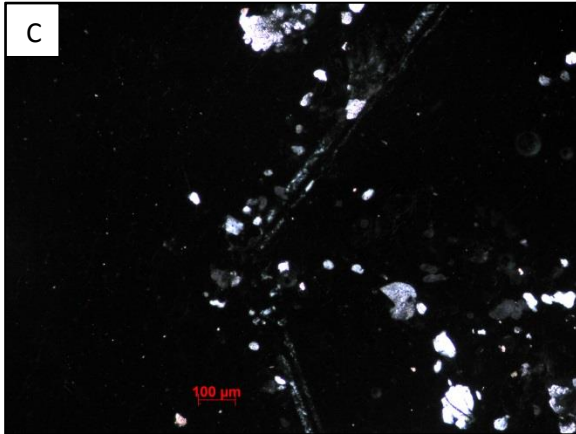
2º Cristal      1<sup>er</sup> Cristal

### XA-41 (fotografías con nicoles cruzados)

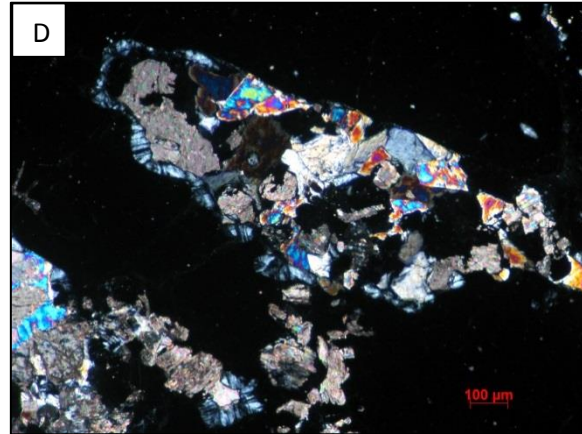


En la figura A se muestra un cristal Euedral de granate con alto contenido en Itrio, esto significa que creció al mismo tiempo que el granate y bajo condiciones estables.

## Apéndice B



En la figura C se muestra un cristal de granate con bandas de crecimiento, se distinguen tres capas la de la derecha presenta inclusiones de tamaño medio, la segunda capa es de granate anisotrópico con inclusiones de tamaño fino, y la tercera capa, lado izquierdo, presenta inclusiones de tamaño medio.



La figura D muestra una aglomeración de cristales con un borde de reacción de diópsida.

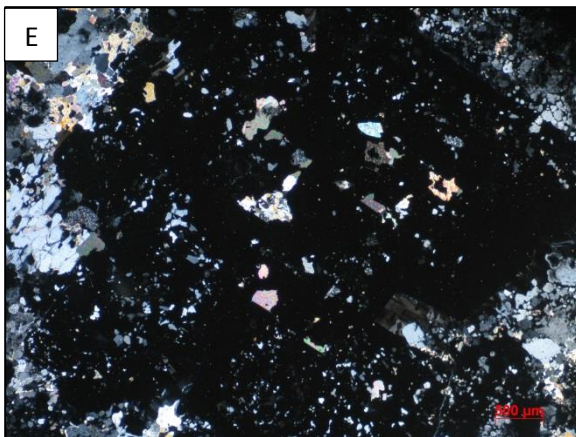


Figura E, muestra un granate pseudoromboedra con textura poiquiloblástica, las inclusiones del centro del cristal se encuentran orientadas a las líneas de crecimiento.

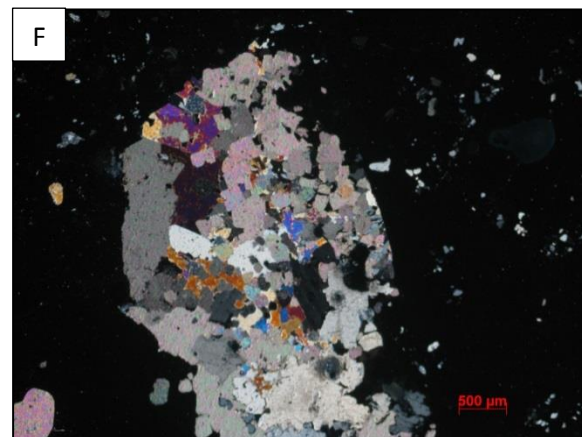


Figura F, aglomeración de cristales dentro del granate, entre ellos se encuentra cuarzo y clinopiroxenos.

## Apéndice B

### XAGr-1 (fotografías con nicoles cruzados)

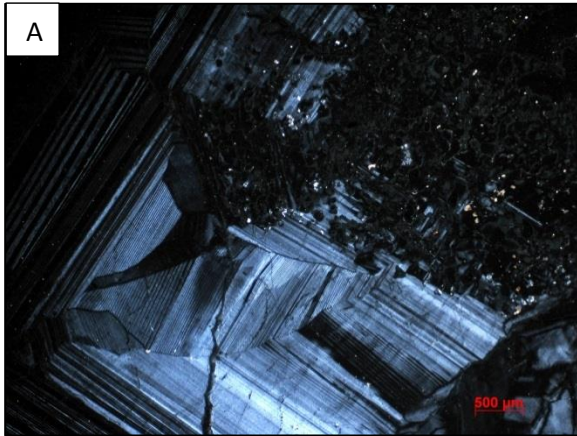


Figura A muestra el crecimiento de dos cristales el del centro, lado superior derecho, se presenta textura equigranular, la parte bandeada, segundo cristal, muestra dos direcciones de crecimiento.

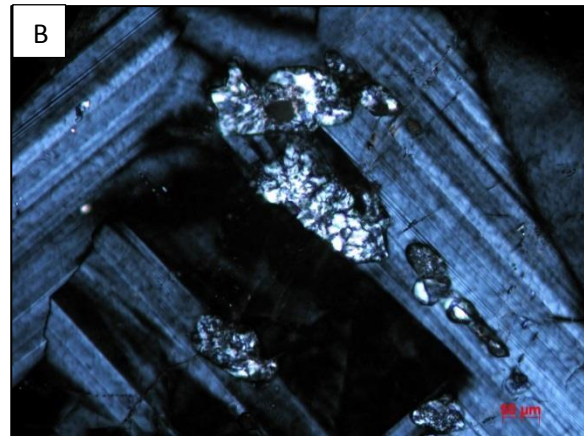


Figura B muestra un acercamiento de las bandas observadas en la figura A, se observa una orientación paralela de las inclusiones a las líneas de crecimiento del granate anisotrópico.

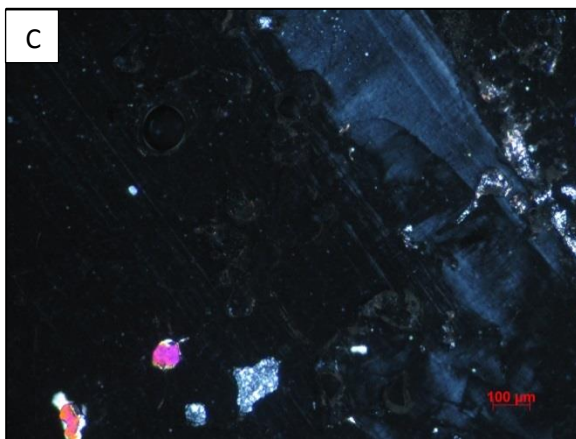


Figura C inclusiones de clinopiroxenos dentro de las bandas de crecimiento del granate.

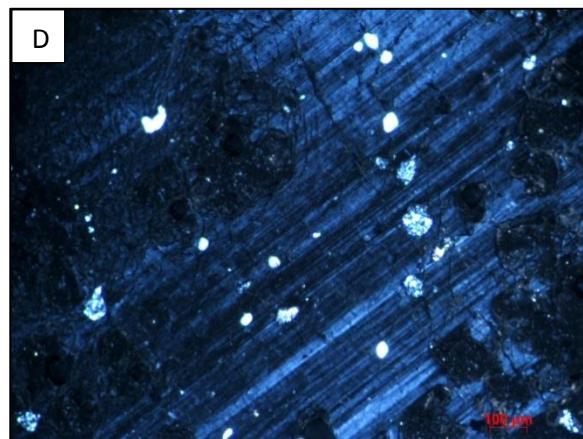


Figura D se observa el pseudomorfismo del granate, como pequeños círculos rodeados por fracturas, se observa también inclusiones orientadas a las bandas de crecimiento.

## Apéndice B

### XAGr-15

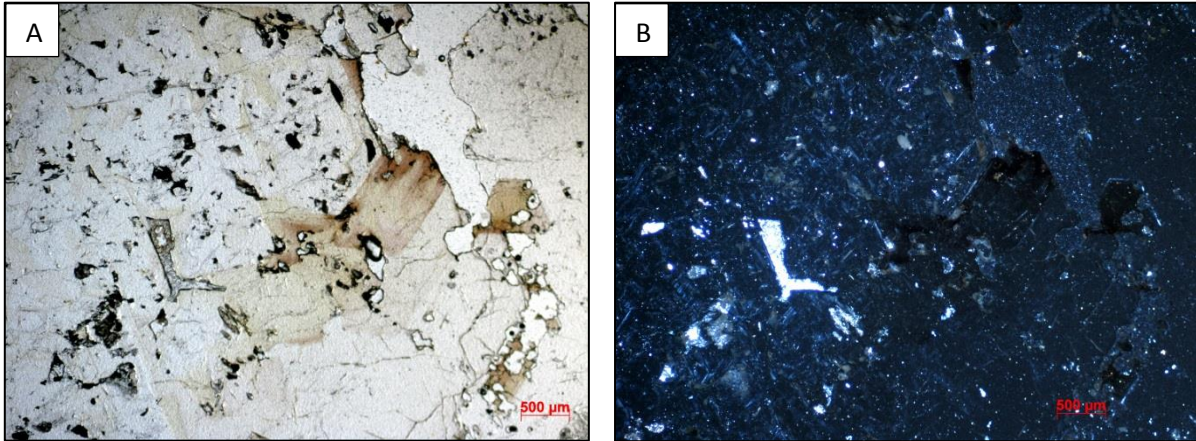


Figura A sección delgada con luz transmitida donde se aprecia una coloración pardo claro en el granate, en la figura B se observa la misma área en nicols cruzados, las zonas pardas de la figura A presentan una anisotropía anormal.

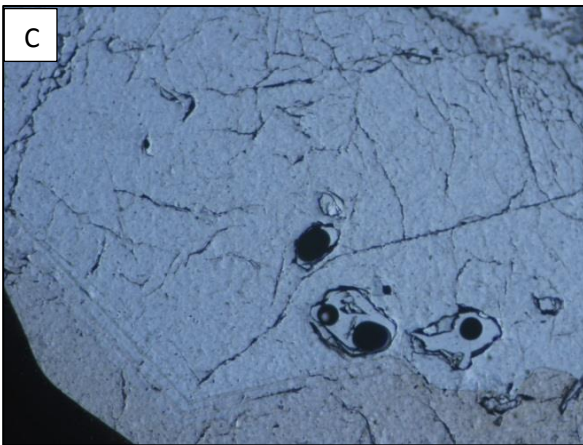


Figura C, muestra bandas de crecimiento color pardo en un cristal de granate, fotografía con luz transmitida.

## Apéndice B

### XAGr-16

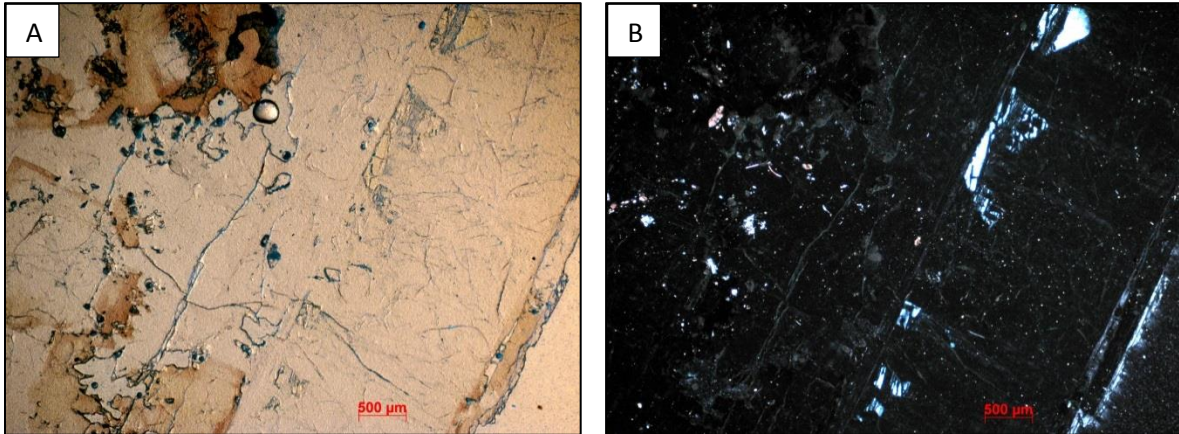


Figura A sección delgada con luz transmitida donde se observa una coloración parda clara en el granate y bandas de crecimiento, en la figura B se observa la misma área en nicols cruzados se aprecian las inclusiones orientadas a las bandas de crecimiento, se observa que en las zonas pardas de la figura A el número de inclusiones es menor.

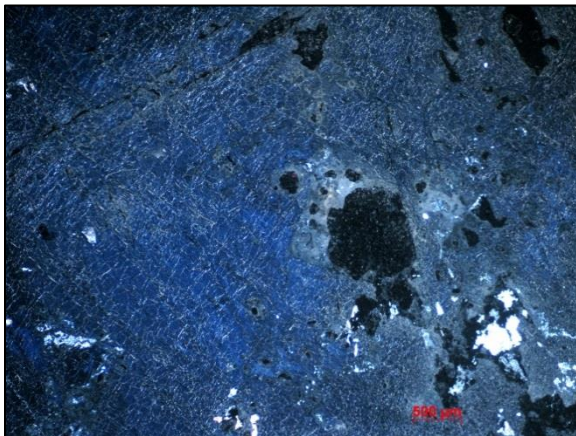


Figura C, se observa un cristal de granate anhedral rodeado de vesuvianita, esto permite visualizar la formación temprana de granate y su alteración para formar vesuvianita, fotografía con nicols cruzados.

## Apéndice C

Tablas de composición porcentual de los granates analizados mediante microscopia electrónica de barrido con EDS

	XaGr15 a1	XaGr15 a2	XaGr15 a3	XaGr15 a4	XaGr15 a5	XaGr 15 b1	XaGr 15 b2	XaGr 15 b3	XaGr 15 b4	XaGr 15 b5	XaGr 15 b6	XaGr 15 b7	XaGr 15 b8	XaGr 15 b9
<b>SiO<sub>2</sub></b>	33.11	37.72	36.1	34.73	35.28	37.22	35.99	36.38	36.49	34.86	35.32	34.15	35.07	32.87
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.22	0	0.79	2.49	2.94	0.4	1.93	1.57	2.45	3.45	3.16	4.95	4.08	5.22
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	17.37	20.59	11.85	14.15	15.87	19.12	17.07	16.89	17.84	14.5	15.72	11.96	14.62	10.67
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.13	0.28	12.25	7.76	3.78	0.8	2.86	3.05	1.8	5.51	4.97	9.06	5.25	12.03
<b>MgO</b>	3.84	34.52	0.39	0.82	0.62	0.66	0.88	0.93	0.76	0.66	0.7	0.86	0.53	0.75
<b>MnO</b>	0	0.23	0.23	0.39	0.39	0	0	0.37	0.32	0.26	0.27	0	0.3	0
<b>CaO</b>	40.73	3.51	37.53	37.32	39.7	40.51	39.31	39.53	39.56	39.39	38.22	38.19	38.59	37.42
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.13	0	0.14	0.04	0.05	0.12	0	0.04	0.09	0	0.15	0.32	0.16	0.08
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.05	0.06	0	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0.11	0
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.22	0.09	0	0.08	0	0	0.31	0.05	0.12	0.2	0.15	0.26	0	0.23
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.44	0.39	0.51	1.04	0.61	0.59	0.76	0.54	0.42	0.08	0.62	0.11	0.83	0.43
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0	0	0.21	0.39	0.19	0.14	0.72	0.45	0	0.47	0.21	0.14	0.3	0.07
<b>ZnO</b>	0.54	0.24	0	0.65	0.54	0.44	0.17	0	0	0.62	0.51	0	0	0.09
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.24	2.38	0	0.14	0.03	0	0	0.13	0.15	0	0	0	0.17	0.14
<b>P</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>total</b>	100.02	100.01	100	100	100	100	100	99.99	100	100	100	100	100.01	100
<b>Composición</b>														
<b>Gro</b>	77.75	37.02	47.94	61.20	76.82	92.91	82.03	79.52	86.10	69.28	72.58	54.66	70.63	45.50
<b>And</b>	5.06	0.50	49.56	33.56	18.30	3.89	13.74	14.36	8.69	26.33	22.95	41.41	25.36	51.30
<b>Piralspita</b>	17.19	62.48	2.51	5.23	4.89	3.21	4.23	6.12	5.21	4.40	4.48	3.93	4.01	3.20

## Apéndice C

	Xa-25 c1	Xa-25 c2	Xa-25 c3	Xa-25 c4	Xa-25 c5 inc osc	Xa-25 d4	Xa-25 d5	Xa-25 d6	Xa-25 d7	Xa-25 d8	Xa-25 d9	Xa25 d fcha	Xa25 d fin
<b>SiO<sub>2</sub></b>	31.82	32.14	35.42	32.85	35.74	30.11	32.84	33.26	29.48	32.53	32.77	31.72	32.84
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.44	0.34	0.04	0.25	0.32	0.61	0.95	0.74	0.81	0.14	0.3	0.79	0.17
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16.43	15.8	12.65	16.43	11.78	11.72	8.45	7.49	11.58	16.75	16.58	13.7	16.43
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.43	2.39	2.14	2.49	1.84	13.05	10.68	11.06	14.21	1.99	2.09	3.7	2.21
<b>MgO</b>	0.44	0.39	0.26	0.35	0.26	0.27	0.16	0.31	0	0.59	0.38	0.28	0.41
<b>MnO</b>	0.11	0.46	0.67	0.51	0.31	0.04	0.34	0.28	0.97	0.33	0.38	0.29	0.4
<b>CaO</b>	47.32	47.25	47.5	47.07	48.25	43.94	46.28	46.73	42.62	47.54	47.5	48.64	47.07
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.9	0.08	0	0	0.08	0.01	0.04	0	0	0.06	0	0.08	0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0.08	0.32	0.02	0.41	0	0.03	0	0	0.06	0	0.14	0.11
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.08	0.26	0.13	0	0	0.24	0.25	0.13	0	0	0	0.08	0
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04	0.81	0.88	0.03	1.01	-	-	-	-	-	-	0.58	0.22
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
<b>ZnO</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
<b>P</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.133
<b>total</b>	100.01	100	100.01	100	100	99.99	100.02	100	99.67	99.99	100	100	99.99
<b>Composición</b>													
<b>Gro</b>	84.65	82.98	80.47	83.06	83.02	46.73	43.05	39.13	43.27	85.20	85.33	76.24	84.47
<b>And</b>	12.52	12.55	13.61	12.59	12.97	52.03	54.41	57.78	53.10	10.12	10.76	20.59	11.36
<b>Piralspita</b>	2.83	4.46	5.92	4.35	4.02	1.24	2.55	3.08	3.62	4.68	3.91	3.17	4.16

## Apéndice C

	Xa-41 e1	Xa-41 e2	Xa-41 e3	Xa-41 e4	Xa-41a 2	Xa-41a 1,2	Xa-41a 2, 2	Xa-41a f 2 inc	Xagr1 f1	Xagr1 f2	Xagr1 f3	Xagr1 f4	Xagr1 f5
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37.62	38.02	36.75	34.13	37.1	37.21	38.03	34.78	36.69	37.79	36.94	36.79	36.44
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0	0	0.2	0	0.12	0.13	0.5	0.28	2.11	0.94	1.23	2	0.09
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	19.58	19.69	17.83	8.24	19.46	19.58	19.86	8.8	19.65	18.54	18.9	18.88	20.45
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.75	0.79	4.61	19.52	1.17	0.88	0.24	18.01	1.53	2.81	1.46	0.91	0.09
<b>MgO</b>	0.75	0.61	0.12	0	0.81	0.04	0.43	0.07	0.31	0.33	0.43	0.43	0
<b>MnO</b>	0	0.2	0.21	0	0	0	0	0	0.32	0.37	0.77	0.32	0.49
<b>CaO</b>	40.11	39.7	39.21	37.45	40.23	40.38	40.37	37.22	39.34	38.92	39.79	39.1	38.62
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.05	0.06	0	0	0.03	0	0.05	0.21	0.01	0.16	0.32	0	0.03
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0.02	0	0.12	0.02	0	0	0.01	0.03	0	0	0	0
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.15	0.21	0.16	0	0	0.29	0	0.24	0	0.13	0.16	0.07	0
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.52	0.47	0.63	0.14	0.5	0.86	0.44	0.24	0	0	0	1.49	3.39
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.24	0.14	0.15	0.18	0.01	0	0.07	0	-	-	-	-	-
<b>ZnO</b>	0	0	0.13	0.04	0.45	0.44		0	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.23	0.08	0	0.17	0.1	0.19		0.16	-	-	-	-	-
<b>P</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>total</b>	99.99	99.99	100	99.99	100	100	99.99	100.02	99.99	99.99	100	99.99	99.6
<b>Composición con los miembros extremos</b>													
<b>Gro</b>	92.88	92.48	78.30	29.68	90.76	95.51	96.74	32.74	90.10	84.08	87.66	91.92	97.24
<b>And</b>	3.56	3.71	20.25	70.32	5.46	4.29	1.17	67.00	7.02	12.74	6.77	4.43	0.43
<b>Piralspita</b>	3.56	3.80	1.45	0.00	3.78	0.20	2.09	0.26	2.89	3.17	5.57	3.65	2.33



## Apéndice D

### Apéndice D

#### Tabla de composición porcentual de los granates graficados

Composición porcentual de óxidos de puntos de análisis de la muestra XaGr 15

	XaGr15 a1	XaGr15 a2	XaGr15 a3	XaGr15 a4	XaGr15 a5	XaGr 15 b1	XaGr 15 b2	XaGr 15 b3	XaGr 15 b4	XaGr 15 b5	XaGr 15 b6	XaGr 15 b7	XaGr 15 b8	XaGr 15 b9
<b>SiO<sub>2</sub></b>	33.11	37.72	36.1	34.73	35.28	37.22	35.99	36.38	36.49	34.86	35.32	34.15	35.07	32.87
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.22	0	0.79	2.49	2.94	0.4	1.93	1.57	2.45	3.45	3.16	4.95	4.08	5.22
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	17.37	20.59	11.85	14.15	15.87	19.12	17.07	16.89	17.84	14.5	15.72	11.96	14.62	10.67
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.13	0.28	12.25	7.76	3.78	0.8	2.86	3.05	1.8	5.51	4.97	9.06	5.25	12.03
<b>MgO</b>	3.84	34.52	0.39	0.82	0.62	0.66	0.88	0.93	0.76	0.66	0.7	0.86	0.53	0.75
<b>MnO</b>	0	0.23	0.23	0.39	0.39	0	0	0.37	0.32	0.26	0.27	0	0.3	0
<b>CaO</b>	40.73	3.51	37.53	37.32	39.7	40.51	39.31	39.53	39.56	39.39	38.22	38.19	38.59	37.42
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.13	0	0.14	0.04	0.05	0.12	0	0.04	0.09	0	0.15	0.32	0.16	0.08
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.05	0.06	0	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0.11	0
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.22	0.09	0	0.08	0	0	0.31	0.05	0.12	0.2	0.15	0.26	0	0.23
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.44	0.39	0.51	1.04	0.61	0.59	0.76	0.54	0.42	0.08	0.62	0.11	0.83	0.43
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0	0	0.21	0.39	0.19	0.14	0.72	0.45	0	0.47	0.21	0.14	0.3	0.07
<b>ZnO</b>	0.54	0.24	0	0.65	0.54	0.44	0.17	0	0	0.62	0.51	0	0	0.09
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.24	2.38	0	0.14	0.03	0	0	0.13	0.15	0	0	0	0.17	0.14
<b>total</b>	100.02	100.01	100	100	100	100	100	99.99	100	100	100	100	100.01	100
<b>Composición %</b>														
<b>Gro</b>	77.75	37.02	47.94	61.20	76.82	92.91	82.03	79.52	86.10	69.28	72.58	54.66	70.63	45.50
<b>And</b>	5.06	0.50	49.56	33.56	18.30	3.89	13.74	14.36	8.69	26.33	22.95	41.41	25.36	51.30
<b>Piralspita</b>	17.19	62.48	2.51	5.23	4.89	3.21	4.23	6.12	5.21	4.40	4.48	3.93	4.01	3.20

## Apéndice D

Composición porcentual de óxidos de puntos de análisis de la muestra Xa-25

	Xa-25 c1	Xa-25 c2	Xa-25 c3	Xa-25 c4	Xa-25 c5 inc.osc
<b>SiO<sub>2</sub></b>	31.82	32.14	35.42	32.85	35.74
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.44	0.34	0.04	0.25	0.32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16.43	15.8	12.65	16.43	11.78
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.43	2.39	2.14	2.49	1.84
<b>MgO</b>	0.44	0.39	0.26	0.35	0.26
<b>MnO</b>	0.11	0.46	0.67	0.51	0.31
<b>CaO</b>	47.32	47.25	47.5	47.07	48.25
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.9	0.08	0	0	0.08
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0.08	0.32	0.02	0.41
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.08	0.26	0.13	0	0
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04	0.81	0.88	0.03	1.01
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-	-
<b>ZnO</b>	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-
<b>P</b>	-	-	-	-	-
<b>total</b>	100.01	100	100.01	100	100
<b>Composición</b>					
<b>Grosularita</b>	84.65	82.98	80.47	83.06	83.02
<b>Andradita</b>	12.52	12.55	13.61	12.59	12.97
<b>Piralspita</b>	2.83	4.46	5.92	4.35	4.02

Tabla 6 Composición porcentual de óxidos de puntos de análisis de la muestra Xa-41

	Xa-41 e1	Xa-41 e2	Xa-41 e3	Xa-41 e4
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37.62	38.02	36.75	34.13
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0	0	0.2	0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	19.58	19.69	17.83	8.24
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.75	0.79	4.61	19.52
<b>MgO</b>	0.75	0.61	0.12	0
<b>MnO</b>	0	0.2	0.21	0
<b>CaO</b>	40.11	39.7	39.21	37.45
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.05	0.06	0	0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0.02	0	0.12
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.15	0.21	0.16	0
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.52	0.47	0.63	0.14
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.24	0.14	0.15	0.18
<b>ZnO</b>	0	0	0.13	0.04
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.23	0.08	0	0.17
<b>P</b>	-	-	-	-
<b>total</b>	99.99	99.99	100	99.99
<b>composición</b>				
<b>Grosularita</b>	92.88	92.48	78.30	29.68
<b>Andradita</b>	3.56	3.71	20.25	70.32
<b>Piralspita</b>	3.56	3.80	1.45	0.00

## Apéndice D

Composición porcentual de óxidos de puntos de análisis de la muestra XaGr1.

	<b>Xagr1 f1</b>	<b>Xagr1 f2</b>	<b>Xagr1 f3</b>	<b>Xagr1 f4</b>	<b>Xagr1 f5</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	36.69	37.79	36.94	36.79	36.44
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2.11	0.94	1.23	2	0.09
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	19.65	18.54	18.9	18.88	20.45
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.53	2.81	1.46	0.91	0.09
<b>MgO</b>	0.31	0.33	0.43	0.43	0
<b>MnO</b>	0.32	0.37	0.77	0.32	0.49
<b>CaO</b>	39.34	38.92	39.79	39.1	38.62
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.01	0.16	0.32	0	0.03
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.03	0	0	0	0
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0	0.13	0.16	0.07	0
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0	0	0	1.49	3.39
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	-	-	-
<b>ZnO</b>	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-
<b>P</b>	-	-	-	-	-
<b>total</b>	99.99	99.99	100	99.99	99.6
<b>Composición</b>					
<b>Grosularita</b>	90.10	84.08	87.66	91.92	97.24
<b>Andradita</b>	7.02	12.74	6.77	4.43	0.43
<b>Piralspita</b>	2.89	3.17	5.57	3.65	2.33