



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“CARACTERIZACIÓN Y CONDICIONES DE FORMACIÓN
DE LA RESTITA CON CORUNDO DE PIEDRA IMÁN,
ESTADO DE GUERRERO.”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A :

OSVALDO IVAN VARGAS PAREDES

DIRIGIDA POR: ING. ALFREDO VICTORIA MORALES



CIUDAD UNIVERSITARIA 2005

m.340775



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-385

SR. OSVALDO IVAN VARGAS PAREDES
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Alfredo Victoria Morales y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**CARACTERIZACIÓN Y CONDICIONES DE FORMACIÓN DE LA RESTITA CON
CORUNDO DE PIEDRA IMÁN, ESTADO DE GUERRERO**

- INTRODUCCIÓN
- I MARCO GEOLÓGICO REGIONAL
- II CARTOGRAFÍA LOCAL
- III ESTUDIO PETROGRÁFICO
- IV ESTUDIO CON MICROSONDA ELECTRÓNICA
- V ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- APÉNDICES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria D. F., a 22 de abril de 2004
EL DIRECTOR

M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Oswaldo Ivan Vargas
Paredes
FECHA: 4 / Febrero / 2005
FIRMA: [Firma]

AGRADECIMIENTOS

- A mi Mamá Ara. Mamá esté triunfo también es tuyo ya que sin tu apoyo incondicional en cada momento no hubiese sido llegar hasta este punto de mi vida.
- A mi hija Karla Sofía simplemente por existir y ser el motor de mi vida.
- A toda mi familia a mi Abuelita Pera gracias por todos tus consejos y enseñanzas, a mi Tía Pily por apoyarme todo el tiempo que lo necesite, siempre serás mi segunda mamá, a mi hermana Cinthya mi única hermana, y a mis primos Carlos y Vero por alegrarme en mi juventud, a Carlos por apoyarme en momentos difíciles.
- A Gaby por su apoyo incondicional desde el momento de conocernos a hasta ahora sin ti no hubiese sido posible lograrlo, gracias por compartir tu vida conmigo.
- A Carlos y Blanca por su apoyo en todo momento en que lo necesitamos, gracias a ese apoyo su pudo lograr está meta.
- A la memoria de mi Padre donde quiera que se encuentre.
- A mis sinodales por su apoyo y comprensión

Dante Morán Zenteno Enrique González Torres
Alfredo Victoria Morales Carlos Shulze Shreiber
Leovigildo Cepeda Dávila

Sus consejos y sugerencias fueron muy valiosos para la realización de este trabajo

- A todos mis profesores de la facultad y de la División en Ciencias de la Tierra ya que gracias a que compartieron sus conocimientos conmigo logre mis objetivos.
- A mis compañeros y amigos por sus consejos y apoyo, y por compartir una parte de su vida conmigo.

A mi compadre Victor Valdez y Perla, sean felices en todo lo que hagan
Gerardo Ochoa Alfaro, Igor Hernández, Moisés Hernández Diazgiron,
Domingo Antonio Amador Luna, David Blanco Florido, Valerie Pompa Mera,
Sandra Nayeli Nava López, Jessica Torres Hernández, Valentín Ortega Gamboa
Y a todos los demás

- A todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la elaboración de la tesis

Jurgen Dieter Heinz Pérez por sus valiosas contribuciones en la edición de muchas de las figuras y diagramas.

Arturo Rojo Contreras y Adán Flores por su valiosa ayuda en la edición del mapa geológico.

Al laboratorio universitario de petrología (LUP) especialmente a Carlos Linares por su valiosa contribución al capítulo cuatro y por ayudarme a preparar las muestras y realizar el estudio con microsonda.

- A la Universidad Nacional Autónoma De México y a la Facultad de Ingeniería por formarme en sus aulas y hacerme la persona que actualmente soy

El guerrero de la luz recuerda:
"Aun cuando haya pasado por todo lo que pase, no me arrepiento de los problemas en que me metí, porque fueron ellos los que me condujeron hasta donde deseé llegar. Ahora, todo lo que tengo es esta espada, y la entrego a cualquiera que desee seguir su peregrinación. Llevo conmigo las marcas y las cicatrices de los combates; ellas son testimonio de lo que viví, y recompensas de lo que conquiste.

Son estas marcas y cicatrices queridas las que me abrirán las puertas del paraíso. Hubo una época en la que viví escuchando historias de hazañas. Hubo otras épocas en las que viví porque necesitaba vivir. Pero ahora vivo por que soy un guerrero y porque quiero estar un día en la compañía de aquel por quien tanto luche".

Paulo Coelho
Manual del Guerrero de la Luz

INDICE

Resumen

Introducción. 1

- Antecedentes. 1
- Objetivos. 3
- Método de trabajo. 4
- Localización. 6

1 Marco Geológico Regional. 8

- 1.1 Tectónica. 8
- 1.2 Estratigrafía. 12
 - Terreno Xolapa. 12
 - Batolito Xaltianguis. 13
 - Cuerpos de fierro. 14
 - Aluvión. 14
- 1.3 Geología Estructural de la Región de piedra Imán. 16

2 Cartografía Local. 18

- Descripción de la Columna propuesta. 28
- Caminamientos. 28

3 Estudio Petrográfico. 33

- Restita. 33
- Fleckigneis. 48

4 Estudio con Microsonda Electrónica (SEM). 54

- Introducción. 54
- Preparación de muestras. 58
- Unidades utilizadas en el microscopio electrónico. 61
- Información que se puede obtener. 62
- Recomendaciones para la preparación de muestras. 62
- Resultados obtenidos. 64

5 Análisis de Resultados. 62

- Comparación entre las minas El Milagro y El Poder de Dios con los enclaves Squares Area, Madagascar y Namaqualand, Sudáfrica. 66

6 Conclusiones y Recomendaciones. 71

Referencias Bibliográficas. 73

Apéndices. 75

Lista de Figuras y Tablas

- 1- Localización. 7

- 1-1- Terrenos Tectonoestratigráficos en el Estado de Guerrero. 9
- 1-2- Terrenos Tectonoestratigráficos en el Sur de México. 11
- 1-3- Tabla cronoestratigráfica del Terreno Xolapa y al Plataforma Guerrero-Morelos. . .15
- 1-4- Datos estructurales. 17

- 2-1- Afloramiento de la Restita. 19
- 2-2- Afloramiento del Fleckigneis. 20
- 2-3- Afloramiento de Migmatita. 21
- 2-4- Afloramiento del Granito (Cerro Piedra Prieta). 22
- 2-5- Fracturas de Granito. 23
- 2-6- Xenolitos en Granito. 24
- 2-7- Yacimiento de Fierro. 25
- 2-8- Depósitos Detríticos. 26
- 2-9- Columna geológica propuesta. 27

- 3-1- Socavón de la Mina "El Milagro". 34
- 3-2- Características macroscópicas de la Restita. 35
- 3-3- Fotomicrografía de un cristal de Corundo. 36
- 3-4- Fotomicrografía de un cristal de Sillimanita. 37
- 3-5- Fotomicrografía de varios cristales de Rutilo.37
- 3-6- Fotomicrografía de varios cristales de Circón.38
- 3-7- Diagrama AFM. 40
- 3-8- Diagrama AFM mostrando la posición de los minerales más comunes en la Restita. 41
- 3-9- Diagrama AFM mostrando las paragénesis propuestas para la Restita. 42
- 3-10- Diagrama de facies metamórficas mostrando la posición de la Restita. 43
- 3-11- Fotomicrografía de un cristal de Corundo mostrando bordes de reacción. 44
- 3-12- Fotomicrografía de un cristal de Sillimanita mostrando bordes de reacción. 45
- 3-13a- Fotomicrografía mostrando crecimientos simplectíticos. 46
- 3-13b- Fotomicrografía mostrando crecimientos simplectíticos. 47
- 3-14- Afloramiento del Fleckigneis. 48
- 3-15- Fotomicrografías de cristales de Biotita y Hornblenda. 49
- 3-16- Fotomicrografía de un cristal de Plagioclasa con su macla característica. 50
- 3-17- Diagrama AFK. 51
- 3-18- Diagrama AFK mostrando la posición de los minerales más comunes en el Fleckigneis. 52
- 3-19- Diagrama AFK mostrando la paragénesis propuesta para el Fleckigneis. 53
- 3-20- Diagrama de facies metamórficas mostrando la posición del Fleckigneis. 53

4-1-	Imagen de la Microsonda electrónica.	54
4-2-	Esquema del microscopio electrónico.	55
4-3-	Imagen digital de una vetilla en un cristal de Corundo.	57
4-4-	Imagen digital de un cristal de Sillimanita.	58
4-5-	Imagen digital de un cristal de feld-K y Hornblenda.	59
4-6-	Imagen digital de un cristal de Hornblenda.	60
4-7-	Tabla mostrando los porcentajes de los óxidos más comunes en las muestras analizadas.	61
5-1-	Diagrama AFM mostrando la posición de los óxidos y paragénesis más comunes encontrados en la Restita.	64
5-2-	Sección transversal indicando la distribución de las facies metamórficas en una zona de subducción y arco magmático	66
5-3-	Tabla comparativa entre la Restita y otros enclaves similares.	67
5-4-	Comparación entre los diagramas AFM de la restita y otros enclaves similares. . .	68

RESUMEN

En este trabajo se presentan la caracterización petrológica y las condiciones de formación de un enclave metamórfico, localizado en las cercanías del poblado de Piedra Imán, a 35 Km Al NW de Acapulco en el Estado de Guerrero, México, este cuerpo restítico tiene dos afloramientos Mina "El Milagro" y Mina "El Poder de Dios" constituidos principalmente por cristales de corundo y sillimanita inmersos en una matriz de biotita, encajonados por una potente secuencia de gneises cuarzofeldespáticos pertenecientes al Complejo Xolapa.

Estos cuerpos describen una geometría burdamente lenticular y presentan una paragénesis constituida por corundo, sillimanita, espinela (hercynita), cordierita y biotita. Los minerales accesorios comunes son rutilo, circón y algunos minerales opacos como la magnetita. La roca encajonante tiene una asociación mineral compuesta por cuarzo, andesina, feldespato potásico, hornblenda y biotita, es común la perita, en la plagioclasa y el feld-K es frecuente la alteración a sercita.

Una característica importante que se observa en este enclave es la presencia de varias estructuras cristalinas, como son coronas o bordes de reacción además de abundantes crecimientos simplectíticos; los bordes están compuestos por dos fases, hercynita y cordierita, rodeando al corundo y sillimanita, y en ocasiones parecen ser absorbidos por este borde. El fenómeno está asociado a un desequilibrio en las condiciones originales de P-T, básicamente en una disminución en la presión provocada por un rápido levantamiento.

La paragénesis observada en la restita permite ubicarla en la zona de facies de Granulita, con condiciones de formación de altas presiones y temperaturas en un rango de 650 a 850 °C y 4 a 6 Kbar, en un ambiente tectónico de arco magmático cercano a una zona de subducción. Esto es reforzado, por los datos obtenidos en el estudio con microsonda electrónica, donde se detectó una pobre presencia de zinc en la hercynita, lo cual ocurre en enclaves metamórficos con condiciones de formación similares, además que la asociación mineral hercynita-sillimanita-cordierita es un indicativo de altas temperaturas y presiones.

La restita se formó a una profundidad cercana a los 22 Km como un producto refractario, el cual se separó del material original, que pudo ser una metapsamita con alto contenido de arcilla, que comenzó a enfriarse en los inicios del levantamiento y exhumación del Complejo Xolapa, emplazándose en la secuencia gnéssica donde también fue levantada y exhumada hasta su posición actual.

En este estudio se presenta también un mapa geológico, en donde se definen y describen siete unidades litológicas de origen ígneo y metamórfico, las cuales se encuentran distribuidas en toda la región que se analizó. Se propone también una columna geológica local donde se representan la serie de eventos geológicos característicos de la región. Se da a conocer brevemente el procedimiento para la preparación de muestras que serán analizadas en la microsonda electrónica SEM y de algunas recomendaciones importantes en su elaboración.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El término "restita" fue acuñado en el siglo pasado cuando existían afloramientos con altos contenidos de mica en secuencias de granitos sin un nombre específico que los nombrara; Lacroix (1933) en Didier (1991) reportó enclaves ricos en mica en granitos cercanos al área del Puerto de Portugal a los que llamó enclaves "surmicáceos". Después de varias décadas Didier (1973) notó que numerosos geólogos habían reportado la ocurrencia de enclaves semejantes sin un nombre especial, que los caracterizara, entonces restringió el nombre de enclaves "surmicáceos" a aquellos en donde la mica forme más del 50% del volumen de dicho enclave y se encuentre en granitos migmatíticos o en Migmatitas.

Beatman (1963) en Didier (1991) describe algunos enclaves máficos con presencia de hornblenda en el batolito de la Sierra Nevada, sugiriendo varias posibles hipótesis para su génesis, pudiendo ser material refractario que no se fundió cuando el magma estaba formándose. Presnall y Beatman (1973) en Chapell (1987) declararon también que la fuente más probable para la génesis de dichos enclaves máficos es el material refractario restante después de la fusión parcial. Van Moort (1966) en Chapell (1987) mencionó también que la restita o el residuo proveniente de la fusión parcial es el origen de los enclaves máficos en el monte Losère en Francia.

Estudios anteriores han mostrado que la plagioclasa cálcica y la hornblenda persisten a temperaturas de 900 °C en una mezcla experimental en tonalitas y granodioritas, sugiriendo que en la producción de estas rocas la presencia de material refractario residual transportado de manera ascendente con el líquido granítico formado por una fusión diferencial pudo ser una alternativa para completar la fusión a altas temperaturas (Piwinski y Willye, 1968) en Chappell (1987).

Chappell (1966) propuso que los afloramientos máficos en granitos del batolito de Nueva Inglaterra al este de Australia son remanentes de la fusión parcial de material máfico. Las propuestas hechas por los autores antes mencionados sugieren que los enclaves máficos pueden ser el material residual proveniente de un magma granítico.

Por lo anterior el término restita se utiliza para referirse a los enclaves máficos en granitoides, que son residuos sólidos de rocas de la corteza que no fueron fundidos o derretidos por la acción de la anatexis (White y Chappell, 1977) y que se encuentran en rocas ígneas o metamórficas. Este material puede ocurrir en enclaves de varios metros o en pequeños cristales derivados de la desintegración de enclaves más grandes o acarreados de la fuente o magma original en cristales separados.

Existen dos clasificaciones para las restitas, la primera de acuerdo con el tipo de granitoide donde se emplazan, ya que es posible encontrarlas en granitoides tipo "S" con un contenido importante de minerales ricos en alúmina (Al_2O_3) y con una clara textura metamórfica. El segundo tipo se encuentra en granitoides tipo "I" con una textura ígnea y con una composición mineralógica similar a los granitoides ígneos.

La segunda clasificación se basa en el tiempo en que cristalizan. Estas pueden ser el residuo de la fusión de una roca "fuente" y se les denomina restita primaria, o producto de la recristalización de los cristales residuales originales a los que se les llama restita secundaria

La manera de identificar a una restita primaria de una secundaria es por sus asociaciones minerales; la restita producida por la fusión parcial puede contener cristales de biotita u hornblenda; mientras que en las restitas ferromagnesianas existen dos tipos de piroxenos para las fuentes de granitoides tipo "I" y ortopiroxenos \pm granate \pm biotita \pm cordierita, para las fuentes de granitoides tipo "S"; para la restita secundaria se ha encontrado que raramente los cristales de biotita están asociados con inclusiones de ortopiroxenos, y hornblenda, con núcleo de clinopiroxeno para los granitoides tipo "I" y algunos filósilicatos remplazando a la cordierita en los granitoides tipo "S".

Es importante mencionar que no se utiliza el término restita para el material residual producto de la fusión parcial local o de xenólitos incorporados de manera accidental en el magma.

En México el registro de enclaves o de afloramientos de restitas es sumamente escaso, ya que hasta la fecha no se han descrito enclaves con estas características. En localidades o provincias geológicas en donde existen granitos o rocas metamórficas susceptibles de contener enclaves restíticos, salvo algunos trabajos realizados en el Complejo Xolapa. Destaca el trabajo de Victoria et al, en donde se describe un melanosoma restítico dentro de una potente secuencia de migmatitas en la localidad de Piedra Imán en el Estado de Guerrero.

Esta se describió como un cuerpo lenticular de pequeñas dimensiones, de grano grueso, constituido por cristales de corundo y cordierita, inmersos en un mosaico de cristales de biotita aparentemente sin ningún tipo de orientación; este enclave se encuentra encajonado en una secuencia de gneises cuarzo feldespáticos y donde el presente trabajo pretende abundar más en cuanto a su caracterización, génesis y posible utilidad económica.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es hacer un estudio mineralógico y químico de la restita y su roca encajonante ubicada en las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios", localizadas al este del poblado Piedra Imán, municipio de Acapulco de Juárez Guerrero, para:

- Definir las asociaciones minerales de la restita y la roca o rocas encajonantes.
- Definir las condiciones de formación de la restita con base en la paragénesis obtenida, mediante estudios petrográficos y con microsonda electrónica.
- Reconocer las relaciones de la restita y las rocas circundantes.
- Determinar una posible utilidad económica.

Método de Trabajo

- **Gabinete**

Después de haber definido los objetivos, el siguiente paso fue recabar toda la información sobre el área de estudio y sus alrededores, tanto a nivel local como regional, mediante la consulta de publicaciones, artículos, informes técnicos, cartografía geológica y topográfica, además de fotografías aéreas.

Se elaboró un mapa geológico a detalle, el cual incluye la topografía de Piedra Imán y sus alrededores y las diferentes unidades litológicas.

- **Campo**

Posteriormente se planearon las visitas a la zona de estudio para realizar trabajo de campo, el cual consistió en un levantamiento geológico, recolección de muestras y datos estructurales, que sirvieron para los análisis petrográficos y de microsonda, así como para definir las unidades litológicas presentes y poder realizar la cartografía correspondiente.

Al finalizar esta etapa se continuó integrando la información bibliográfica que permita conocer la génesis de la restita y de la o las rocas encajonantes. Los estudios, análisis y técnicas empleadas se describen a continuación.

- **Laboratorio**

Petrografía

Se prepararon 19 láminas delgadas de las rocas colectadas en el campo para su estudio con el microscopio petrográfico mediante microscopía de polarización. Se realizó también la toma de fotomicrografías de las estructuras y paragénesis más representativas con luz paralela y con nícoles cruzados aplicando los objetivos de 2.5X, 10X, 20X, 50X con un ocular de 10X. El procesamiento de las imágenes se realizó mediante un analizador de imágenes CARL ZEISS que emplea un microscopio Axiolab y el software AxioVision 3.1 con Carl Zeiss Axiocam Emulation del Departamento de Geología de la Facultad de Ingeniería.

Estudio con microsonda electrónica

Se prepararon 6 láminas delgadas de las cuales cuatro son de la restita (R-1b, R-3, R-5, R-7), y dos del fleckigneis (F-5, F-7), y se seleccionaron los mejores campos en dichas láminas para su estudio. A todas ellas se les aplicó una ligera capa de grafito para proveer una mejor conductividad, utilizando un haz concentrado de electrones. Se obtuvieron imágenes composicionales además de la concentración de los óxidos más comunes que se encuentran en las rocas que se están analizando y de esta manera poder conocer su génesis y evolución.

Es de una microsonda electrónica de barrido JEOL JXA-8900R del Instituto de Geofísica de la UNAM, con dos espectrómetros WDS y sistema EDS. La platina (para introducir muestras hasta de 100 mm X 100 mm X 50 mm) permite un área de análisis de 90 mm X 90 mm. Cuenta con cuatro tipos de cristales TAP (5.69 ~ 93.0 Å), PETJ (1.93 ~ 8.10 Å), LIF (0.889 ~ 3.73 Å) y LDE2 (23.2 ~ 88.0 Å) que combinados permiten medir concentraciones de elementos en un rango que va del 5B (Boro) al 92U (Uranio).

El microscopio electrónico (SEM) de la microsonda permite una magnificación desde 40X hasta 300,000X. Incluye un microscopio óptico con imagen digital desplegable en pantalla que es un auxiliar para lograr un mejor enfoque y búsqueda de campo. El SEM permite obtener imágenes de electrones secundarios con una resolución de 6 nm e imágenes de electrones retrodispersados para obtener imágenes topográficas y composicionales.

El procesamiento de imágenes se realizó en una estación de trabajo Hewlett Packard HP-B132L, que cuenta con monitor de 21", procesador RISC de alta velocidad, gran capacidad en memoria RAM y disco duro, CD-ROM y posibilidades de almacenar información en discos ópticos.

Los estudios con microsonda electrónica fueron realizados por el Ingeniero Carlos Linares, técnico del Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Localización

Este enclave metamórfico se encuentra ubicado en las cercanías del poblado de Piedra Imán en el estado de Guerrero a 8 Km al SW de Xaltianguis, 35 Km al NW de Acapulco y 23 Km al SW de Tierra Colorada; dichos enclaves afloran en dos pequeños socavones con una geometría burdamente rectangular, de unos diez metros de largo por cuatro de ancho, que se denominan "Mina El Milagro" y "Mina El Poder De Dios" respectivamente.

El acceso a la zona de estudio es por la carretera Federal No. 95 en el tramo Tierra Colorada-Acapulco, tomando la desviación hacia Piedra Imán en el kilómetro 42 "Juan N. Alvarez". Siguiendo esta desviación, aproximadamente a 4 Km se localiza Piedra Imán de donde se toma un camino de terracería el cual lleva a los afloramientos estudiados (fig.1).

Otra vía de acceso es por la autopista de cuota (Autopista del Sol), se toma la desviación a Tierra Colorada para después incorporarse a la carretera federal No. 95 hasta llegar al kilómetro 42 "Juan N. Alvarez", en donde se toma la desviación a Piedra Imán.

De acuerdo con la nomenclatura usada por el INEGI para dividir el territorio nacional en cartas a escala 1:50,000 el 100%, de la región analizada esta comprendida dentro de la hoja Xaltianguis con la clave correspondiente E14-C47.

El cubrimiento fotográfico esta constituido por las fotografías: SINFA línea 159 fotos 1, 2, 3 a escala 1:75,000 tomadas por el INEGI el 12 de marzo de 1995. Este material, además del mapa topográfico de Xaltianguis, sirvió para la realización del mapa geológico presentado en este trabajo.

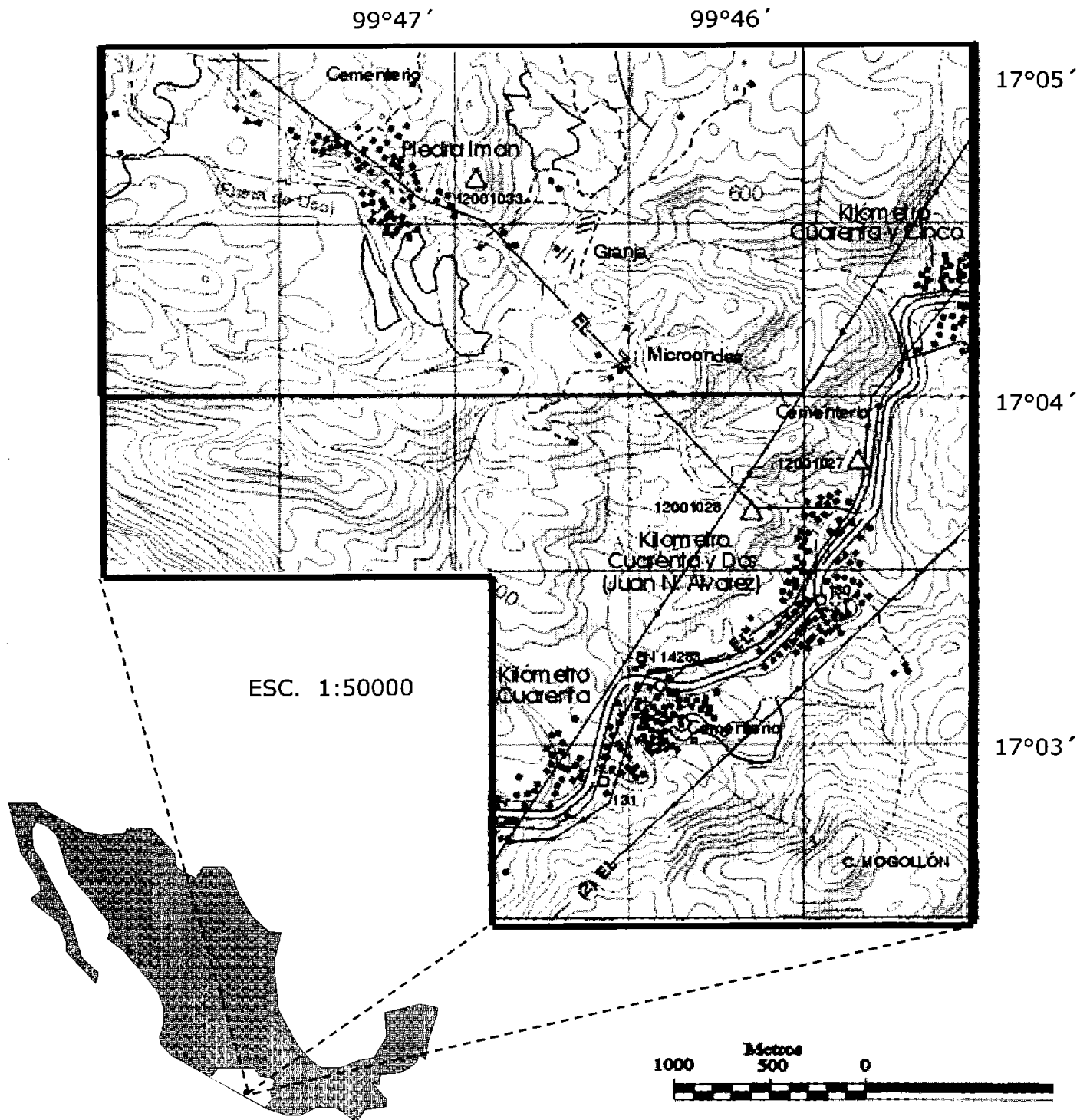
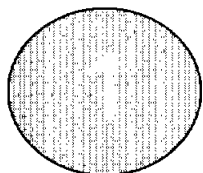


FIG. 1 Localización general y vías de acceso a la zona de estudio; en la parte superior se muestra el área de estudio delimitada por un rectángulo rojo, y en la parte meridional derecha se halla la principal vía de acceso a Piedra Imán. Fte. Carta Xaltianguis E14-C47 INEGI (2001)



MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

1. 1 Tectónica

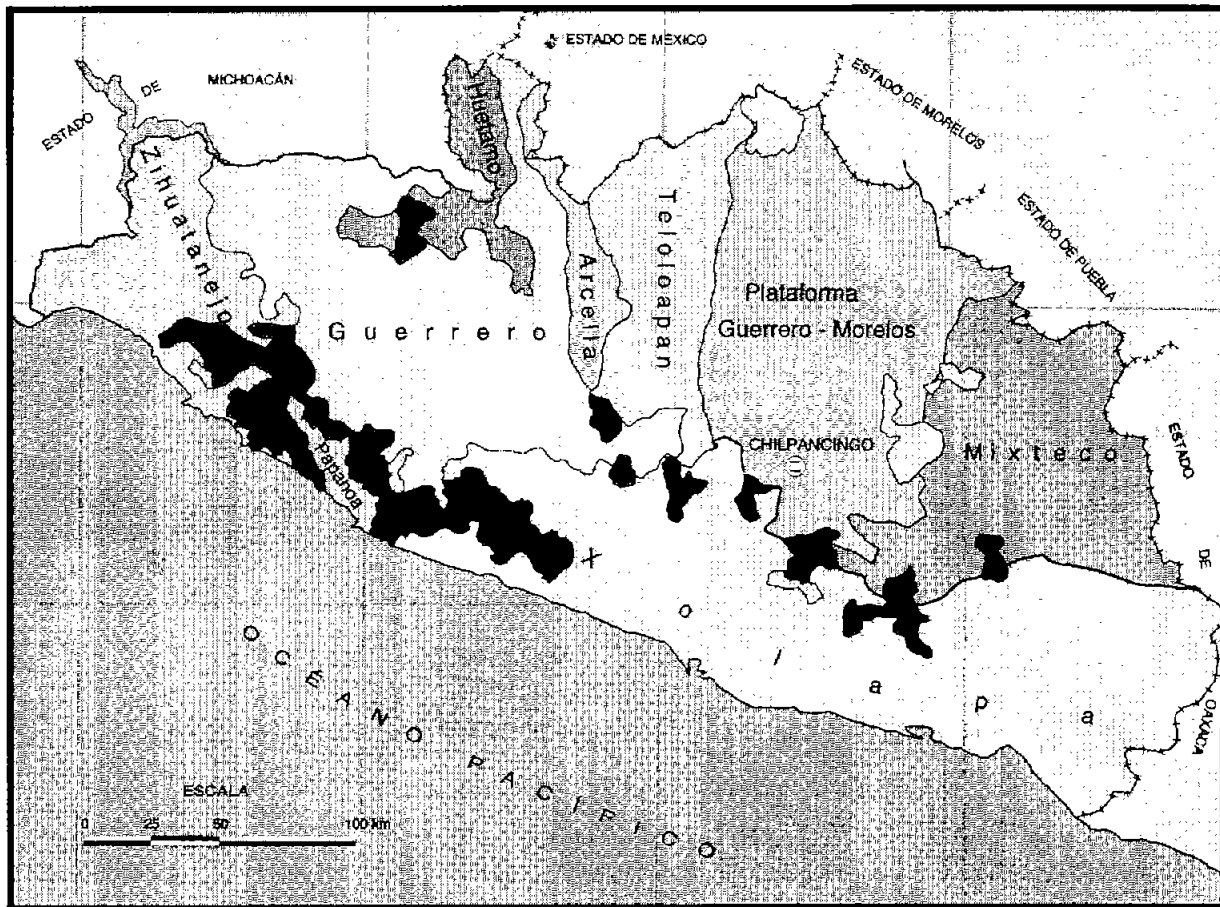
El sur del territorio mexicano ha sido dividido en seis provincias geológicas o terrenos tectonoestratigráficos (Campa y Coney 1983) los cuales conforman la corteza continental en esa zona. Estos bloques se diferencian entre sí por sus características litológicas, espaciales y temporales. Los terrenos que constituyen este gran mosaico geológico son: Guerrero, Juárez, Maya, Mixteco, Oaxaqueño, y Xolapa, En la Fig.1-1 se muestran los terrenos tectonoestratigráficos en el Estado de Guerrero. Dado que el área de estudio queda incluida en el Terreno Xolapa, se hace a continuación una breve descripción del mismo.

Terreno Xolapa

Este terreno tectonoestratigráfico constituye uno de los terrenos metamórficos más importante y extenso de la región occidental de México y es considerado como uno de los más grandes de la margen occidental de Norteamérica (Campa-Uranga y Coney 1983).

El Terreno Xolapa está formado por las rocas metamórficas que constituyen al Complejo Xolapa, por grandes cuerpos intrusivos terciarios que lo atraviesan, así como por un gran número de diques máficos que los cortan.

Se encuentra en contacto al norte con la Plataforma Guerrero Morelos, Terreno Mixteco y Oaxaca, al noroeste con el terreno Guerrero, y al sur con la trinchera Pacífica.



- > Contacto entre terrenos
- > Contacto entre subterrenos y otras rocas
- > Principales cuerpos ígneos que enmascaran contactos entre terrenos
- > Afloramientos terciarios que enmascaran contactos entre terrenos

Fig.1-1 Terrenos tectonoestratigráficos en el Estado de Guerrero. El área de estudio se encuentra en su totalidad en el Terreno Xolapa. Fuente Campa y Coney, 1981 Vidal-Serratos, 1991, modificado por Werre-Keeman, 1997

Tolson et al (1997) estudiaron el contacto entre los terrenos Mixteco y Oaxaca con el terreno Xolapa, y encontraron que está definido por una zona compleja de milonitas, pseudotaquilas y cataclasitas, asociadas a fallas laterales activas con un movimiento predominantemente izquierdo. Las milonitas muestran una alineación penetrativa aunque el desarrollo de foliación es escaso; la alineación de la zona milonítica está orientada al EW, lo que sugiere que el régimen de deformación sea transtensional.

El límite SW del terreno Xolapa se encuentra truncado debido a la distribución de las facies metamórficas y a la existencia de rocas cristalinas calcialcalinas cercanas a la actual trinchera. Esto es reforzado por el hallazgo de rocas plutónicas de 35 Ma a 50 Km del eje de la Trinchera Mesoamericana, en uno de los sondeos del Deep Sea Drilling Project, así como, el de sedimentos más antiguos de 10 M.a. (del Mioceno) en la ladera noreste de la trinchera (Moore et al, 1982). No se tiene un acuerdo en cuanto al origen de dicho truncamiento.

Algunos autores proponen que el truncamiento del terreno Xolapa es producto del desplazamiento del bloque Chortis hacia el SE. Por lo tanto es posible pensar que el Terreno Xolapa no colisionó con la Placa Norteamericana, sino que forma parte de un grupo de terrenos que han estado estáticos desde el Jurásico Superior.

Estudios paleomagnéticos de los terrenos Guerrero, Mixteco y Xolapa, realizados por Böhnelt (1989), demuestran que esta zona no ha experimentado grandes rotaciones o traslaciones latitudinales desde el Cretácico medio y que las rotaciones fueron relacionadas con una cizalla lateral izquierda a lo largo de la margen continental, lo que permite pensar que esta zona del país ha tenido un comportamiento estático. Esto había sido propuesto por Urrutia (1981), de un estudio hecho en la zona donde compara el paleopolo de rocas de esta región, con el de unas calizas del Albiano-Cenomaniano de Oaxaca, y con otro en el Norte de México, donde encuentra que los paleopolos son afines, lo que indica la ausencia de grandes movimientos regionales. Si se considera que han ocurrido traslaciones éstas ocurrieron antes del Jurásico superior, lo que ubicó a las formaciones prejurásicas en su actual posición y desde ese entonces no se ha registrado ningún cambio, al menos latitudinalmente, descartando la idea de traslado y colisión de bloques más jóvenes.

Se han propuesto varios modelos, que describen el desplazamiento del bloque Chortis, que conforma actualmente el norte de América Central, durante el Cenozoico, uno de ellos Schaaf et al. (1995), basa su teoría en el análisis de relaciones isotópicas de intrusiones granitoides, a lo largo de la Costa Pacífica entre Puerto Vallarta y Tehuantepec, donde estos cuerpos presentan edades de formación que varían de los 100 a los 22 Ma. Esta variación en la edad de las intrusiones indica que el magmatismo inició en el Cretácico temprano y continúa en la actualidad. De esto se deduce que ha existido un límite convergente a lo largo del margen continental del sur de México, donde la velocidad y la inclinación de la placa que se estaba consumiendo debajo de la Placa Norteamericana no eran constantes.

A partir del Eoceno se inicia el desprendimiento del bloque Chortis y su migración hasta su posición actual, así como el desplazamiento del magmatismo hacia el sur notorio en las edades decrecientes de los cuerpos intrusivos del sur de México, en los que se encuentran todos los intrusivos cercanos al área de estudio Xaltianguis, Piedra Imán, además de Tierra Colorada y Acapulco.

En cuanto a su génesis se considera al Terreno Xolapa como un arco volcánico truncado por el desplazamiento del bloque Chortis, el cual cesó con la actividad volcánica, para después pasar a un régimen de levantamiento que lo exhumó. (Alaniz y Ortega, 1997); el espesor de la corteza fue disminuido por la erosión superficial y por la erosión por subducción (Morán-Zenteno, et al. 1996).

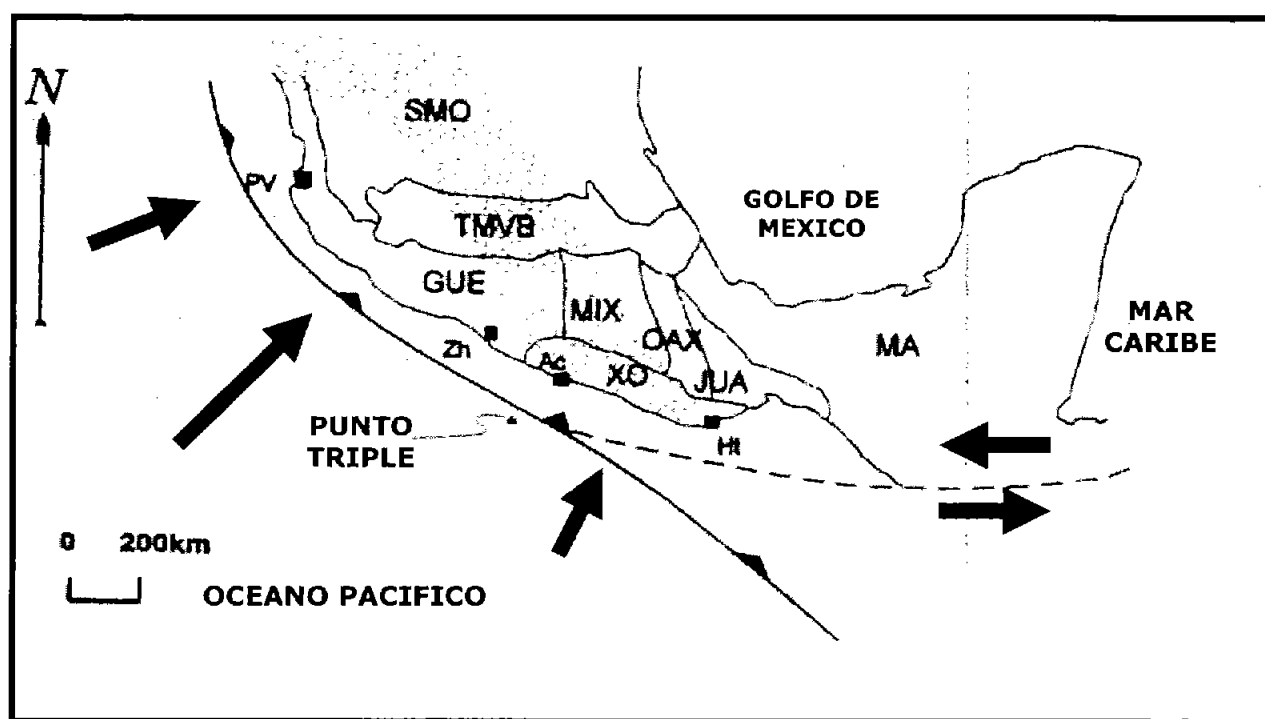


Fig. 1-2 En esta figura se muestran los principales terrenos tectonoestratigráficos del sur de México según Campa y Coney (1983). Se indica también las principales características tectónicas del área, movimientos relativos de las placas así como la posición del punto triple (trinchera-trinchera-transforme).

SMO = Sierra Madre Oriental

JUA = Juárez

PV = Puerto Vallarta

TMVB = Cinturón Volcánico Trans-Mexicano

MA = Maya

Zh = Zihuatanejo

GUE = T. Guerrero

MIX = Mixteco

Ac = Acapulco

OAX = T. Oaxaqueño

Ht = Huatulco

XO = Xolapa

1. 2 Estratigrafía

El registro estratigráfico, de la región en donde se localiza el área de estudio la forman los siguientes grupos litológicos: el primero representa el basamento y está formado por rocas metamórficas que constituyen al Complejo Xolapa, con una edad hasta ahora incierta (Paleozoico-Mesozoico?); el segundo está representado por el intrusivo Xaltianguis con una edad Paleógena, un tercer grupo lo constituyen cuerpos de mineral de hierro. Existen además algunos diques pegmatíticos que cortan a los dos primeros y por último, están los depósitos aluviales, producto de la erosión e intemperismo de la región.

Complejo Xolapa

El Complejo Xolapa fue definido por De Cserna (1965) en el área comprendida entre El Ocotito y Acapulco Guerrero. La Barranca de Xolapa, localizada entre el puente sobre el río Papagayo y el poblado El Playón en la parte centro meridional del estado de Guerrero, se designó como la localidad tipo.

Las dimensiones aproximadas del complejo abarcan 70-100 km de ancho y una longitud que se extiende unos 600 km a lo largo de la costa del Pacífico desde Petatlán, Guerrero hasta Astate, Oaxaca. (Ortega-Gutiérrez, 1981). El espesor se ha calculado por métodos indirectos como la gravimetría obteniéndose un espesor de 15 a 20 km.

Al norte del área de estudio el Complejo Xolapa se encuentra en contacto discordante con las formaciones Chapolapa, Ixcuantoyac y es cortado por el Batolito Xaltianguis.

Consiste en rocas cristalinas ígneas y metamórficas, las cuales se encuentran formando un cinturón orientado NW-SE, limitado al sur por la trinchera de Acapulco (Ortega-Gutiérrez, 1981) y al norte, por una zona de falla normal izquierda con algunas zonas de milonitas (Morán-Zenteno, 1992). Las rocas del Complejo Xolapa han sido intrusionadas por rocas graníticas, tonalíticas y granodioríticas, así como numerosos enjambres de diques pegmatíticos, aplíticos y máficos (De Cserna 1965, Ortega-Gutiérrez 1981, Moran-Zenteno 1992).

Las rocas más antiguas fueron grauvacas intercaladas con rocas pelíticas que antes o durante el proceso de metamorfismo fueron intrusionadas y cortadas por los cuerpos plutónicos anteriormente mencionados; los diques que están cortando al complejo son indicativos de una etapa posterior de distensión ocurrida en el Terciario. La edad del Complejo Xolapa es todavía incierta, pues se la han dado rangos desde el Paleozoico hasta el Mesozoico (Morán-Zenteno, 1992, Alaniz op. cit.).

La litología del Complejo Xolapa está constituida de granitoides, pegmatitas; orto para gneises (gneises, mármoles y calcosilicatitas) y micaesquistos de granate, estaurólita o sillimanita, migmatitas y una maraña de pegmatitas, atravesados por innumerables diques de composición básica, que se extienden desde Guerrero hasta Oaxaca. Las condiciones de formación de estas rocas es de facies de anfibólita, alcanzando la anatexis.

Ortega-Gutiérrez (1981) define a partir de las asociaciones minerales en rocas calcáreas (wollastonita) y rocas máficas (cummingtonita) y rocas pelíticas con cordierita, sillimanita y andalucita, características de terrenos metamórficos de baja presión y alta temperatura. Esto corresponde con las regiones orogénicas circumpacíficas por lo tanto considera al Complejo Xolapa como las raíces expuestas de un antiguo arco volcánico del Mesozoico.

Batolito Xaltianguis

Este cuerpo intrusivo, presenta una geometría alargada, burdamente paralela a la costa del Pacífico, con una dimensión de 55 km de largo, 20 km en su parte más ancha y 5 km en la más angosta, con aproximadamente 250 km² de extensión (Correa-Mora, 1997). De Cserna (1965) le dio la denominación de tronco, aunque dicho intrusivo sobrepasa los límites en cuanto a superficie para dichos cuerpos ígneos intrusivos, por lo cual corresponde con un batolito.

De Cserna lo describe como una monzonita cuarcífera, pero estudios petrográficos recientes indican que su composición varía de granito a granodiorita, monzonita cuarcífera e importantes cuerpos de pegmatitas.

El área donde aflora el batolito Xaltianguis está dominado por lomeríos producto del intemperismo y la exfoliación de los granitos, siendo el más importante el Cerro Pelón el cual representa el ejemplo más notable de la exfoliación granítica en esta región.

Su contacto con el Terreno Xolapa parece ser transicional; en las que deberían ser las facies marginales de la zona de contacto, se presenta con una foliación paralela a la del Complejo Xolapa, y es cortado por algunos diques similares a los existentes en la localidad tipo de dicho complejo; otro rasgo característico de este contacto es la amplia piritización del Complejo Xolapa, incluyendo rocas corneanas que forman grandes bloques en las laderas de los cerros Correa-Mora (1997).

El batolito Xaltianguis considerado dentro del grupo de plutones no deformados pertenecientes al Terreno Xolapa (Morán-Zenteno 1992) corresponde a un cuerpo intrusivo de carácter calcoalcalino, asociando con un arco magmático edificado en un límite convergente de placas.

El batolito Xaltianguis se emplazó después del desplazamiento sinistral del bloque Chortis entre 28 y 31.5 M.a. pertenece a un cinturón de cuerpos plutónicos que se edificaron entre el Cenomaniano hasta el Mioceno a lo largo de la costa del Pacífico sur de México en un ambiente tectónico de placas convergentes (Correa-Mora 1997).

Cuerpos de mineral de fierro.

En la cima del cerro Piedra Imán, se localiza lo que en su tiempo fue una mina de fierro, a la que debe su nombre la población, formada por remanentes de cuerpos de mineral de fierro constituidos por un mosaico de magnetita masiva alterada a hematita y limonita, intercrecida con minerales arcillosos.

Aluvión

Formado por fragmentos subangulosos a subredondeados de granito y rocas metamórficas, como producto de la descomposición mecánica de las rocas preexistentes en la región; con una granulometría que varía de arena fina hasta bloques.

Se encuentra relleno de las partes bajas del terreno, como arroyos y pequeñas depresiones donde se han ido acumulando.

En la tabla 1.3 se muestra una columna estratigráfica que incluye a las unidades brevemente descritas, donde pueden ser ubicadas en el tiempo geológico, y correlacionadas con las formaciones de la Plataforma Guerrero Morelos que aflora al norte del área de estudio.

Tabla 1-3 Estratigrafía del Terreno Xolapa y la Plataforma Guerrero Morelos

	SIST.	SERIE	PISO	EDAD	PLATAFORMA GUERRERO-MORELOS	TERRENO XOLAPA		
CENOZOICO	CUAT.	HOLOCENO		0.01	ALUVION			
		PLESTOCENO		1.6	FM. CUERNAVACA			
		PLIOCENO		5.3	FM. CHILPANCINGO FM. OAPAN			
	TERCIARIO	MIOCENO		23.7	ANDESITA BUENAVISTA			
		OLIGOCENO		36.5	FM. CHAUCINGO	INTRUSIVOS GRANITICOS TERCARIOS		
		EOCENO		57.8	FM. BALSAS			
		PALEOCENO		66.4	FM. TETELCINGO			
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	GOLFO	MAESTRICHTIANO	74.5			
				CAMPANIANO	87.5	FM. MEXCALA		
				SANTONIANO				
				CONIACIANO	91	FM. CUAUTLA		
				TURONIANO				
		CENOMANIANO	97.5	FM. MORELOS				
		INFERIOR	COAHUILA	ALBIANO	SUPERIOR	113		
					MEDIO			
					INFERIOR			
				APTIANO		FM. ZICAPA		
	NEOCOMIANO			144	FM. CHACACHUALA FM. XILICUITA			
	JURASICO	SUPERIOR		TITONIANO	163			
				KIMERIDGIANO		FM. IXCUANTOYAC		
				OXFORDIANO				
		MEDIO		CALOVIANO	187			
				BATONIANO				
				BAJOCIANO				
				ALENIANO				
		INFERIOR	LIASICO	TOARCIANO	208			
				PIENSIANIANO				
HETANGIANO				FM. CHAPOLAPA		COMPLEJO XOLAPA		
TRIASICO		SUPERIOR	245					
		MEDIO						
		INFERIOR						
PALEOZOICO		SUPERIOR	570					
		MEDIO						
		INFERIOR						
PRECAMBRICO								

Tabla.1-3 Muestra la tabla estratigráfica donde aparece el Terreno Xolapa y la Plataforma Guerrero-Morelos; en ella se aprecian las diferentes formaciones que los componen; los contactos punteados son contactos inferidos entre El Complejo Xolapa, las Fms. Chapolapa e Ixcuantoyac y los Intrusivos Graníticos. Fuente: Monografía Geológico Minera del C.R.M., modificada para el presente trabajo.

1. 3 Geología Estructural de la Región de Piedra Imán

Debido a la falta de continuidad de los afloramientos de la restita y del fleckigneis, y al intemperismo de la zona, no fue posible tomar datos estructurales que permitieran definir una estructura geológica particular para los cuerpos metamórficos descritos en el presente trabajo; cabe mencionar que, por comunicación personal con el propietario del terreno en donde se encuentran los afloramientos de la restita, éstas formaron estructuras tabulares con un espesor aproximado de 10 a 8 metros. Actualmente y debido a la explotación a la que estuvieron sometidas, solo quedan los socavones que describen burdamente una geometría lenticular.

Las migmatitas, se presentan en forma masiva y no existen lugares apropiados para la toma de datos estructurales capaces de definir alguna estructura particular. Existen algunas fracturas en los afloramientos visitados que no presentan alguna tendencia o dirección preferencial de fracturamiento.

Para los cuerpos graníticos se tomaron datos estructurales de fracturas en diferentes puntos cercanos a la cantera en donde se está explotando el granito de manera comercial y en varios puntos durante los caminamientos, con el objetivo de conocer la o las direcciones preferenciales de fracturamiento

Los datos obtenidos fueron procesados en el software; STERONET, por este procedimiento se obtiene la representación gráfica de de los datos estructurales colectados en campo en la red estereográfica de Wulf, y se les puede dar el tratamiento estadístico necesario, obteniendo así la distribución de la tendencia preferencial de fracturamiento del granitoide.

La figura 1-5a se creó a partir de los datos adquiridos en la cantera donde se explota el granito y en un radio aproximado de 45 m de la misma, principalmente en las fracturas del los cuerpos de granito. La figura 1-5b fue construida a partir de los datos adquiridos en varios puntos donde aflora el granito dentro del área de estudio, logrando los siguientes resultados:

La distribución preferencial de los polos en la cantera indica que se trata de un conjunto de diaclasas con dos planos preferenciales, de direcciones 88° y 330° , con inclinaciones respectivas de 86.6° y 66.1° . La tendencia preferencial de fracturamiento tiene dos direcciones principales 321.7° y 127.2° siendo similares a las direcciones de las diaclasas en la cantera figura 1-5c.

La distribución de los polos de los planos de fractura en los afloramientos del granito fue de 267° con 87.9° de inclinación. Es muy probable que las fracturas reflejen el comportamiento del cuerpo granitoide después de su emplazamiento y solamente obedece a cambios en la temperatura y no a deformaciones tectónicas. La deformación frágil común para este tipo de intrusivos indica que el granito se emplazó antes o durante los últimos estados de deformación tectónica regional.

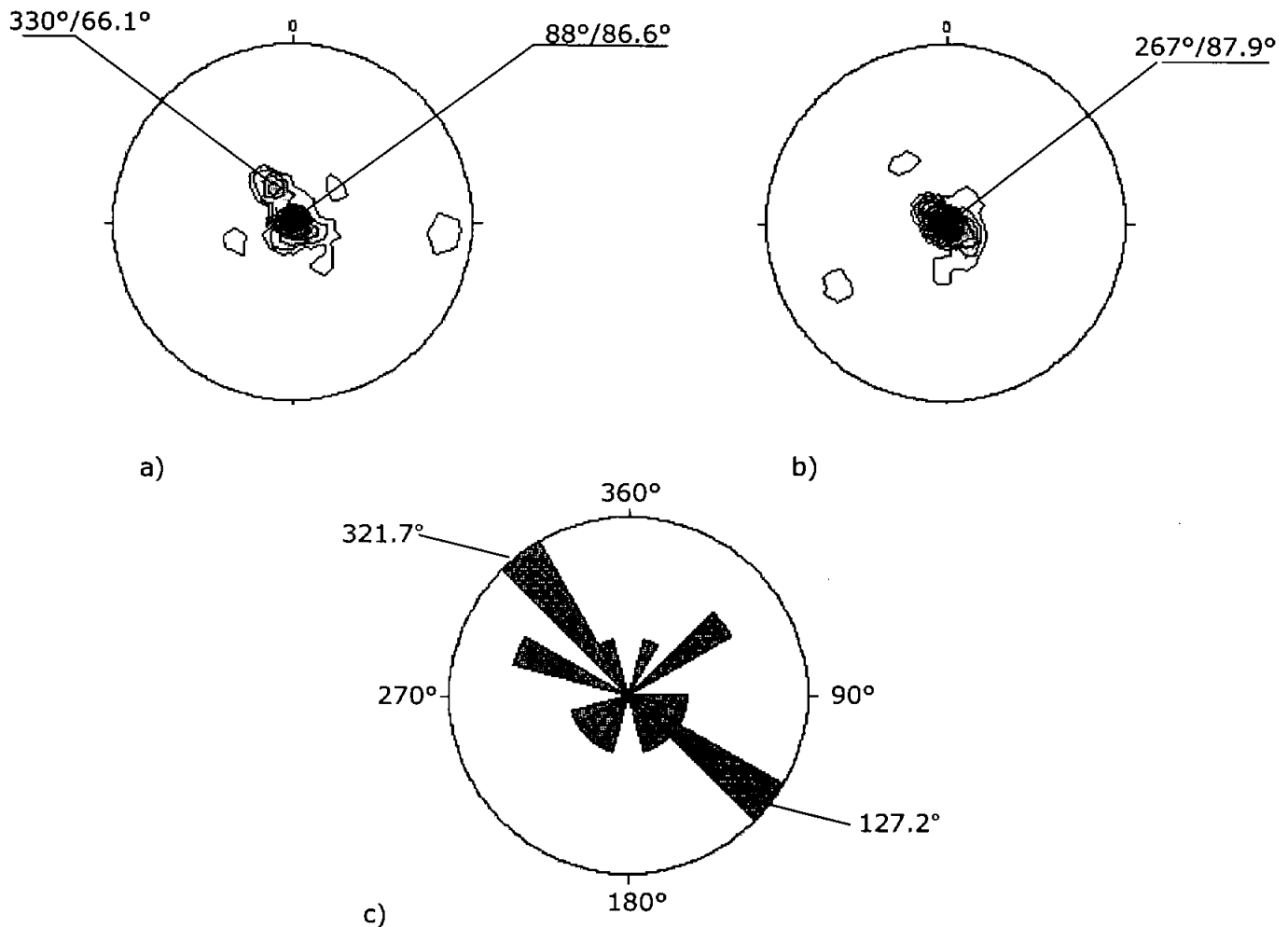
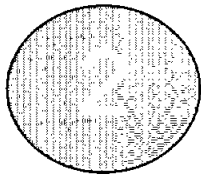


Fig.1-4 Representación grafica de los datos estructurales de los afloramientos de granito; los diagramas a y b son redes estereográficas en las que se incluyen los datos de los polos de los planos de las fracturas del granito en la cantera y en diferentes afloramientos, respectivamente; el diagrama c es una roseta mostrando las direcciones preferenciales de fracturamiento del granito.



CARTOGRAFÍA LOCAL

Los escenarios en donde se desarrollan los fenómenos geológicos en muchas ocasiones resultan ser tan bastos y complejos que el registro geológico se encuentra incompleto la mayoría de las ocasiones. Para poder comprender las interrelaciones entre estos factores y poder postular hipótesis acerca de su evolución y significado, los geólogos tenemos que recurrir generalmente a la expresión gráfica de las características geológicas de la región que se pretende estudiar, además de la distribución geográfica de las unidades litológicas.

La cartografía geológica es una poderosa herramienta en el trabajo del geólogo y es auxiliar en el registro de la información obtenida en campo, pues constituye un recurso muy efectivo para comunicar en forma sintética la conformación geológica y la posible evolución de una región.

En el presente trabajo, se elaboró un mapa litológico interpretativo, en donde se definen y describen seis unidades litológicas, utilizándose la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) como sistema de proyección y como elipsoide de referencia el sistema ITRF-92 teniendo un cubrimiento de 12 Km² a una escala de 1:11,000, derivado de la construcción de un mapa preliminar, realizado por la interpretación fotogeológica de las expresiones del relieve en donde está incluida el área de estudio, tomando como mapa base una fracción de la carta topográfica E14C47 Xaltianguis Gro.

Además de la respectiva verificación en campo se realizaron dos visitas previas, en las cuales se llevaron a cabo varios caminamientos a lo largo y ancho de la zona, con el propósito de determinar los límites y contactos entre las unidades propuestas y la verificación de su correcta ubicación, incluyendo las descripciones y las características generales de las unidades involucradas, enfocado a proponer una columna geológica local, en donde se pueda apreciar de manera descriptiva el orden espacial de la unidades propuestas y su distribución dentro del área de estudio.

A continuación se incluye una breve descripción de las seis unidades Litoestratigráficas propuestas en el mapa:

- **Restita:** Aflora en un par de socavones de geometría tabular denominados minas "El Poder de Dios" y "El Milagro"; ambas forman cuerpos lenticulares de color beige debido al intenso intemperismo de la zona, pero color pardo a pardo oscuro al fresco compuesta de una matriz de cristales de biotita en donde se encuentran inmersos fenocristales de corundo y sillimanita, ambos indicadores de ambientes de alta temperatura, formando una textura porfidoblástica, el tamaño de los cristales varía de 5 mm a 4 cm aproximadamente y debido a su estructura masiva y deleznable no es posible tomar datos estructurales que permitan obtener su orientación preferencial; estos cuerpos se encuentran encajonados por una potente secuencia de fleckigneises (Fig. 2-1).

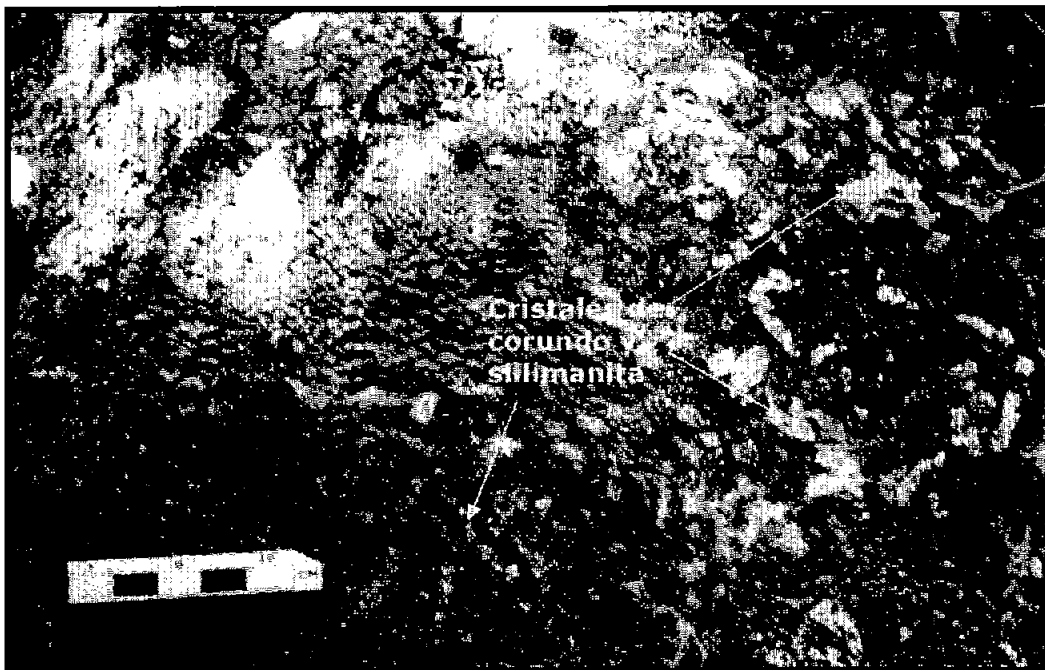


Fig.2-1 Imagen obtenida en el afloramiento de la restita mina "El Milagro" en donde se pudo apreciar la textura porfidoblástica y los cristales de corundo y sillimanita en una matriz de biotita sin ninguna orientación preferencial; el color beige se debe al fuerte intemperismo de la zona.

- **Fleckigneis ó Gneis Manchado:** Estos afloramientos presentan una estructura masiva, tanto en los cortes de la carretera que lleva a Piedra Imán como los afloramientos encontrados en campo; muestran un color pardo claro a la intemperie y blanco con algunos horizontes de color oscuro al fresco formando pequeñas bandas casi horizontales; los minerales observables son cuarzo, feldespatos y franjas de anfíboles (hornblenda), formando una textura lepidoblástica; en algunos casos está atravesada por pegmatitas de cuarzo y feldespatos. El termino fleckigneis se emplea para rocas con textura foliada, con segregaciones de tipo pegmatita, de bordes difusos formadas por un mosaico de cristales subedrales; de cuarzo y feldespato, con grandes cristales poikiliticos sub a euedrales, estos cristales son los que le dan el nombre de Gneis manchado, presumiblemente se trate de la roca encajonante de la restita (Fig. 2-2).

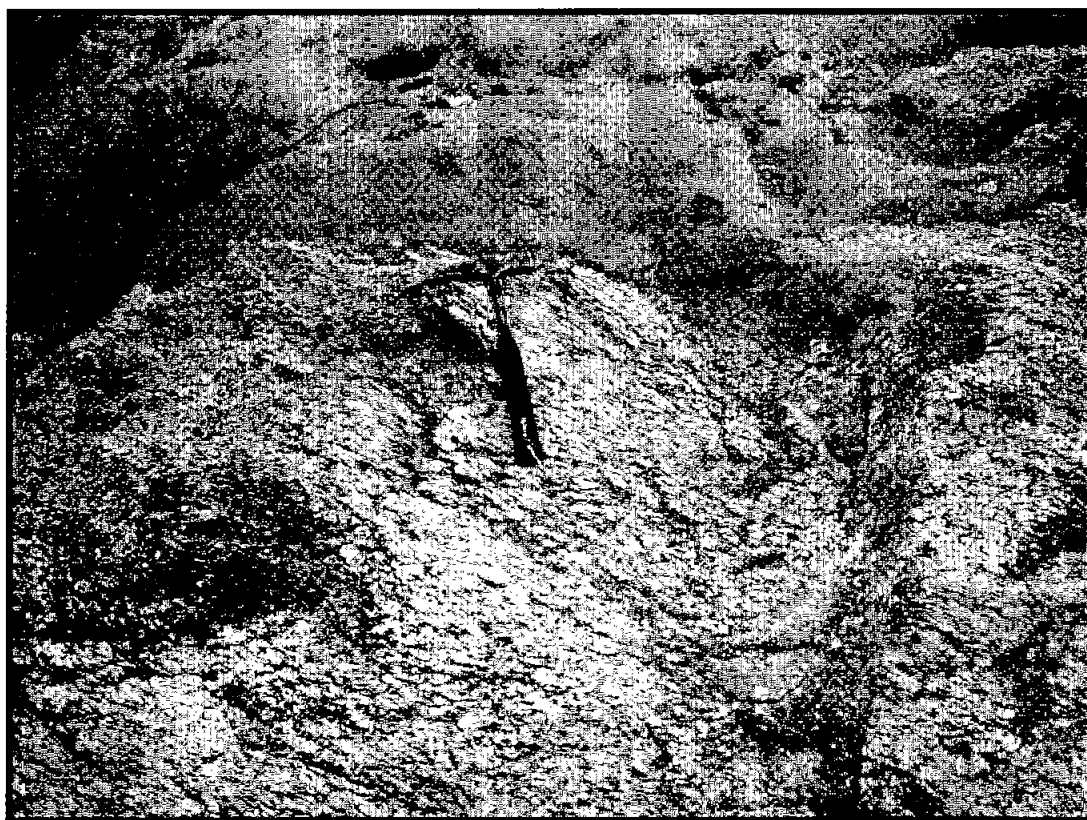


Fig.2-2 Fotografía tomada en un corte en la carretera que comunica a Piedra Imán, donde es posible observar la estructura masiva y la textura gnéisica del fleckigneis o Gneis Manchado, compuesto principalmente por feldespato-K y en menor grado por cristales de hornblenda y biotita, los cuales le dan ese aspecto moteado (manchado); se observa también en la parte superior una cubierta de material detrítico ocre producto del intemperismo que forma la capa de suelo que suprayace al afloramiento del Fleckigneis.

- **Migmatitas:** Aflorando en el lecho de un arroyo cercano a Piedra Imán, con una estructura masiva, de color gris con bandas blancas y gris oscuro; se observa el melanosoma y leucosoma bien definidos, las bandas del leucosoma están compuestas básicamente por cuarzo y feldespatos además de encontrarse intensamente plegados (pliegues ptygmatíticos), el melanosoma esta constituido por minerales ferro-magnesianos y pequeños cristales de esfena, formando en conjunto una textura flevítica y en algunas zonas nebulítica (Fig.2-3) esta afloramiento se encuentra atravesado en varias ocasiones por cuerpos pegmatíticos.



Fig.2-3 Fotografía tomada en el lecho de un arroyo al suroeste de Piedra Imán en donde aflora la Migmatita; se aprecia claramente el leucosoma y melanosoma compuesto de cuarzo, feldespato-k y por minerales ferromagnesianos respectivamente; otra característica que destaca es que el leucosoma esta fuertemente plegado debido a la alta temperatura a la que estuvo sometido donde alcanzó la anatexis. En la fotografía de la izquierda se aprecia un cuerpo pegmatítico tabular cortando a la migmatita.

- **Granitoides:** Los afloramientos encontrados pertenecen a la porción SW del batolito Xaltianguis que con su gran extensión de aproximadamente 250 Km² logra abarcar una buena parte de Piedra Imán (Correa-Mora 1997) que en la mayoría de los casos es leucocrático con una textura fanerítica la cual fue clasificada en campo como cuerpos granitoides, con una estructura masiva, de color gris claro al intemperie y blanco con motas oscuras al fresco, es posible apreciar la forma clásica de exfoliación de los cuerpos graníticos cuando se intemperizan alcanzando en ocasiones dimensiones megascópicas formando grandes promontorios siendo el caso mas característico el cerro "Piedra Prieta" (Fig.2-4).



Fig.2-4 En la imagen superior se tiene la vista del cerro "Piedra Prieta" el cual es un claro ejemplo de tipo de intemperismo clásico de los cuerpos graníticos de Piedra Imán; La fotografía de la izquierda muestra algunos fragmentos del granitoide con las mismas características de intemperismo (forma de bola) pero de dimensiones menores; cabe mencionar que este tipo de fragmentos son muy abundantes en toda la zona.

Los minerales observables son cuarzo, feldespatos, micas y anfíboles; estos últimos formando autolitos en diversos cortes. El intemperismo solo ha afectado a los cuerpos granitoides de manera superficial por lo que no presentan gran alteración y es posible decir que el intrusivo se muestra sano en la gran parte de su extensión y casi no se ve afectado por el sistema de fracturas locales.

Estos cuerpos granitoides a lo mismo que las migmatitas se encuentra atravesada en múltiples ocasiones por cuerpos pegmatíticos producto del proceso metamórfico que ha sufrido el granitóide dichas pegmatitas afloran en vetas delgadas de 5 a 10 cm. Y en algunos casos llegan a tener un espesor de hasta 1 m. compuestas principalmente de cuarzo y feldespatos mostrando una textura que va de sacarosa de grano grueso en algunas vetas (Fig.2-5)

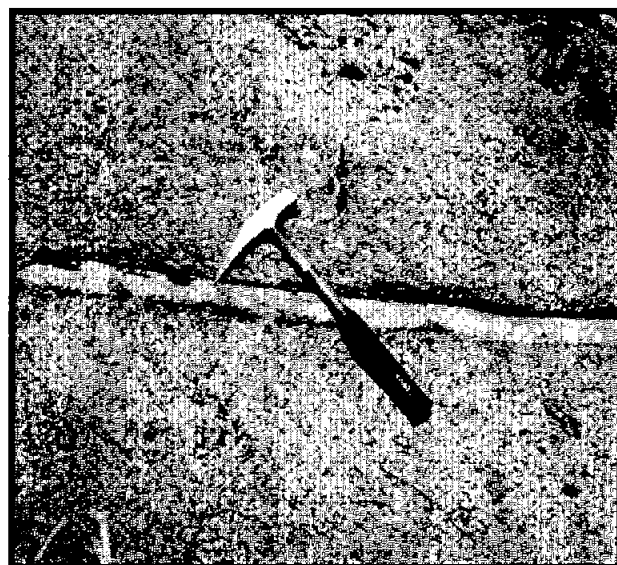


Fig.2-5 En las imágenes superiores se muestran las fracturas tipo que afectan a los cuerpos granitoides; en ocasiones muestran una abertura considerable de más de 10 cm, con una orientación preferencial de 321.7° y 127.2° , respectivamente.

En la imagen inferior, se observa un cuerpo pegmatítico que esta cortando al granito; este tipo de cuerpos tabulares atraviesa en múltiples veces a esta unidad, teniendo un espesor variable de 5 a 10 cm.

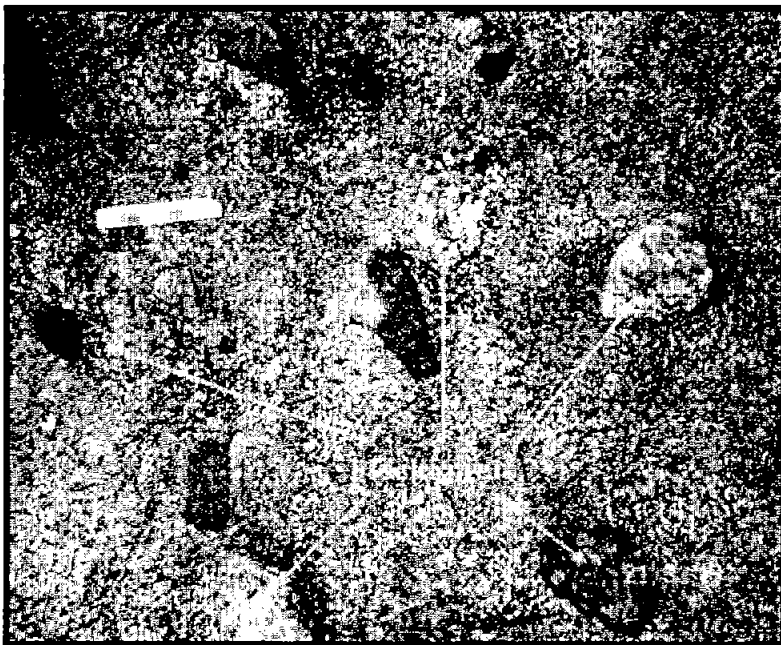
Otra característica interesante de los cuerpos granitoides es que se encontró la presencia de pequeños fragmentos de fleckigneis como xenolitos en algunos bloques cercanos a los afloramientos del fleckigneis, lo que puede deberse a que cuando el granito intrusionó a la secuencia metamórfica particularmente al fleckigneis provocó en las paredes de la roca encajonante derrumbes (caídos) los cuales fueron atrapados y contenidos dentro del magma que dio origen al intrusivo lo que se aprecia mejor en la figura 2-6.



Fig.2-6 Fotografías en donde se muestran los xenolitos de fleckigneis contenidos en el granitoide; en la figura superior se observa un fragmento de 10 cm. de tamaño aproximadamente, con las características típicas de esta unidad metamórfica como son las bandas de biotita y hornblenda.

En la imagen inferior se aprecian fragmentos más pequeños de 3 a 5 centímetros aproximadamente con un color que varía de blanco a gris oscuro todo ellos inmersos en una matriz granítica lo que los hace resaltar aun mas.

Esto puede deberse a que cuando el granito intrusionó a la secuencia metamórfica particularmente al fleckigneis esta intrusión provocó en las paredes de la roca encajonante derrumbes (caídos) los cuales fueron atrapados y contenidos dentro del magma que dio origen al intrusivo.



- **Cuerpos de Fe:** Se localiza en la parte mas alta del cerro de Piedra Imán llamado así debido a que la mena que se extraía de ese antiguo yacimiento, era de magnetita, principalmente; el yacimiento está formando una corona típica de los yacimientos de Fe por segregación magmática, emplazado en un cuerpo granitoide pobre en cuarzo y muy alterado, principalmente a arcillas debido probablemente a la acción de los fluidos hidrotermales; lo que queda de la mena que se extraía (magnetita-hematita-ilita) está alterada a óxidos de Fe y era utilizada en la elaboración de puzolana, un componente del cemento comercial (Fig.2-7).

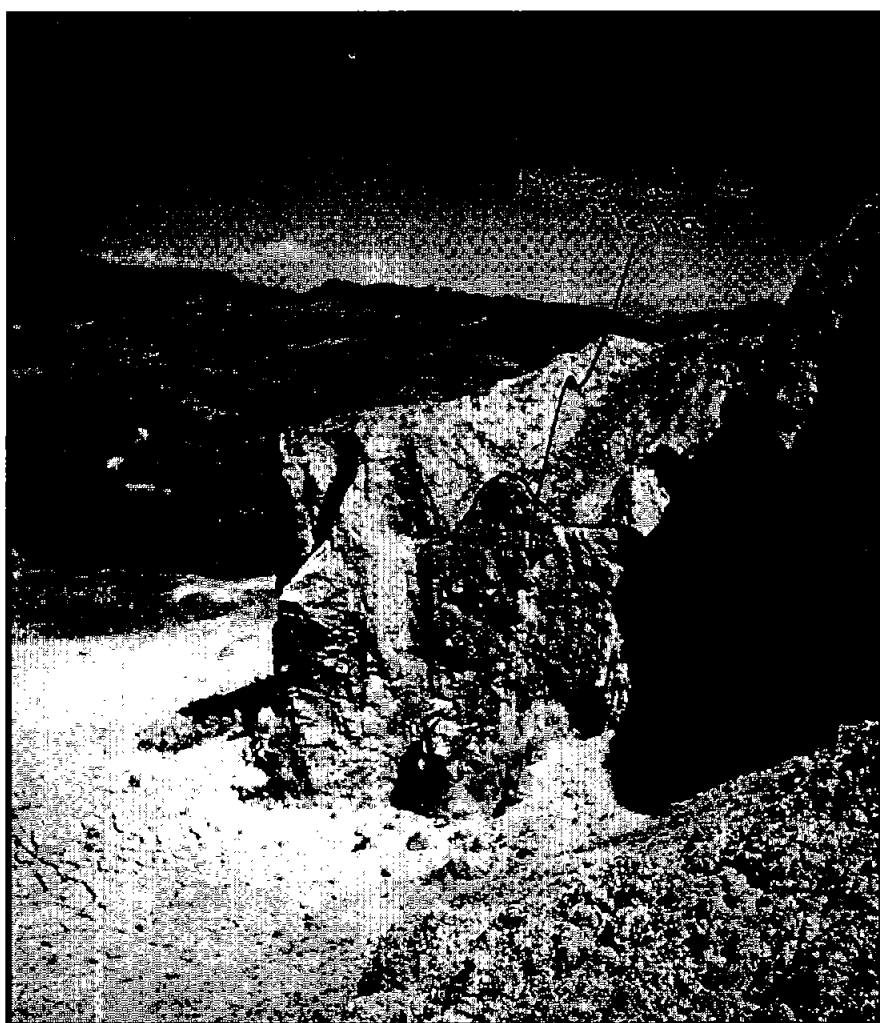


Fig.2-7 Fotografía en donde se puede apreciar una parte de lo que queda del yacimiento de hierro de Piedra Imán; en el fondo, delimitado con una línea negra, se observa el material de mena constituido principalmente por magnetita, hematita e ilita, rodeado a su vez por un borde de alteración hidrotermal, caracterizado por el color pardo blanquecino que adquieren las arcillas presentes en el yacimiento.

- **Depósitos Aluviales:** La cubierta superficial de la zona son los depósitos aluviales que se han ido acumulando con el paso del tiempo, y consisten principalmente productos del intemperismo de las rocas presentes en el área, los cuales han formado suelos en donde se ha desarrollado la mayoría de la vegetación que cubre el lugar (Fig.2-8).

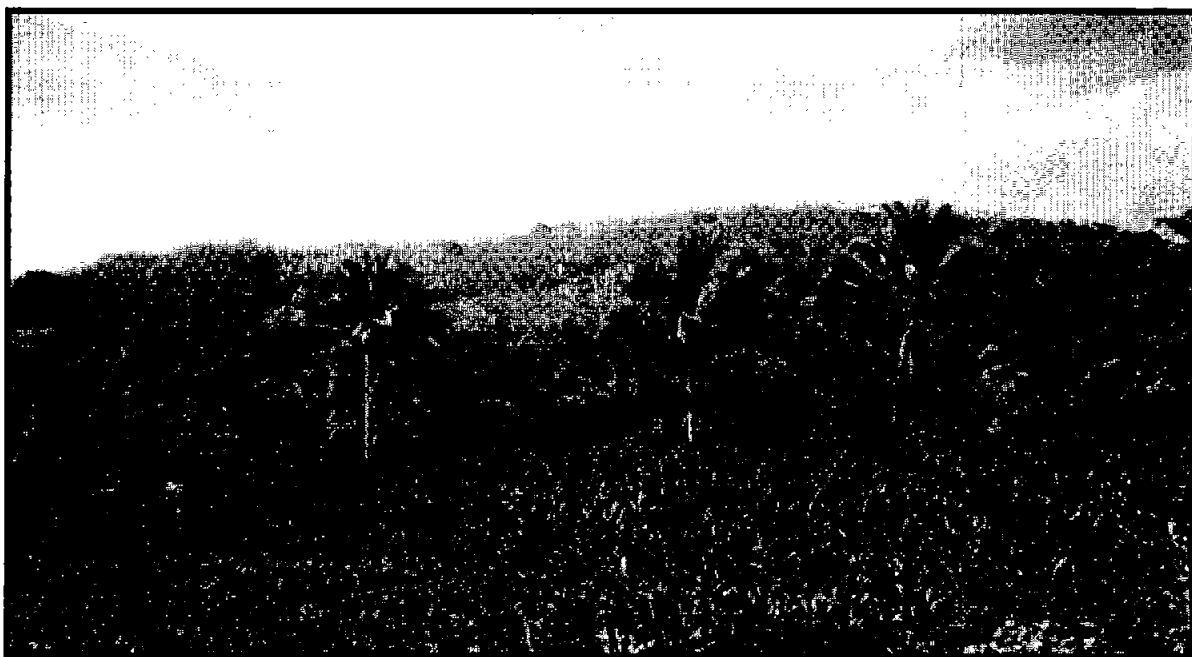
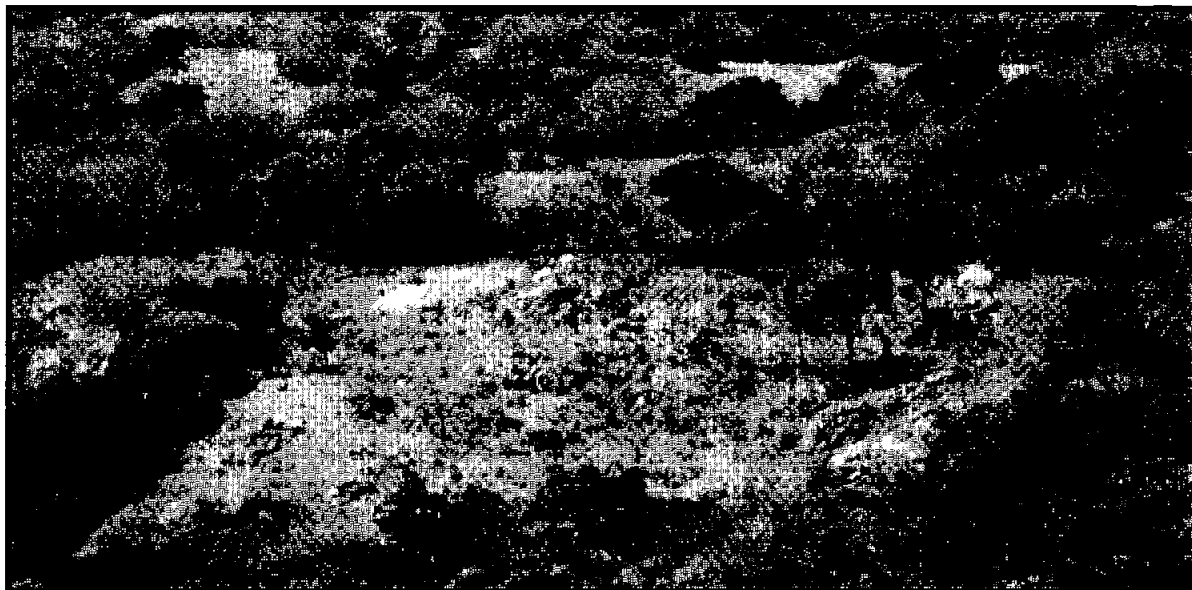


Fig.2-8 En la imagen superior se muestra la vista desde el "Cerro Pelón" de la cubierta superficial que cubre gran parte de la región formada en su gran mayoría por los detritos de las rocas preexistentes. En la imagen inferior se aprecia la amplia cobertura vegetal del suelo de Piedra Imán y sus alrededores; esta cubierta de aluvión sobreyace a todas las demás unidades antes descritas, enmascarando en muchas ocasiones los contactos entre las unidades.

Con base en las descripciones que se hicieron de las unidades propuestas, se definió una columna geológica local en donde se pretende mostrar la posición de dichas unidades (Fig.2-9) con los siguientes resultados:

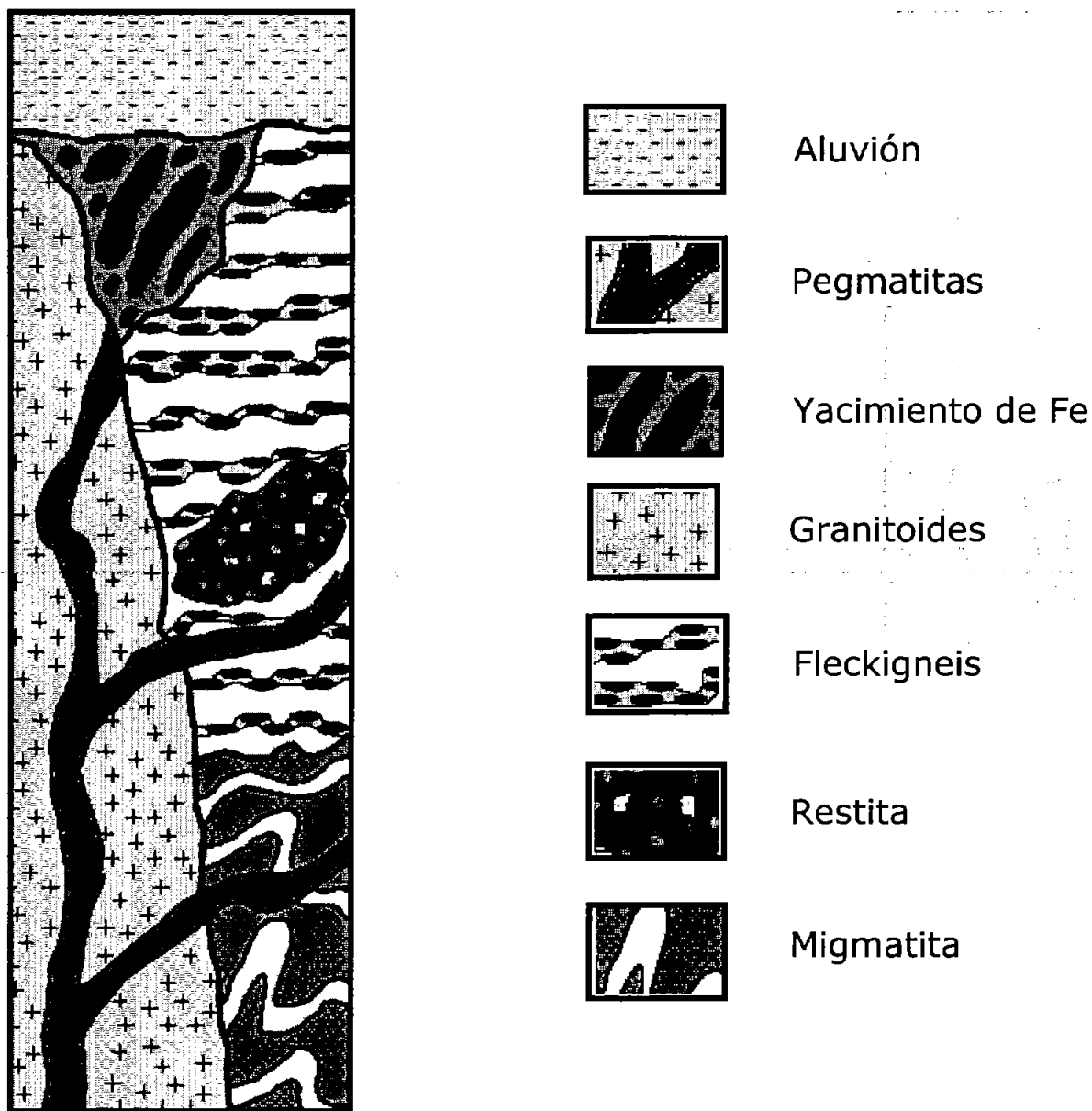


Fig.2-9 Columna geológica propuesta para la región de Piedra Imán y sus alrededores, mostrando esquemáticamente la unidades propuestas en el presente trabajo.

Descripción de la Columna

En la parte inferior se localizan las migmatitas seguidas de una potente secuencia de fleckigneises que, presumiblemente, se trata de la roca encajonante de la restita, la cual es el material refractario remanente de los procesos de fusión parcial, contemporáneos a la génesis de las migmatitas, alojándose en la secuencia gnéisica, la cual representa una etapa de transición entre un gneis y una migmatita conforme se incrementaban las condiciones de metamorfismo, comunes en el complejo Xolapa, que fueron sepultados por sedimentos más jóvenes.

El siguiente evento se trató de la intrusión de cuerpos ígneos graníticos con una edad aproximada de finales del Cretácico y principios del Paleógeno, los cuales cortaron toda la secuencia metamórfica y sedimentaria dando origen a diversos tipos de yacimientos minerales, entre ellos al yacimiento de Fe en Piedra Imán, probablemente por procesos de segregación magmática; después toda la secuencia litológica fue atravesada y cortada, en múltiples ocasiones por diques pegmatíticos y aplíticos más jóvenes.

Por último dio paso a la cubierta sedimentaria, compuesta por aluvión y detritos de las unidades anteriormente descritas, producto del intemperismo dominante y que en la actualidad están constituyendo el suelo de la región.

Caminamientos

El desarrollo del mapa geológico fue sustentado con base en los caminamientos que a continuación se resumen y con la interpretación de fotografías aéreas; los puntos de muestreo tienen la clave PI y el número correspondiente de la muestra y representan también lugares de verificación e interés para el presente trabajo.

Los caminamientos fueron los siguientes:

- Piedra Imán – Rancho Las Abubillas (Mina "El Milagro")
- Mina "El Milagro"- Cerro "Pelón"- Mina "El Poder de Dios"
- Piedra Imán – Cerro "Piedra Imán" (Yacimiento de Fe)
- Piedra Imán – Cantera de Granito – Cerro "Piedra Prieta"
- Rancho Las Abubillas – El 45 (Km. 45)
- Rancho Las Abubillas – Estación de Microondas
- Piedra Imán – Región E y SE de Piedra Imán

- Piedra Imán – Rancho Las Abubillas (Mina “El Milagro”)

Este transecto abarca 1 Km al NE de Piedra Imán, siguiendo por un camino de terracería, siendo los primeros 600 m depósitos aluviales y materiales detríticos; en el trayecto restante se observaron algunos afloramientos aislados de fleckigneis compuestos por bloques de regular tamaño, muy intemperizados, con pequeños cristales de biotita, dispuestos en bandas pequeñas. Siguiendo una brecha y a 270 m al NE del Rancho Las Abubillas se encuentra el primer afloramiento de la restita, observándose un cuerpo lenticular masivo muy intemperizado, color beige a pardo, con una textura porfidoblástica; los minerales observables son corundo y sillimanita, sin una orientación aparente, dispuestos en una matriz de biotita. Se colectaron muestras para lámina delgada y estudio con SEM, además de tomar punto con GPS para ubicar el afloramiento en el mapa.

- Mina “El Milagro”- Cerro “Pelón”- Mina “El Poder de Dios”

En este trayecto de 2.5 Km al E de la mina “El Milagro” se encontraron varios afloramientos aislados de Fleckigneis altamente intemperizados, observándose una tendencia gradual en la disminución del tamaño de los cristales; siguiendo una incipiente brecha se llegó a la cima de cerro “Pelón”, en donde se pueden apreciar con claridad los depósitos de aluvión, cubiertos por una espesa capa de vegetación; al descender se hallaron pequeños bloques de fleckigneis y se encontró el primer afloramiento de granito, sin encontrar el contacto entre estas dos unidades, por estar cubierto por aluvión y vegetación; se tomó punto con GPS, el cuerpo granitoide mostró una estructura masiva y en bloques con la típica forma de bola, debido a la exfoliación producto del intemperismo con una mineralogía de cuarzo, biotita y feldespato potásico; siguiendo la brecha continuó la misma litología granítica, atravesada en ocasiones por cuerpos pegmatíticos tabulares, con espesores que varían de 1 a 10 cm, posicionando con GPS los más representativos; continuando por el camino y adentrándose en la maleza se encontró el segundo afloramiento de la restita en la Mina “El Poder de Dios” aproximadamente a 400 m al NE de la mina “El Milagro”, este afloramiento se encuentra cubierto casi en su totalidad por una espesa vegetación que enmascara sus dimensiones reales; presenta características muy similares en textura y mineralogía a la mina “El Milagro”, pero con una mayor abundancia de cristales de sillimanita. Se tomaron muestras para lámina delgada y para estudio con SEM, además de su posicionamiento con GPS.

- Piedra Imán – Cerro “Piedra Imán” (Cuerpos de Fe)

Este trayecto abarcó aproximadamente 800 m desde Piedra Imán hasta el cerro con el mismo nombre, al cual se sube por una pronunciada pendiente, siguiendo un camino de terracería utilizado antiguamente por los camiones que trasportaban el mineral extraído del depósito; durante el ascenso se observó un cambio gradual en la coloración del suelo, de pardo a rojizo, aunado a una alteración gradual del granito a minerales arcillosos del grupo de la illita, de gris a amarillo ocre antes de llegar a un color rojo intenso; el yacimiento se encuentra totalmente agotado y sólo es posible observar algunas vetas con mineral de mena, la cual consistió en magnetita y hematita principalmente; se buscó el contacto franco entre el yacimiento y el cuerpo granitoide, pero se encuentra cubierto por los detritos de las laderas del cerro y por la vegetación que cubre las mismas; se tomaron puntos con GPS en los lugares más representativos; bajando del cerro se encontraron varios cuerpos de pegmatitas de cuarzo y feldespato potásico cortando al granitoide.

- Piedra Imán – Cantera de Granito – Cerro “Piedra Prieta”

Este trayecto, de aproximadamente 5 Km fue cubierto siguiendo la terracería que comunica a Piedra Imán con el poblado próximo La Providencia; más adelante, siguiendo el camino, se encuentran numerosos afloramientos del granitoide, algunos de ellos con diferentes grados de intemperismo, con una mineralogía de cuarzo, feldespato potásico, biotita y esporádicamente esfena; saliendo del pueblo y tomando por una brecha se llega a la cantera donde se está explotando el granito; en ese lugar se tomaron datos estructurales a las fracturas más representativas del granito en la propia cantera y en los alrededores de la misma, además de posicionar el lugar con GPS y tomar muestras para lámina delgada; en la parte alta de la cantera es posible observar varios promontorios de tamaño considerable, con el tipo clásico de exfoliación en forma de bola del granitoide; continuando por la terracería la litología se mantuvo igual, siendo el afloramiento más representativo el cerro “Piedra Prieta”, al cual se llegó abriendo camino por la maleza y subiendo por una escarpada pendiente; desde la cima del cerro se aprecia toda la región hasta la costa del Pacífico y se puede ver también la extensión regional que tiene el intrusivo desde Piedra Imán hasta Xaltianguis; toda el área que abarca la cima del cerro está despoblada de vegetación, este cerro se encuentra en los límites hacia el Norte del área de estudio.

- Rancho Las Abubillas – El 45 (Km 45)

Este transecto de aproximadamente 3 Km, al SE de Piedra Imán, se cubrió siguiendo una sinuosa brecha; en los primeros 800 m se encontraron aislados afloramientos de fleckigneis con un alto grado de intemperismo y con una mineralogía de cuarzo, feldespatos potásicos y bandas delgadas de biotita y hornblenda; continuando por la brecha se encontraron afloramientos más sanos del fleckigneis, conservándose la misma mineralogía en ocasiones se notó un cambio gradual en el tamaño de los cristales; se encontró también varias pegmatitas que cortaban al fleckigneis durante todo el camino hasta llegar a El 45, donde finalizó esta ruta por estar ya fuera del área de estudio; cabe destacar que en gran parte del camino se encontró una fuerte capa de aluvión y vegetación que enmascara a las unidades y sus contactos entre ellas.

- Rancho Las Abubillas – Estación de Microondas

Este trayecto de 2 Km al S-SW de Piedra Imán fue cubierto abriéndose paso por la vegetación, encontrándose varios afloramientos de fleckigneis en bloques muy intemperizados y rodeados de vegetación, tendencia predominante durante todo el caminamiento; la ruta continuó hasta encontrar la carretera que comunica a Piedra Imán con la carretera federal 95, en donde se observó un afloramiento sano del fleckigneis, en un corte de la carretera cercano a la estación de microondas; la mineralogía que lo caracteriza es cuarzo, feldespatos potásicos, biotita y hornblenda, estos dos últimos minerales dispuestos en pequeñas bandas o agregados cristalinos; en el lugar se tomaron muestras para lámina delgada y estudio de SEM, además de localizar el punto con GPS.

- Piedra Imán – Región E y SE de Piedra Imán

Esta ruta, de aproximadamente 3 Km al E y SE de Piedra Imán, se cubrió siguiendo un camino en la ladera de los cerros aledaños al pueblo hasta llegar a un campo de cultivo; en este transcurso se encontraron aislados afloramientos de fleckigneis con la mineralogía ya descrita y con un grado de intemperismo elevado, así como también una gruesa capa de aluvión y vegetación que cubre las unidades y enmascara los contactos; más adelante, y en medio del campo de cultivo por un camino improvisado, se encontró un bloque de granitoide que contenía varios xenolitos de fleckigneis; continuando por el mismo camino aparece un afloramiento de migmatitas en el lecho de un arroyo, que presenta claramente las diferencias entre el leucosoma compuesto por cristales de cuarzo y feldespatos potásicos, mientras que el melanosoma está constituido por minerales ferromagnesianos.

En este lugar se tomó punto de posicionamiento con GPS, y continuando por un camino de terracería se encontraron varios afloramientos aislados de fleckigneis con las características ya descritas; posteriormente se subió por una pendiente a una loma donde se halló un cuerpo pegmatítico de más de 70 cm; de espesor, se tomó punto con GPS y se encontraron más afloramientos de fleckigneis; durante una distancia de 1 Km aparece una cubierta de aluvión cubriendo las unidades anteriores, al descender de el cerro se llegó al lecho de un arroyo, donde se volvió a encontrar el afloramiento de Migmatita, esta vez con dimensiones más, grandes abarcando de extremo a extremo del arroyo, la mineralogía de las bandas de leucosoma y melanosoma fue la misma y no se logró encontrar el contacto franco entre esta unidad con el fleckigneis y con el granitoide, probablemente cubierto por vegetación o aluvión; al acercarse al pueblo de Piedra Imán se observó nuevamente el cuerpo granitoide, completando de esta manera el área correspondiente a la zona de estudio.

El mapa geológico y de caminamientos se incluye en los apéndices, al final del presente trabajo.



ESTUDIO PETROGRÁFICO

Para el análisis petrográfico de la restita y la roca encajonante se tomó como base la descripción petrográfica de 20 láminas delgadas, elaboradas a partir de las muestras XO-12, perteneciente a la mina "El Milagro" y XO-16, que corresponde a la mina "El Poder de Dios" obteniéndose las laminas R1 a la R7, además de 3 laminas previamente preparadas por el Ingeniero Alfredo Victoria, y de las muestras XO-19 b y c respectivamente, correspondientes al Fleckigneis elaborando las láminas F1 a F9 para la roca encajonante. La forma de tratarlas fue por el procedimiento usual, es decir se obtuvo de ellas la composición mineralógica, observando también las relaciones interminerales, tanto en lámina delgada como en muestra de mano.

Resultados obtenidos "Restita"

Las muestras recolectadas en los dos afloramientos de las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios" son fragmentos extraídos de socavones con una geometría burdamente rectangular, labrados en lo que parecen ser unos cuerpos masivos lenticulares, mismos que presentan un intemperismo muy avanzado.



Fig.3-1 En esta imagen es posible apreciar la geometría de los socavones de las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios", las cuales presentan un avanzado intemperismo lo que les da el color beige claro a pardo oscuro.

Los fragmentos sanos presentan una textura porfidoblástica con cristales de corundo y sillimanita, cuyo un tamaño oscila entre los 0.5 cm y 5.00 cm de longitud, inmersos en una matriz de biotita sin ningún tipo de orientación. El corundo no siempre tiene un color uniforme, pues varía de un azul claro casi blanco a un azul mas intenso; los cristales son prismáticos con una ligera deformación, los cristales de sillimanita también se presentan en una forma prismática y de un color blanquecino (lechoso) con una ligera deformación curva.

Existen además algunos cristales de color oscuro azulado que parecen ser cristales de corundo y sillimanita dentro de otro mineral más oscuro, probablemente espinela; todos estos cristales se encuentran incluidos en un mosaico de biotita con un hábito masivo tabular y de agregados laminares con un color pardo rojizo a pardo oscuro en ocasiones muy deleznable, incluso en los fragmentos sanos; se observa también en los cristales de biotita de todo el afloramiento una alteración muy avanzada a clorita y minerales arcillosos, los cuales cubren de forma superficial la mayor parte del afloramiento, dándole un color pardo claro a beige, siendo la mina "El Milagro" la más afectada por este fenómeno. (fig.3-2)

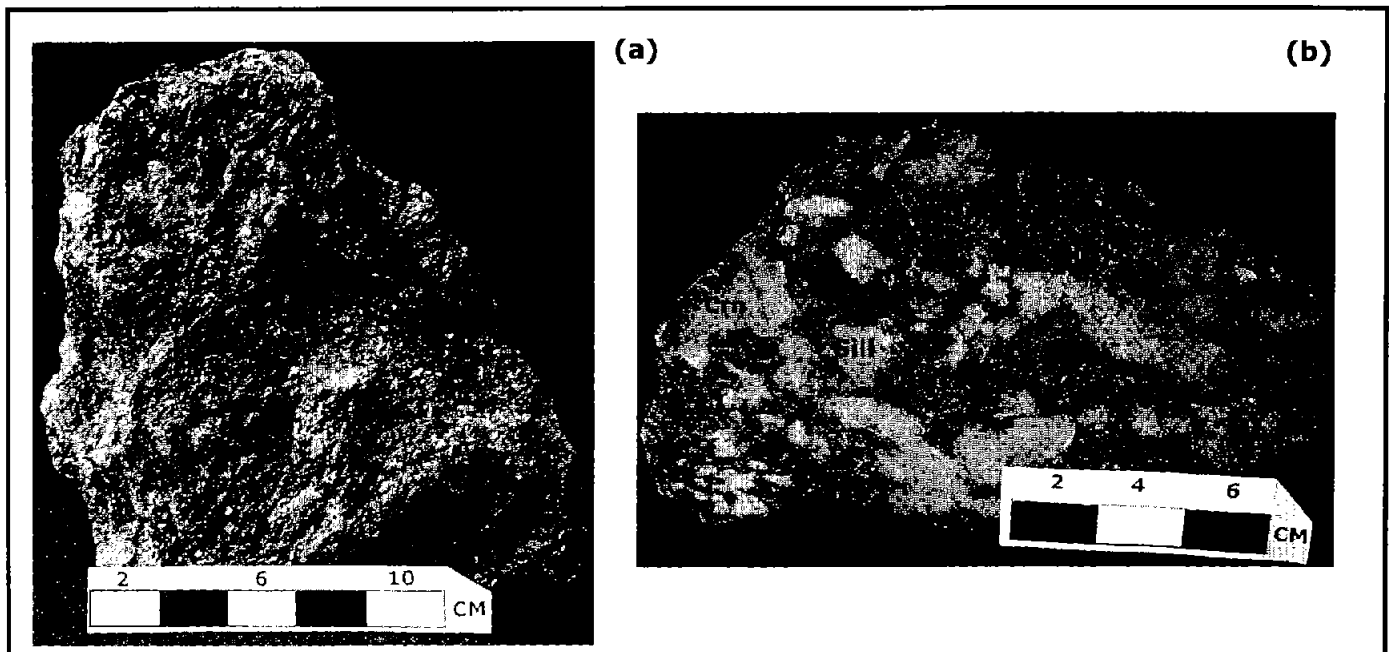


Fig. 3-2 En esta figura se muestran dos imágenes donde se aprecian las características macroscópicas de la restita; se aprecia una estructura masiva y densa (3-2 a) y es posible observar también en un corte de la muestra el tamaño de los cristales de corundo (Crn) y sillimanita (Sill), inmersos en un mosaico de cristales de biotita (Bio) sin una disposición preferencial (3-2 b).

En lámina delgada se aprecia una textura porfidoblástica muy similar a la observada en muestra de mano pues se ven cristales de corundo y sillimanita (porfidoblastos) incluidos en un mosaico de cristales de biotita anedral (matriz). Los cristales de corundo son euedrales a subedrales, prismáticos con un tamaño que varía de 0.3 cm a 1.5 cm, incoloros con luz paralela, muestra un relieve muy alto y débil birrefringencia; estos cristales presentan un borde de espinela y cordierita de unas cuantas micras de grosor, siendo la cordierita la mas externa, se aprecia en algunos casos un maclado polisintético en el corundo (Figs. 3-3a, 3-3b).

En el caso de la sillimanita se presenta como cristales euedrales con un aspecto alargado, incoloros y con una birrefringencia moderada; se observa también el mismo borde de espinela y cordierita, aunque en algunos casos el borde de espinela es incipiente y los pequeños cristales de espinela están rodeados por completo por cristales de cordierita (fig. 3-4).

La espinela se presenta como pequeños cristales subedrales y un ligero color verde con luz paralela e isotrópica con nícoles cruzados de unas cuantas micras de grosor y es el borde intermedio entre los cristales de corundo o sillimanita y la cordierita. La cordierita se presenta como cristales anedrales incoloros con luz paralela, mostrando una birrefringencia bastante débil, similar a la del cuarzo y representa el borde más externo, que se encuentra en contacto con la matriz de biotita.



Fig.3-3a Foto micrografía con luz paralela y con el objetivo de 2.5X mostrando un cristal de corundo rodeado por un borde de espinela y cordierita siendo esta ultima la más externa, inmersos en una matriz de biotita color pardo ; se aprecia también la macla polisintética del corundo y algunas microfracturas rellenas del mismo material que los bordes .
 Crn = Corundo
 Esp = Espinela
 Crd = Cordierita
 Bio = Biotita

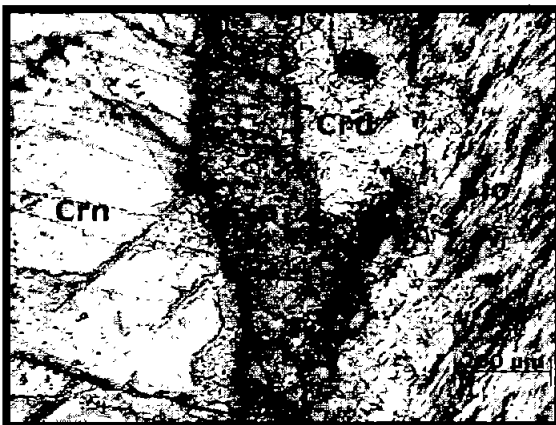


Fig. 3 -3b Fotomicrografía con luz paralela der. y con nícoles cruzados izq. utilizando el objetivo 10X. Se observan cuatro fases minerales de la restita, de izquierda a derecha: corundo Crn, espinela Esp cordierita Crd y biotita Bio.

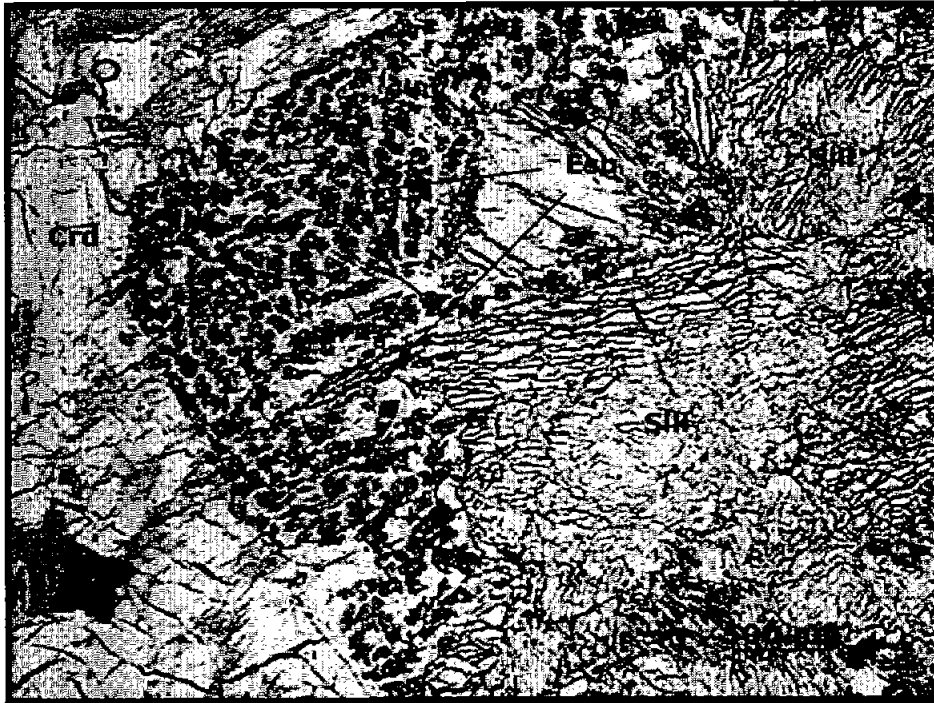


Fig.3-4 Fotomicrografía con un objetivo de 2.5X en donde se observa un cristal de sillimanita con un borde incipiente de espinela y cordierita; una característica que resalta de la sillimanita es su fuerte relieve; los cristales de espinela se ven muy pequeños en comparación de los que rodean al corundo y parecen estar contenidos a su vez en los cristales de cordierita.

Sill = sillimanita
Esp = espinela
Crd = cordierita
Bio = biotita

Se han observado también cristales de rutilo como pequeñas inclusiones dentro del corundo y los bordes externos de espinela y cordierita con una forma granular alargada de 250 μ m y un color pardo rojizo a ámbar; es importante mencionar que en los cristales de sillimanita casi no había inclusiones de rutilo (fig. 3-5).



Fig.3-5 Fotomicrografía con luz paralela y objetivo 10X, En donde se muestran varios Cristales de Rutilo euhedrales embebidos En el Corundo y en ocasiones en los cristales de Sillimanita, y mas esporádicamente en la Espinela y Cordierita. Otra característica que se aprecia en esta lamina es el Fuerte relieve, típico de este mineral.

También se detectó la presencia de cristales de zircón con un tamaño de 20 μ dentro del borde espinela-cordierita y del corundo, hábito prismático corto bipiramidal y en la mayoría de los casos parece estar retrabajado y muestra una forma granular (fig. 3-6). Otro mineral accesorio encontrado aunque en menor cantidad es la hematita la cual se observa en pequeños fragmentos y como un mineral opaco con algunos bordes rojizos.

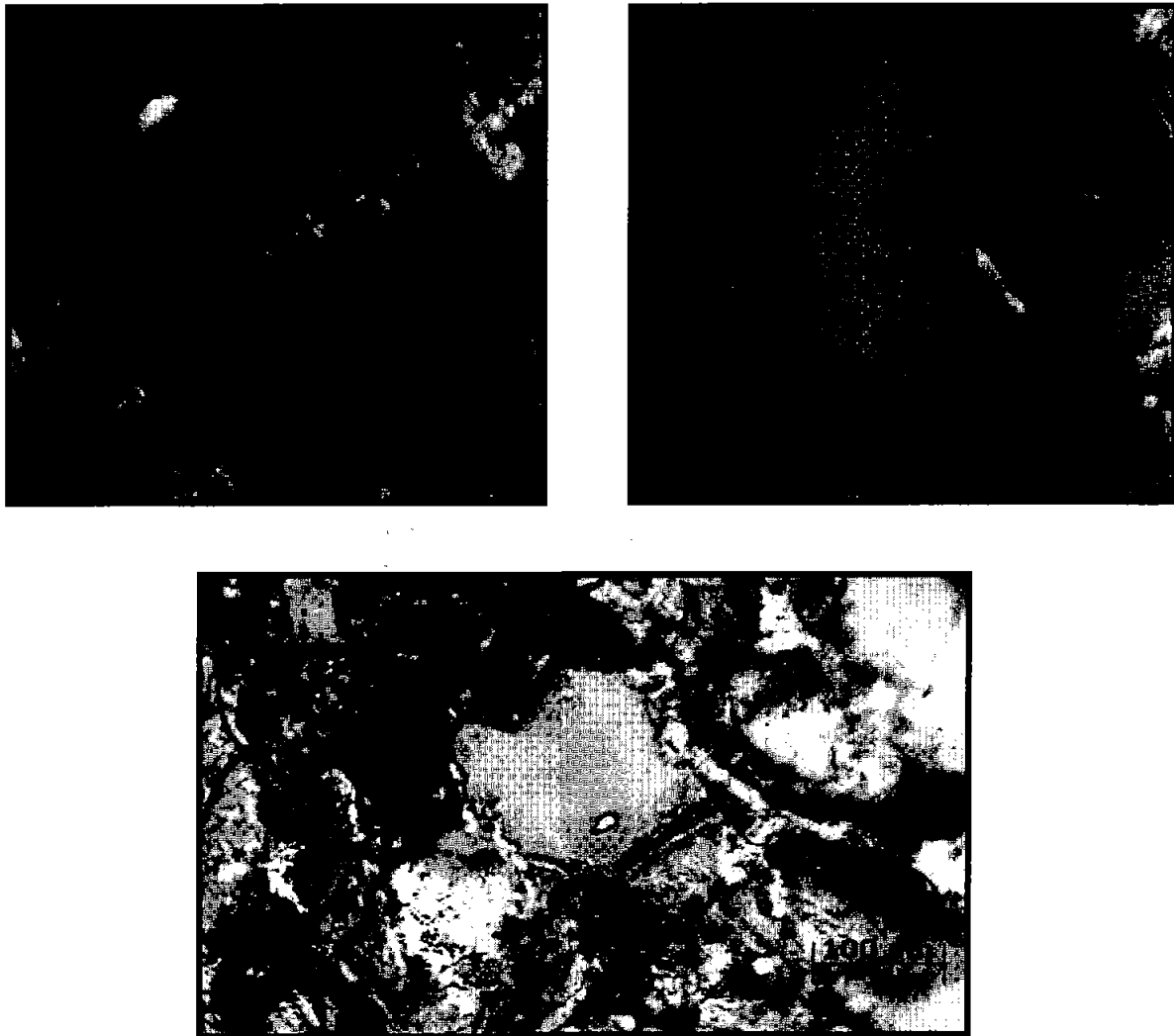


Fig.3-6 Fotomicrografías con nícoles cruzados y objetivo 50X y 20X respectivamente mostrando tres pequeños cristales de zircón contenidos en cristal de corundo y en el borde externo de cordierita, con un tamaño aproximado de 20 a 30 μ ; se aprecia un hábito prismático corto y en la mayoría de los casos parece estar retrabajado y muestra una forma granular; otra característica distintiva es su alta birrefringencia.

En el total de las muestras analizadas de la restita se observó una asociación mineral correspondiente a roca metamórficas pelíticas, siendo la biotita la predominante con más del 90% del volumen total, siguiéndole los cristales de corundo y sillimanita. Por lo tanto se utilizó el diagrama **AFM** para representar las asociaciones minerales en rocas pelíticas de acuerdo con la composición química.

La composición química de dichas rocas puede representarse en un sistema de seis componentes:

SiO₂ - Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O - H₂O (sistema KFMSH, Spear 1995) y para este trabajo se utilizó el subsistema **Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O**.

El propósito del diagrama es el estimar las condiciones metamórficas a partir de los minerales coexistentes.

Las fórmulas empleadas para el cálculo de la posición de los minerales en el diagrama **AFM** fueron las siguientes:

- $$A = \frac{Al_2O_3 - 3K_2O}{Al_2O_3 - 3K_2O + MgO + FeO}$$

- $$M = \frac{MgO}{MgO + FeO}$$

- $F = FeO$

Las fórmulas químicas de los minerales encontradas en la restita son las siguientes:

- Corundo Al₂O₃
- Sillimanita Al₂SiO₅
- Espinela MgAl₂O₄
- Cordierita MgAl₂Si₅O₃

En la figura 3-7 se muestra el diagrama **AFM** con las fases minerales más comunes en las rocas metamórficas pelíticas.

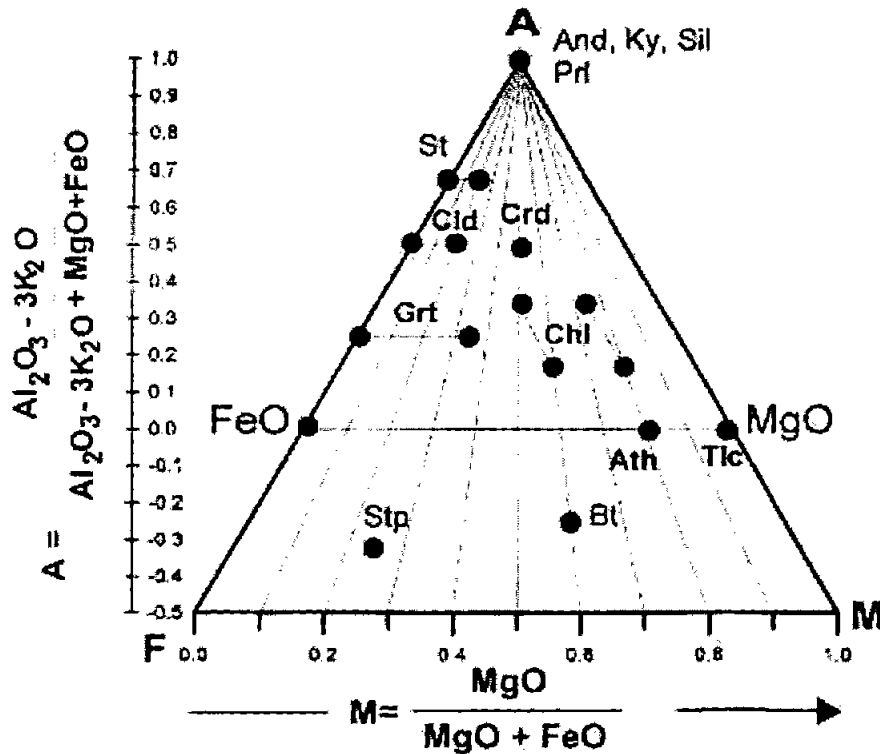


Fig. 3-7 Diagrama **AFM** con representación de los minerales más frecuentes:

- And = Andalucita
- Ath = Antofilita
- Bt = Biotita
- Chl = Clorita
- Cld = Cloritoide
- Crd = Cordierita
- Grt = Granate
- Ky = Kyanita
- Prf = Pirofilita
- Sil = Sillimanita
- St = Staurolita
- Stp = Estilpnomelana
- Tlc = Talco

Después de realizar el balanceo químico de las fórmulas minerales con los óxidos más comunes en el subsistema **Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O** y los cálculos aritméticos para poder posicionar a la restita en el diagrama, los resultados se muestran en la figura 3-8.

Otro de los propósitos del diagrama **AFM** es ilustrar los efectos de las sustituciones Fe-Mg en los minerales componentes de las rocas pelíticas.

En numerosos estudios sobre metamorfismo en rocas pelíticas se muestra el orden decreciente del Fe / Mg en minerales metamórficos como sigue:

Alto Fe / Mg Bajo Fe / Mg

Granate > Estaurolita ≥ Cloritoide > Biotita ≥ Clorita > Cordierita ≥ Talco

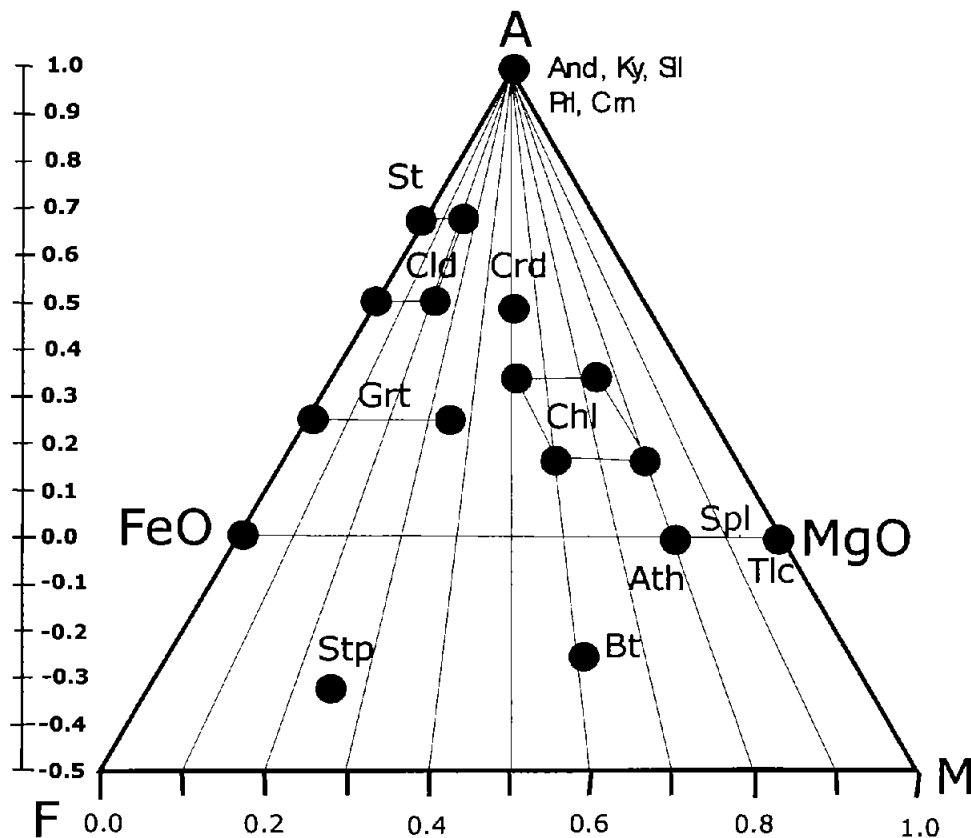
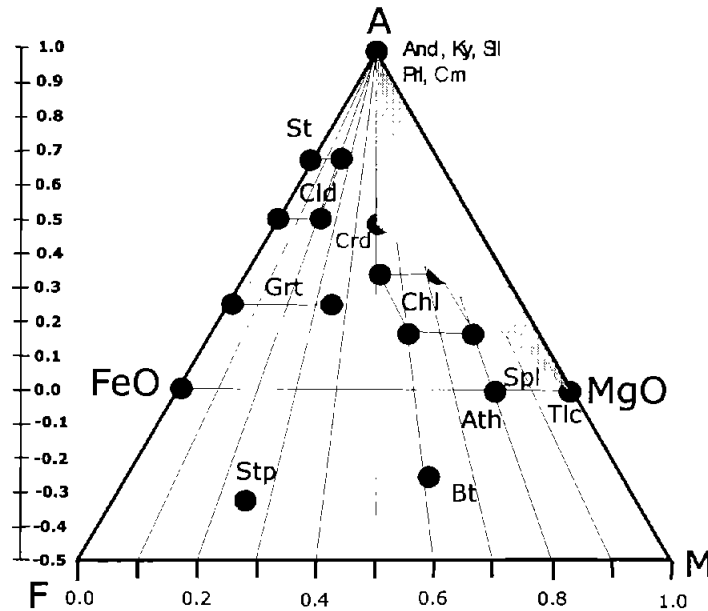


Fig. 3-8 Diagrama AFM mostrando en rojo la posición de los principales minerales componentes de la restita, corundo (Crn), sillimanita (Sil), espinela (Spl), cordierita (Crd) y biotita (Bt), y en azul los minerales más frecuentes que se representan en este diagrama.

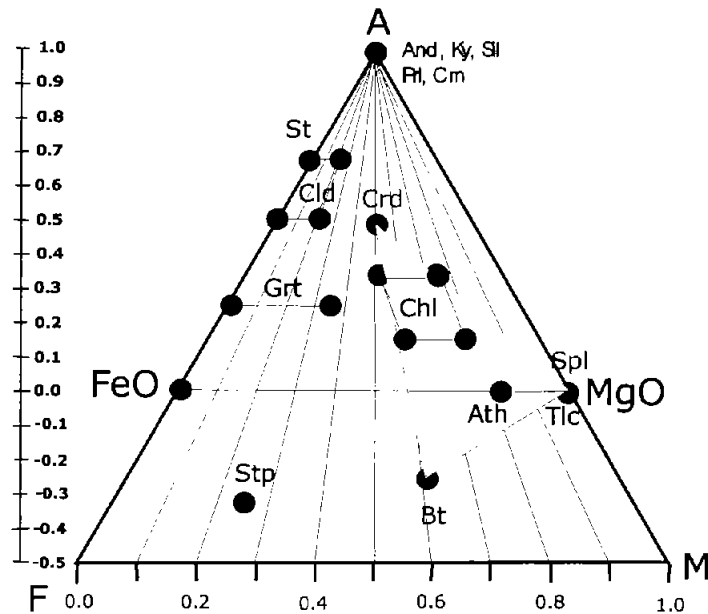
De acuerdo con las relaciones texturales de los minerales observados en lámina delgada y obedeciendo al criterio de que solo los minerales que se encuentran en contacto mutuo puede considerarse como una asociación de minerales o paragénesis en equilibrio, y que una o mas paragénesis en equilibrio pueden llegar a coexistir en un área o campo de una lámina delgada, se definen las paragénesis en equilibrio en la figura 3-9. Esto es de gran importancia ya que en el pasado se creía que bastaba con la sola determinación de todos los minerales presentes para poder identificar a la roca (Winkler, 1978) y des esta forma es factible de determinar las facies y reacciones metamórficas.

Por lo tanto se han definido las siguientes paragénesis:

- Corundo/Sillimanita + Espinela + Cordierita
- Espinela + Cordierita + Biotita



(3-9a)



(3-9b)

Fig. 3-9 Diagramas **AFM** mostrando las dos paragénesis en equilibrio propuestas para la restita, 3-9a Crn/Sil+Crd+Spl; 3-9b Crd+Spl+Bt.

De acuerdo con las paragénesis propuestas anteriormente para la restita es posible definir el grado y facies metamórficas a la que pertenece al comparar las paragénesis definidas en un diagrama de Presión- Temperatura para metapelitas con las obtenidas en dicho análisis, en donde se observa la posición de esta roca, como se aprecia en la figura (3-10).

Por tanto, el metamorfismo de los enclaves encontrados en las minas "El Milagro", y "El Poder de Dios" es de alto grado, en facies de granulita, definidas por la paragénesis **corundo/sillimanita + cordierita + espinela + biotita**, la cual se forma a temperaturas de alrededor de los 850 °C y una presión de alrededor de 4 a 6 Kbar.

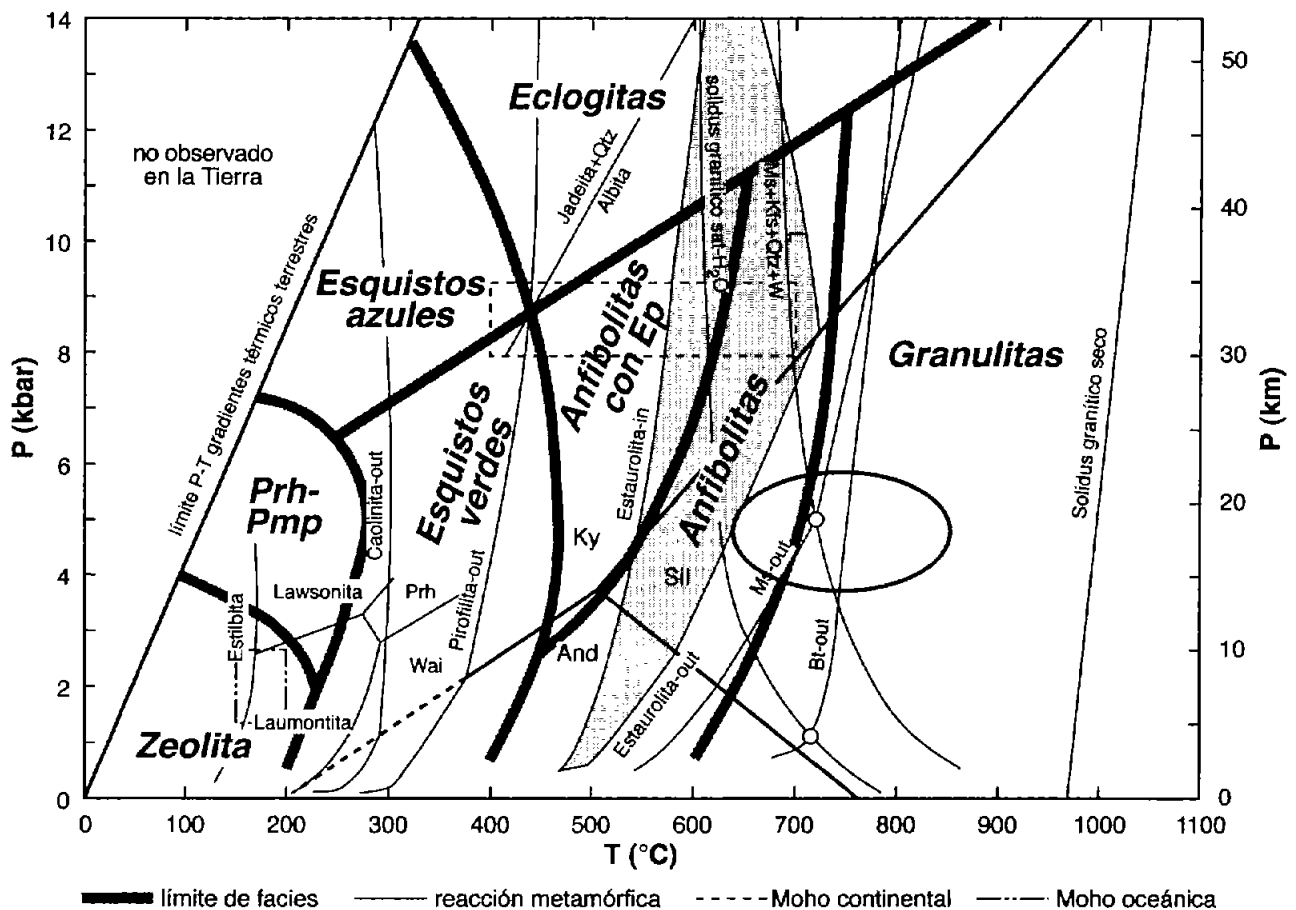


Fig. 3-10 Diagrama Presión vs. Temperatura mostrando los límites de las facies metamórficas, así como las reacciones metamórficas que las acompañan. Abreviaturas: Bt (biotita), L (líquido), Ms (moscovita), Pmp (pumpellita), Prh (prehnita), Qtz (cuarzo), Kfs (feld-K) y Wai (wairakita) en el ovalo rojo se localiza la zona donde se encuentra la restita de acuerdo con la paragénesis que presenta. Fuentes del diagrama PT: límites de facies según Spear (1993); reacciones metamórficas para metapelitas tomadas de la parrilla petrogenética de Spear y Cheney (1989); reacciones de Caolinita-out y Pirofilita-out de Bucher y Frey (1994); solidus graníticos de Johannes y Holtz (1996); condiciones PT para las Moho oceánica y continental de Condie (1989). La equivalencia entre presión litostática y profundidad está calculada para una densidad cortical promedio de 2700 kg/m³.

Otra característica textural que posee la restita es la presencia de unas estructuras que remplazan a través de bordes al corundo y a la sillimanita, que son conocidas como coronas o bordes de reacción y nos indican condiciones de desequilibrio progrado o retrógrado, son muy comunes en gneises, granulitas, y eclogitas de alto grado, las que pueden llegar a ser de una o varias fases minerales, siendo en este caso de tipo progrado donde la espinela y corundo remplazan a la cordierita y sillimanita; en algunos casos los bordes de reacción están bien definidos y en otros son muy delgados o incipientes, siendo el caso de la sillimanita el mas representativo, donde se observa el borde incipiente de espinela rodeada a su vez por cordierita (figs. 3-11 y 3-12).

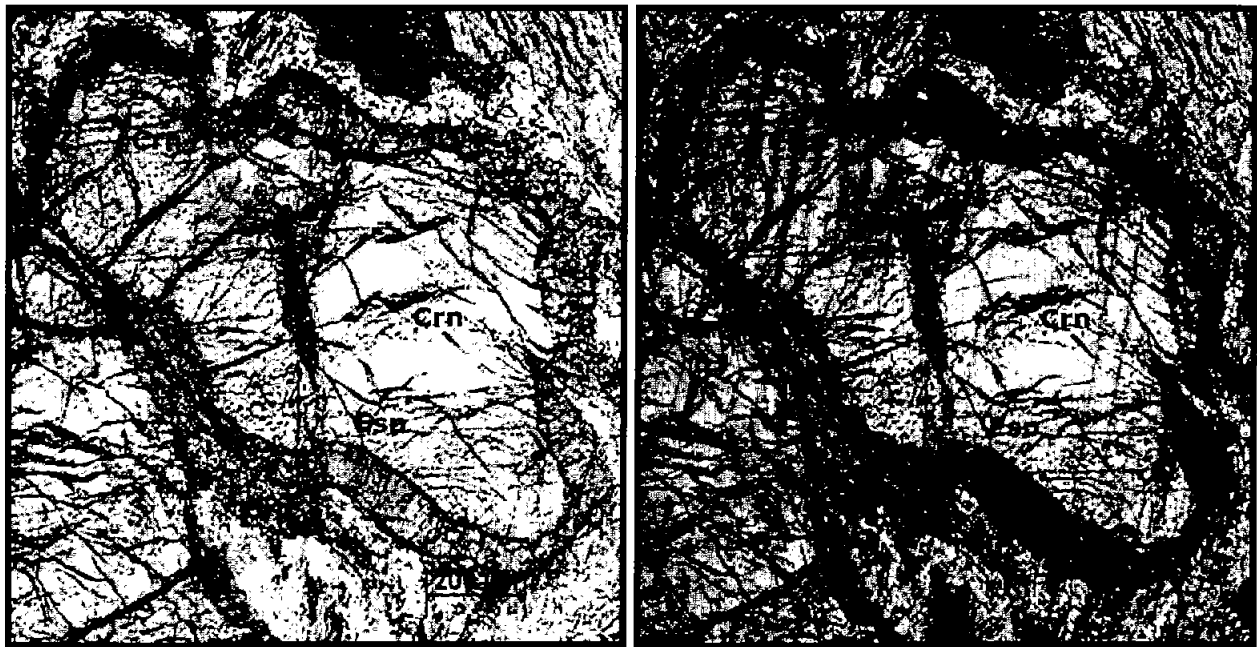
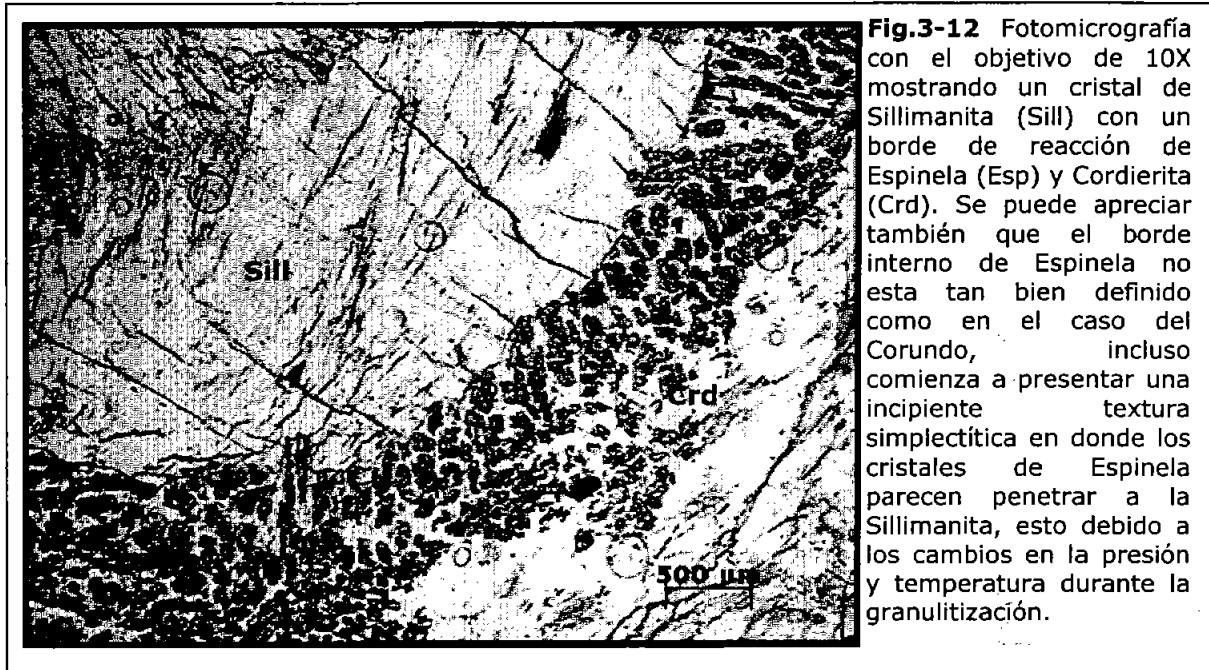


Fig.3-11 Fotomicrografía de un cristal de corundo (Crn) con un objetivo de 10X con luz reflejada a la derecha y con nicoles cruzados a la izquierda, en donde es posible apreciar el borde de reacción de espinela (Esp) y cordierita (Crd), el cual se ve bien definido y es posible diferenciar las dos fases minerales del borde, gracias a sus propiedades ópticas como birrefringencias e anisotropías. Estos bordes son causados como respuesta a los cambios en las condiciones de presión y temperatura P-T durante el levantamiento del enclave o como evidencia de las condiciones extremas durante el metamorfismo.



Se han observado también intercrecimientos de pequeños cristales de forma alargada en los bordes de reacción, mostrando una textura simplectítica; estos crecimientos simplectíticos son pequeños cristales de espinela que parecen penetrar en los cristales de corundo y sillimanita, estructuras que están asociadas y son comunes en metamorfismo de alto grado, especialmente en gneises y granulitas; consisten en una o varias fases minerales generalmente en parejas, las cuales pueden cristalizar de forma simultánea y desarrollar contemporáneamente porfidoblastos que pueden encontrarse en la roca de forma muy extendida, debido a los abundantes y dispersos sitios de nucleación.

Las simplectitas ocurren en una de las dos vecindades de los minerales que están reaccionando, en este caso la cordierita da lugar a la formación de crecimientos de corundo o sillimanita y espinela, dejando solo algunos vestigios de cordierita; los crecimientos simplectíticos y los bordes de reacción en las rocas metamórficas son el resultado de la inestabilidad las asociaciones minerales en la granulita de alto grado, como respuesta al aumento de las condiciones de temperatura Waters, 1991. Durante la ascensión se efectúa la migmatización y se separa los enclaves de restita, por ser el material refractario, del material cuarzo feldespático los fleckigneises. La reacción resultante produce el borde de reacción o los crecimientos simplectíticos de una o las dos fases (espinela, corundo) formando una barrera que aísla las fases en desequilibrio (cordierita, sillimanita).

A continuación se muestran algunas imágenes en donde se pueden observar las características de los bordes de reacción y los crecimientos simplectíticos.

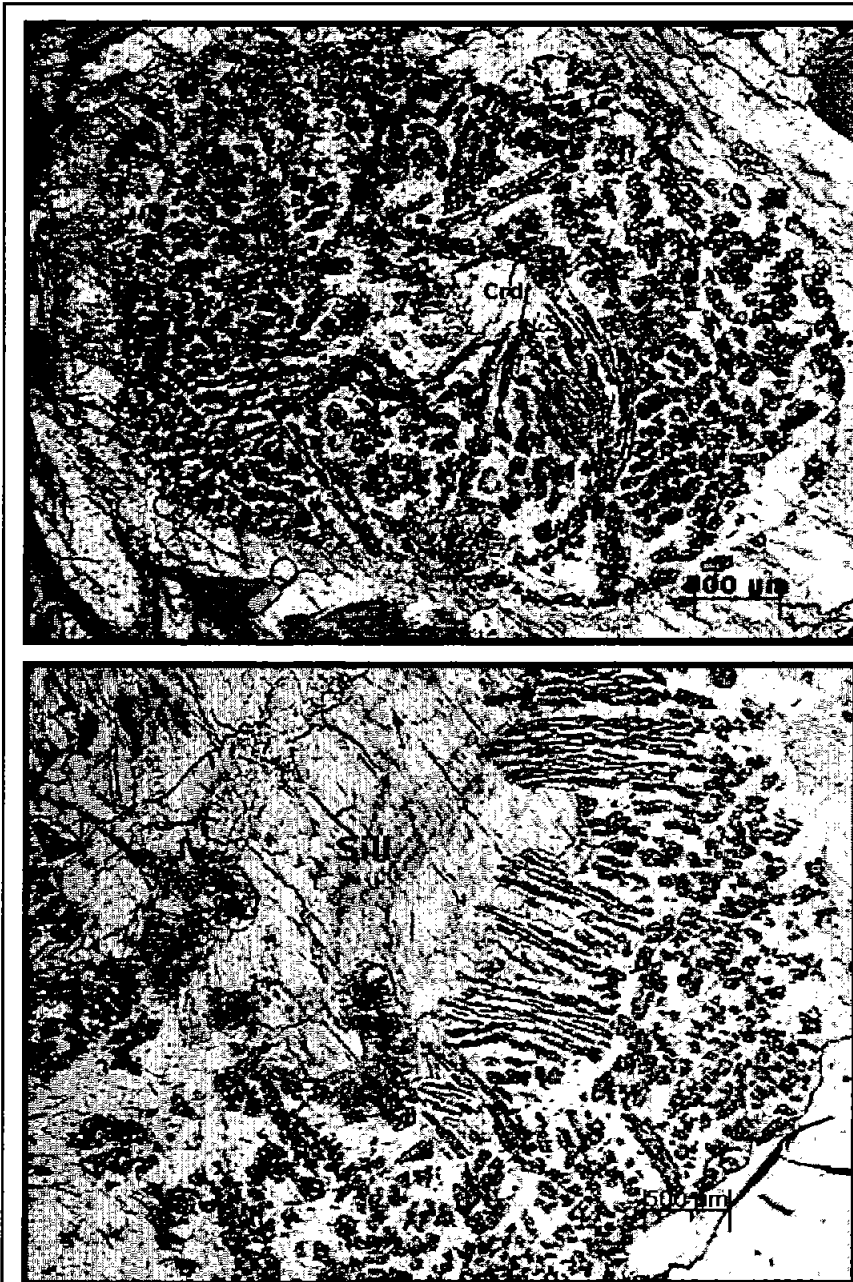


Fig.3-13a Fotomicrografías tomadas con el objetivo de 2.5X y luz reflejada en donde se aprecian importantes crecimientos simplectíticos. En la imagen superior se observa en la parte central un cristal de cordierita (Crd) rodeado de pequeños y alargados cristales de espinela y corundo, absorbiendo casi por completo a la cordierita, en el borde mas exterior se ve a la cordierita (Crd) rodeando todo el conjunto de cristales. En la imagen inferior se aprecian los mismos crecimientos simplectíticos penetrando a un cristal de sillimanita (Sill), es posible decir que estos crecimientos, al igual de los bordes de reacción son producto de un desequilibrio en la presión y la temperatura. La reacción resultante produce el borde de reacción o los crecimientos simplectíticos de espinela, corundo, formando una barrera que aísla las fases en desequilibrio.



Fig.3-13b Fotomicrografías de un cristal de sillimanita, la imagen superior tomada con el objetivo de 2.5X y luz reflejada muestra el borde de reacción y los crecimientos simplectíticos alrededor de un cristal de sillimanita (Sill), se puede observar cómo los pequeños y alargados cristales de corundo (Crn) que están penetrando a la sillimanita en varios lados del cristal esto se aprecia claramente en la parte derecha e inferior de la imagen; el tamaño aproximado de estos crecimientos supera en ocasiones los 500 μ m. La imagen inferior fue tomada con el objetivo de 10X y luz reflejada y representa un acercamiento sobre los crecimientos simplectíticos.

Roca Encajonante "Flecki Gneis"

El término de fleckigneis o gneis manchado se emplea para denotar a las rocas metamórficas con textura foliada, con segregaciones tipo pegmatita, de bordes difusos, formadas por un mosaico de cristales subedrales de cuarzo y feldespato, con grandes cristales poikilíticos sub a euedrales de hornblenda, que son los que le dan el nombre de gneis manchado. Se trata de una potente secuencia de gneises cuarzofeldespáticos (metapsamitas), con varios afloramientos cercanos al poblado de Piedra Imán y en los alrededores de las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios"; se presenta con una estructura masiva, de color blanco, con bandas oscuras al fresco y con un color que varía de gris a beige según lo intemperizado que se encuentre, se aprecia también una textura migmatítica, pudiéndose diferenciar el leucosoma del melanosoma; el primero está compuesto por cristales de cuarzo y feldespato potásico y el melanosoma por cristales de anfíboles (hornblenda) y biotita (fig. 3-14). La secuencia gnéisica se encuentra en algunos casos cortada por cuerpos pegmatíticos de cuarzo y feldespato, con algunas micas en las paredes.



Fig.3-14 Imagen obtenida en un afloramiento cercano a Piedra Imán, producto de un corte en la carretera; se aprecia también una textura migmatítica pudiéndose diferenciar el leucosoma del melanosoma; el leucosoma esta compuesto por cristales de cuarzo, feldespato potásico y hornblenda y el melanosoma por los gneises de biotita.

En lámina delgada se observa una textura granolepidoblástica (migmatítica), el melanosoma y leucosoma, el primero formado por biotita y hornblenda y el segundo por cuarzo, feldespato potásico, (Fig. 3-15), los cristales de feldespato alcalino son considerablemente mas grandes que los de plagioclasa (andesina), además de tener un gran numero de fisuras; la técnica empleada para conocer el tipo de plagioclasa fue el de la macla de albita (Fig. 3-16); además se observa una textura pertítica entre el Feld-K y la plagioclasa.

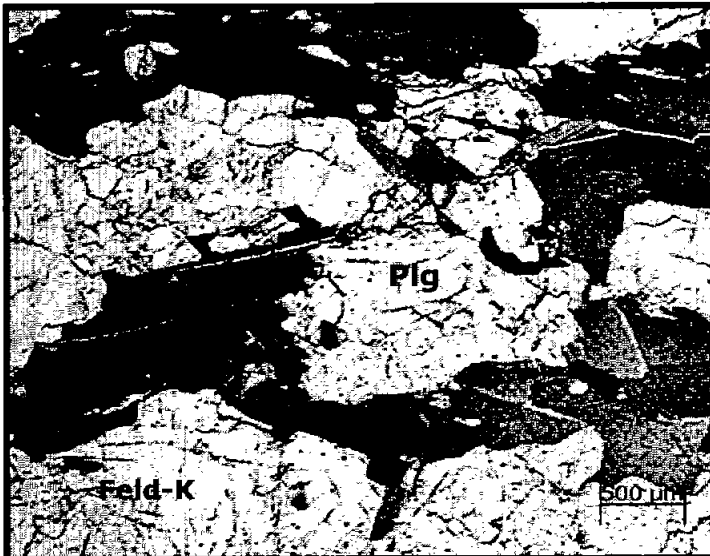
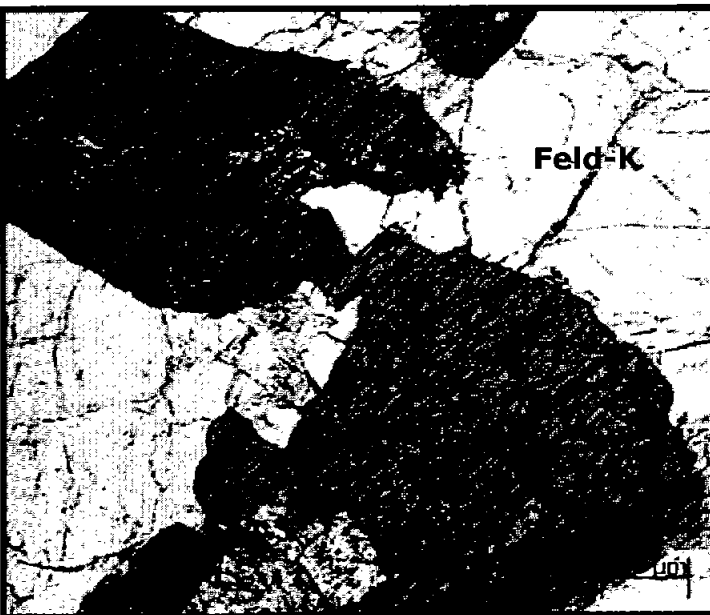


Fig.3-15 Fotomicrografías tomadas con el objetivo de 2.5X y luz paralela. La imagen superior muestra varios cristales de biotita (Bio) dispuestos en una textura lepidoblástica o migmatítica, formando el melanosoma, y cristales de feldespato potásico (feld-k) y plagioclasa (Plg), el feldespato potásico y las plagioclasas están alterándose a minerales arcillosos; una característica especial es que existen numerosas fisuras en las plagioclasas y los feldespatos alcalinos. En la imagen inferior se observa un cristal de hornblenda (Hbl) formando un fenoblasto y plagioclasas y feldespatos potásicos, una característica óptica distintiva de la hornblenda es su fuerte relieve y alta birrefringencia; este mineral es particularmente útil porque es un buen indicador de las condiciones de presión y temperatura a las que estuvo sometido el enclave que la contiene durante el proceso metamórfico.



Como características especiales se observó que los feldespatos potásicos y las plagioclasas tienen una alteración a minerales arcillosos como la sericita. Algunas secciones de cristales de hornblenda se utilizan en el estudio con microsonda debido a que este mineral es un buen indicador geotermobarométrico.



Fig.3-16
Fotomicrografía tomada con el objetivo de 2.5X y nícoles cruzados. En la imagen se puede apreciar la macla polisintética de un cristal de plagioclasa, se puede observar como una cierta alteración de esta a minerales arcillosos posiblemente sericita.

En el total de las muestras analizadas del fleckgneis se observó una asociación mineral correspondiente a rocas metamórficas cuarzofeldespáticas, siendo el feldespato potásico y las plagioclasas las más predominantes con más del 75% del volumen total, siguiéndole los cristales de hornblenda y biotita, por esta razón y de acuerdo con la composición química se utilizó el diagrama **AFK** para representar dichas asociaciones minerales.

La composición química de dichas rocas puede representarse en un sistema de seis componentes:

SiO₂ - Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O - H₂O (sistema KFMSH, Spear 1995) y para este trabajo se utilizó el subsistema **Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O**.

El propósito del diagrama es estimar las condiciones metamórficas a partir de los minerales coexistentes.

En la figura (3-17) se muestra el diagrama **AFK** con las asociaciones más comunes en las rocas metamórficas pelíticas y cuarzofeldespáticas

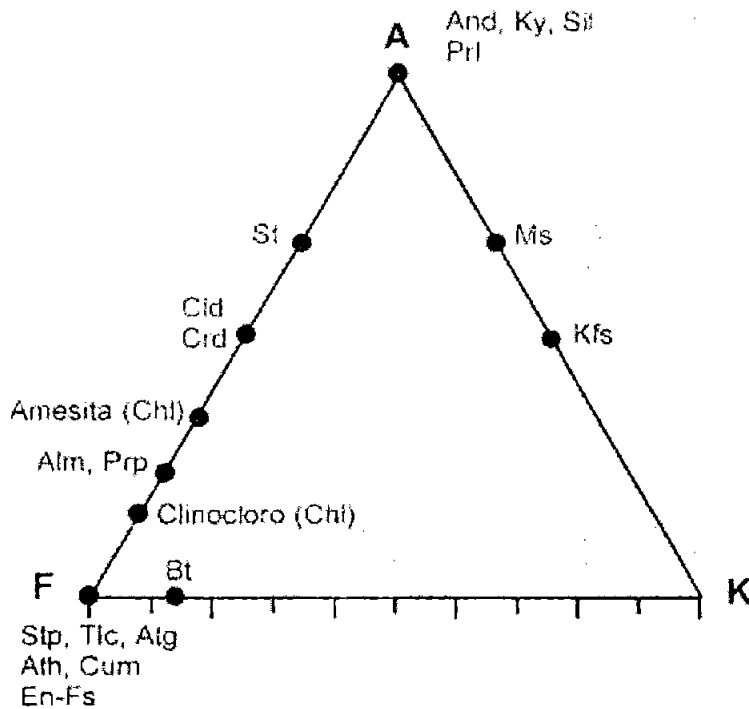


Fig. 3-17 Diagrama **AFK** con representación de los minerales más frecuentes:

- And = Andalucita
- Ath = Antofilita
- Alm = Almandino
- Atg = Antigorita
- Bt = Biotita
- Chl = Clorita
- Cld = Cloritoide
- Crd = Cordierita
- Cum = Cummigtonita
- En-Fs = Enstatita-Ferrosilita
- Ky = Kyanita
- Kfs = Feldespato Potásico
- Ms = Muscovita
- Prl = Pirofilita
- Prp = Piropo
- Sil = Sillimanita
- St = Staurolita
- Stp = Estilpnomelana
- Tlc = Talco

Después de realizar el balanceo químico de las fórmulas minerales con los óxidos más comunes en el subsistema **Al₂O₃ - MgO - FeO - K₂O** y los cálculos aritméticos para poder posicionar al fleckigneis en el diagrama, los resultados se muestran en la figura (3-18).

Las formulas químicas de los minerales encontradas en el fleckigneis son las siguientes:

- Andesina $\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$
- Feldes-K KAlSi_3O_8
- Hornblenda $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$
- Biotita $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$

Las formulas empleadas para el cálculo de la posición de los minerales en el diagrama **AFK** fueron las siguientes:

- $A = \frac{Al_2O_3 - 3K_2O}{Al_2O_3 - 3K_2O + MgO + FeO}$
- $F = FeO$
- $K = K_2O$

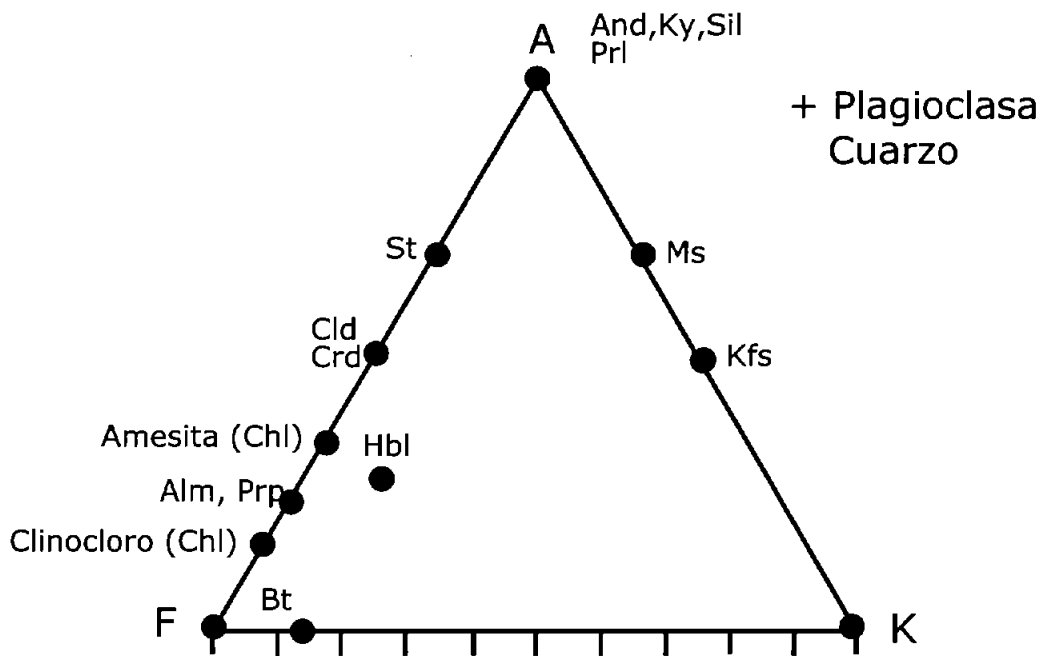


Fig. 3-18 Diagrama AFK mostrando en rojo la posición de los principales minerales componentes del fleckigneis. Feld-K (Kfs), hornblenda (Hbl) y biotita (Bt), y en azul los minerales más frecuentes que se representan en este diagrama.

De acuerdo con la distribución espacial de los minerales en lámina delgada y obedeciendo al criterio según el cual solo los minerales que se encuentran en contacto mutuo puede considerarse como una asociación de minerales coexistentes a la que se le llama paragénesis y que una o mas paragénesis en equilibrio pueden llegar a coexistir en el área de una lamina delgada.

Se definió la siguiente paragénesis:

- Feld-K + Hornblenda + Biotita + Cuarzo + Plagioclasa que nos indica condiciones de una facies de anfibolita asociada a la migmatización.

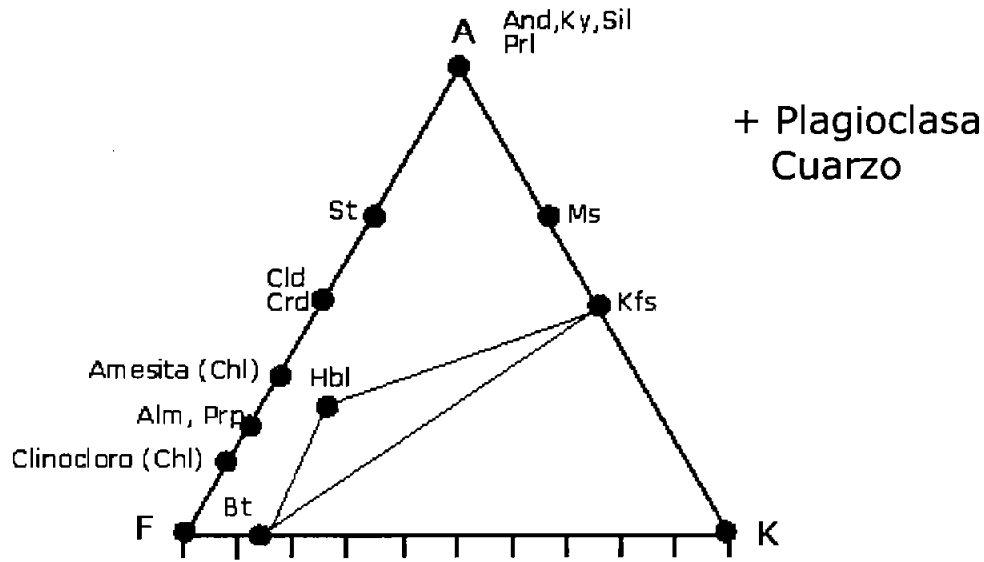


Fig. 3-19 Diagrama AFK mostrando la paragénesis propuesta para el Fleckigneis Feld-K+Hbl+Bt.

De acuerdo con la paragénesis mineral que presentó el fleckigneis, éste se encuentra en la transición entre un gneis y una migmatita, cerca de la anatexis o fusión parcial.

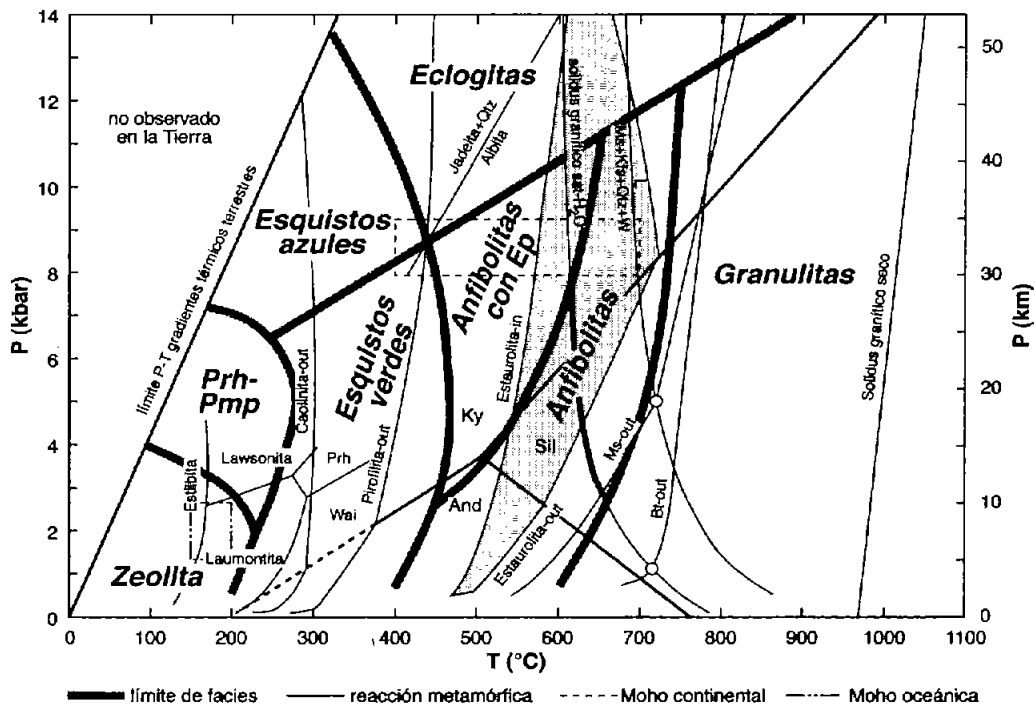
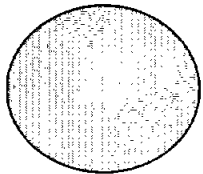


Fig. 3-20 Diagrama Presión vs. Temperatura mostrando los límites de las facies metamórficas, así como las reacciones metamórficas que las acompañan. Abreviaturas: Bt (biotita), L (líquido), Ms (moscovita), Pmp (pumpellita), Prh (prehnita), Qtz (cuarzo), Kfs (feld-K) y Wai (wairakita). En la línea roja se localiza la zona donde se encuentra el Fleckigneis de acuerdo con la paragénesis que presenta. Fuentes del diagrama PT: límites de facies según Spear (1993); reacciones metamórficas para metapelitas tomadas de la parrilla petrogenética de Spear y Cheney (1989); reacciones de Caolinita-out y Pirofilita-out de Bucher y Frey (1994); solidus graníticos de Johannes y Holtz (1996); condiciones PT para las Moho oceánica y continental de Condie (1989). La equivalencia entre presión litostática y profundidad está calculada para una densidad cortical promedio de 2700 kg/m³.



ESTUDIO CON MICROSONDA ELECTRONICA

Este estudio se realizo en la microsonda electrónica de barrido (EPMA), equipo de reciente adquisición por parte del Instituto de Geofísica de la UNAM, a través del Programa UNAM-BID (Banco Interamericano de Desarrollo) fig. 4-1. El equipo es de un alto grado de automatización y es, al momento, *la única microsonda que existe en el país.*

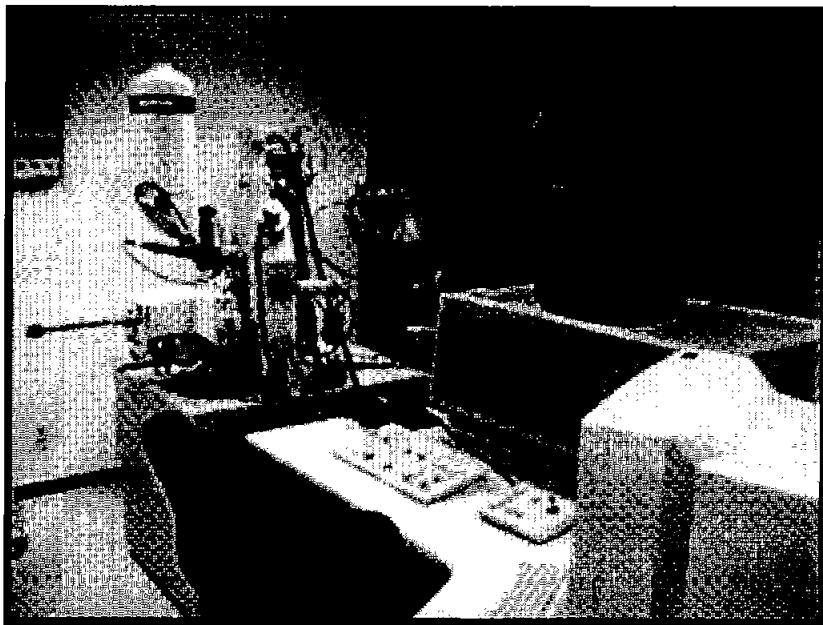
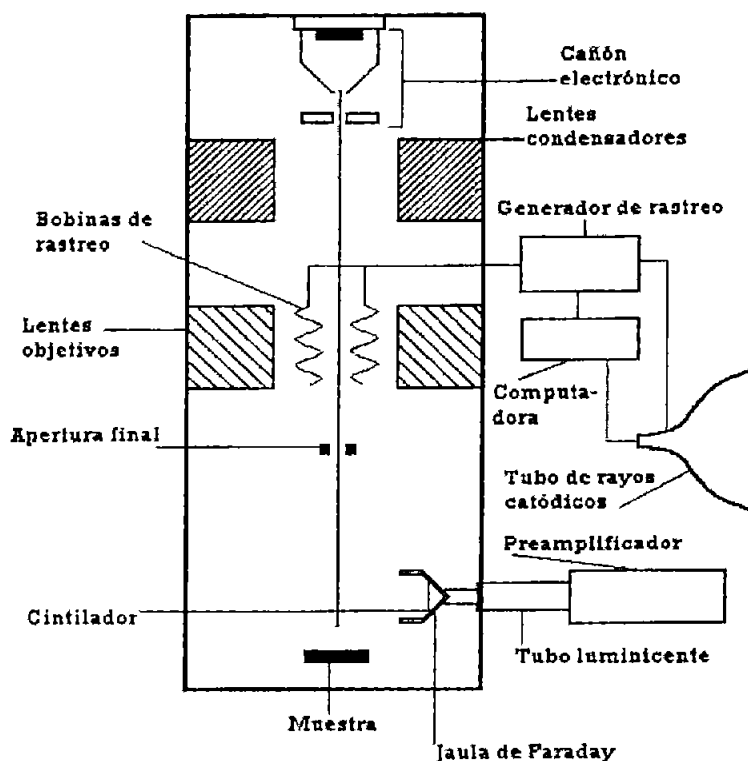


Fig.4-1 Microsonda electrónica de barrido (EPMA) del Instituto de Geofísica de la UNAM modelo JEOL JXA-8900R.

El microscopio electrónico (SEM) de la microsonda permite una magnificación desde 40X hasta 300,000X. Incluye un microscopio óptico con imagen digital desplegable en pantalla que es un auxiliar para lograr un mejor enfoque y búsqueda de campo. El SEM permite obtener imágenes de electrones secundarios con una resolución de 6 nm e imágenes de electrones retrodispersados para obtener imágenes topográficas y composicionales.

Incluye un sistema de cómputo que permite procesar imágenes e información, almacenarla y enviarla al exterior o imprimirla, incluso en calidad de publicación. Mediante esta paquetería se pueden llevar a cabo análisis cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos para los sistemas WDS y EDS. Además, permite la identificación de minerales, materiales, etc. y plasmar sus características en gráficas convencionales de fases minerales y diagramas de rocas.

Esquema de un Microscopio Electrónico de Barrido



(Figura 4-2)

En la figura 4-2 se muestra un diagrama básico de un SEM, donde el cañón electrónico produce un rayo de electrones que es atraído hacia el ánodo; este rayo es condensado por lentes condensadores y enfocado como un punto fino sobre la superficie del espécimen por el lente del objetivo. Un juego de pequeños rollos de alambre, llamados bobinas de rastreo, se localiza dentro del lente del objetivo; los rollos son energizados por un voltaje variante, producido por el generador examinador, creando un campo magnético que desvía el rayo de electrones de un lado a otro con un patrón controlado llamado barrido; el barrido es muy similar al barrido en un receptor de televisor.

Preparación de muestras

Para la realización de este estudio se utilizaron las secciones delgadas que se emplearon en el estudio petrográfico, las cuales no tenían cubre objetos y se pulieron con diamante. Fue necesario seleccionar algunos campos específicos los cuales se marcaron con tinta china al realizar la petrografía. Posteriormente se les aplicó un recubrimiento de grafito (carbón) en aerosol para mejorar la conductividad eléctrica de haz de electrones, como se indica en el trabajo de Linares, 2004.

Resultados Obtenidos

En el presente trabajo se realizó un análisis semicuantitativo y cuantitativo de 6 laminas delgadas, 4 de la restita y 2 del fleckigneis, además de imágenes digitales en escalas de grises y con diferentes atributos de color donde se destacan los elementos más pesados de los más ligeros a través de dichas escalas, como se muestran en las figuras 4-2 a la 4-5

Los resultados se describen en las figuras siguientes:

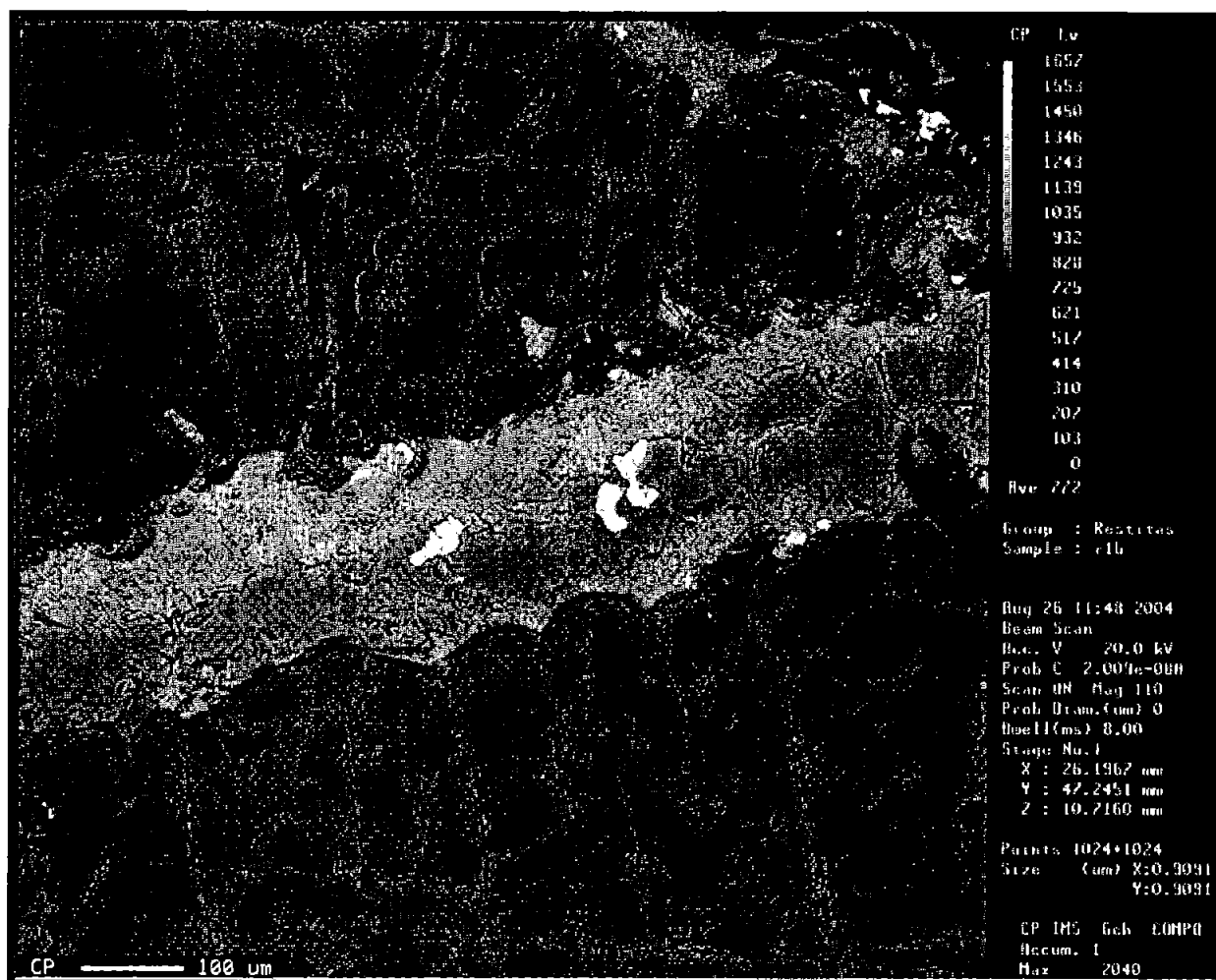


Fig.4-2 Imagen digital obtenida en la microsonda de un campo seleccionado en una muestra de la restita, donde se puede apreciar con detalle el relieve de la lámina mostrando una fisura del corundo rellena de cordierita y espinela, en la parte central de la imagen y otras fisuras mas pequeña en el resto del campo. La escala de grises indicada en la derecha de la imagen sirve para separar a los elementos más pesados de los más ligeros. Este campo fue utilizado para obtener un análisis composicional de los óxidos que lo componen a las fases seleccionadas.

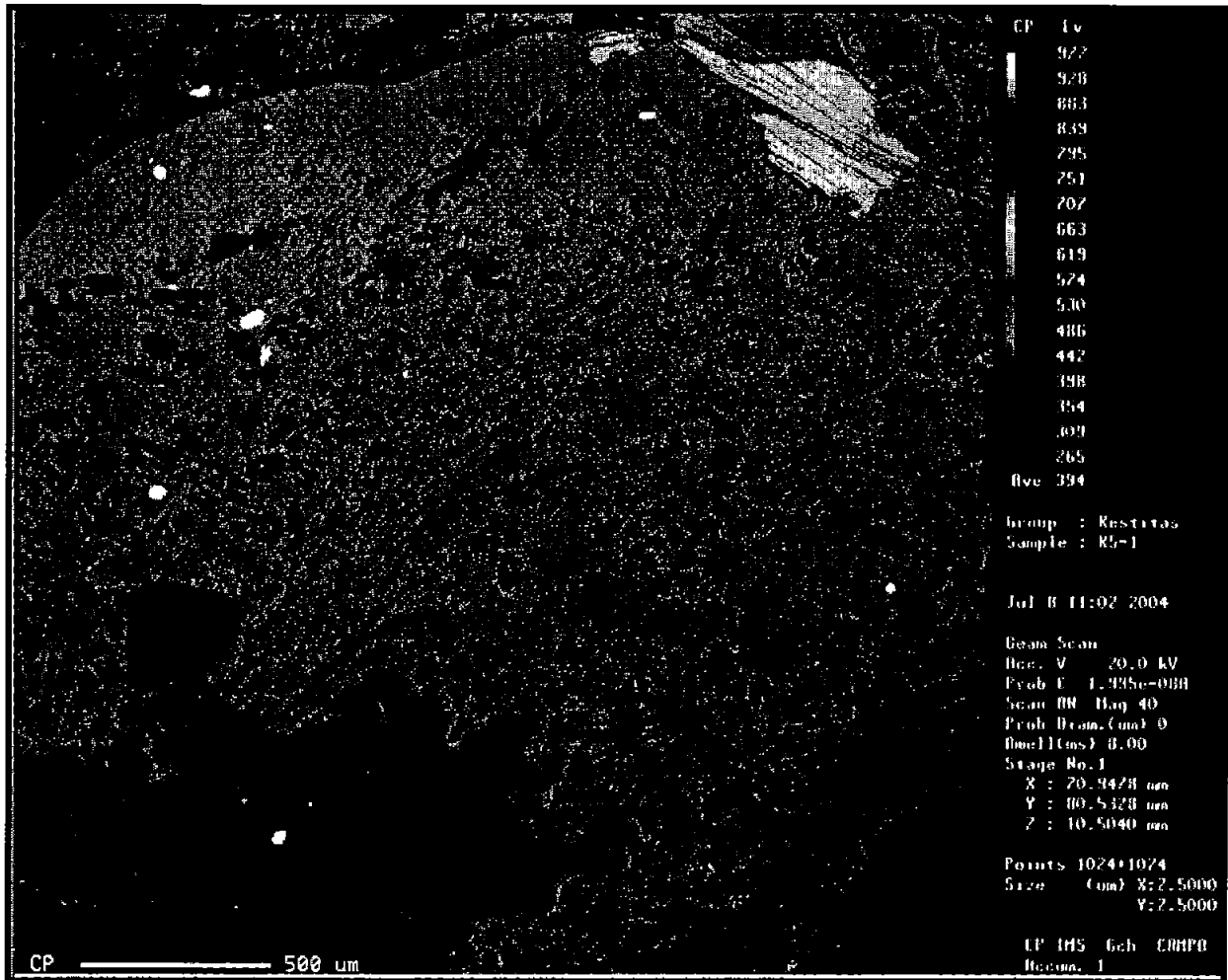


Fig.4-3 Imagen digital obtenida en la microsonda electrónica de un campo seleccionado en una muestra de restita, en donde se puede apreciar un cristal de sillimanita acompañado de varios crecimientos simplectíticos de espinela en color rojo y corundo en color azul oscuro; los atributos de color que presenta la imagen sirven como en el caso de la escala de grises para denotar a los minerales más pesados de los más ligeros. En la parte superior derecha en color amarillo aparece un cristal de biotita, la cual es muy abundante en todas las muestras de la restita. Al igual que la imagen anterior ésta fue utilizada para hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de los óxidos más comunes que la conforman.

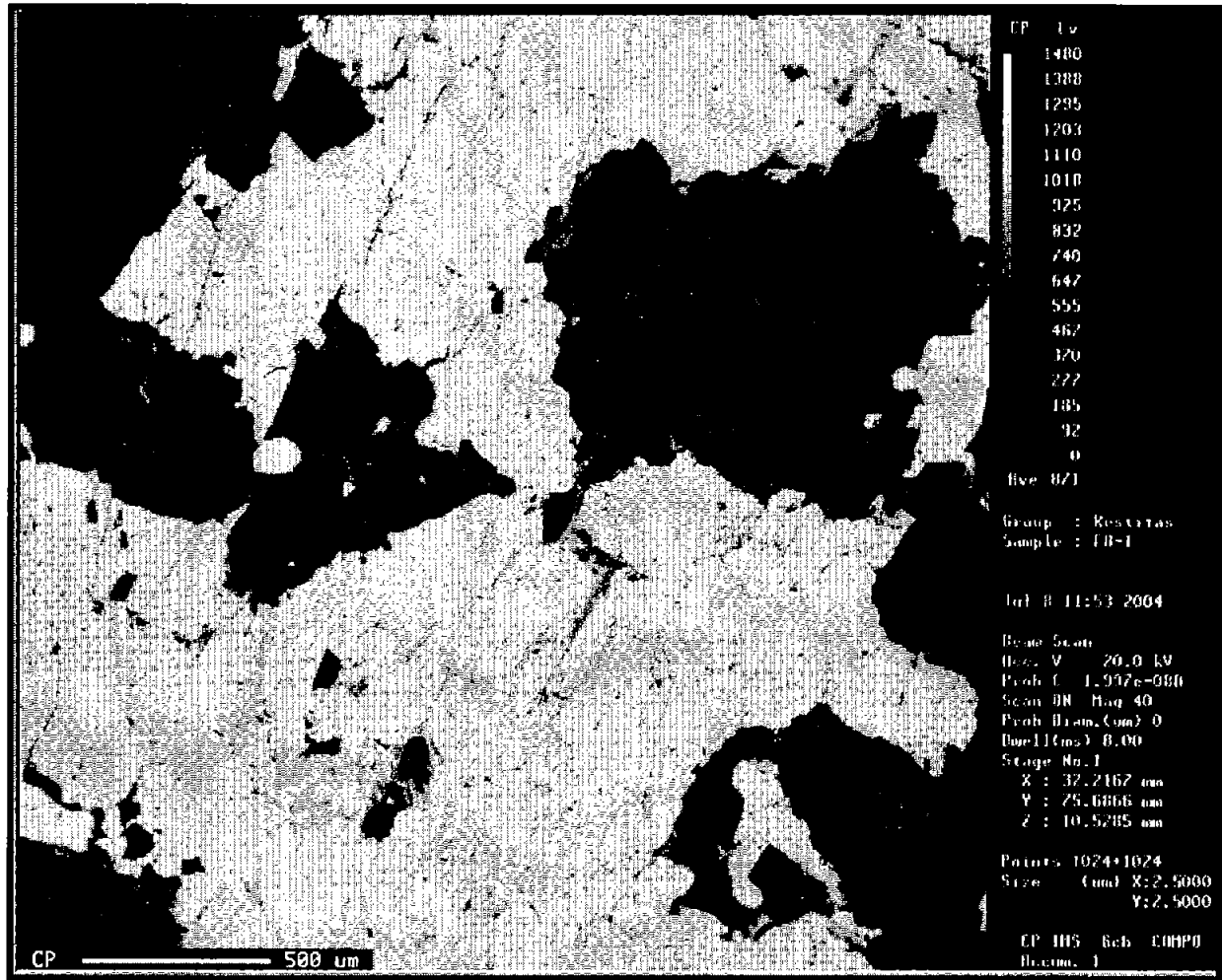


Fig.4-4 Imagen digital obtenida de un campo seleccionado del fleckigneis, donde es posible observar varios cristales de feldespato potásico y plagioclasas en color gris oscuro coexistiendo con varios cristales de hornblenda de color gris claro, se observan también detalles en el relieve del campo en análisis, tales como las pequeñas fisuras en los feldespatos los cuales tienen una tendencia a alterarse a minerales arcillosos; los cristales de hornblenda son muy buenos indicadores geotermobarmétricos, por lo que fueron utilizados como indicadores de las condiciones metamórficas de formación de dichos enclaves. De igual manera que en las imágenes anteriores, la escala de grises sirve para diferenciar los minerales pesados de los ligeros.

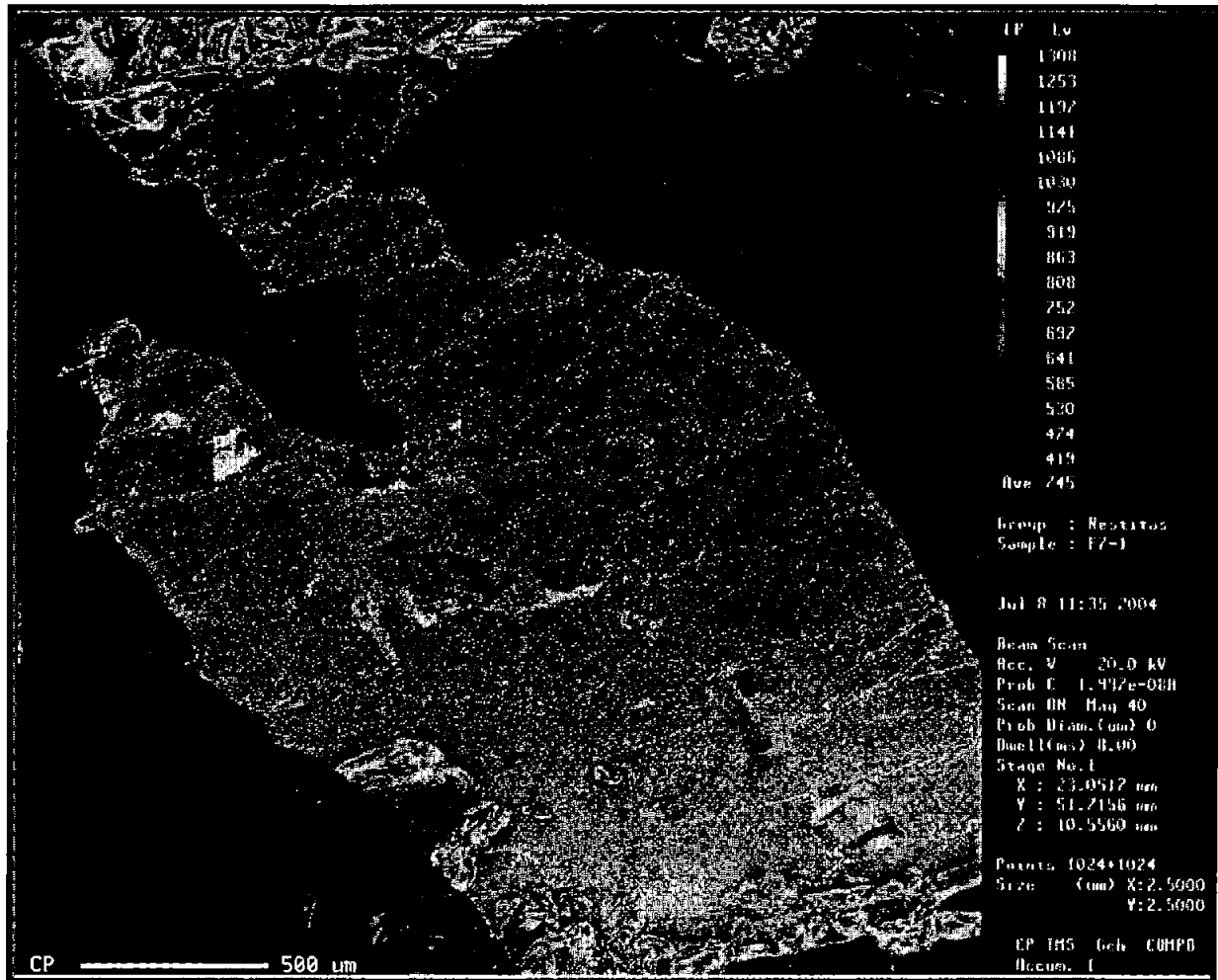
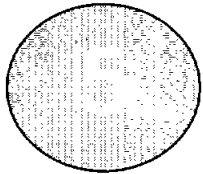


Fig.4-5 Imagen digital obtenida de un campo seccionado de una muestra de fleckigneis donde aparecen varios cristales de hornblenda coexistiendo con cristales de feldspatos y plagioclasas; en esa caso en la parte central de la imagen se observa en color anaranjado brillante una hornblenda y en azul rey los cristales de feldspato y plagioclasa; como detalle adicional es posible observar también la fisuras en la Hornblenda. La escala de colores es equivalente a la de grises y sólo denota el peso de los minerales; por tanto la hornblenda es más pesada que los minerales que la rodean al contener compuestos de Fe y Mg.

Los estudios composicionales se efectuaron analizando en un campo seleccionado de las muestras de restita y de fleckigneis varios puntos contenidos en dicho campo, obteniéndose de esta manera la composición y porcentaje de cada uno de los óxidos contenidos en las muestras; se calculó el promedio de los óxidos más utilizados en estudios petrográficos y en los diagramas ternarios AFM y AFK, se incluye también el promedio del óxido de Zinc, ya que es muy importante para la definición de las condiciones de formación de la restita; esto se discute en el capítulo siguiente y los resultados se vaciaron en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Análisis cuantitativo de cordierita, espinela y hornblenda en las muestras analizadas.

	muestra	Al ₂ O ₃ %	MgO %	FeO %	K ₂ O %	ZnO %
Cordierita	R-1b	54.391	23.345	23.198	0.004	0
Espinela	R-3	60.119	9.793	27.798	0.006	2.011
Espinela	R-5	60.631	9.192	26.715	0.005	1.944
Espinela	R-7	64.084	11.159	26.614	10.117	1.365
Hornblenda	F-7	9.963	4.005	21.424	1.550	0
Hornblenda	F-8	16.593	0.909	35.033	0.272	0



ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se interpretan los resultados obtenidos en los estudios petrográfico y con microsonda electrónica (SEM) para la restita y el fleckigneis con el propósito de conocer sus características petrológicas y sus condiciones de formación.

En campo la restita se clasifica como un enclave metamórfico con una estructura masiva y una tendencia a formar un cuerpo lenticular, una textura porfidoblástica, con una mineralogía compuesta por cristales de corundo y sillimanita, inmersos en una matriz de biotita, sin algún orden particular. El fleckigneis muestra en los afloramientos más sanos una estructura masiva en bloques, con una textura lepidoblástica y una mineralogía predominante de cuarzo y feldespato potásico con cristales de biotita y hornblenda dispuestos en delgadas bandas, dándole un aspecto moteado. Para una clasificación más precisa se emplearon los datos de la petrografía y geoquímica de ambas rocas, donde es posible apreciar con mayor claridad las texturas, paragénesis, composición química, así como los procesos geológicos que dieron origen a la restita y el fleckigneis, siendo este último la roca encajonante de la restita.

Del estudio petrográfico y con microsonda se puede apreciar lo siguiente:

Se observó una textura porfidoblástica resaltando por su tamaño y geometría los cristales de corundo y sillimanita, ambos inmersos en una matriz de biotita, siendo la sillimanita un indicador de alta temperatura y de condiciones de baja a alta presión. Se observó también en estos dos minerales varias estructuras similares a coronas o bordes de reacción y numerosos crecimientos simplectíticos, estas estructuras están formadas por cristales de espinela y en el caso de la sillimanita o cordierita por corundo, en algunos casos la espinela rodea por completo a los cristales de corundo y sillimanita, dando la impresión de ser absorbidos por la corona o borde y, en otros casos sólo se presenta como un incipiente borde formado por pequeños cristales de espinela; estas estructuras son comunes y están asociadas a enclaves metamórficos de alto grado especialmente en gneises o granulitas y denotan un metamorfismo retrógrado, con una tendencia a cristalizar en sentido contrario a las manecillas del reloj en sentido antihorario, este aspecto se observa mejor en un diagrama P-T que muestra las facies metamórficas; estas estructuras pueden cristalizar al mismo tiempo que los porfidoblásticos, generalmente están formadas por pares de minerales, siendo en este caso por espinela y cordierita y pueden encontrarse en la roca de forma muy extendida, debido a los muchos y dispersos sitios de nucleación.

Estas estructuras se forman debido a la inestabilidad en las condiciones de presión y temperatura, básicamente a una declinación en la presión provocada por una rápida ascensión del enclave, lo que es indicativo de que la restita empezó a cristalizar mientras el lugar donde se emplazó comenzó a ser levantado, que en este caso es la parte inferior o la base del Complejo Xolapa en los inicios de su exhumación.

La paragénesis encontrada en esta roca **Crn + Sill + Esp + Crd** permite ubicarla en un diagrama de facies metamórficas en la zona de Facies de Granulita con unas condiciones de formación de altas temperaturas y presiones en un rango de 650 - 850 °C y de 4.5 - 7 Kbar y a una profundidad aproximada de 18 a 22 Km. Los resultados del análisis con Microsonda de los óxidos más comunes en la restita fueron graficados en el software TriDraw 4.0 en un diagrama ternario, en este caso el diagrama AFM, arrojando una posición similar a la propuesta en el mismo diagrama, construido con los datos encontrados en el estudio petrográfico para cada muestra de la restita analizada con el SEM; esto se aprecia mejor en la figura 5-1, donde se hace una comparación de ambos diagramas y se pueden observar sus similitudes, coincidiendo ambos en que la facies metamórfica es la de Granulita.

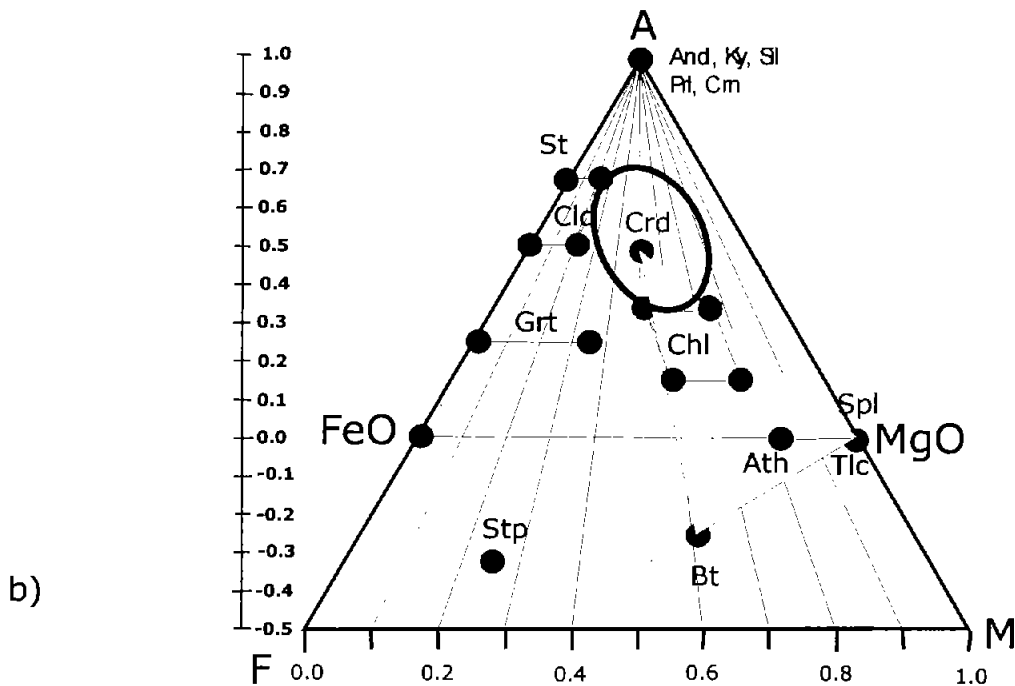
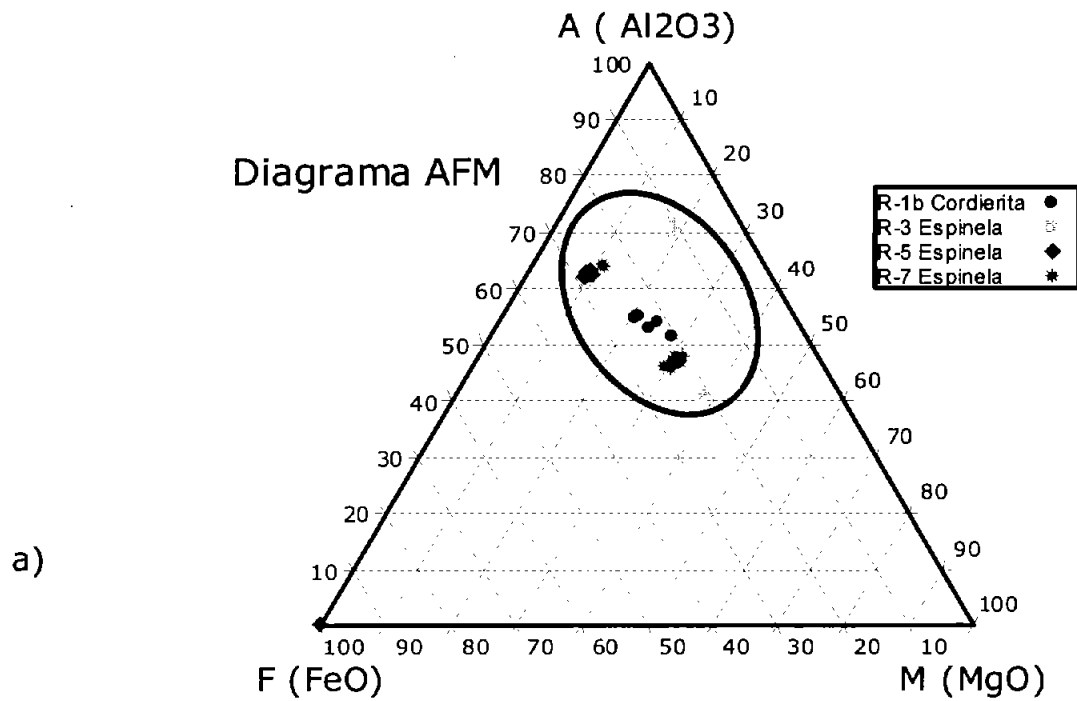


Fig. 5-1 Diagramas AFM mostrando los resultados obtenidos en ambos estudios, con microsonda electrónica (a) y petrográfico (b); en ambos se pueden apreciar en los óvalos rojo y azul la similitud en la posición de los minerales encontrados, coincidiendo por su paragénesis en equilibrio en la facies metamórfica de Granulita.

El estudio composicional realizado con la microsonda electrónica además de ayudar a ubicar a la restita en un diagrama de facies metamórficas, arrojó un dato interesante, la variedad de espinela encontrada en la restita resulto ser hercynita con pequeñas cantidades de zinc (alrededor de un 2%) representado por óxido de Zinc (ZnO) lo cual tiene importantes implicaciones en las condiciones de formación de la restita y los procesos en la corteza que le dieron origen (Waters 1991).

La paragénesis común con la que está asociada la hercynita son cordierita, cuarzo, y sillimanita y es un diagnostico contundente de alta temperatura y presiones medias a altas en facies de granulita a profundidades de más de 20 Km en la corteza, un factor importante es que la hercynita se encuentra formando coronas o bordes de reacción como los anteriormente descritos, coronas que indican un metamorfismo prógrado, la hercynita y corundo remplazan a la cordierita La temperatura y presión promedio a la que se encuentra comúnmente la hercynita es de 750 – 850 °C y de 3.5 – 6.5 Kbar.

Un posible escenario en donde la restita pudo haberse formado es un margen convergente de placas tectónicas, cercano a una zona de subducción o arco magmático, donde al estar una placa subduciendose debajo de otra se provoca un levantamiento de la placa superior y al mismo tiempo un adelgazamiento de la corteza debido a la erosión por subducción (Morán Zenteno-Tolson-Jones 1996-1998); este adelgazamiento se produjo en la zona más próxima al manto, siendo este lugar donde se generó la restita con condiciones de anatexis o fusión parcial, como se aprecia en la figura 5-2.

Lo anterior indica que la restita se generó a una profundidad cercana a los 20 Km, en un ambiente tectónico de arco magmático como lo fue el Complejo Xolapa y comenzó a enfriarse cuando éste inició su rápido levantamiento y exhumación, emplazándose en la secuencia gnéisica donde también fue exhumada hasta quedar expuesta, en donde ahora se encuentran los afloramientos minas "El Milagro" y "El Poder de Dios" en Piedra Imán.

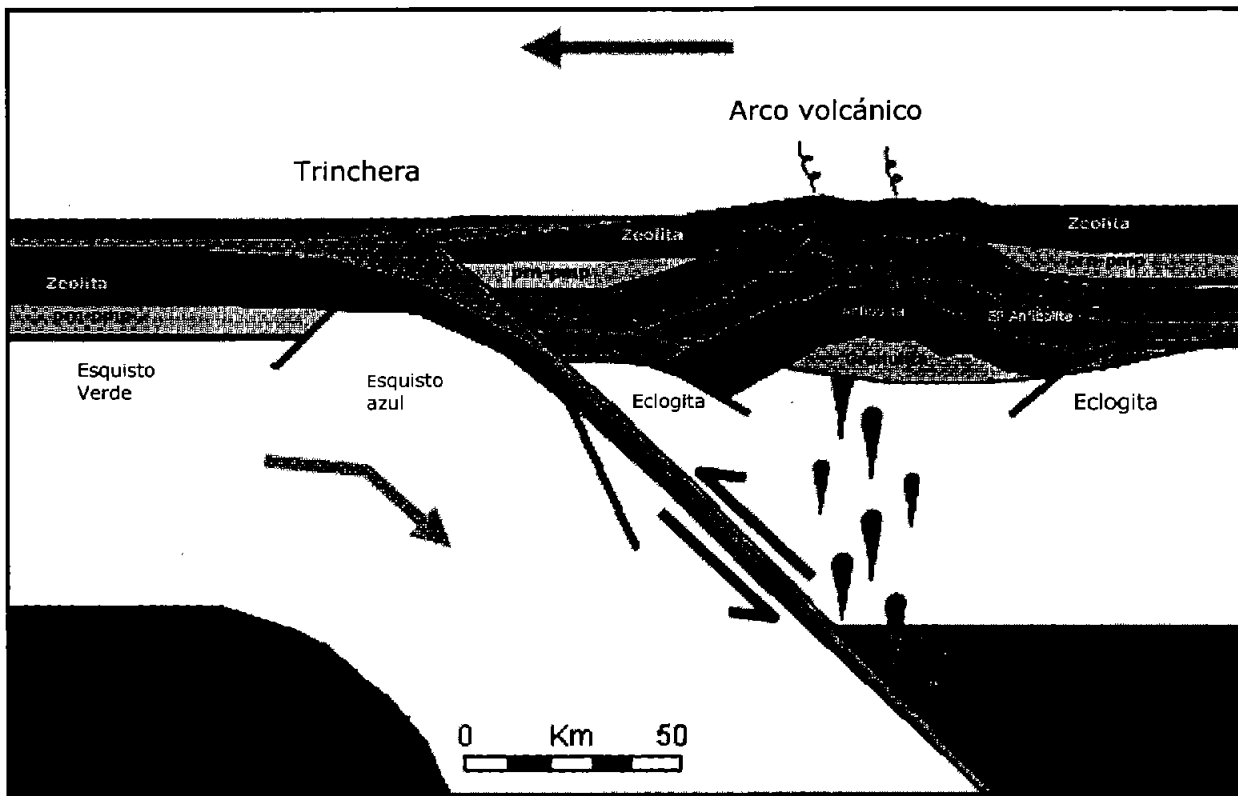


Fig.5-2 Sección esquemática mostrando la distribución de la facies metamórficas en una zona de subducción y en un arco magmático; las facies de alta P-T se encuentran en la zona de subducción, mientras que las de media y baja P-T se localizan en el arco, este lugar es donde posiblemente se formó la restita.

Comparación entre las minas El Milagro y El Poder de Dios con los enclaves Squares Area, Madagascar y Namaqualand, Sudáfrica

Resulta muy interesante hacer una comparación entre este enclave metamórfico con otros en condiciones similares de formación en otras regiones del planeta, para conocer sus similitudes en cuanto a sus orígenes y paragénesis. En este caso los enclaves con los que se hace la comparación son: Squares Area en Madagascar y Namaqualand en Sudáfrica.

El complejo ubicado al sur de Madagascar en Squares Area pertenece a la formación Androyan con un alto grado de metamorfismo, y su principal paragénesis la constituyen hercynita + cordierita + cuarzo y esta contenida en gneises graníticos y cuarzofeldespáticos; este enclave se formó a una temperatura de 800 °C y de 5 a 5.5 Kbar de presión (Nicollete 1985-1990 en Waters, 1991), fue datado por medio de U/Pb y arrojó una edad Precámbrica de 561 ± 12 Ma y experimentó un enfriamiento isobárico o que lo llevo a entrar en el campo de la sillimanita-cuarzo.

Este enclave mostró también bordes y coronas de reacción formadas por cordierita adyacentes al cuarzo.

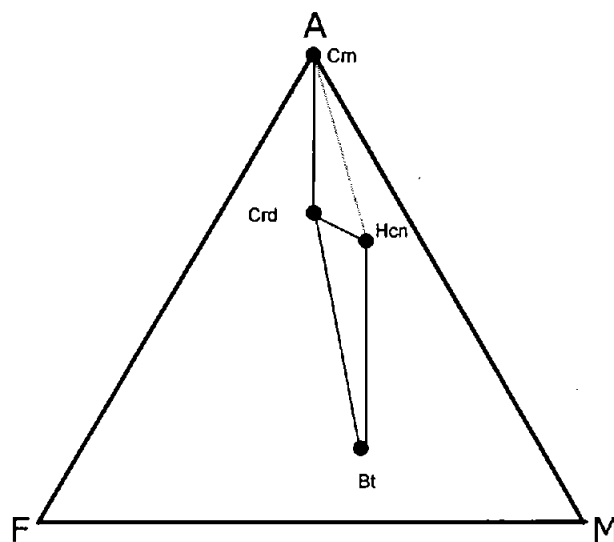
El segundo enclave con el que se hace una comparación se encuentra distribuido en la subprovincia de Bushmanland, en la provincia de Namaqualand, Sudáfrica, a la que se le asigna una edad del Proterozoico medio (Waters 1991) y consiste en gneises graníticos y cuarzofeldespáticos, metabasitas, metacuarcitas y rocas carbonatadas metamorfoseadas en facies de granulita y su paragénesis principal consta de sillimanita + biotita + cuarzo + Espinela + Cordierita con unas condiciones de formación de 540 a 660 °C y una presión de 3 a 4 Kbar; otra característica es que también presenta bordes de reacción de Cordierita.

Como ya se ha expuesto las asociaciones paragenéticas y las condiciones de formación de estos dos enclaves son muy parecidas a las de la restita analizada en este trabajo; la diferencia radica solo en la edad ya que la restita de nuestra área, tiene una edad aproximada que va del Jurásico tardío al Cretácico temprano en cambio estos dos enclaves son mucho más antiguas, pertenecen al Precámbrico.

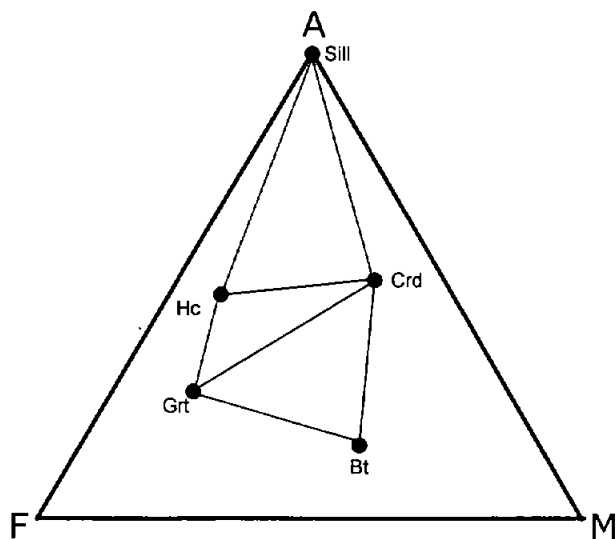
A continuación se muestra una tabla con las características más importantes de los tres enclaves (tabla.5-1) así como los diagramas ternarios de las paragénesis en equilibrio de cada uno de ellos (fig.5-4)

Tabla 5.1 Comparación de la paragénesis y condiciones de formación propuesta para la restita de Piedra Imán con dos de terrenos precámbricos.

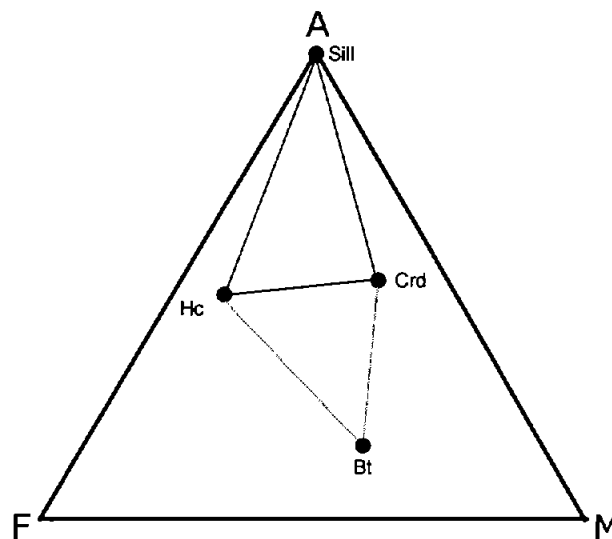
	El Milagro y El Poder de Dios	Squares Area	Namaqualand
Paragénesis	Corundo Sillimanita Hercynita Cordierita Biotita	Hercynita Cordierita Cuarzo Granate Biotita	Sillimanita Biotita Cuarzo Hercynita Cordierita
Temperatura	650 - 850 °C	800 °C	540 - 660 °C
Presión	4 - 6 Kbar	5 - 5.5 Kbar	3 - 4 Kbar
Bordes	Hercynita-Corundo	Hercynita	Hercynita
Edad	Cretácico temprano	Precámbrico	Proterozoico
Localización	Terreno Xolapa	Madagascar	Sudáfrica



**El Milagro y
El Poder de Dios**



Squares Area



Namaqualand

Fig. 5-4 Diagramas ternarios mostrando las paragénesis en equilibrio de los tres enclaves comparados en ellos se aprecian algunas similitudes en la posición en los diagramas de las paragénesis. Crn = corundo, Sill = sillimanita, Esp = espinela, Hc = hercynita, Crd = cordierita, Grt = granate y Bt = biotita.

Para el fleckigneis el cual resultó ser la roca encajonante de la restita, se observó una textura foliada constituida por delgadas bandas y pequeños agregados cristalinos poikilíticos de biotita y hornblenda, siendo estas constituyentes del melanosoma, embebidos en una matriz de cuarzo, feldespato potásico, y plagioclasas (leucosoma); la variedad que se encontró de plagioclasas es la andesina, cabe mencionar que los feldespatos y plagioclasas forman una textura pertítica en donde las plagioclasas están embebidas en cristales de Feldespato potásico, y es indicativa de un origen por transformación desde otros polimorfos de más alta temperatura como la ortosa que es común en rocas plutónicas, en gneises y esquistos los cuales tuvieron un lento enfriamiento, el cual pudo haberse efectuado mientras este enclave estaba siendo exhumado hasta su posición actual; los feldespatos potásicos y plagioclasas se están alterando a minerales arcillosos como la sericita, también es importante mencionar que el fleckigneis se encuentra en contacto gradual con la migmatita y que el contacto franco entre la restita y la migmatita no se pudo localizar de forma directa debido a que se encuentran cubiertos por una espesa capa de aluvión y vegetación, por lo que dichos contactos son graduales o se infirieron.

Las condiciones de formación de esta roca fueron propuestas gracias a su paragénesis de cuarzo + andesina + feld-K + biotita + hornblenda la cual lo sitúa en un diagrama de facies metamórficas en la línea de solidus granítico saturado de agua, con condiciones de presión y temperatura de alrededor de 650 a 800 °C y 4 a 6 Kbar.

Las posibles aplicaciones de la restita y de sus minerales más representativos como el corundo y la sillimanita son pocas, pues los cristales de corundo con calidad de gema se forman en otro tipo de yacimientos, como son las pegmatitas de donde proceden el rubí el cual es la variedad roja del corundo y el zafiro variedad azul del mismo; en el caso de los corundos de la restita su arreglo cristalino no corresponde al de un cristal con calidad de gema y los pocos que pudieron haber existido ya han sido extraídos de las minas, según comunicación personal con el dueño de las mismas y que hasta la fecha no se han encontrado ejemplares con esa misma calidad; un factor que disminuye la calidad de los cristales como gemas es la presencia de los bordes de reacción y los crecimientos simplectíticos, los cuales van remplazando al corundo dejando en ocasiones solo vestigios del mismo.

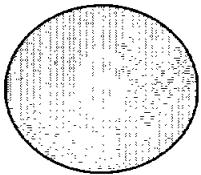
El corundo se emplea fundamentalmente como abrasivo para pulido, en todo tipo de procesos industriales, debido a su gran dureza, 9 en la escala de Mohs, solo por debajo del diamante, a su elevado punto de fusión 1950 °C y a la forma de sus granos, controlada por la partición perfecta que llegan a tener y que facilita esta aplicación; por otra parte el esmeril es un abrasivo de menor calidad

que se utiliza fundamentalmente como aditivo en revestimientos como antideslizante, lo cual sería la mejor aplicación del los corundos de la restita. Zimbabwe y la Republica de Sudáfrica son los principales productores a nivel mundial de corundo mientras que Turquía y Grecia lo son de esmeril, mientras que las variedades de tipo gema so extraídos de aluviones en Sri Lanka, Birmania y Tailandia entre otros.

Mientras que la sillimanita al ser un neosilicato de aluminio del que se obtienen cerámicas refractarias especiales que se utilizan en la industria metalúrgica como revestimiento de hornos y moldes; en ocasiones este mineral tiene ejemplares de calidad gema que no son de origen metamórfico sino hidrotermal. El principal productor de Sillimanita es la India.

Por lo tanto las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios" no tienen importancia minera representativa, ya que se encuentran muy explotadas y no existe infraestructura que permita su reexplotación por tratarse de cuerpos de poco volumen.

Por último el fleckigneis y la restita se representaron en el mapa geológico construido en el presente trabajo.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La restita con corundo y sillimanita es un pequeño enclave metamórfico de alto grado en facies de granulita, con dos afloramientos tipo, ubicados en las minas "El Milagro" y "El Poder de Dios", cerca del pueblo de Piedra Imán, Estado de Guerrero.
- La paragénesis encontrada fue de cristales de corundo y sillimanita de algunos milímetros hasta 5 centímetros de tamaño, los cristales de corundo presentan un borde de reacción constituido por cristales de hercynita.
- Se observaron crecimientos simplectíticos de espinela y corundo, remplazando a cordierita y como bordes de sillimanita, formados básicamente por un desequilibrio en la geopresión durante su cristalización que corresponde a una facies de granulita.
- Las condiciones de formación de la restita corresponden a la base de un arco magmático, a una temperatura que osciló en los 650 a 850 °C, con una presión de 4 a 6 Kbar, esto corresponde a una profundidad cercana a los 22 Km.
- La posible evolución de este enclave metamórfico se realizó en los inicios de la exhumación del Complejo Xolapa; la restita se separó del material original al que pertenecía, como un producto refractario de la fusión parcial y se emplazó en la secuencia gnéissica, donde comenzó a enfriarse y cristalizar mientras era levantada hasta su posición actual; el material original de donde se originó la restita pudo ser una metapsamita con alto contenido de arcillas y algunos horizontes cuarzofeldespáticos.

- La roca encajonate de la restita es una potente secuencia de gneises cuarzo feldespáticos denominada fleckigneis o gneis manchado debido al aspecto moteado que presenta, provocado por las delgadas bandas y pequeños agregados cristalinos de biotita y hornblenda; este tipo de roca corresponde a una migmatita con una textura foliada.
- La paragénesis encontrada para el fleckigneis fue de cuarzo, feld-K, andesina, hornblenda y biotita, situándolo en un diagrama de facies metamórfica en las cercanías de la línea de solidus granítico saturado de agua, a una temperatura aproximada de 650 a 800 °C y una presión de 4 a 6 Kbar aunque esta puede tener grandes variaciones dependiendo de la profundidad.
- La importancia de este enclave es el registro de una localidad con cristales de corundo de dimensiones megascópicas, con posibilidades de ser utilizado en algún proceso industrial como esmeril natural, mientras que la sillimanita lo puede ser en la elaboración de cerámicas de alta resistencia, como revestimientos en hornos y moldes.
- El fleckigneis puede ser explotado también como roca dimensionable. Como carácter específico, hay que señalar el hecho de que sea una roca bandeada lo que afecta su instalación en obra y su aprovechamiento, que estará controlado por este factor; por lo tanto solo se emplea en fachadas; la dificultad para realizar este proceso es que existen muy pocos afloramientos sanos que permitan la extracción de bloques comerciales sin provocar daños considerables a la roca.
- ✓ Se recomienda la realización de un estudio económico para evaluar las posibilidades mineras de los afloramientos de la restita y la posibilidad de reactivarlas de manera formal a pesar de ser enclaves muy pequeños, así mismo las canteras de granito y fleckigneis pueden funcionar como rocas dimensionables, creando y activando de esta manera una fuente de empleo para las personas que viven en Piedra Imán y poblados circundantes, evitando así el gambusinaje, actividad que se ha venido desarrollando en los últimos años.
- ✓ Se recomienda también la búsqueda y localización de afloramientos con condiciones y paragénesis similares en los terrenos donde existan facies de granulita, con el fin de enriquecer el conocimiento de la geología local y regional de la parte sur sureste de la República y poder conocer su origen y evolución, además de sus potenciales mineros.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALANIZ-ALVAREZ, S. y F. ORTEGA. 1997. "Geología y Petrología del Complejo Xolapa, barranca de Xolapa, estado de Guerrero". Boletín de Mineralogía de la sociedad Mexicana de Mineralogía, V. 13, No. 1 p. 3-32.
- BARKER, A.,J. 1990. Introduction to Metamorphic Textures and Microestuctures. University of Southampton. United Kingdom.
- BÖHNEL, H., et. al.1989. "Paleomagnetic data and the accretion of the Guerrero Terrane, southern Mexico continental margin, in Hillhouse, J. W., ed., Deep structure and past Kinematics of accreted terranes": American Geophysical Union Monograph 50. p. 73-92.
- CAMPA, M., F. and CONEY, P., J. 1983. "Tectonostratigraphic Terranes and mineral resources distribution in Mexico". Canadian Journal of Earth Sciencies. V. 20. p. 1040-1051.
- CEPEDA, D., LEOVIGILDO.1985. Apuntes de Petrología Metamórfica. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Dpto. de Yacimientos Minerales. 1ª. Edición. P. 179-227.
- CSERNA, Z. de. 1965. "Reconocimiento Geológico de la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Edo. De Guerrero". UNAM. Instituto de Geología vol. 62. p. 77.
- CHAPPELL, B., W. et. al. 1987. "The Importance of Residual Material (Restite) in granite petrogenesis". Journal Petrology. Vol.28. p. 1111- 1138.
- CORREA, MORA, FRANCISCO. 1997. Estudio Petroológico y Geoquímico del Complejo Intrusivo de Xaltianguis, Guerrero, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- COREMI. "Monografía Geológico Minera Del Estado De Guerrero".
- DIDIER, J. and BARBARIN, B. 1991. "Restites in granite enclaves" Cap. 27. Enclaves and granite petrology. edit. Elsevier science publishers.
- INEGI, Carta Topografica Xaltianguis, Gro. E14C47 esc. 1:50,000.
- LINARES, CARLOS. (inédito). 2004. "Apuntes sobre la microsonda electrónica del laboratorio universitario de petrología (LUP) Instituto de Geofísica de la UNAM".
- MORAN, ZENTENO, D., J. 1992. Investigaciones isotópicas de Rb-Sr y Sm-Nd. En rocas cristalinas en la región de Tierra Colorada-Acapulco-Cruz Grande, Edo. De Guerrero. Tesis Doctoral.
- MORAN, ZENTENO, P. Corona-Chávez, G. Tolson. 1996. "Uplift and subduction erosion in southwestern, Mexico since the oligocene: pluton geobarometry constrains". Earth and planetary science letters. 141. p. 51- 65.
- MOORE, J., C, WATKINS, J.S., SHIPLEY,T.H.,McMILLEN.K.C. BACHMAN, S.B., y LUNDBERG,N. 1882. "Geology and tectonic evolution oe a juvenile accretionary along a truncated convergent margin: Syntesis of resulst from the Irg 66 of the Deep Sea Drilling Projet,Southern Mexico, Geol. Soc. Am". Bull. 93 p. 847-861.

- ORTEGA, GUTIERREZ F., 1981. "Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonics significance". *Geofísica Internacional*. V.20 p. 177-202.
- PRESNAL y BEATMAN, 1973. en CHAPPELL, B., W. et. al. 1987. The Importance of Residual Material (Restite) in granite petrogenesis. *Journal Petrology*. Vol.28. p. 1111- 1138.
- RAISZ, ERWIN., 1964. "Landforms of Mexico: Cambridge, Mass, Physiographic Geography Branch of The Office of Natural Research", escala 1:3´000,000
- SABANERO, SOSA. 1990. Carta Geológica de Chilpancingo esc. 1:200.000
- SCHAAF, .P. et. al. 1995. "Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence". *Tectonics* No. 5, V. 14, p. 1339-1350.
- SHUMANN, W. 1992. Minerals of World. Sterling publishing Co Inc. N.Y.
- SPEAR, S., FRANK. 1995. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature- time paths. Edit. Mineralogical Society of America. Washington D.C. USA.
- TOLSON, G., SOLIS PICHARDO, MORAN ZENTENO, VICTORIA MORALES. 1997. "Naturaleza Petrográfica y Estructural de las Rocas Cristalinas de Sta. Ma. Huatulco, Oax". *Contribuciones al estudio del Circumpacífico*". Unión Geofísica Mexicana
- VICTORIA MORALES. y BAEZ, LÓPEZ, J., A., 2002. "Corundo de la Mina el Milagro, Piedra Imán, Gro". VIII Coloquio de Mineralogía. Sociedad Mexicana de Mineralogía. III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Puerto Vallarta, México.
- VICTORIA MORALES. y CORONA, CHAVEZ., 2000. "Transición de Facies de anfibolita a Migmatitas en facies de granulita, en la porción occidental del terreno Xolapa: Condiciones de metamorfismo e implicaciones tectónicas". Resúmenes 2ª Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra.
- VIDAL, SERRATOS. R. 1991. "Estratigrafía y tectónica de la región de Zihuatanejo, Edo. De Guerrero, SMS. Inst. Geol. UNAM. Inst. Inv. En Ciencias de la Tierra UAH". *Soc. Mex. De Mineralogía, Convención sobre la evolución geológica de México*. P. 231-233.
- WATERS, J., DAVID. 1991. "Hercynite-Quartz granulites: The phase relations, and implications for crustal processes". *Department of Earth sciences. University of Oxford*. V. 3 p. 367-386.
- WINKLER. G., F., HELMUT. 1978. Petrogénesis de rocas metamórficas. H. Blume Ediciones, Madrid, Esp.
- WERRE, KEEMAN, F. y BUSTOS, DIAZ. 2001. "Síntesis Geológica y Evolución Tectónica del Terreno Xolapa, Edo. De Guerrero". *Boletín técnico del COREMI*. Año VIII. No. 44. p. 2-23.

Referencias electrónicas

- <http://geologia.igeofcu.unam.mx/geol.htm>
- www.uclm.es/users/higuera/yymm/YM13html
- www.ugr.es/geopeta/q96htm
- www.igeofcu.unam.mx/lup/microsonda.html

APENDICES

"Puntos de Localización"

Numero de Muestra	Coordenadas	Clasificación
PI-01	14Q 0417801 UTM 1888773	Fleckigneis
PI-02	14Q 0417964 UTM 1888800	Pegmatita
PI-03	14Q 0417116 UTM 1888179	Magnetita
PI-04	14Q 0417197 UTM 1887997	Fleckigneis
PI-05	14Q 0417121 UTM 1888333	Granito
PI-06	14Q 0416831 UTM 1888581	Granito
PI-07	14Q 0415722 UTM 1887360	Fleckigneis
PI-08	14Q 0415722 UTM 1889123	Granito
PI-09	14Q 0417041 UTM 1888333	Granito
PI-10	14Q 0417158 UTM 1887825	Fleckigneis
PI-11	14Q 0418007 UTM 1888600	Fleckigneis
PI-12	14Q 0418013 UTM 1887301	Fleckigneis
PI-13	14Q 0416794 UTM 1887253	Fleckigneis
PI-14	14Q 0416328 UTM 1887082	Fleckigneis
PI-15	14Q 0416445 UTM 1888773	Granito
PI-16	14Q 0417801 UTM 1888773	Granito
PI-17	14Q 0417801 UTM 1888773	Fleckigneis
PI-18	14Q 0417801 UTM 1888773	Fleckigneis
PI-19	14Q 0417801 UTM 1888773	Granito
PI-20	14Q 0418256 UTM 1888403	Restita
PI-21	14Q 0418034 UTM 1888197	Restita

- Resultados obtenidos del análisis cualitativo y cuantitativo de los óxidos más comunes realizado a las muestras de Restita y Fleckigneis

Muestra:R-1b

Pto. No.	MgO	SO3	Al2O3	SiO2	TiO2	V2O3	FeO	CuO	Cr2O3	Total	Comment
1	28.155	0.003	52.004	0.034	0.000	0.005	21.163	0.017	0.000	101.381	r1b-1,1
2	20.251	0.012	53.764	0.045	0.012	0.009	24.227	0.000	0.000	98.320	r1b-2,2
3	20.235	0.005	54.031	0.003	0.000	0.003	23.758	0.000	0.000	98.035	r1b-3,3
4	21.470	0.007	55.594	0.000	0.010	0.005	23.794	0.000	0.044	100.924	r1b-4,4
5	25.991	0.011	57.830	0.030	0.000	0.003	23.066	0.000	0.000	106.931	r1b-5,5
7	23.970	0.000	53.120	0.025	0.010	0.005	23.178	0.000	0.000	100.308	r1b-6,6
Promedio	23.345	0.006	54.391	0.023	0.005	0.005	23.198	0.003	0.007	100.983	

Muestra:R-3

Pto. No.	MgO	MnO	Al2O3	FeO	ZnO	CoO	Total	Comment
1	9.771	0.396	61.561	27.946	2.209	0.031	101.914	espinela-r3-1
2	9.809	0.313	60.785	27.810	2.158	0.039	100.914	espinela-r3-2
3	9.790	0.353	59.509	27.906	2.238	0.014	99.810	espinela-r3-3
4	9.561	0.331	58.707	27.171	2.258	0.030	98.058	espinela-r3-4
5	9.682	0.332	60.203	28.127	2.284	0.002	100.630	espinela-r3-5
6	9.522	0.347	60.128	28.038	2.161	0.031	100.227	espinela-r3-6
7	9.578	0.305	59.841	28.083	2.052	0.025	99.884	espinela-r3-7
8	9.731	0.451	60.017	27.986	2.017	0.023	100.225	espinela-r3-8
9	9.650	0.334	59.621	27.748	1.938	0.000	99.291	espinela-r3-9
10	9.933	0.289	59.877	27.585	1.990	0.024	99.698	espinela-r3-10
11	10.342	0.347	61.231	27.348	1.908	0.023	101.199	espinela-r3-11
Promedio	9.793	0.346	60.119	27.798	2.011	0.021	100.087	

Pto. No.	Na2O	K2O	MgO	SO3	Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	V2O3	MnO	FeO	Total	Comment
12	0.361	0.000	7.726	0.004	28.621	46.485	0.028	0.000	0.000	0.244	4.326	87.795	r3-12
13	0.328	0.000	7.712	0.000	28.200	46.569	0.015	0.000	0.009	0.157	4.385	87.375	r3-13
14	0.381	0.010	7.507	0.000	28.246	46.677	0.026	0.002	0.066	0.112	4.332	87.359	r3-14
15	0.328	0.012	7.553	0.000	28.755	46.560	0.036	0.000	0.000	0.200	4.302	87.746	r3-15
16	0.372	0.007	7.661	0.030	28.111	44.442	0.027	0.008	0.004	0.191	4.259	85.112	r3-16
17	0.347	0.009	7.672	0.007	29.954	46.493	0.036	0.000	0.082	0.172	4.208	88.980	r3-17
Promedio	0.353	0.006	7.639	0.007	28.648	46.204	0.028	0.002	0.027	0.179	4.302	87.395	

Muestra:R-5

Pto. No.	MgO	MnO	Al2O3	FeO	ZnO	CoO	Total	Comment
1	9.811	0.301	61.730	27.272	2.024	0.000	101.138	espinela-r5-1
2	9.611	0.275	61.377	26.570	2.056	0.026	99.915	espinela-r5-2
3	9.666	0.244	62.152	26.835	1.950	0.026	100.873	espinela-r5-3
4	9.726	0.309	60.648	25.715	1.845	0.030	98.273	espinela-r5-4
5	9.193	0.212	60.246	26.520	1.931	0.012	98.114	espinela-r5-5
6	9.231	0.273	60.186	26.804	1.922	0.025	98.441	espinela-r5-6
7	9.162	0.279	60.296	27.564	1.934	0.033	99.268	espinela-r5-7
8	8.853	0.341	61.094	26.843	2.004	0.025	99.160	espinela-r5-8
9	8.988	0.239	61.314	26.841	2.025	0.022	99.429	espinela-r5-9
Promedio	9.192	0.276	60.631	26.715	1.944	0.025	98.781	

Muestra:R-7

Pto. No.	MgO	MnO	Al2O3	FeO	ZnO	CoO	Total	Comment
10	11.056	0.187	64.421	24.690	1.363	0.013	101.730	espinela-r7-1
11	10.924	0.227	64.029	24.482	1.398	0.015	101.075	espinela-r7-2
12	11.105	0.249	64.084	24.635	1.292	0.037	101.402	espinela-r7-3
13	11.550	0.214	63.801	24.649	1.405	0.000	101.619	espinela-r7-4
Promedio	11.159	0.219	64.084	24.614	1.365	0.016	101.457	

Pto. No.	Na2O	K2O	MgO	SO3	Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	V2O3	MnO	FeO	Total	Comment
43	0.930	10.362	11.112	0.023	17.080	43.577	0.014	1.697	0.089	0.032	8.090	93.006	r7-5
44	0.936	9.753	11.945	0.000	17.769	45.624	0.029	1.677	0.090	0.000	7.608	95.431	r7-6
45	0.992	9.820	11.842	0.001	17.470	45.416	0.044	1.697	0.091	0.003	7.960	95.336	r7-7
46	1.092	10.127	11.409	0.019	17.177	43.988	0.019	1.561	0.084	0.003	7.973	93.452	r7-8
47	1.067	9.971	11.490	0.009	16.874	43.349	0.004	1.557	0.091	0.002	8.136	92.550	r7-9
48	1.022	10.163	11.292	0.011	16.691	44.360	0.012	1.563	0.097	0.002	8.076	93.289	r7-10
49	0.948	10.197	10.903	0.008	16.669	44.628	0.015	1.797	0.102	0.028	8.083	93.378	r7-11
50	0.821	9.997	9.762	0.033	15.079	38.962	0.019	1.830	0.105	0.005	7.964	84.577	r7-12
51	0.897	10.245	10.345	0.003	15.390	39.924	0.017	1.819	0.116	0.037	8.019	86.812	r7-13
Promedio	0.975	10.117	10.867	0.014	16.313	42.535	0.014	1.688	0.099	0.013	8.042	90.676	

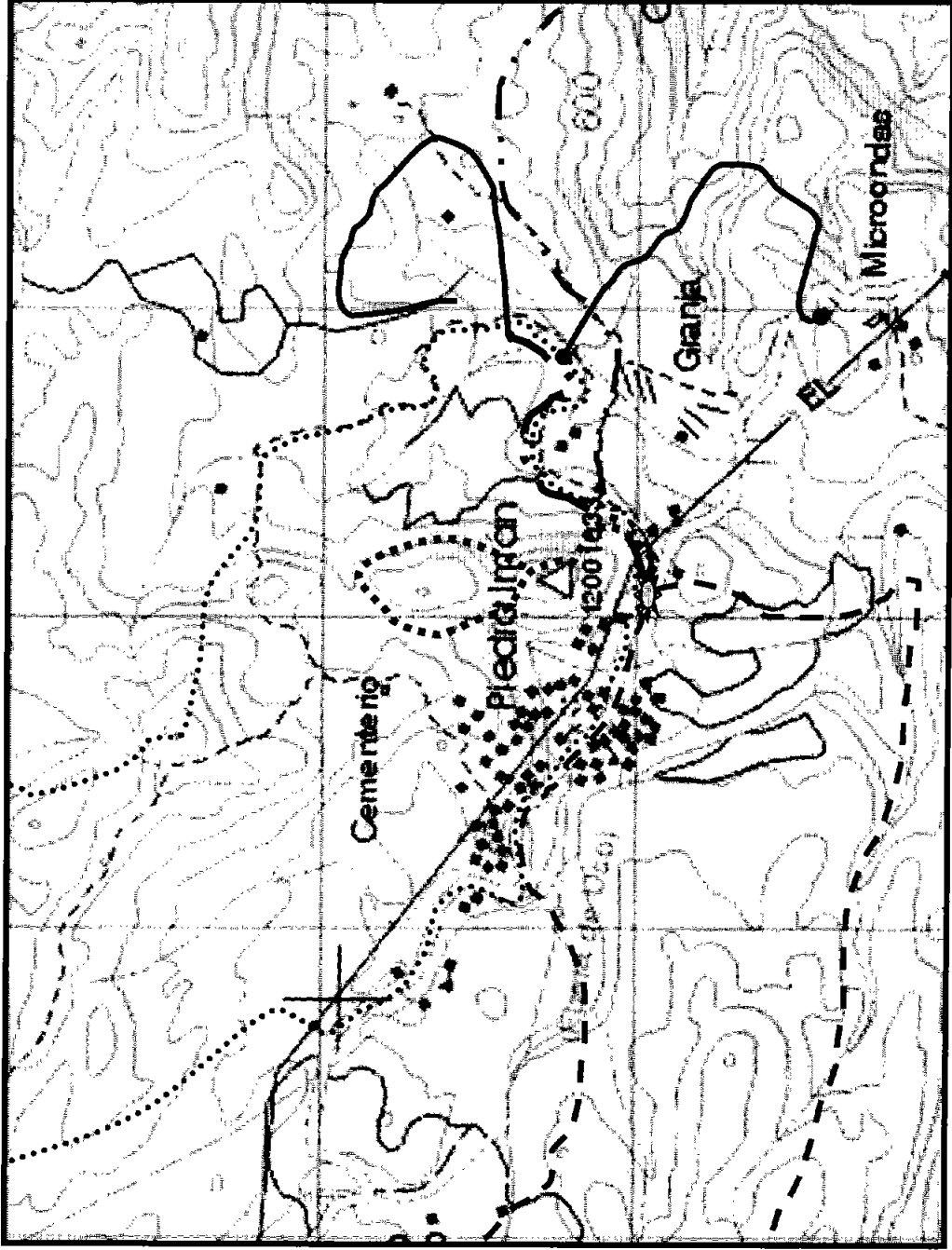
Muestra: F-8

Pto. No.	Na2O	K2O	MgO	SO3	Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	V2O3	MnO	FeO	Total	Comment
1	1.419	1.864	6.123	0.000	10.627	42.250	10.857	1.825	0.863	1.007	23.935	100.770	f8-1
2	1.583	1.585	5.853	0.018	10.230	42.641	10.979	1.716	0.890	1.050	24.096	100.641	f8-2
3	1.569	1.759	5.616	0.028	10.593	42.051	11.276	1.964	0.980	0.991	23.893	100.720	f8-3
4	1.683	1.713	5.599	0.014	10.432	42.682	11.277	2.039	1.015	1.108	24.246	101.808	f8-4
5	1.682	1.817	5.638	0.023	10.207	42.577	11.169	2.000	1.013	1.098	24.110	101.334	f8-5
6	1.448	1.508	5.982	0.015	9.059	44.635	11.268	1.896	1.010	1.178	23.852	101.851	f8-6
7	0.061	0.029	5.723	0.067	17.131	27.348	0.099	0.044	0.008	0.376	31.227	82.113	f8-7
8	0.032	0.028	8.349	0.058	18.014	26.152	0.085	0.047	0.074	1.257	36.115	90.211	f8-8
9	0.043	0.056	8.216	0.048	18.173	25.690	0.120	0.086	0.108	1.099	35.733	89.372	f8-9
10	0.041	0.049	8.670	0.026	15.714	26.889	0.144	0.063	0.165	0.728	36.873	89.362	f8-10
11	0.050	0.024	8.180	0.029	16.250	26.496	0.105	0.067	0.087	1.156	36.612	89.056	f8-11
12	0.073	1.446	8.105	0.050	14.273	28.763	0.157	1.004	0.469	0.840	33.636	88.816	f8-12
Promedio	0.050	0.272	7.874	0.046	16.593	26.890	0.118	0.219	0.152	0.909	35.033	88.155	

Muestra: F-7

Pto. No.	Na2O	K2O	MgO	SO3	Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	V2O3	MnO	FeO	Total	Comment
52	0.024	0.024	0.000	0.000	1.873	35.568	28.258	33.718	1.758	0.063	0.880	102.166	f7-1
53	0.062	0.010	0.008	0.014	1.811	35.247	28.122	33.683	1.772	0.070	0.780	101.579	f7-2
54	0.109	0.009	0.000	0.000	1.769	34.369	27.936	33.539	1.725	0.072	0.761	100.289	f7-3
55	0.020	0.001	0.000	0.000	1.840	34.940	26.953	33.699	1.710	0.090	0.737	99.990	f7-4
56	0.020	0.000	0.000	0.002	1.912	34.635	27.680	33.598	1.718	0.098	0.654	100.317	f7-5
57	0.035	0.007	0.007	0.000	2.554	35.394	26.898	32.622	1.675	0.102	0.719	100.013	f7-6
58	0.046	0.020	0.010	0.000	2.051	35.350	28.252	33.406	1.739	0.067	0.760	101.701	f7-7
59	0.044	0.015	0.019	0.000	1.983	35.132	28.195	33.724	1.755	0.086	0.790	101.743	f7-8
60	0.013	0.012	0.009	0.003	2.034	33.879	27.849	33.441	1.706	0.098	0.925	99.969	f7-9
61	1.631	1.320	4.244	0.010	8.351	50.544	11.365	1.466	0.084	0.423	20.849	100.287	f7-10
62	1.988	1.692	3.901	0.035	11.047	48.606	11.323	1.619	0.092	0.389	21.508	102.200	f7-11
63	1.429	1.283	4.240	0.032	8.501	51.037	11.323	1.381	0.079	0.365	21.338	101.008	f7-12
64	1.965	1.633	3.793	0.035	10.507	47.502	11.362	1.612	0.089	0.361	21.606	100.465	f7-13
65	1.913	1.739	3.872	0.023	10.633	48.828	11.487	1.600	0.095	0.383	21.424	101.997	f7-14
66	1.989	1.635	3.977	0.046	10.739	48.342	11.279	1.615	0.094	0.410	21.821	101.947	f7-15
Promedio	1.819	1.550	4.005	0.030	9.963	49.143	11.357	1.549	0.089	0.389	21.424	101.317	

Trayectorias de Caminamientos



Piedra Imán – Rancho Las Abubillas (Mina "El Milagro")

Mina "El Milagro" - Cerro "Pelón" - Mina "El Poder de Dios"

Piedra Imán - Cerro "Piedra Imán" (Yacimiento de Fe)

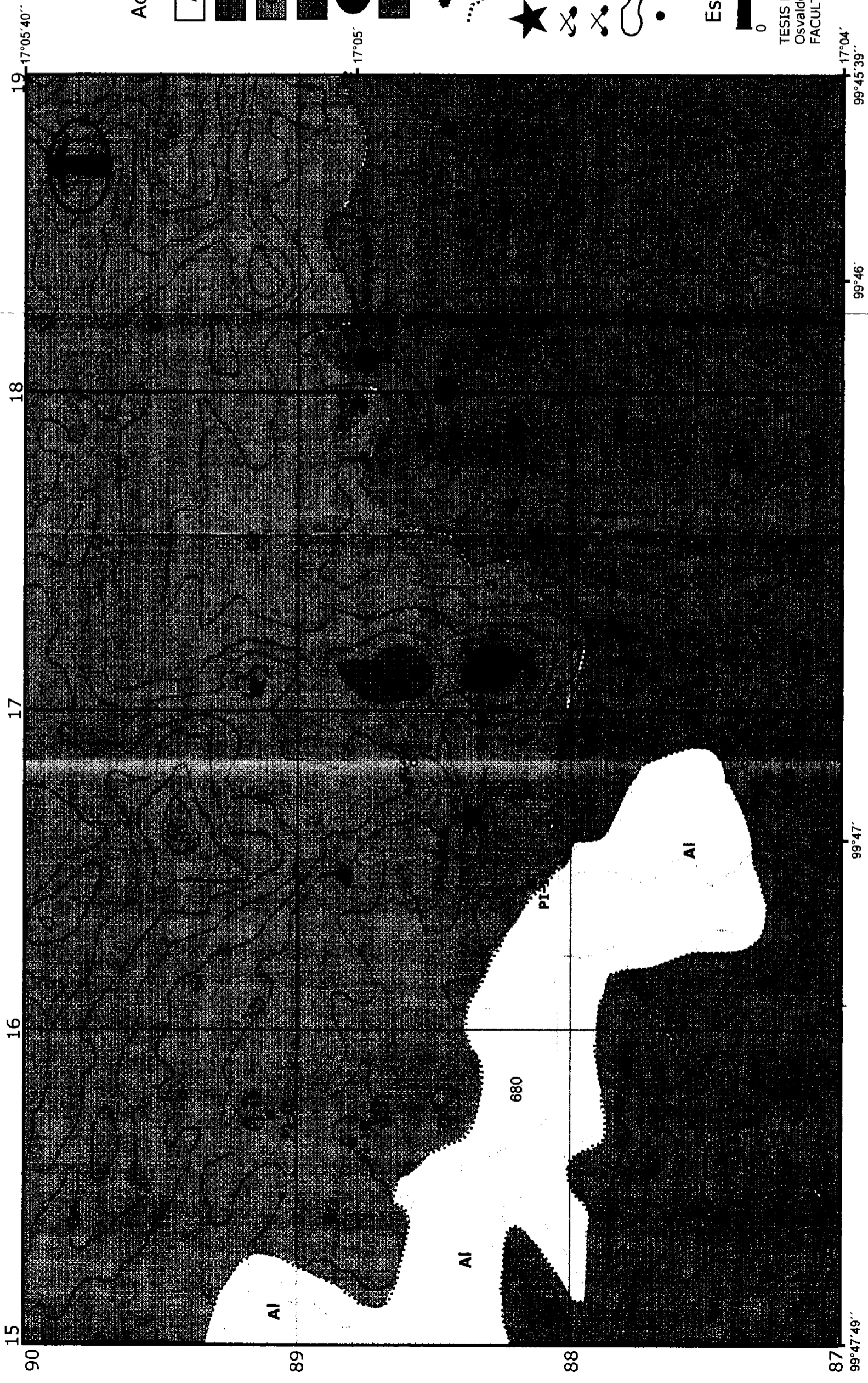
Piedra Imán - Cantera de Granito - Cerro "Piedra Prieta"

Rancho Las Abubillas - El 45 (Km. 45)

Rancho Las Abubillas - Estación de Microondas

Piedra Imán - Región E y SE de Piedra Imán

Campamento base



MAPA GEOLOGICO

Piedra Imán
Municipio De
Acapulco De Juárez
Gro.

- AI** Aluvión
- Yacimiento de Hierro
- Granitoide
- Fleckigneis
- Restita
- Migmatita
- Pegmatita
- Contacto gradual o inferido
- ★ Poblado
- Mina Abandonada
- Banco de Material
- Curvas de Nivel
- Puntos de localización

Esc. 1: 11,000



TESIS PROFESIONAL
Osvaldo Ivan Vargas Paredes
FACULTAD DE INGENIERIA
UNAM