



UNIVERSIDAD DE SONORA



División de Ciencias Exactas y Naturales

**Departamento de Geología**

TESIS:

**'Geología, Geoquímica y Geocronología del área de  
Puerta del Sol, Sonora central: México'**

PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

**GEÓLOGO**

Por:

**ELIZARD GONZÁLEZ BECUAR**

Hermosillo, Sonora, México.  
Enero 2011

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## Resumen

El área de Puerta del Sol en Sonora central representa una serie de intrusiones granodioríticas a graníticas del Eoceno Medio y otros dos plutones gabróticos a granodioríticos del Mioceno Temprano. Las intrusiones del Eoceno Medio corresponden a la Granodiorita Puerta del Sol (49 Ma; U/Pb) y el Granito de dos micas Oquimonis (42 Ma; U/Pb). Estos cuerpos Laramídicos presentan una firma calcoalcalina. Sus valores de REE presentan, por una anomalía negativa en Eu, un origen en ambiente de subducción. Los plutones del Mioceno Temprano, el Gabro Garambullo (19 Ma; U/Pb) y la Granodiorita Las Mayitas (19 Ma; K/Ar), son coevos con la extensión *Basin and Range* y el desarrollo de los complejos de núcleo metamórfico en Sonora. Esto es determinado por una edad de exhumación en meseta de Ar/Ar que arroja una edad de 18 Ma. Los plutones Miocénicos presentan una firma que tiende de calcoalcalina a toleítica y sus valores de REE muestran un enriquecimiento en HREE, lo que demuestra un aporte mantélico. Estos cuerpos fueron exhumados por una falla normal de bajo ángulo ( $\sim 15^\circ$ ) que se extiende N-S desde la Sierra de Mazatán ( $\sim 20$  Kms al S) y desarrolla en los cuerpos cercanos al borde (Granodiorita Puerta del Sol y Granito Oquimonis) una franja milonítica. Se desarrolla otra zona de deformación en una franja E-W a lo largo del contacto de la Granodiorita Puerta del Sol y el Granito Oquimonis. Esta deformación milonítica representa una característica distintiva de los complejos de núcleo metamórfico.

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	1
1.1 Objetivos de este trabajo	3
1.2 Metodología	4
1.3 Localización del área de estudio	4
1.4 Fisiografía, geomorfología e hidrografía	5
1.5 Trabajos previos	6
<b>2. Geología y petrografía del área de estudio</b>	7
2.1 Granodiorita Puerta del Sol	9
2.1.1 Petrografía	11
2.1.2 Edad	12
2.2 Granito Oquimonis	12
2.2.1 Petrografía	13
2.2.2 Edad	14
2.3 Gabro Garambullo	16
2.3.1 Petrografía	17
2.3.2 Edad	18
2.4 Granodiorita Las Mayitas	18
2.4.1 Petrografía	21
2.4.2 Edad	21
2.5 Diques	22
2.5.1 Edad	22
<b>3. Geocronología</b>	27
3.1 Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	28
3.2 Geocronología U/Pb	30
3.3 Geocronología $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	35

<b>4. Geología Estructural</b>	<b>36</b>
4.1. Falla de despegue de Mazatán	37
4.1.1. Estructuras y microestructuras	38
4.2. Zona de deformación Palofierral	41
4.3. Relación y edad entre la falla de despegue de Mazatán y la zona de deformación Palofierral	42
4.4. Análisis estructural mediante sensoría remota	43
<b>5. Geoquímica</b>	<b>46</b>
5.1 Óxidos Mayores	46
5.1.1 Diagrama R1-R2	49
5.1.2 Diagramas de variación	50
5.1.2.1 <i>Diagramas de Harker</i>	50
5.1.3 Diagrama AFM	52
5.1.4 Diagrama discriminante de ambiente tectónico de Shand	54
5.2 Elementos Traza	55
5.2.1 Elementos de tierras raras	55
<b>6. Discusión y conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>62</b>

## Relación de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.	3
Figura 2. Mapa de provincias fisiográficas de Sonora.	6
Figura 3. Diagrama de clasificación modal QAP.	7
Figura 4. Plano geológico del área de estudio.	8
Figura 5. Medidas de foliación magmática.	10
Figura 6. Afloramiento de la Granodiorita Puerta del Sol.	10
Figura 7. Imágen de muestra 10-28-07-3	12
Figura 8. Afloramiento del Granito Oquimonis.	13
Figura 9. Imágen de muestra 4-21-07-5	15
Figura 10. Afloramiento del Gabro Garambullo.	16
Figura 11. Imágen de enclaves en Gabro Garambullo.	16
Figura 12. Imágen de muestra 1-8-09-1	17
Figura 13. Afloramiento de la Granodiorita Las Mayitas.	20
Figura 14. Enclave en la Granodiorita Las Mayitas.	20
Figura 15. Imágen de muestra 4-21-07-2	22
Figura 16. Diques gabróticos.	23
Figura 17. Diques graníticos.	24
Figura 18. Imágen de muestra 08-14-09-3	25
Figura 19. Imágen de muestra 11-21-09-4	25
Figura 20. Diagrama Ar/Ar para 1026081F	29
Figura 21. Diagrama Ar/Ar para 19091F	30
Figura 22. Diagrama U/Pb 1121093F	31
Figura 23. Diagrama U/Pb 011208-3F	32
Figura 24. Diagrama U/Pb 020208-2F	32
Figura 25. Vista panorámica de la Sierra de Mazatán.	36

Figura 26. Proyección estereográfica para la deformación Palofierral.	39
Figura 27. Imágen de muestra 10-28-07-3	39
Figura 28. Brecha silicificada.	40
Figura 29. Imágen de muestra 1-12-09-1	42
Figura 30. DEM para el área de estudio.	44
Figura 31. Diagrama R1-R2	49
Figura 32. Diagramas Harker	51
Figura 33. Diagrama AFM	53
Figura 34. Diagrama Shand	54
Figura 35. Diagrama de REE	56
Figura 36. Diagrama de espectros de REE	57
Figura 37. Diagrama comparativo de REE	58

## Relación de tablas

Tabla I. Resumen de muestras para geocronología	27
Tabla II. Resultados U/Pb para la muestra 1121093F	33
Tablas III. Resultados U/Pb para la muestra 0112083F y 0202082F	34
Tablas IV. Resultados K/Ar 927092F	35
Tablas V. Resultados de geoquímica	48

## **Agradecimientos**

Expreso mi sincero agradecimiento al Dr. Efrén Pérez Segura, por su apoyo como director de este trabajo. Sin su ayuda y su humor, este trabajo no hubiera concluído. Gracias a los sinodales MC Ricardo Amaya y Dr. Martín Valencia que aportaron valiosos comentarios y recomendaciones en la revisión y desarrollo de esta tesis.

Este trabajo de tesis se realizó con apoyo del proyecto CONACyT #24893 'Characterizing and dating the Cretaceous and Tertiary magmatic, tectonic and mineralizing events in Sonora, northwest Mexico' a cargo del Dr. Carlos González. Este proyecto financió la geocronología y, en su mayoría, la geoquímica.

Muchas gracias a mi padre, a mi madre y a mi hermano por su ayuda incondicional en campo, en la escuela y en la vida. Estoy en deuda con ustedes.

Doy gracias al Dr. Jesús Vidal Solano por su gran ayuda con los temas de geoquímica, valiosos comentarios y por alentarme a hacer este trabajo; al Dr. Ricardo Vega Granillo por ayudarme con paciencia a entender la geología estructural del área y por su interés en mi trabajo; al Dr. Francisco Paz Moreno por su interés en mi trabajo y su apoyo a lo largo de mis estudios.

Al Quím. Pablo Peñaflor, encargado del laboratorio de preparación de muestras por su ayuda con la preparación de las muestras para geoquímica y su paciencia para enseñarme las técnicas de preparación. A Abraham Mendoza Córdova del laboratorio de cristalografía y geoquímica por su valiosa ayuda en la preparación de mis muestras para análisis.

A mis compañeros estudiantes por su apoyo en las clases, en campo y su interés en la geología: Angel Enrique Olguín Villa, Alejandra Gómez Valencia, Oscar Smith Gayón, Héctor Mendívil Quijada, Santa Barrera Guerrero e Iván Ceseña Solano.

## 1. Introducción

La evolución geológica en Sonora estuvo grandemente influenciada desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno por la subducción entre la placa oceánica Farallón debajo de la placa norteamericana. La principal consecuencia de este proceso tectónico convergente, en Norte América está manifestada por una gran actividad magmática a lo largo del margen continental, que produjo el emplazamiento de gran cantidad de cadenas batolíticas de plutones graníticos y volcanismo asociado. Estas rocas constituyen un cinturón de batolitos que se extienden por el suroeste de los Estados Unidos y a través del noroeste de México. La orientación de dicho cinturón es NW-SE, casi paralela a la actual costa del Pacífico. Los afloramientos de las rocas plutónicas pertenecientes a este evento tectónico en Sonora afloran prácticamente en todo el estado (Fig. 1), constituyendo lo que Damon *et al.* (1983) llamaron el Batolito Laramíde de Sonora. El batolito de Sonora está limitado temporalmente de 90 a 40 Ma (K/Ar) y consiste en plutones que varían de graníticos a tonalíticos (Damon *et al.*, 1983; Richard *et al.*, 1989; Roldán-Quintana, 1991; Valencia-Moreno *et al.*, 2001), e incluye también granitos peraluminosos de dos micas. Los afloramientos de esta cadena batolítica presentan una edad mayor en la zona oeste, cercana a la costa, y se vuelven progresivamente más jóvenes en su parte este. Este comportamiento supone una migración del arco magmático con dirección al este (Damon *et al.*, 1983; Ramos-Velázquez *et al.*, 2008). Una implicación de estos plutones es su clara relación temporal con el emplazamiento de numerosos yacimientos de tipo pórfido cuprífero, brechas mineralizadas y skarns (Wodzicki, 1995; Scherkenbach *et al.*, 1985). El magmatismo laramídico en Sonora está presente desde el Cretácico Tardío al Eoceno y existe además una propuesta (Macías-Valdez, 1992; Radelli, 1995) que sugiere la existencia de un arco magmático desarrollado durante el Eoceno, al cual se asocia el emplazamiento de los granitos peraluminosos de dos micas.

Subsecuente al magmatismo laramídico, en el Oligoceno Tardío ocurre en Sonora un cambio de régimen tectónico cuando inicia un evento extensivo. El inicio de la extensión en Sonora ocurrió de 5 a 10 Ma posterior al cese de la subducción de la placa Farallón bajo la placa norteamericana, dependiendo de la latitud de la zona

considerada (Wong *et al.*, 2010). Dicha extensión en Sonora involucra el desarrollo de los complejos de núcleo metamórfico y la fase conocida como el evento *Basin and Range*, o de Sierras y Valles Paralelos. El evento *Basin and Range* consiste en el desarrollo de una serie de cuencas y sierras con orientación NW-SE formadas por fallas normales de alto ángulo. Estas cuencas fueron rellenadas por sedimentos detríticos (conglomerados y areniscas) y flujos volcánicos bimodales (basaltos y riolitas). Los complejos de núcleo metamórfico de desarrollo contemporáneo (Wong *et al.*, 2010) están caracterizados por tener una placa inferior o bloque de piso formado por rocas plutónicas generalmente terciarias, el cual está separado de una placa superior (o bloque de techo) por una falla de bajo ángulo (falla de *detachment*) a lo largo de la cual se produjo el desprendimiento de este último durante el proceso de extensión (Coney, 1980). Las rocas de la placa inferior están afectadas por fábricas miloníticas que se produjeron durante el desprendimiento de la placa superior. El evento de desarrollo de los complejos de núcleo metamórfico en Sonora es relativamente sincrónico al evento *Basin and Range* (Nourse *et al.*, 1994; Gans, 1997; González-León *et al.*, 2000; Wong y Gans, 2003; Wong y Gans, 2008; González-León *et al.*, 2010; Wong *et al.*, 2010) el cual se presenta durante el lapso temporal de 26 Ma a 12 Ma.

En el presente trabajo se estudia un área donde está representado el magmatismo tanto laramídico como el asociado a la fase de *Basin and Range*. El área de Puerta del Sol, en Sonora central (Fig. 1) es un lugar donde aflora el plutonismo de las últimas fases de actividad del arco magmático Laramide así como plutonismo asociado al inicio del *Basin and Range*; este último no había sido reportado antes en Sonora.

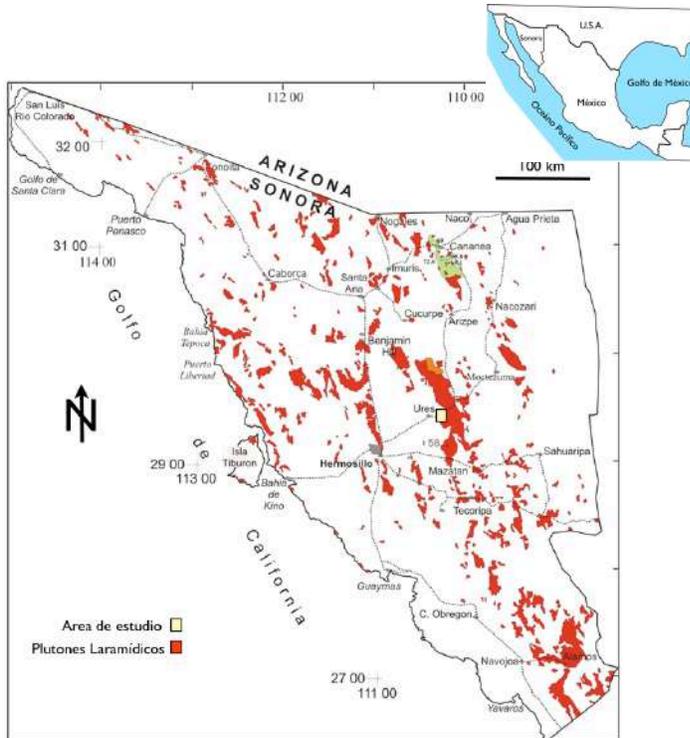


Figura 1. Localización del área de estudio. En color rojo se muestran los afloramientos de intrusivos laramídicos, del Cretácico Tardío a Terciario. La distribución geográfica refleja la estructura NE-SW de la extensión terciaria.

### 1.1. Objetivos de este trabajo

El estudio del área de Puerta del Sol tiene como objetivo aportar datos geológicos, geocronológicos, geoquímicos y estructurales confiables al estudio de las rocas intrusivas laramídicas y miocénicas. Establecer con precisión las edades y la composición de las rocas pertenecientes a esta área, la cual ha sido poco estudiada anteriormente (Radelli, 1986). Por lo tanto, el presente proyecto de tesis se enfoca en:

- a) re-evaluar de los antiguos mapas geológicos de esta área a escala 1:50,000
- b) el estudio petrográfico y establecimiento de una clasificación modal de las láminas delgadas obtenidas
- c) un estudio geocronológico por los métodos U/Pb, Ar/Ar y K/Ar
- d) un estudio geoquímico de óxidos mayores y tierras raras de los cuerpos intrusivos.

## **1.2. Metodología**

Primeramente se realizó un viaje de reconocimiento geológico utilizando como guía el trabajo de Radelli (1986), el cual incluye un mapa geológico general del área. Usando la carta topográfica INEGI H12-D33 "Puera del Sol" y fotografías aéreas, se identificaron estructuras visibles como enjambres de diques, lineamientos, cambios litológicos y fallas.

El trabajo de campo se centró en la cartografía de las unidades litológicas y toma de muestras para lámina delgada, geoquímica y geocronología. Así como toma de datos estructurales de foliaciones metamórficas y magmáticas, dirección de diques y de fallas. La recolección de datos para este trabajo en campo empezó el otoño del 2007 y concluyó en la primavera del 2010. Durante estas salidas a campo se realizó un muestreo acompañado de una descripción.

El trabajo en gabinete se llevó a cabo trabajando sobre el mapa topográfico, extendiendo contactos y organizando las muestras tomadas. Posteriormente, se realizó un estudio petrográfico sobre 45 láminas delgadas de las cuales se realizó un conteo de 600 puntos por cada lámina en un microscopio petrográfico

La preparación de muestras para geoquímica fueron realizados en el Laboratorio de Preparación de Roca de la Estación Regional del Noroeste (ERNO) de la Universidad Autónoma de México (UNAM). Se usó un triturador para obtener gravilla, un cuarteo de la gravilla y, finalmente, un pulverizado de la muestra en un mortero (*puck*) de cerámica.

## **1.3. Localización del área de estudio**

### **a) Localización geográfica**

El área de estudio se encuentra en la zona central de Sonora, al este de Ures y al sur del poblado de Puerta del Sol, dentro del municipio de Ures (Fig. 1). Puede ser consultada en la carta topográfica 1:50,000 de INEGI Puerta del Sol H12D33. Se

localiza entre las coordenadas 29°25'N 110°15'O, a ~100 kilómetros de la ciudad de Hermosillo.

#### b) Vías de acceso

Para acceder al área de Puerta del Sol, se toma la carretera federal número 14 (Hermosillo-Moctezuma) desde Hermosillo hasta el poblado vecino a Ures, San Pedro de Ures. Posteriormente, en la parte sur de este poblado se puede acceder a la propiedad de la comunidad San Juan mediante un camino de terracería en buen estado. La comunidad San Juan es un territorio ejidal que alberga la mayor parte del área de estudio. Dentro de la comunidad San Juan, se encuentra un camino pavimentado en muy buen estado que sube hasta la cima del cerro El Pal, donde se encuentran tres antenas de telecomunicaciones.

### **1.4. Fisiografía, geomorfología e hidrografía**

En Sonora existen cuatro provincias fisiográficas principales (Fig. 2):

- a) Provincia de Sierras Sepultadas
- b) Provincia de la Sierra Madre Occidental
- c) Provincia norte de las Sierras y Llanuras
- d) Provincia de la Planicie Costera.

Dentro de estos contextos, el área de estudio se encuentra dentro de la Provincia de Sierras Sepultadas.

Los rasgos geomorfológicos más sobresalientes del área de estudio es el contraste entre los plutones laramídicos que forman morfologías planas y esferoidales y los plutones miocénicos que ocupan morfologías altas, la máxima de 2200 msnm en el cerro El Garambullo.

La hidrología de Puerta del Sol está dominada por el río Sonora, encontrado al norte del área. Los arroyos más representativos del área son los arroyos La Cañada Colorada, San Juan, Ures y La Poza, todos tributarios del río Sonora.

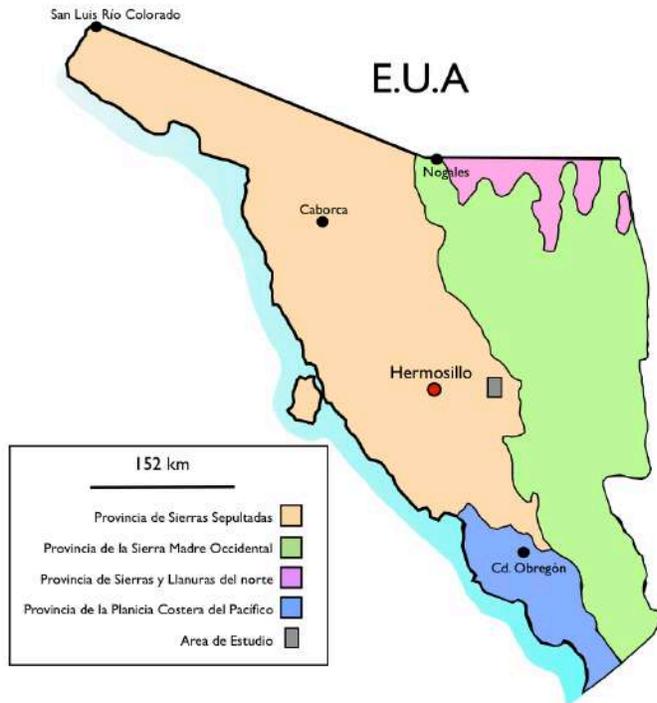


Figura 2. Mapa de provincias fisiográficas de Sonora, tomado de INEGI,1981 (mod. de Raisz, 1959)

### 1.5. Trabajos previos

El área Puerta del Sol ha sido mencionado en varios trabajos anteriores, pero solo se cuenta con una cartografía geológica hecha por Radelli (1986). Aunque, este trabajo presenta básicamente la misma nomenclatura presentada por Radelli (1986), se reconocen estructuras y se realizan modificaciones en la cartografía original del autor mencionado. La cartografía de Radelli (1986) es también usada por Macías-Valdéz (1982); por otra parte, Calles-Montijo (1999), presenta en su trabajo la cartografía geológica de la cuenca de Ures, al sur de esta zona e incluye en su cartografía un segmento sur de Puerta del Sol. Anderson *et al.* (1980) publicaron un fechamiento U/Pb para la granodiorita Puerta del Sol deformada. Wong y Gans (2008) presentan cuatro fechamientos Ar/Ar, pero su trabajo está centrado en el complejo de núcleo metamórfico de Mazatán, por lo que no hace reconocimiento detallado de las litologías.

## 2. Geología y petrografía del área de estudio

En este capítulo se describen las características de los plutones Granodiorita Puerta del Sol, Granito Oquimonis, Gabro Garambullo, Granodiorita Las Mayitas y los diversos diques que cortan a estos cuerpos intrusivos (Fig 4).

Los trabajos de muestreo para petrografía, geoquímica y geocronología se llevaron a cabo dentro de las coordenadas UTM 564750 a 580000 E y 3244000 y 3264000 N.

Para clasificarlos mineralógicamente se realizó un conteo de puntos en 45 láminas delgadas. En total, se contaron 600 puntos en cada lámina. Los resultados obtenidos se graficaron en un diagrama ternario de clasificación modal (Fig. 3). Basado en la nomenclatura propuesta por Streckeisen (1976).

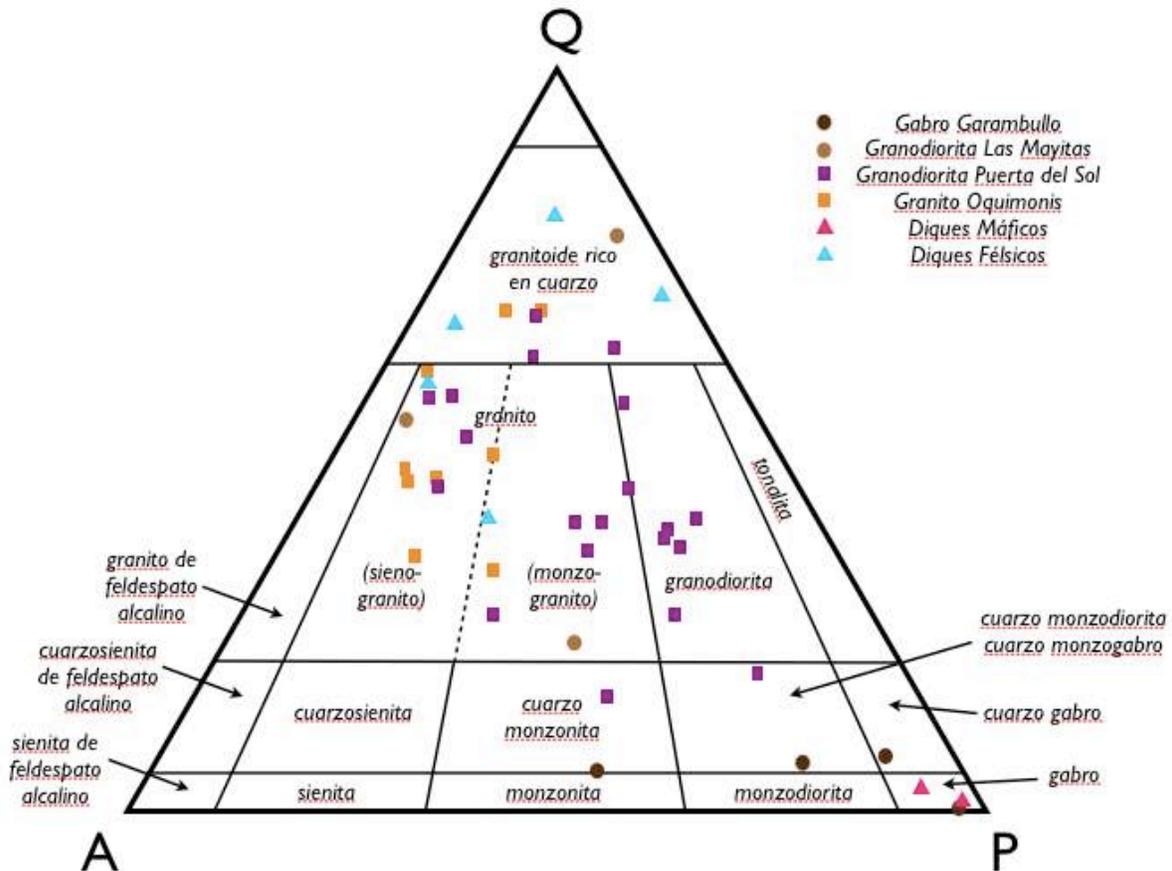


Figura 3. Diagrama de clasificación modal QAP (Streckeisen, 1976) mostrando la distribución composicional de las muestras estudiadas.

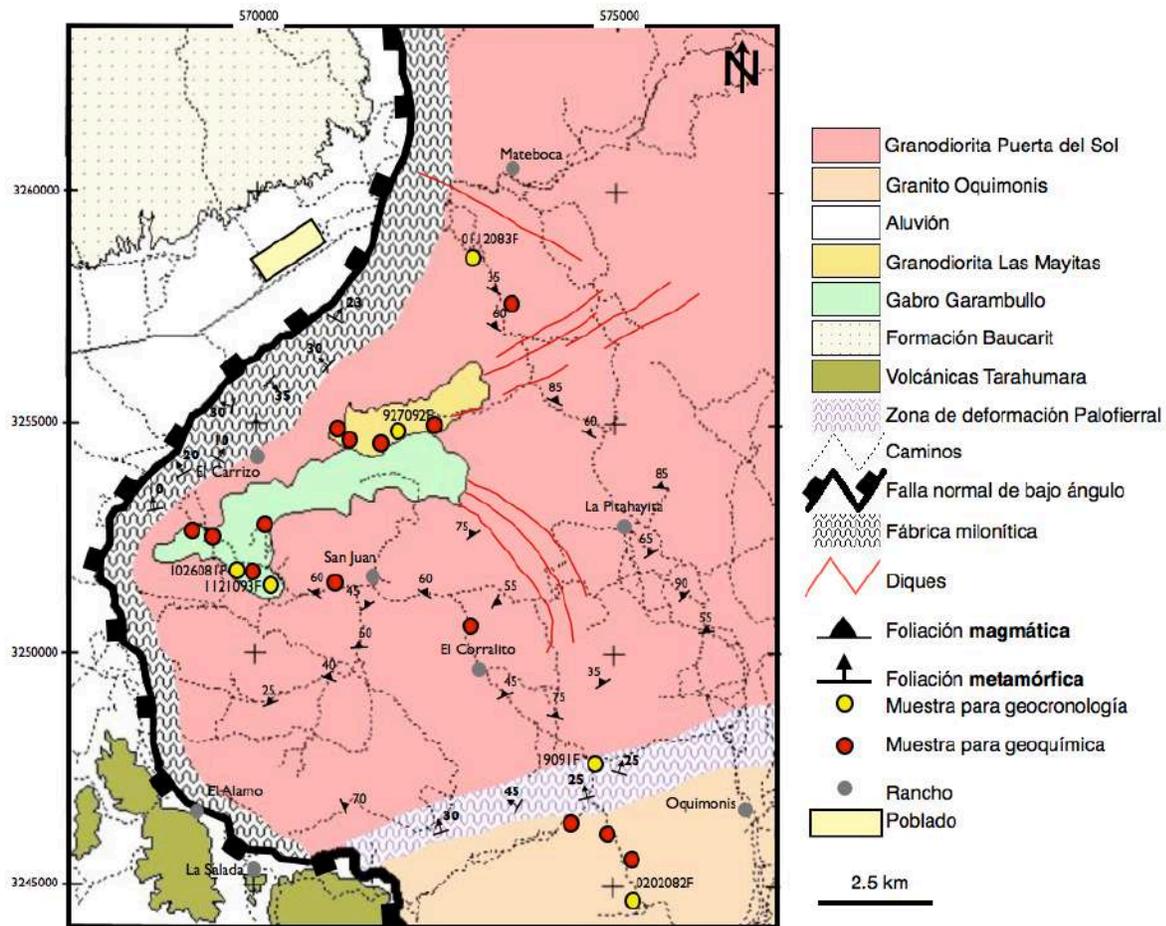


Figura 4. Plano geológico del área de estudio mostrando datos de foliación magmática y metamórfica y la ubicación de las muestras para análisis geoquímico y geocronológico. Los cuadros negros en la falla normal de bajo ángulo indican el bloque de techo. Modificado de Radelli (1986) y Vega-Granillo y Calmus (2006).

## 2.1 Granodiorita Puerta del Sol

La Granodiorita Puerta del Sol es el cuerpo intrusivo más antiguo del área y ocupa además la mayor parte del cuadrángulo con un área mayor a los 100 km<sup>2</sup>. Es un cuerpo de presencia regional ya que sus afloramientos se extienden hacia el norte y oriente, fuera de los límites del área (Fig. 4). Dentro del área estudiada tiende a ocupar las elevaciones inferiores a 700 msnm, por lo que aparentemente se erosiona más fácil que los otros cuerpos intrusivos. Su intemperismo esferoidal es común en los cuerpos granitoides. Es un cuerpo mesocrático porfídico en el que megascópicamente se distinguen feldespato potásico (ortoclasa y microclina), cuarzo, plagioclasa, biotita y hornblenda, en orden de abundancia (Fig. 6). Sin embargo, los cristales tabulares de feldespato potásico alcanzan tamaños que van de los 2 a los 5 cm de longitud y se alinean formando una foliación magmática que ocurre entre N60E de rumbo y echado 60NW hasta N50W de rumbo y echado 50NE (Fig. 5).

Esta foliación magmática es una característica que permite distinguir fácilmente a la granodiorita Puerta del Sol (Fig. 6). Algunos autores han atribuido la causa de formación de este tipo de fábricas a la ascensión del magma durante su emplazamiento, a esfuerzos tectónicos, o a procesos internos de cámaras magmáticas (Paterson *et al.*, 1998). Sin embargo, no se encuentra evidencia que soporte la hipótesis de que las fábricas puedan ser usadas para inferir la geometría de un plutón. Se sabe, también, que las fábricas magmáticas no tienen gran relación con el ascenso o el emplazamiento de un cuerpo. Las fábricas magmáticas preservan, típicamente, las últimas deformaciones por procesos internos o por deformación regional durante el flujo magmático antes de cristalizarse (Paterson *et al.*, 1998).

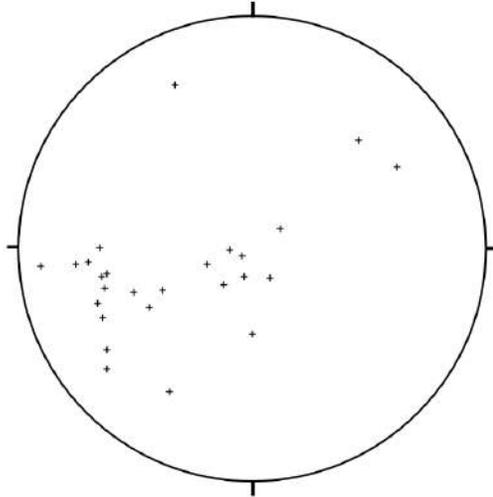


Figura 5. Medidas de foliación magmática en ortoclasas tomadas en la Granodiorita Puerta del Sol. 27 datos en total.



Figura 6. Afloramiento de la Granodiorita Puerta del Sol. Se muestra una superficie de intemperismo (color oscuro) y en superficie fresca (color claro). Notar los fenocristales de ortoclasa, de 5 a 2 cm, que presentan una sutil foliación magmática.

### 2.1.1 Petrografía

La Granodiorita Puerta del Sol es hipidiomórfica y está esencialmente constituida por cuarzo, feldespato potásico (ortoclasa y microclina) y plagioclasa. Sus minerales subordinados circón suelen ser, biotita, hornblenda y esfena. Sus accesorios son apatito, epidota, circón y minerales opacos (Fig. 3). El tamaño de los minerales varía grano medio a grueso.

Presenta texturas porfídicas euhedrales de feldespato potásico cuando no se encuentra deformado y cuando no es éste el caso se presenta holocristalino y con texturas micrográficas.

El cuarzo frecuentemente presenta texturas xenomorfas, de intercrecimiento anhedral con una fuerte extinción ondulante, ambos indicativos de deformación. Usualmente, presenta también, texturas mirmequíticas (Fig. 7).

El feldespato potásico que se encuentra es del tipo ortoclasa y microclina, este último, con menor frecuencia, en fenocristales de hasta 5 cm de longitud. Se suele observar cristales de cuarzo tardío rellenando espacio vacíos o biotita en los cruceros.

Las plagioclasas son de euhedrales a subhedrales, del tipo, andesina ( $An_{40-50}$ ) y en zonas de deformación presenta sus maclas borradas, *kink bands* y sericitización. Se observan comúnmente plagioclasas zonadas, presentando una zonación oscilatoria. La zonación suele ser inversa, es decir, más cálcico en los bordes y más sódico en el centro.

La biotita es de subhedral a anhedral y se presenta frecuentemente cloritizada y en algunos casos se encuentra con circón dentro de sus cruceros. La hornblenda es anhedral y se presenta cloritizada y epidotizada. La esfena se distingue fácilmente por su alto relieve, su color marrón, y por su forma rómbica, se presenta en ocasiones en una forma 'esquelética'. El circón observado se presenta en pequeñas cantidades, de muy alto relieve y con una alta birrefringencia. Se presenta, en ocasiones dentro de cristales de ortoclasa o cuarzo.

La alteración que afecta a este cuerpo es principalmente la (1) alteración propilítica (clorita + epidota + actinolita), que se caracteriza por su color verdoso y se genera principalmente de la descomposición de minerales ferromagnesianos como la biotita, y

el anfíbol y la (2) alteración sericítica (sericita), que se forma principalmente por la alteración de feldespatos, principalmente en plagioclasas.

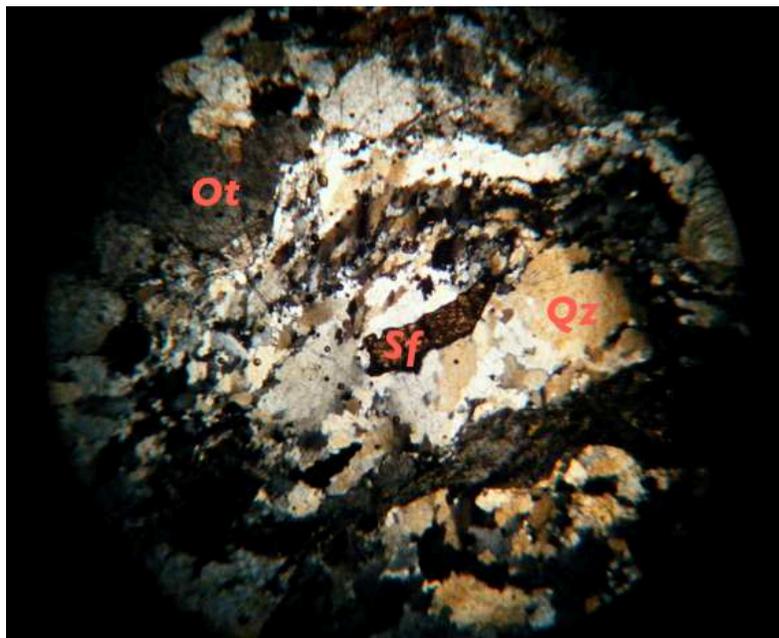


Figura 7. Muestra 10-28-07-3 a 4x perteneciente a la granodiorita Puerta del Sol. Presenta cuarzo (Qz) recrystalizado, ortoclasa (Ot) y esfena (Sf).

### 2.1.2 Edad

Tras realizar un análisis U/Pb en circones para una muestra de la Granodiorita Puerta del Sol, se obtiene una edad de 49 Ma. Esta edad representa la edad de emplazamiento, haciéndolo contemporáneo con el batolito Iaramídico (90 a 40 Ma) propuesto por Damon *et al.* (1983). En otro capítulo de este trabajo se discuten con más detalle los datos relacionados a la edad.

## 2.2. Granito Oquimonis

El Granito Oquimonis, es un cuerpo granítico peraluminoso que cubre un área de aproximadamente 40 km<sup>2</sup> y que aflora en la región sur del área de estudio (Fig. 4). Al igual que la Granodiorita Puerta del Sol, tiende a presentar topografías bajas y desarrolla intemperismo esferoidal.

Se describe en afloramiento como un cuerpo hololeucocrático en ocasiones porfídico de biotita y muscovita, compuesto principalmente de cuarzo, feldespato potásico

(ortoclasa y microclina), muscovita, biotita y plagioclasa (Fig. 8). Su característica principal es la presencia de dos micas la cuales se presentan diseminadas y formando glomero-cristales de mica concentrada.

Se encuentra deformado en sus límites al norte con la Granodiorita Puerta del Sol y en el límite oeste por una falla normal de bajo ángulo (Fig. 4), desarrollando fábrica de deformación en ambos flancos del tipo ortogneiss e incluso fábricas protomiloníticas.



Figura 8. Afloramiento del Granito Oquimonis de dos micas. Se observa característicamente hololeucocrático y con intemperismo esferoidal.

### 2.2.1 Petrografía

Microscópicamente, la textura del Granito Oquimonis se puede definir como panidiomórfica. Se compone principalmente por cuarzo, feldespato potásico (ortoclasa y microclina) y plagioclasa. Los minerales accesorios son generalmente muscovita y biotita. Los minerales accesorios son apatito, circón y opacos. Presenta texturas porfídicas de cuarzo y biotita/muscovita, de grano medio a grueso, mientras que los demás minerales presentan grano medio (Fig. 9). Cuando se encuentra deformado, la

textura es de tamaño más pequeño y se conservan fenocristales de ortoclasa y microclina.

El cuarzo frecuentemente se presenta anhedral y con texturas de intercrecimiento desarrolladas. Cuando éste se encuentra deformado, presenta fábrica con intensa extinción ondulante y recristalización dinámica. Es también común observar texturas granofiricas y mirmequíticas de cuarzo en feldespato potásico y plagioclasas.

Los cristales de feldespato potásico observados son subhedrales a euhedrales y se pueden encontrar ortoclasas presentando una zonación normal. Los cristales de mica (muscovita y biotita) son euhedrales; en ocasiones se puede observar muscovita concentrada en 'bolsillos' que tiende a fengita o muscovita alta en sílice, caracterizada por tender a un color rosado-verde pálido; la biotita se encuentra frecuentemente acompañando a la muscovita en agujas o cristales anhedrales. Las plagioclasas encontradas son del tipo albita-oligoclasa ( $An_{10-20}$ ) y conserva muy bien sus maclas. El apatito se observa euhedral de alto relieve con un color azul-grisáceo. El circón se observa frecuentemente dentro de cristales de cuarzo y cercano a los cristales de apatito.

Estos minerales se encuentran afectados principalmente por una alteración sericítica y, en menor medida, propilítica. La principal alteración se exhibe en los feldespatos, mientras que la propilítica afecta a la biotita, descomponiéndola a clorita.

### 2.2.2 Edad

El Granito Oquimonis fué analizado también por la técnica U/Pb y rindió una edad de 42 Ma. Esta se considera una edad de emplazamiento la cual también lo hace, al igual que la Granodiorita Puerta del Sol, contemporáneo al pulso magmático del batolito laramídico (Damon *et al.*, 1983). En otra sección posterior se discuten los datos relacionados a la edad.



Figura 9. Muestra 4-21-07-5 a 4x perteneciente al Granito Oquimonis. Presenta cuarzo recristalizado (Qz), ortoclasa (Ot) y muscovita (Ms).

### 2.3 Gabro Garambullo

El Gabro Garambullo es un cuerpo melanocrático que aflora en la porción centro-norte (Fig. 4), ocupando un área de  $\sim 20 \text{ km}^2$  y formando las topografías más altas del área, entre 700 y 2,200 msnm, contrastando bastante con la topografía de los cuerpos félsicos.

Está compuesto principalmente por plagioclasa, anfíbol y biotita, en afloramiento se reconoce como un cuerpo melanocrático con una textura porfídica donde los fenocristales son principalmente, de anfíbol y de biotita (Fig. 10). Como característica distintiva presenta concentraciones de ferromagnesianos en 'bolsillos' y una gran cantidad de enclaves (Fig. 11). Los enclaves pueden llegar a medir de 2 a 20 cm. La composición de estos enclaves es variable. Los principales son: granodioritas porfídicas de feldespato potásico, granitoides de grano fino, dioritas de grano fino, dioritas porfídicas de hornblenda y gabros de hornblenda. En muchos casos, es común la abundancia de xenolitos en los márgenes de las intrusiones, especialmente, cercano al techo del cuerpo. Los xenolitos son fáciles de reconocer. Frecuentemente

exhiben formas angulares, contactos agudos con el cuerpo englobante, y sus texturas reflejan recristalización (Didier, 1991).



Figura 10. Afloramiento del Gabro Garambullo con vetas de diorita afectadas por una falla sinmagmática. Se observan, también vetas de epidota.



Figura 11. Enclaves graníticos a dioríticos encontrados en el Gabro Garambullo. Marro de 95 cm de largo.

### 2.3.1 Petrografía

Microscópicamente, es común que el Gabro Garambullo presente texturas porfídicas de hornblenda, biotita y epidota (Fig. 12). También, con menor frecuencia, se puede observar texturas glomerofíricas en los minerales ferromagnesianos. Sus cristales son en su mayoría de subhedral a euhedrales, presentando una textura hipidiomórfica. Se compone principalmente de plagioclasa, hornblenda, epidota y biotita. Los subordinados son esfena, ortoclasa, actinolita, opacos (hematita y magnetita) y cuarzo. La plagioclasa es de tipo labradorita-bytownita ( $An_{60-70}$ ) se presenta en cristales euhedrales con texturas de intercrecimiento.



Figura 12. Muestra 1-8-09-1 a 4x perteneciente al Gabro Garambullo. Se observa plagioclasa (Pg), hornblenda (Hb), biotita (Bt) y epidota (Ep).

La hornblenda se presenta en fenocristales euhedrales fibrosos con numerosas inclusiones de cristales opacos (hematita y magnetita) en los cruceros. La epidota se observa en fenocristales subhedrales y presentando texturas 'esqueléticas'. La biotita se presenta de subhedral a euhedral, con inclusiones de opacos en sus cruceros. La esfena se observa considerablemente euhedral, formando cristales en forma rombica fáciles de reconocer por su alto relieve. Se encuentra en intercrecimiento con la

plagioclasa. La ortoclasa, se encuentra formando pequeños cristales, difíciles de reconocer por su tamaño y porque se encuentran rodeadas de plagioclasa.

Ocurre también actinolita que se presenta subhedral en agregados fibrosos formando agujas. Es difícil distinguirla de la hornblenda. El principal criterio para esto es su color de pleocroismo. Los opacos se exhiben en la muestra diseminados, y en numerosas inclusiones en clivajes de micas y anfíboles. Este cuerpo se encuentra afectado por una alteración propilítica, siendo muy evidente en los minerales ferromagnesianos y la cantidad de vetillas de epidota que afectan al plutón (Fig. 10).

### 2.3.2 Edad

Debido a las relaciones de enclaves observadas en el Gabro Garambullo, se le atribuye una edad menor a 42 Ma. Sin embargo, considerando su composición poco común para pertenecer a los plutones del batolito Laramide en Sonora (Damon *et al.*, 1983), se decidió realizar un fechamiento U/Pb y un fechamiento Ar/Ar. El fechamiento U/Pb dió resultados de 19.8 Ma, mientras que el fechamiento Ar/Ar 18.1 Ma. Esta edad concuerda con las relaciones de campo y también lo hace contemporáneo al período de extensión *Basin and Range* en Sonora.

## 2.4. Granodiorita Las Mayitas

La Granodiorita Las Mayitas es un cuerpo mesocrático porfídico de cuarzo y plagioclasa que ocupa un área  $\sim 7$  km<sup>2</sup>, considerablemente menor que los demás intrusivos. La Granodiorita Las Mayitas aflora hacia el lado este y en contacto intrusivo con el Gabro Garambullo (Fig. 4), ocupando topografías medias, de 700 a 1200 msnm. Este plutón fue cartografiado y nombrado por Radelli (1986) como 'Granito Las Mayitas' pero en base al análisis químico y petrográfico presentado, se reclasifica aquí como granodiorita. Este intrusivo está compuesto principalmente por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico (ortoclasa) y biotita, con textura de grano medio y con fenocristales de plagioclasa, ortoclasa y biotita (Fig. 3).

Al igual que el Gabro Garambullo, la Granodiorita Las Mayitas exhibe una gran abundancia de texturas magmáticas y xenolitos de diferentes litologías (Fig. 13 y 14).

La presencia de enclaves se hace más intensa en el flanco oeste, es decir, en el contacto con el Gabro Garambullo. En ésta zona se presentan enclaves con dimensiones desde 1 cm a ~2 m y son de una gran cantidad de composiciones y texturas. A continuación serán descritos brevemente los enclaves encontrados: (1) enclaves máficos microgranulares, (2) enclaves máficos porfídicos de plagioclasa, (3) enclaves máficos porfídicos de hornblenda (Fig. 14), (4) enclaves provenientes de la granodiorita Puerta del Sol (identificada por sus grandes fenocristales de feldespato potásico), (5) enclaves granodioríticos/dioríticos porfídicos de plagioclasa, (6) enclaves provenientes de la Granodiorita Puerta del Sol deformada.

Estos enclaves se presentan con texturas que puede ser microgranulares, porfídicas, con halos felsicos alrededor y texturas tipo *schlieren*. Además de presentarse una gran variedad de estructuras menores como vetas felsicas y fallas sinmagmáticas.

La Granodiorita Las Mayitas se interpreta como una fase diferenciada del Gabro Garambullo. Esto se especula por su relación de enclaves y su contemporaneidad. Sin embargo, su relación cogenética, está pendiente por ser demostrada



Figura 13. Afloramiento de la Granodiorita Las Mayitas con enclaves gabróticos y dioríticos cortados por vetillas félsicas.



Figura 14. Afloramiento de la Granodiorita Las Mayitas con un enclave de una hornblendita y otro perteneciente a la Granodiorita Puerta del Sol.

#### 2.4.1 Petrografía

Microscópicamente la Granodiorita Mayitas, presenta una textura de grano medio a fino, porfídica de plagioclasa, ortoclasa y biotita (Fig. 15). Los cristales son de subhedral a anhedrales, exhibiendo una textura hipidiomórfica. Se compone principalmente de cuarzo, plagioclasa del tipo oligoclasa-andesina ( $An_{25-35}$ ), ortoclasa. Los minerales subordinados son biotita y clorita. Los accesorios son esfena, opacos, y circón.

El cuarzo se presenta de subhedral a anhedral, no presenta extinción ondulante y se encuentra relativamente sano. Es común encontrarlo rellenando espacios vacíos.

La plagioclasa es de tipo oligoclasa-andesina, y se observa en fenocristales euhedrales con frecuencia formando agregados. La ortoclasa es relativamente escasa y presenta zonación composicional, frecuentemente con inclusiones de circón. La biotita se observa en fenocristales euhedral con inclusiones de circón en los cruceros y acompañada de minerales opacos. Es común observar alteración clorítica en las orillas de la biotita.

La esfena se observa de alto relieve, presenta un color café-amarillento y forma cristales rómbicos euhedrales. Se pueden observar también en cristales 'esqueléticos'. Acompaña a los minerales opacos y biotita. Los opacos, del tipo hematita-magnetita son subhedrales y están diseminados en la muestra. El circón, se observa en pequeños cristales tabulares euhedrales de alto relieve.

#### 2.4.2 Edad

La Granodiorita Las Mayitas fue fechada también por la técnica K/Ar en biotita y rindió una edad de 19.2 Ma. Este análisis corresponde a una edad de enfriamiento la cual la hace contemporánea con el Gabro Garambullo y, por lo tanto, perteneciente al mismo evento tectónico.



Figura 15. Muestra 4-21-07-2 a 4x perteneciente a la Granodiorita Las Mayitas. Se observa plagioclasa (Pg), hornblenda (Hb) y cuarzo (Qz).

## 2.5 Diques

Los diques en el área de Puerta del Sol son estructuras importantes que deben ser tomadas en cuenta, ya que aportan información sobre la deformación a la que ha estado sometida esta zona (Fig. 4). Anteriormente han sido estudiados y descritos en los cortes nororientales de la carretera de Ures-Mazocahui por varios autores (Anderson *et al.*, 1980; Radelli *et al.*, 1995; Bronner y Radelli, 1996; Wong y Gans, 2008).

Los cuerpos plutónicos del área se encuentran intrusionados por dos tipos de diques: (1) diques gabroicos y dioríticos (Fig. 16) y (2) diques aplíticos y pegmatíticos (Fig. 17). Ambos pueden tener espesores desde 5 cm hasta 4 m. Sin embargo, es más común que los diques máficos tengan mayor espesor que los diques félsicos.

La presencia de los dos tipos de diques varía de plutón a plutón. La relación de la presencia de los diques en los plutones será discutida a continuación.

- El Granito Oquimonis se encuentra intrusionado solamente por diques félsicos. La roca encajonante no presenta bordes de enfriamiento considerables ni metasomatismo.
- La Granodiorita Puerta del Sol es intrusionada por diques máficos y diques félsicos. Los de mayor espesor son los máficos, pero suelen ser más abundantes los diques félsicos. Los diques máficos forman bordes de enfriamiento en la roca huesped.
- La Granodiorita Las Mayitas es intrusionada por diques máficos y félsicos con espesores inferiores a 2 mt. Es común observar fallas sinmagnéticas que desplazan a estas estructuras sin producir cataclasis ni deformación.
- El Gabro Garambullo es intrusionado en su mayoría por diques félsicos de hasta ~3 m de espesor. Estos diques se observan epidotizados y presentan estructuras cinemáticas (Fig. 17). Se encuentran fallados y asimilados por el Gabro Garambullo.



Figura 16. Diques gabróicos de grano fino cortando a la Granodiorita Puerta del Sol afectada por fábrica milonítica.



Figura 17. Diques graníticos de grano fino cortando al Gabro Garambullo. En los diques se observa desplazamiento por fallamiento sinmagmático.

Los diques máficos son melanocráticos y de grano fino, con una composición de andesita a andesita basáltica (Wong y Gans, 2008). Se componen principalmente de plagioclasa, hornblenda, biotita y epidota (Fig. 18). Presentan una textura holocristalina hipidiomórfica de grano fino, porfídica de plagioclasa del tipo bitownita ( $An_{70-90}$ ). La textura y su arreglo mineralógico son muy consistentes en las localidades en las que se observa. En la parte central y noroccidental de la región presentan una disposición N10-60W con un buzamiento de 50NE a 50SE.

Los diques félsicos se presentan leucocráticos, con una composición de granítica a granodiorítica. Se componen principalmente de cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita y muscovita (Fig. 19). Presentan una textura holocristalina panidiomórfica. El tamaño de grano es variable ya que presentan texturas aplíticas y pegmatíticas. Presentan una disposición N15W a N50E con un buzamiento de NE a SE.

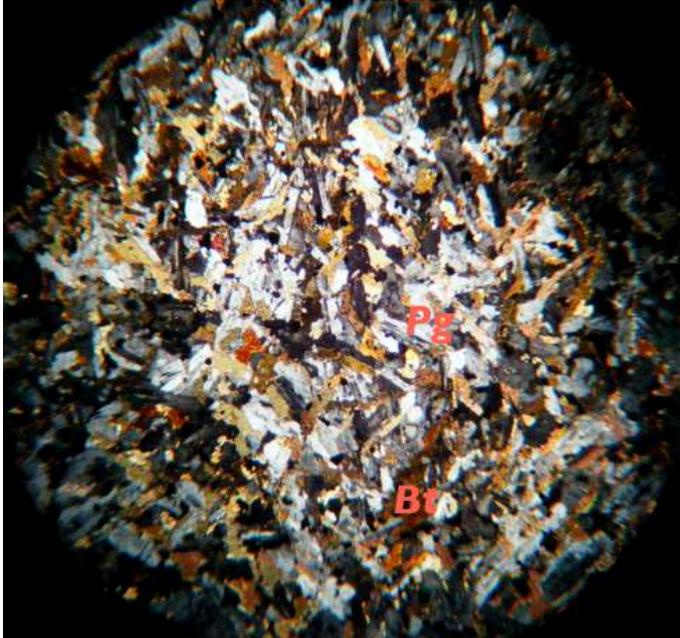
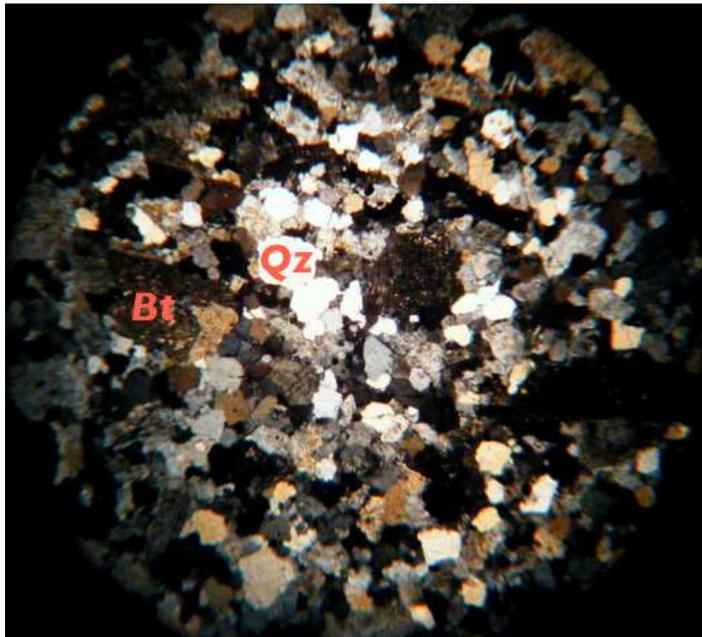


Figura 18. Muestra 08-14-09-3 a 25x perteneciente a un dique máfico afanítico. Se observa biotita (Bt) y plagioclasa (Pg).



Muestra 19. Muestra 11-21-09-4 a 4x perteneciente a un dique félsico. Se observa cuarzo (Qz) y biotita (Bt).

### 2.5.1 Edad

Wong y Gans (2008), proporcionan un edad isócrona Ar/Ar en hornblenda de  $22.6 \pm 0.4$  Ma para un dique máfico en el corte del tramo carretero Ures - Mazocahui, kilómetro 70. Dichos autores estudiaron esta región y reportan un buzamiento promedio de S48W. También, sugieren su relación con un pulso magmático significativo durante el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano. Esto es importante porque se relaciona temporal y composicionalmente con los intrusivos máficos del Mioceno temprano (Gabro Garambullo, 20 Ma; Granodiorita Mayitas 19 Ma) y es altamente probable que éstos cuerpos sean la fuente de la familia de diques máficos presentes en ésta región.

### 3. Geocronología

Para este estudio se colectaron seis muestras para su análisis por los métodos geocronológicos de  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  en circones (tres muestras),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en feldespatos (dos muestras) y  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  en biotitas (una muestra) (Tabla I).

Dos fechamientos U/Pb fueron realizados en el laboratorio Arizona LaserChron de la Universidad de Arizona por el Dr. Victor Valencia con un espectrómetro de masas GVI Isoprobe acoplado a un sistema de ablación láser 193 nm Excimer. Uno más por este mismo método fué realizado en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla por el Dr. Luigi Solari realizado con un espectrómetro de masas inducido de ablación láser (LA-ICPMS). Los fechamientos Ar/Ar fueron realizados en el Laboratorio de Geocronología en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por la Dra. Margarita López con un espectrómetro de masas tipo VG-5400. Por último, se cuenta con una fecha K/Ar que se realizó en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) por el Dr. Jesús Solé en un espectrómetro de masas.

Tabla I. Resumen de las muestras tomadas para geocronología con datos generales de ubicación (UTM), método usado, mineral analizado, edad y laboratorio de análisis.

Muestra	Localidad	X	Y	Método	Mineral	Edad (Ma)	±	Analizados en
1121093F	Garambullo	568679	3251838	U/Pb	Circón	19.8	0.2	UNAM (Juriquilla)
0112083F	Puerta del Sol	573580	3258270	U/Pb	Circón	49.1	0.8	University of Arizona
0202082F	Ocuimonis	576850	3244858	U/Pb	Circón	41.8	0.7	University of Arizona
19091F	Palofierral	575140	3246040	Ar/Ar	Feldespatos	22.6	1.3	CICESE
1026081F	Garambullo	568300	3252016	Ar/Ar	Plagioclasa	18.1	0.8	CICESE
927092F	Las Mayitas	573835	3255437	K/Ar	Biotita	19.2	1.2	UNAM-LUGIS

Anteriormente, se reportaron dos estudios que presentan datos geocronológicos por Anderson *et al.* (1980) y Wong y Gans (2008). El primero de ellos se obtuvo un fechamiento U/Pb en circones de la granodiorita Puerta del Sol que arroja una edad de  $57 \pm 3$  Ma y en el segundo se reportan presentan tres fechamientos Ar/Ar en feldespato potásico que arrojan edades de 17.5 a 24 Ma.

### 3.1 Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Para este estudio, se analizaron dos muestras: una perteneciente al gabro Garambullo (1026081F) analizada en plagioclasa y hornblenda, la siguiente, al gneiss Palofierral (19091F) analizado en feldespatos. Las muestras fueron tomadas para su análisis en roca fresca libre de alteración.

Los resultados de la muestra 1026081F (Fig. 20) fueron dos edades que tienen diferente significado. La edad proveniente del anfíbol no rindió resultados satisfactorios. La edad medida en plagioclasa rinde una edad isócrona de  $13.4 \pm 1.4$  Ma y una edad de meseta de  $18.1 \pm 0.8$  Ma, la edad isócrona indica la presencia de exceso de argón con un cociente  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $397 \pm 21$ , la edad de meseta representa una media de las plagioclasas medidas.

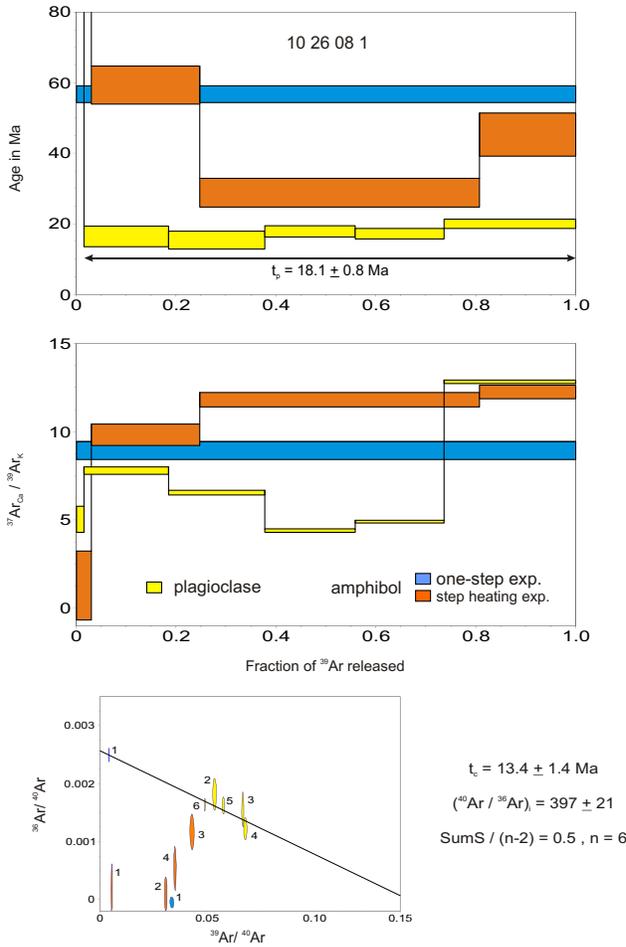


Figura 20. Diagramas de resultados para los análisis por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para la muestra 1026081F

Para la muestra 19091F (Fig. 21) se analizó un feldespato y la fracción más radiogénica rinde la edad más joven de  $22.6 \pm 1.3 \text{ Ma}$ . Como se puede ver en la figura, el espectro de edad está algo perturbado con edades más antigua en el primer paso de calentamiento, indicando la presencia de un exceso de argón. Con excepción de esta fracción, los datos se alinean muy bien indicando una edad de 22.6 Ma que coincide muy bien con la edad de la fracción más radiogénica.

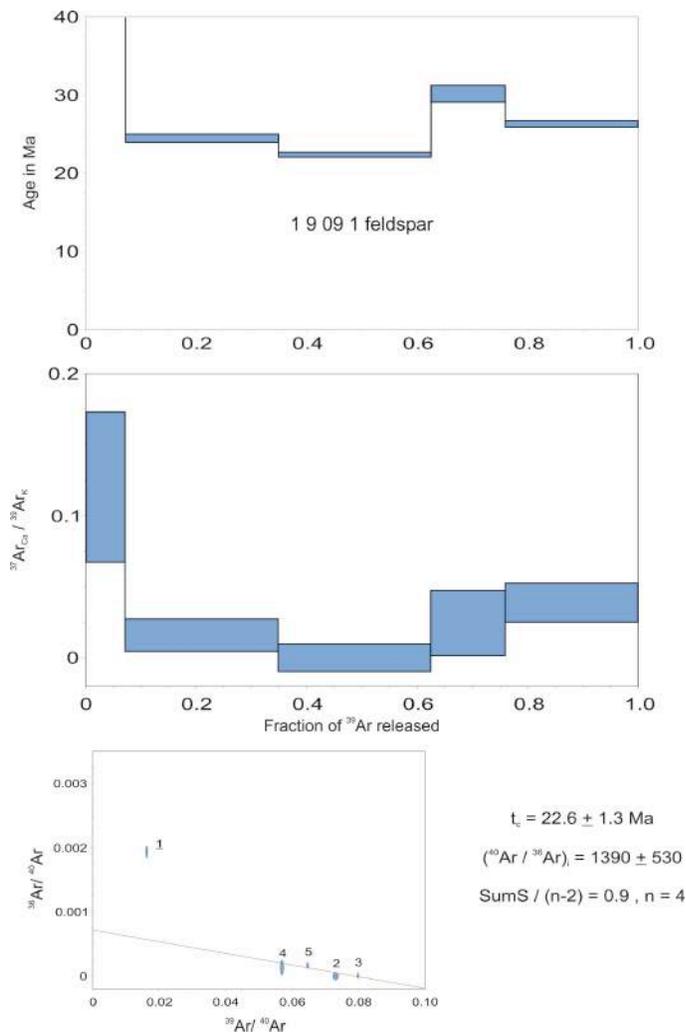


Figura 21. Diagramas de resultados para los análisis por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para la muestra 19091F

### 3.2 Geocronología U/Pb

El método de geocronología U/Pb ha sufrido grandes avances en exactitud y precisión, lo cual significa el grado de cercanía de una cantidad a su valor real y su capacidad de reproducirlo o repetir la medición. Gran parte de estos avances en geocronología se deben a la mejora en espectrometría de masas inducida por ablación laser (LA-ICPMS). Los análisis son realizados en circones, los cuales son perforados por un láser de 35 a 25  $\mu\text{m}$ . El material liberado es transportado a un espectrómetro de masas

acoplado a una fuente de plasma donde se analiza la cantidad de U. Se asume una temperatura de cierre para el sistema mineral de U y Th en el circón es de  $\sim 900^{\circ}\text{C}$ .

Por este método se analizaron tres muestras: una perteneciente al Gabro Garambullo (1121093F), otra perteneciente a la Granodiorita Puerta del Sol (0112083F) y otra al Granito Oquimonis (0202082F).

En lo referente a la muestra 1121093F (Fig. 22) perteneciente al Gabro Garambullo, los cristales primarios de circón arrojan edades de  $19.8 \pm 0.2$  Ma. Además, se analizaron dos circones que rinden edades de 78 y 70 Ma, esto significa que son heredados de rocas laramídicas (Tabla II).

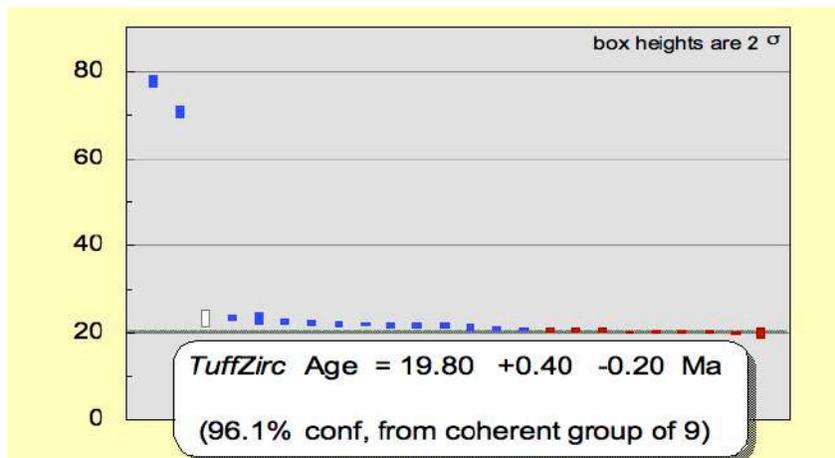


Figura 22. Diagramas de resultados para los análisis por el método U/Pb para la muestra 1121093F.

Los resultados para la muestra 0112083F (Fig. 23) perteneciente de la Granodiorita Puerta del Sol, arrojan una edad de  $49.1 \pm 0.8$  Ma. En los análisis se tiene un análisis para un circón heredado con una edad en el Proterozoico (Tabla III).

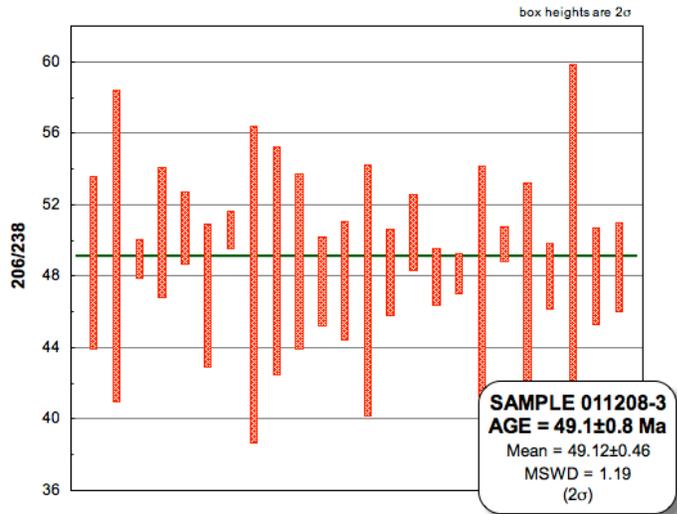


Figura 23. Diagramas de resultados para los análisis por el método U/Pb para la muestra 011208-3F.

Los análisis en circones para la muestra 0202082F (Fig. 24) del Granito Oquimonis rindieron resultados de  $41.8 \pm 0.7$  Ma. Se tienen análisis para 5 circones heredados que rinden edades del Paleoproterozoico superior, entre 1610 a 1690 Ma (Tabla III).

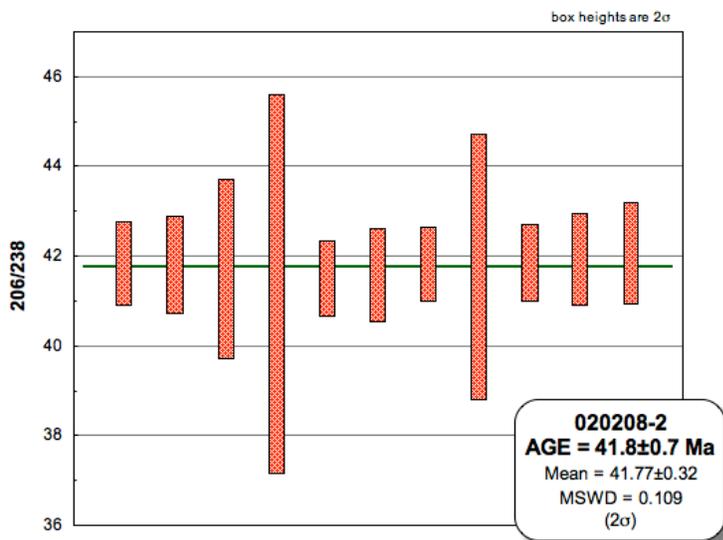


Figura 24. Diagramas de resultados para los análisis por el método U/Pb para la muestra 020208-2F.

Tabla II. Resultados del análisis U/Pb en circón para la muestra 1121093F

SAMPLES	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	CORRECTED RATIOS		CORRECTED AGES (Ma)		Best age (Ma)	% disc														
				207Pb/206Pb ±1s	207Pb/235U ±1s	207Pb/235U ±1s	207Pb/206Pb ±1s																
Zircon 10_018	1245	1387	1.02	0.07113	0.018	0.03066	0.008	0.00325	0.00003	0.001	0.00002	0.05	20.9	0.2	31	8	961	518	20.2	0.4	21	0	32.581
Zircon 11_020	657	713	0.00	0.05386	0.003	0.02385	0.0012	0.00323	0.00004	0.00096	0.00002	0.23	20.8	0.3	24	1	365	101	19.4	0.4	21	0	13.333
Zircon 11_21-09	782	578	0.00	0.03563	0.002	0.01553	0.0008	0.00309	0.00008	0.00108	0.00004	0.24	21.8	0.2	15.6	0.7	-129	71	21.8	0.8	22	0	-39.74
Zircon 12_021	1510	3206	1.93	0.04635	0.001	0.02012	0.0006	0.00314	0.00003	0.00098	0.00002	0.3	20.2	0.2	20.2	0.6	16	55	19.8	0.4	20	0	0
Zircon 13_022	1466	2161	1.34	0.04618	0.001	0.01937	0.0006	0.00308	0.00003	0.00097	0.00002	0.28	19.8	0.2	19.7	0.6	7	55	19.6	0.4	20	0	-0.508
Zircon 14_023	176	169	0.87	0.07294	0.012	0.03309	0.0056	0.00349	0.00021	0.00105	0.00003	0.34	22	1	33	6	1012	325	21.2	0.6	22	1	33.333
Zircon 15_024	385	369	0.87	0.06081	0.011	0.02847	0.0052	0.00346	0.00006	0.00116	0.00005	0.1	22.3	0.4	29	5	633	363	23	1	22	0	23.103
Zircon 16_026	1672	2445	1.33	0.05652	0.004	0.02389	0.0015	0.00305	0.00003	0.00097	0.00002	0.17	19.6	0.2	24	1	473	131	19.6	0.4	20	0	18.333
Zircon 17_027	294	208	0.00	0.05311	0.002	0.01528	0.0011	0.00342	0.00004	0.00113	0.00002	0.15	22	0.3	15	1	-151	103	22.8	0.8	22	0	-46.67
Zircon 18_028	1589	2377	1.36	0.06671	0.002	0.04244	0.0007	0.00314	0.00003	0.00099	0.00002	-0.02	20.2	0.2	2.5	0.7	-1540	104	12.6	20	0.4	0	-708
Zircon 19_029	1823	2904	0.91	0.04809	0.002	0.02037	0.0007	0.00308	0.00002	0.00094	0.00002	0.22	19.8	0.1	20.5	0.7	104	71	19	0.4	20	0	3.4146
Zircon 20_030	1084	1325	1.14	0.04818	0.003	0.02019	0.001	0.00304	0.0001	0.00096	0.00002	0.48	19.6	0.6	20	2	108	150	19.5	0.5	20	1	5.1643
Zircon 21_032	1823	2528	1.26	0.04907	0.001	0.02118	0.0005	0.00314	0.00003	0.00103	0.00002	0.33	20.2	0.2	21.3	0.5	151	53	20.8	0.4	20	0	16.4
Zircon 22_033	455	229	0.46	0.05695	0.003	0.02527	0.0015	0.00325	0.00004	0.00096	0.00002	0.23	20.9	0.3	25	1	490	120	19.4	0.4	21	0	28.667
Zircon 23_034	539	409	0.69	0.05083	0.002	0.02334	0.0011	0.00336	0.00005	0.00099	0.00003	0.32	21.6	0.3	23	1	233	98	20	0.6	22	0	6.087
Zircon 24_035	1740	2113	1.11	0.04954	0.002	0.02099	0.001	0.00308	0.00002	0.00096	0.00002	0.23	19.8	0.2	21.1	1	173	98	19.4	0.4	20	0	6.1611
Zircon 25_036	5984	3339	0.51	0.04927	1E-03	0.02154	0.0005	0.00317	0.00002	0.00102	0.00002	0.34	20.4	0.1	21.6	0.5	161	45	20.6	0.4	20	0	5.5556
Zircon 26_038	423	338	0.73	0.06418	0.009	0.02948	0.0041	0.00332	0.00004	0.00123	0.00016	0.09	21.4	0.3	30	4	748	291	25	3	21	0	28.667
Zircon 29_041	809	517	0.00	0.04736	0.002	0.07181	0.0025	0.01101	0.00011	0.00332	0.00005	0.3	70.6	0.7	70	2	67	69	67	1	71	1	-0.857
Zircon 3_010	279	150	0.00	0.05992	0.005	0.02094	0.0019	0.00253	0.00005	0.00078	0.00002	0.36	16.3	0.3	21	2	601	171	15.8	0.3	16	0	22.381
Zircon 30_042	353	442	1.14	0.05375	0.003	0.02564	0.0015	0.00353	0.0001	0.00102	0.00002	0.49	22.7	0.6	26	1	361	108	20.6	0.4	23	0	12.692
Zircon 31_044	406	396	0.89	0.04593	0.002	0.02243	0.0011	0.00358	0.00005	0.00146	0.00002	0.27	23	0.3	23	1	6	96	29	5	23	0	0
Zircon 31_046	246	296	0.07	0.03979	0.003	0.01903	0.0022	0.00375	0.00032	0.00102	0.00003	0.73	24	2	19	2	-302	163	20.6	0.6	24	2	-26.32
Zircon 34_047	624	620	0.00	0.05447	0.002	0.02485	0.001	0.00332	0.00004	0.00104	0.00002	0.29	21.4	0.3	25	1	391	83	20.1	0.4	21	0	14.4
Zircon 35_048	889	1259	1.29	0.05504	0.005	0.02532	0.0023	0.00334	0.00003	0.00103	0.00002	0.12	21.5	0.2	25	2	414	190	20.8	0.4	22	0	14
Zircon 36_050	647	703	0.99	0.04372	0.003	0.01992	0.0015	0.00329	0.00004	0.00105	0.00002	0.15	21.2	0.3	20	1	-85	140	21.2	0.6	21	0	-6
Zircon 37_051	832	887	0.97	0.05131	0.002	0.02376	0.0009	0.00338	0.00004	0.00103	0.00002	0.32	21.8	0.3	23.8	0.8	255	74	20.8	0.4	22	0	8.4034
Zircon 38_052	975	1193	1.11	0.04819	0.002	0.02216	0.0008	0.00332	0.00004	0.00101	0.00004	0.29	21.4	0.3	22.3	0.8	109	77	20.4	0.8	21	0	4.0359
Zircon 39_053	237	66	0.00	0.017	0.005	0.00754	0.002	0.00351	0.00008	0.00165	0.00012	0.07	23.2	0.5	8	2	-921	240	33	2	23	1	-190
Zircon 4_011	612	474	0.00	0.05424	0.003	0.02544	0.0018	0.00351	0.00002	0.00106	0.00002	0.77	23	1	26	2	381	99	21.4	0.4	23	1	11.538
Zircon 40_054	2145	2902	0.56	0.0468	0.001	0.01966	0.0006	0.00305	0.00003	0.00105	0.00002	0.27	19.6	0.2	19.8	0.6	39	57	19.2	0.4	20	0	1.0101
Zircon 5_012	167	174	0.00	0.15027	0.072	0.06268	0.0301	0.00334	0.00005	0.00115	0.00037	0.04	21.5	0.3	62	29	2349	997	30	7	2349	997	65.323
Zircon 6_014	1155	1273	1.00	0.05076	0.001	0.02195	0.0007	0.00315	0.00003	0.00099	0.00002	0.32	20.3	0.2	22	2	220	64	20	0.4	20	0	7.7273
Zircon 7_015	1390	1783	1.17	0.04929	0.002	0.02085	0.0007	0.00306	0.00003	0.00096	0.00002	0.26	19.7	0.2	20.9	0.7	162	71	19.4	0.4	20	0	5.7416
Zircon 8_016	629	603	0.87	0.05238	0.002	0.02455	0.001	0.00343	0.00004	0.00088	0.00002	0.25	22.1	0.3	25	1	302	89	17.8	0.4	22	0	11.6
Zircon 9_017	1154	1965	1.55	0.05109	0.002	0.02245	0.0009	0.00319	0.00003	0.00099	0.00002	0.26	20.5	0.2	22.5	0.9	245	81	18.2	0.4	21	0	8.8889
Zircon 28_040	340	183	0.00	0.04928	0.002	0.08233	0.0034	0.01214	0.00011	0.00308	0.00009	0.23	77.8	0.7	80	3	161	87	77	2	78	1	2.75

Tabla III. Resultados de los análisis U/Pb en círculo para las muestras 0112083F y 0202082F

Analysis	U (ppm)	206Pb/204Pb	U/Th	206Pb*/207Pb*	± (%)	207Pb*/235U*	± (%)	208Pb*/238U	± (%)	error corr.	206Pb*/238U*	± (Ma)	207Pb*/235U*	± (Ma)	206Pb*/207Pb*	± (Ma)	Best age (Ma)	± (Ma)
0112083-1	488	4075	1.3	23.1106	15.6	0.0562	16.2	0.0094	4.4	0.27	60.4	2.7	55.5	8.8	-152.1	389.1	60.4	2.7
0112083-2	1809	16070	2.7	21.7367	6.3	0.0577	6.7	0.0091	2.3	0.34	56.4	1.3	56.9	3.7	-2.1	152.7	56.4	1.3
0112083-3	234	62130	2.0	9.6391	2.6	0.35132	3.8	0.2456	2.3	0.67	145.8	29.4	1530.2	27.3	1692.1	47.4	1692.1	47.4
0112083-4A	1113	13020	6.5	21.5174	3.7	0.0697	3.5	0.0109	1.0	0.26	69.7	0.7	68.4	2.5	22.3	88.0	69.7	0.7
0112083-5	837	6565	2.6	20.8705	7.7	0.0484	10.1	0.0073	6.5	0.65	47.1	3.1	48.0	4.7	95.0	183.4	47.1	3.1
0112083-5A	1611	9205	3.4	20.5567	7.4	0.0501	7.6	0.0075	1.9	0.25	48.0	0.9	49.7	3.7	-130.8	174.0	48.0	0.9
0112083-6	258	3235	2.5	31.7315	31.1	0.0342	32.5	0.0079	9.2	0.28	50.5	4.6	34.1	30.9	-1014.8	943.5	50.5	4.6
0112083-6A	1531	8695	5.4	20.1636	8.8	0.0511	9.2	0.0076	2.8	0.31	48.0	1.3	50.6	4.5	176.0	204.8	48.0	1.3
0112083-8	1336	9970	4.0	21.5756	4.2	0.0483	4.9	0.0075	2.6	0.52	48.5	1.2	47.8	2.3	15.8	100.9	48.5	1.2
0112083-9	1104	42700	11.4	10.9012	1.8	0.3736	5.8	0.0295	5.5	0.95	187.6	10.1	322.3	16.0	1461.8	35.0	187.6	10.1
0112083-10	742	4235	2.9	19.2479	6.8	0.0537	6.9	0.0075	1.2	0.17	48.1	0.6	53.1	3.5	283.3	154.7	48.1	0.6
0112083-11	479	4280	3.0	21.1029	10.6	0.0485	12.6	0.0074	6.8	0.54	47.7	3.2	48.1	5.9	68.7	252.9	47.7	3.2
0112083-12	3574	27600	7.3	21.1861	2.1	0.0505	2.3	0.0077	1.0	0.43	49.8	0.5	50.0	1.1	61.6	49.9	49.8	0.5
0112083-13	564	565	4.9	20.7164	10.8	0.0589	11.2	0.0089	2.8	0.25	56.8	1.6	58.1	6.3	112.5	256.6	56.8	1.6
0112083-15	439	3660	4.0	18.7535	23.0	0.0569	24.6	0.0077	8.8	0.36	48.9	4.4	56.2	13.5	342.6	526.7	48.9	4.4
0112083-16	3196	24945	9.7	20.2861	2.2	0.0518	2.4	0.0076	1.1	0.45	48.9	0.5	51.3	1.2	161.9	51.2	48.9	0.5
0112083-18	413	3075	3.0	19.9701	16.0	0.0543	16.4	0.0079	3.6	0.22	50.5	1.8	53.6	8.6	198.5	374.0	50.5	1.8
0112083-19	1381	10905	3.3	20.1367	4.7	0.0541	5.1	0.0079	2.0	0.39	50.7	1.0	53.5	2.7	179.1	170.7	50.7	1.0
0112083-20	662	4225	3.8	19.6411	15.1	0.0513	15.7	0.0073	4.3	0.27	46.9	2.0	50.8	7.8	236.9	350.0	46.9	2.0
0112083-21	1064	7765	6.7	21.7372	9.2	0.0500	9.2	0.0079	1.0	0.11	50.6	0.5	49.5	4.5	-2.2	221.6	50.6	0.5
0112083-22A	393	3245	3.2	20.8883	23.0	0.0488	24.9	0.0074	9.4	0.36	47.5	4.4	48.4	11.8	93.0	551.4	47.5	4.4
0112083-22A	830	6255	2.8	21.7338	12.7	0.0482	14.3	0.0076	6.6	0.46	48.8	3.2	47.8	6.7	-1.8	307.7	48.8	3.2
0112083-23	603	4900	3.7	19.1494	22.0	0.0547	22.6	0.0076	5.1	0.22	48.8	2.5	54.1	11.9	295.1	507.8	48.8	2.5
0112083-24	809	6065	2.9	19.7586	7.0	0.0518	7.5	0.0074	2.6	0.34	47.7	1.2	51.3	3.7	223.1	162.5	47.7	1.2
0112083-25	877	5930	3.4	20.4133	8.0	0.0502	8.7	0.0074	3.5	0.40	47.7	1.7	49.7	4.2	-147.2	187.6	47.7	1.7
0112083-26	197	2040	2.9	49.2814	59.6	0.0206	60.1	0.0073	7.4	0.12	47.2	3.5	20.7	12.3	-2573.4	102.9	47.2	3.5
0112083-27	645	3380	1.8	19.3356	10.7	0.0535	11.0	0.0075	2.5	0.22	48.2	1.2	53.0	5.7	272.9	245.8	48.2	1.2
0112083-29	398	3980	3.5	20.4870	13.1	0.0529	13.3	0.0079	2.1	0.16	50.4	1.1	52.3	6.8	138.8	308.8	50.4	1.1
0112083-30A	649	4965	2.2	19.9848	13.6	0.0516	13.7	0.0075	1.6	0.12	48.0	0.8	51.1	6.8	199.1	316.3	48.0	0.8
0112083-32A	2874	30705	5.0	15.8257	2.1	0.0962	2.3	0.0109	1.0	0.43	70.1	0.7	92.4	2.1	714.6	45.0	70.1	0.7
0112083-36	614	5230	3.2	20.0186	12.6	0.0522	13.6	0.0076	5.0	0.37	48.7	2.4	51.7	6.8	192.8	294.4	48.7	2.4
202082-1	846	6445	12.5	23.6781	9.4	0.0379	9.4	0.0065	1.1	0.12	41.8	0.5	37.8	3.5	-212.6	235.8	41.8	0.5
202082-2	796	130280	3.5	10.0825	1.8	1.8621	10.0	0.1432	9.9	0.98	862.7	79.9	1102.6	67.7	1612.5	1612.5	862.7	33.2
202082-3	1232	7035	1.8	22.7496	6.4	0.0394	6.6	0.0065	1.3	0.20	41.8	0.5	39.3	2.5	-113.1	158.3	41.8	0.5
202082-5	606	3580	9.3	21.3481	9.8	0.0419	10.1	0.0065	2.4	0.24	41.7	1.0	41.7	4.1	41.2	234.3	41.7	1.0
202082-6	798	5595	1.2	22.2465	3.9	0.0485	4.1	0.0078	1.0	0.25	50.3	0.5	48.1	1.9	-58.3	96.0	50.3	0.5
202082-8	166	1085	1.6	30.8555	97.1	0.0288	97.3	0.0064	5.1	0.05	41.4	2.1	28.8	27.6	-927.7	1803.4	41.4	2.1
202082-10	1154	6380	1.2	22.2902	5.2	0.0399	5.3	0.0065	1.0	0.19	41.5	0.4	39.8	2.0	-63.1	125.9	41.5	0.4
202082-11	246	95010	1.3	9.6511	1.1	4.1515	1.5	0.2909	1.0	0.67	1846.0	14.5	1664.5	12.2	1687.9	20.5	1687.9	20.5
202082-12	333	2345	2.7	23.6851	25.7	0.0377	25.7	0.0065	1.2	0.05	41.6	0.5	37.5	9.5	-213.4	654.6	41.6	0.5
202082-13	1141	9090	11.2	21.9919	9.5	0.0409	9.6	0.0065	1.0	0.10	41.8	0.4	40.7	3.8	-25.9	230.5	41.8	0.4
202082-14	500	2265	0.5	23.4330	13.3	0.0382	13.7	0.0065	3.5	0.26	41.8	1.5	38.1	3.9	-186.5	332.9	41.8	1.5
202082-16	279	87105	2.5	9.6608	3.1	3.0664	4.4	0.2149	3.2	0.72	1254.6	36.4	1424.3	33.8	1688.0	56.3	1688.0	56.3
202082-17	754	5215	4.8	21.8326	7.9	0.0411	7.9	0.0065	1.0	0.13	41.8	0.4	40.9	3.2	-12.7	190.2	41.8	0.4
202082-19	774	5000	2.5	20.2984	9.7	0.0565	9.7	0.0065	1.0	0.10	53.3	0.5	55.8	5.3	161.6	226.2	53.3	0.5
202082-20	326	88625	1.7	9.6532	1.8	3.2725	2.1	0.2330	1.0	0.48	1350.0	12.2	1487.5	16.4	1689.5	33.9	1689.5	33.9
202082-21	1318	7765	6.7	21.3002	6.6	0.0422	6.7	0.0065	1.2	0.18	41.9	0.5	42.0	2.7	46.6	156.7	41.9	0.5
202082-22	1229	5035	0.8	20.1974	4.7	0.0557	6.1	0.0082	3.8	0.63	52.4	2.0	55.0	3.2	172.1	110.3	52.4	2.0
202082-24	1274	9970	2.6	21.8269	6.9	0.0516	6.9	0.0082	1.0	0.14	52.5	0.5	51.1	3.5	-12.1	166.0	52.5	0.5
202082-23	340	114265	4.7	9.6410	2.8	3.4873	3.2	0.2498	1.6	0.49	1406.6	19.8	1524.3	25.5	1691.8	52.0	1691.8	52.0
202082-25	854	6260	11.9	22.9483	9.5	0.0393	9.6	0.0065	1.3	0.14	42.1	0.6	39.2	3.7	-134.6	236.1	42.1	0.6

### 3.3 Geocronología $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

El método K/Ar se basa en la tasa de decaimiento radioactivo del isótopo  $^{40}\text{K}$  que se transforma en  $^{40}\text{Ar}$ . Para este estudio se realizó un fechamiento en biotita.

Las temperaturas de cierre nominales para la biotita se asumen en  $325 \pm 30^\circ\text{C}$ .

Se realizó un análisis para una muestra tomada de la Granodiorita Las Mayitas (927092F) la cual arrojó una edad de  $19.2 \pm 1.2$  Ma (Tabla IV).

Tabla IV. Resultados del análisis K/Ar en biotita para la muestra 927092F

Spike #	Muestra	Mineral	%K	$^{40}\text{Ar}^*$ (moles/g) x $10^{-10}$	% $^{40}\text{Ar}^*$	Edad (Ma)
1406	927092F	Biotita	738	2465	752	$19.2 \pm 1.2$

## 4. Geología Estructural

En el área de Puerta del Sol existen dos principales estructuras tectónicas que afectan a la Granodiorita Puerta del Sol y al Granito Oquimonis. Estas estructuras son fallas de importancia regional que están asociadas al desarrollo del complejo metamórfico de la Sierra de Mazatán (Fig. 25). La falla más importante es una falla de bajo ángulo (*detachment fault*) localizada en la parte occidental del área y que limita a los cuerpos plutónicos aquí reportados del relleno sedimentario de la cuenca de Ures que aflora hacia el occidente, en el valle del mismo nombre (Fig. 4). A esta falla de despegue, y para propósitos de facilitar la discusión, se le da aquí el nombre informal de falla de despegue de Mazatán. La segunda estructura corresponde a la zona de falla Palofierral que aflora en la parte central del área de estudio.

Otras estructuras que se han considerado asociadas a eventos tectónicos en el área, son las familias de diques de basalto, dioríticos y riolíticos que allí afloran.



Figura 25. Vista panorámica de la sierra de Mazatán a ~20 km al límite sur del área de estudio.

#### **4.1 Falla de despegue de Mazatán**

Esta es una falla normal de bajo ángulo que se manifiesta desde la Sierra de Mazatán al sur hasta la Sierra de Aconchi al norte, siguiendo una dirección NNW-SSE a lo largo del flanco occidental de estas sierras y tiene una longitud aproximada de 120 km (Lugo-Zazueta, 2006). Diversos autores (Lugo-Zazueta, 2006 y Wong y Gans, 2008) proponen una traza estructural que involucra la Sierra de Mazatán, Puerta del Sol y se extiende hacia el norte, posiblemente hacia la Sierra de El Jaralito y Aconchi. Es por esta razón que se continúa llamando a esta estructura la Falla de despegue de Mazatán.

En la zona estudiada esta falla aflora con rumbo casi N-S en la parte occidental del área donde pone en contacto al Granito Oquimonis y la Granodiorita Puerta del Sol con sedimentos de la Formación Báucarit (rocas conglomeráticas, masivas de edad Mioceno) y la Formación Belleza (Vega-Granillo y Calmus, 2003) que forman el relleno sedimentario de la cuenca de Ures (Calles-Montijo, 2006), así como, con rocas volcánicas mesozoicas (Calles-Montijo, 2006). En la parte NW del área cambia hacia un rumbo NE, solo por algunos kilómetros.

Vega-Granillo y Calmus (2003), Calles-Montijo (2006) y Wong y Gans (2008) consideran a la cuenca de Ures como la cuenca sedimentaria y volcánica que se desarrolló sintectónicamente sobre el bloque de techo de la falla de despegue. Algunos fechamientos realizados por esos autores a las rocas volcánicas intercaladas con la Formación Báucarit de esa cuenca han ayudado a precisar la edad del complejo metamórfico de la Sierra de Mazatán.

#### 4.1.1 Estructuras y microestructuras

La zona de deformación desarrollada por esta estructura a lo largo de sus ~20 km que van de el camino al Cerro El Pal hasta el rancho La Salada tiene un ancho de 1 a 2 km. En esta región la falla afecta a los plutones Puerta del Sol y Oquimonis, los cuales forman parte del bloque de piso o *footwall* y en los cuales desarrolla una fábrica milonítica. En ella, la foliación varía entre ~N65E a ~N25W de rumbo y 30NW a 20NE de echado (Fig. 26). Sin embargo, la deformación disminuye conforme se aleja de la falla de detachment hacia el interior del cuerpo intrusivo. El bloque de techo o *hanging wall* en la sección norte se encuentra cubierto por depósitos de aluvión. En la sección sur, el bloque superior está cubierto por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Báucarit (Calles-Montijo, 2006), la Formación Belleza y rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Tarahumara (Vega-Granillo y Calmus, 2003). En esta región, produce un gneiss milonítico cuarzo-feldespático con porfiroclastos de ortoclasa, cuyo protolito es la Granodiorita Puerta del Sol, y un granito-gneiss cuarzo-feldespático de dos micas con porfiroclastos de ortoclasa y microclina cuando el protolito es el Granito Oquimonis.

En lámina delgada se observa en el gneiss milonítico una mineralogía de cuarzo, ortoclasa, microclina, plagioclasa, muscovita y biotita, opacos y circón (Fig. 27). Se presenta con alteración clorítica y sericitica, esto es especialmente evidente en el límite inferior de la franja de deformación. El cuarzo se observa recristalizado dinámicamente y con extinción ondulante. La ortoclasa y microclina se presentan de subhedral a euhedral en porfiroclastos con un tamaño de 0.5 cm a 1.5 cm. Las micas son biotita y muscovita y presentan texturas aciculares. Definen la foliación y forman agregados en ‘agujas’ alrededor de los porfiroclastos.

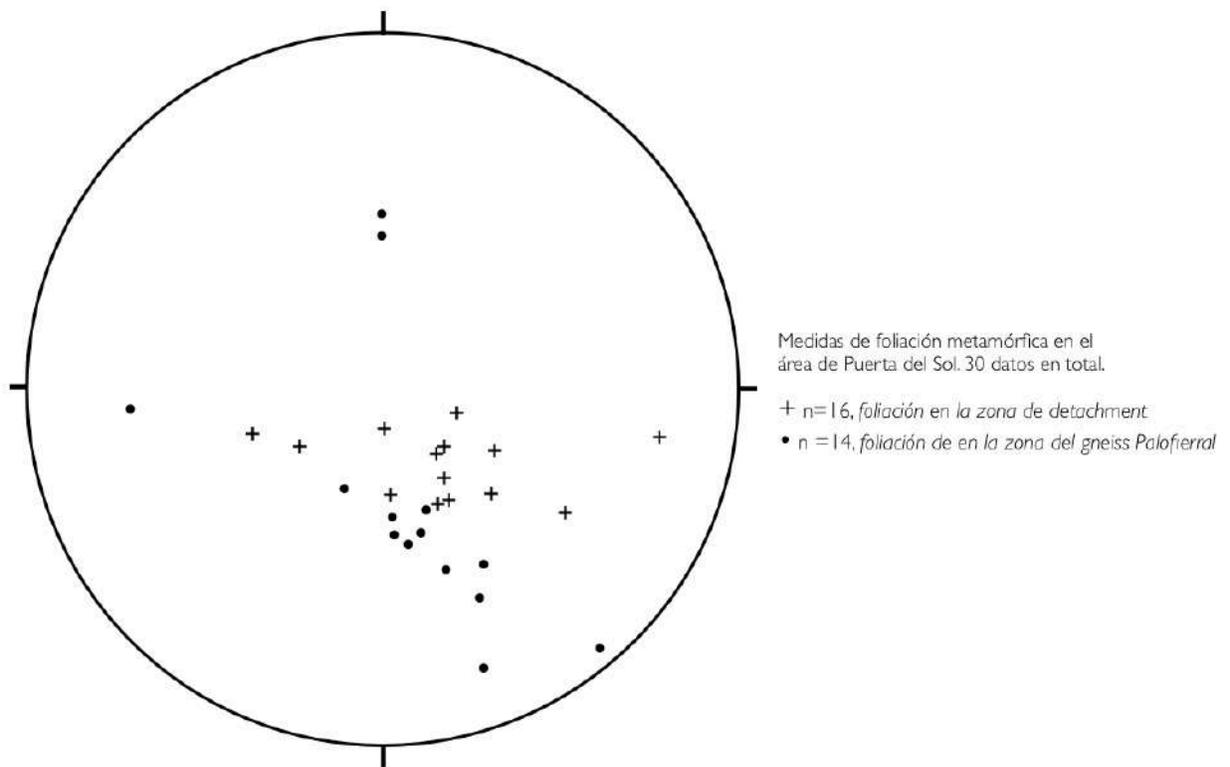


Figura 26. Proyección estereográfica de datos de foliación tomados de la zona de falla de despegue y de la zona de deformación Palofierral.



Figura 27. Muestra 10-28-07-3 a 4x perteneciente a la Granodiorita Puerta del Sol en la zona de falla de despegue. Presenta cuarzo (Qz) recristalizado, ortoclasa (Ot) y biotita (Bt). Luz polarizada.

En la sección norte de la zona de despegue, donde la falla toma un rumbo hacia el NE, se observa que la granodiorita Puerta del Sol desarrolla una fábrica milonítica que se presenta como gneiss milonítico cuarzo-feldespático con porfiroclastos de ortoclasa. También se observan escasos afloramientos de ultramilonitas cuarzo-feldespáticas que se desarrollan en franjas delgadas de un par de decenas de metros de espesor. También, aunque escasas y localizadas, se desarrollan afloramientos de bloques de una brecha con clastos no reconocibles por estar altamente silicificados y cloritizados. Estos bloques tienen buzamiento subhorizontal y están en contacto con la Granodiorita Puerta del Sol ultramilonitizada (Fig. 28). Es probable que estas brechas correspondan a las rocas del bloque de techo de la falla de *detachment*. En lámina delgada las rocas gneissicas y miloníticas presentan el mismo arreglo mineralógico que la Granodiorita Puerta del Sol (cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita, ópacos, esfena, muscovita y circón) y la alteración observada es silicificación, cloritización y epidotitización. El cuarzo se observa recristalizado dinámicamente y con una fuerte extinción ondulante. También presenta texturas de cuarzo en *ribbons*. La ortoclasa se observa de subhedral a euhedral en porfiroclastos que varían en tamaño desde 0.5 mm hasta 3 cm. Las biotitas se observan subhedrales y en texturas aciculares, lo cual ayuda a definir la foliación y forman agregados alrededor de los porfiroclastos. Se observan microestructuras de bandas de cizalla tipo S-C en el gneiss y en la milonita.



Figura 28. Afloramiento de una brecha altamente silicificada y cloritizada frente al cerro El Boludo presentando un echado subhorizontal.

## 4.2. Zona de deformación Palofierral

La zona de deformación Palofierral es una franja de deformación dúctil de ~1 km de ancho que aflora en dirección NE-SW desde el rancho La Salada donde está cubierta por la Formación Báucarit, hasta el límite oriental del área de estudio donde se prolonga hacia el oriente (Fig. 4). Esta es una zona de deformación importante dentro de la cual se desarrolla un gneiss protomilonítico porfídico con grandes cristales de feldespato potásico. Este gneiss tiene una foliación bastante constante de rumbo ~N50E y echado 40NW. Esta franja de deformación dúctil se desarrolla en la zona de contacto entre el Granito Oquimonis y la Granodiorita Puerta del Sol. En la parte central de la zona de deformación se aprecian texturas miloníticas con porfiroclastos de ortoclasa representada por una milonita cuarzo-feldespática con porfiroclastos de ortoclasa y gradualmente hacia sus orillas norte y sur.

Puesto que esta zona tiene por protolito a la Granodiorita Puerta del Sol y al Granito Oquimonis, el Gneiss Palofierral comparte el mismo arreglo mineralógico de cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita, muscovita, ópacos, esfena y circón (Fig. 29).

En lámina delgada el cuarzo se observa recristalizado dinámicamente y con una fuerte extinción ondulante. Es común observar texturas de cuarzo en *ribbons* que suelen ayudar a definir la foliación. La ortoclasa se observa de subhedral a euhedral en porfiroclastos que varían en tamaño desde 0.5 mm hasta 3 cm. La presencia de porfiroclastos de ortoclasa, indica claramente cuando su protolito corresponde a la Granodiorita Puerta del Sol, mientras que la presencia de muscovita y porfiroclastos de microclina de menor tamaño se piensa que son provenientes del Granito Oquimonis. Las micas están representadas por biotita y muscovita, las cuales forman cristales subhedrales y en agujas que delimitan claramente la foliación. En esta zona de deformación se pueden observar microestructuras de bandas de cizalla tipo S-C que sirven como indicadores cinemáticos.

### 4.3. Relación y edad entre la falla de despegue de Mazatán y la zona de deformación Palofierral

La edad de actividad de la falla Puerta del Sol en esta zona está reportada por los resultados de tres edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de enfriamiento, entre 17.5 y 24 Ma, reportadas por Wong y Gans (2008). En esta tesis y en base a un fechamiento Ar/Ar en feldespato potásico separado de una muestra de roca de la zona de deformación Palofierral se obtuvo una edad de enfriamiento de  $22.6 \pm 1.3$  Ma (Fig. 21)). De esta manera y aunque la relación de ambas franjas de deformación no es clara en el campo ya que no aflora el contacto entre ambas, podemos considerar que en base a estas edades, dichas deformaciones son contemporáneas y pertenecen al evento de extensión que se desarrolló entre Puerta del Sol y el complejo metamórfico de Mazatán.

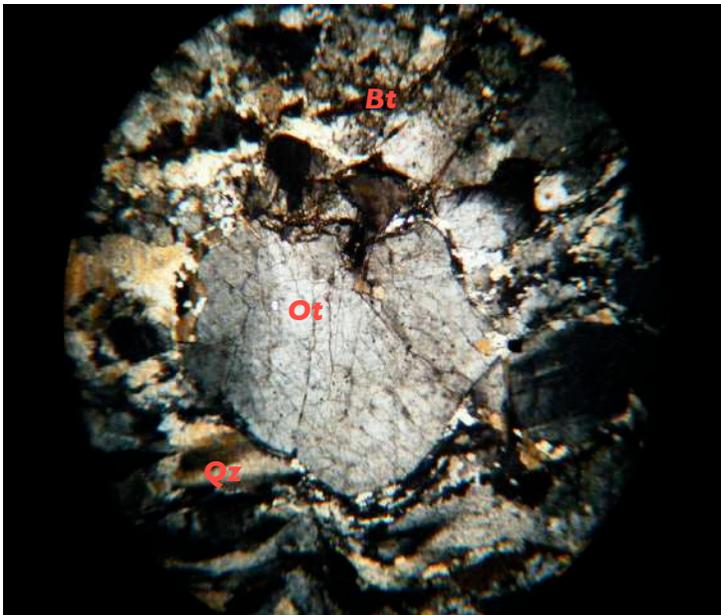


Figura 29. Muestra 1-12-09-1 a 4x perteneciente al gneiss Palofierral. Se observa bajo luz polarizada un porfiroclasto de ortoclasa (Ot), biotita (Bt) y cuarzo (Qz)

#### 4.4 Análisis estructural mediante sensoría remota

En Febrero del 2000, la Misión *Shuttle Radar Topography* (SRTM) a bordo del *Endeavour* adquirió datos de radar de apertura sintética para producir un nuevo modelo de elevación digital (DEM) de la mayoría de las áreas terrestres entre las latitudes 60°N y 56°S (Farr *et al.*, 2007). El DEM está disponible en todas las áreas de reconocimiento a una resolución espacial de 90 m. Los nuevos DEMs proveen de información topográfica de alta calidad para el 80% de la superficie terrestre, mucha de la cual no ha sido bien reconocida antes de la adquisición de información del SRTM (Spencer, 2010).

La información del DEM SRTM está incluida en una representación topográfica y batimétrica que es auspiciada por el *Marine Geoscience Data System* (MGDS) en el *Lamont-Doherty Earth Observatory* de la Universidad de Columbia. Este set de datos globales puede ser consultada en internet con una herramienta de visualización y análisis de imágenes llamada *GeoMapApp*® que se encuentra disponible en la página de internet del MGDS en [www.geomapapp.org](http://www.geomapapp.org). Esta aplicación Java™ permite al usuario observar la topografía y batimetría en diferentes escalas de mapa, crear secciones, y guardar imágenes como archivos gráficos. Las elevaciones están representadas por color, curvas de nivel, y relieve sombreado, todos estos son ajustables a través de la interface gráfica de usuario.

El *GeoMapApp*® es usado en este estudio estructural para trazar nueve secciones que atraviesan la traza de la falla de despegue de Maztán (Fig. 30-I). Se utiliza el filtro de Topografía Global Multi-Resolución (GMRT) para obtener la información de elevación topográfica. Las secciones se realizan con la herramienta *Distance/Profile Tool*, para trazar, en una línea, la trayectoria de la sección. Las secciones se muestran sin exageración vertical en su escala. Esto es útil, para determinar el ángulo de echado en la traza de la falla de despegue.

Se puede observar en las secciones obtenidas (Fig.30-II) que la traza de la falla presenta un perfil de bajo ángulo (entre 20° y 5°), lo cual es consistente con las mediciones de la falla de despegue reportadas en este trabajo y en Mazatán por Vega-Granillo y Calmus (2003) y Wong y Gans (2008). La dirección del echado en la traza de la falla varía desde NW, WNW en las secciones A, B, C y D, WSW a WNW en las secciones G, H, e I, y S, SSW en las secciones F y E.

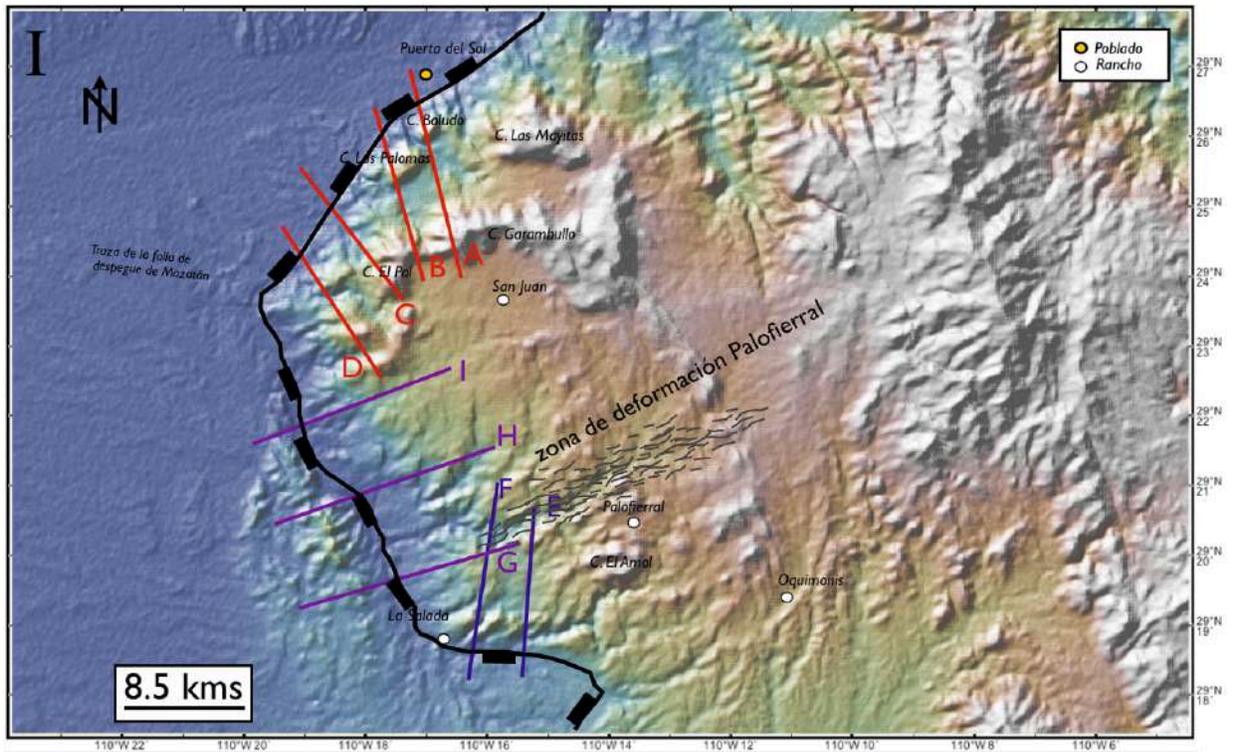
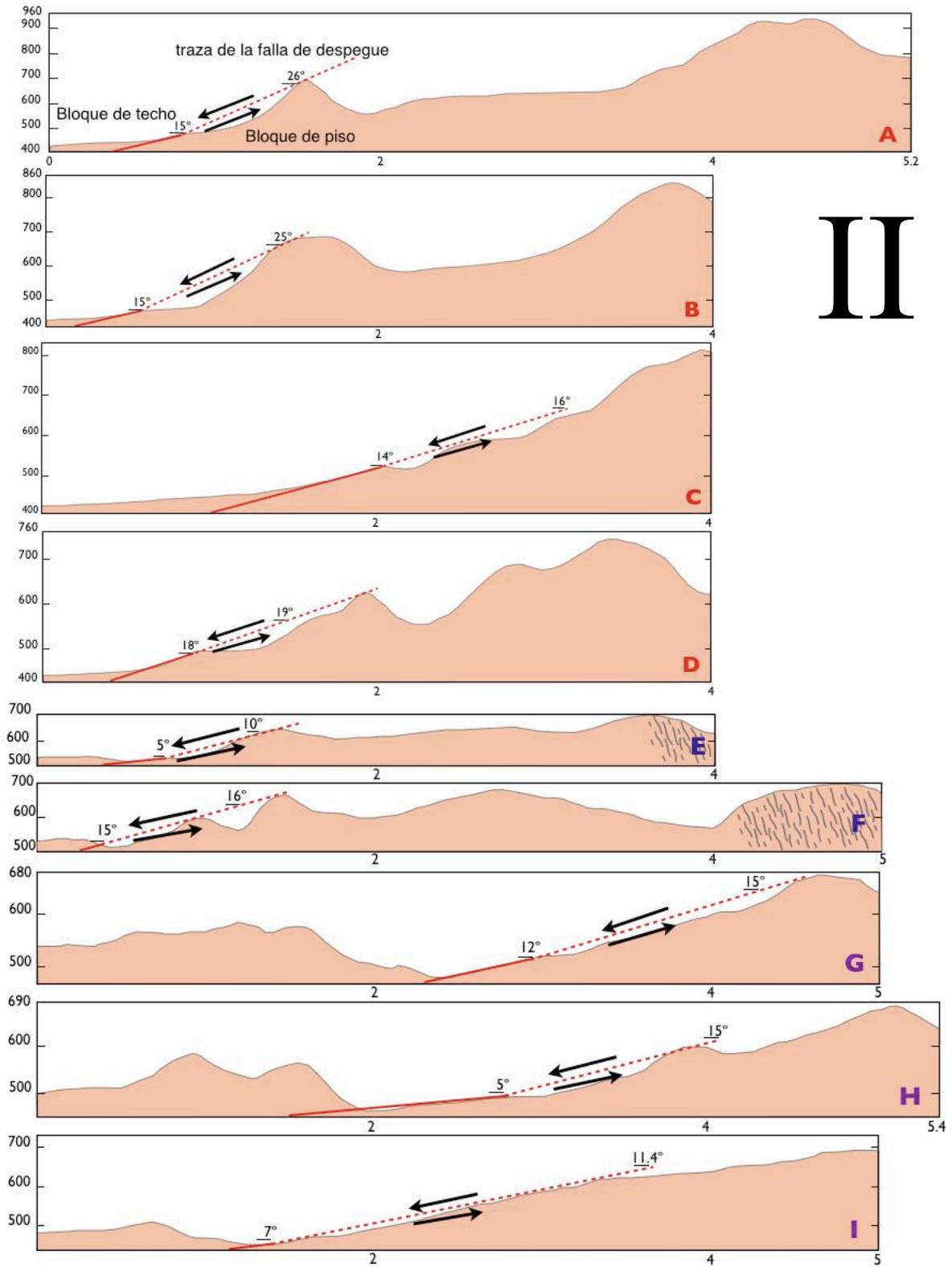


Figura 30. Mapa de Modelo de Elevación Digital (DEM) con un filtro de Topografía Global Multi-Resolución (GMRT) que (I) muestra el área de Puerta del Sol y nueve secciones realizadas con la herramienta GeoMapApp. (II) Secciones transversales topográficas del área de Puerta del Sol. Las líneas grises representan la fábrica milonítica,



## 5. Geoquímica

Se tomaron y analizaron 14 muestras representativas del área de estudio para obtener datos de elementos mayores y elementos traza (Tabla V). Para análisis de cada cuerpo intrusivo se tomaron al menos tres muestras. El muestreo se hizo tomando esquirlas de roca fresca de >7 cm, para después ser preparadas para el análisis.

Las esquirlas fueron trituradas a tamaño de gravilla con un molino de quijadas de acero inoxidable marca Braun Chipmunk. Posteriormente para pulverizar la gravilla se pulverizó utilizando un contenedor con *puck* de cerámica marca Herzog. Este proceso fue efectuado en el Laboratorio de Preparación de Muestras del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste (ERNO) a cargo del Quim. Pablo Peñaflor.

Las muestras *072409G1*, *072409G2*, *072509G1*, *072509G2*, *072509G3*, *0927092G*, *03201003*, *03201004* y *03191003G* fueron analizadas para óxidos mayores y elementos traza en el Laboratorio de ICPMS en un espectrómetro de masas Agilent 7500 en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu y Rufino Lozano Santacruz .

Las muestras *0418081*, *112083B*, *0202082G*, *1121093G* y *1121095G* fueron analizadas en el Laboratorio ICPMS de la Universidad de Arizona por el Dr. Victor Valencia

### 5.1 Óxidos Mayores

Los óxidos de elementos mayores son aquellos que predominan en los análisis de química de roca. Entre los elementos medidos en estos análisis se encuentran Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P, y sus concentraciones se expresan en la cifra por ciento (% wt.) del óxido.

Los resultados crudos de los análisis químicos de óxidos mayores para este estudio se presentan en la Tabla V. Estos datos químicos de óxidos mayores son usados para

apoyar la nomenclatura obtenida con la petrografía y aportar una mejor clasificación para los cuerpos intrusivos.

El porcentaje de  $\text{SiO}_2$  en los cuerpos intrusivos varía de intrusivo a intrusivo. Para la Granodiorita Puerta del Sol se analizaron tres muestras. Su concentración de  $\text{SiO}_2$  varía de 67 a 72% wt. Las concentraciones para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varían entre 15 a 17%, de  $\text{Na}_2\text{O}$  son 4%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se presentan de 2 a 3%,  $\text{K}_2\text{O}$  es de 2.4 a 3% y  $\text{CaO}$  de 3.7 a 2.4%. Los elementos como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  y  $\text{MgO}$  se comportan homogéneamente presentando concentraciones menores a 1%.

Para el Granito Oquimonis se tienen tres análisis. Su concentración de  $\text{SiO}_2$  varía de 70 a 75% wt, mientras que la concentración de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es de ~15 a 16% y la de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  varían de 3 a 4%. Presenta concentraciones inferiores a 2% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{CaO}$ .

En el caso del Gabro Garambullo se realizaron cuatro análisis. Los datos varían de 47 a 49% wt. en  $\text{SiO}_2$ , son sumamente constantes en este elemento y claramente diferenciable de las unidades anteriores. También presenta concentraciones muy superiores en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{CaO}$  en relación a los plutones antes mencionados.

Para la Granodiorita Las Mayitas se tienen cuatro análisis químicos. En esta unidad las concentraciones en  $\text{SiO}_2$  desde 44 a 75% wt. lo cual evidencia una importante variedad petrológica de gabros a granitos. También se presentan concentraciones elevadas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y altas proporciones de  $\text{TiO}_2$  (hasta 2.24%).

Estos datos fueron recalculados al 100% wt. sobre una base anhidra, con el objeto de utilizarlos en los diagramas convencionales de series magmáticas y de discriminación en relación a ambientes tectónicos.



### 5.1.1 Diagrama R1-R2

El diagrama R1-R2 (Fig. 31) de De la Roche *et al.* (1980) propone un esquema de clasificación para rocas plutónicas basado en la proporción de milicaciones. Aunque el diagrama R1-R2 es poco popular debido a los límites curvilíneos de los campos y a los parámetros R1 y R2 que no tienen ningún significado inmediato, se le considera como muy útil y preciso ya que para introducir los análisis en el diagrama se utilizan ocho variables (elementos mayores) como parámetros. Esto es importante, ya que involucra mayor cantidad de elementos al usar el diagrama, arrojando una clasificación más precisa y robusta. Los autores de este diagrama aseguran que el diagrama R1-R2 es más sencillo en su utilización que un diagrama de la norma CIPW.

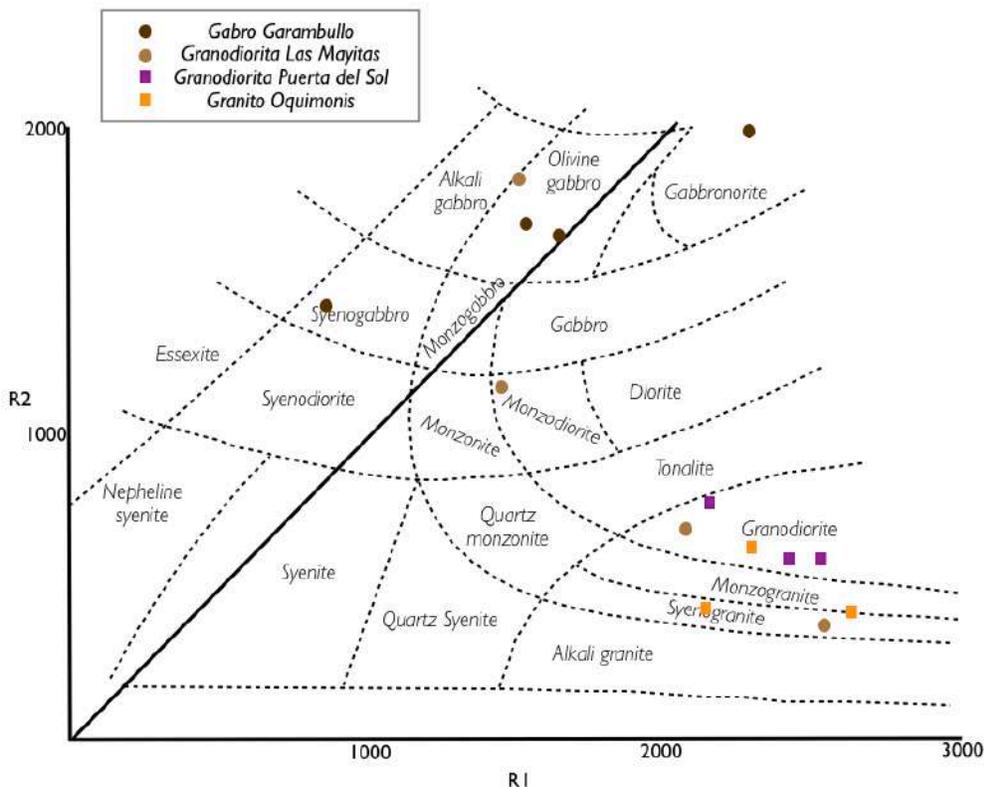


Figura 31. Clasificación de cationes R1-R2 (De la Roche *et al.*, 1980) para el área de Puerta del Sol. Las proporciones químicas fueron recalculadas a milicaciones.  $R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$ ;  $R2 = 6Ca + 2Mg + Al$

Los datos introducidos al diagrama R1-R2 (Fig. 31) clasifican de la siguiente manera:

- La Granodiorita Puerta del Sol cae dentro del campo de la granodiorita exclusivamente
- El Granito Oquimonis cae dentro de los campos del sienogranito, monzogranito y uno último dentro del campo de la granodiorita. El corrimiento de dos muestras hacia los campos “potásicos” es sinónimo de la baja en Ca y Mg.
- El Gabo Garambullo se encuentra en los campos del sienogabro, gabro de olivino y gabronorita. La composición general concuerda con el tipo de roca predominante y existe una aparente proporcionalidad directa entre R1 y R2.
- La Granodiorita Las Mayitas, como se ha mencionado anteriormente, muestra una importante variedad petrográfica, con composiciones de: gabro de olivino, monzodiorita, granodiorita y monzogranito. Esta ubicación concuerda con las observaciones de campo y las características observadas en lámina delgada.

### 5.1.2 Diagramas de variación

Los diagramas de variación son usados con diferentes propósitos en petrología, tienen la ventaja de ser más sencillos de interpretar que los números globales en las tablas de geoquímica que, a primera vista, pueden ser difíciles de leer e interpretar. Gracias a estos diagramas se pueden observar con facilidad comportamientos y tendencias petrológicas que aporten información relevante en procesos petrológicos como la cristalización fraccionada, fusión parcial o líneas de mezcla.

En este trabajo se utilizan los diagramas de Harker y el diagrama AFM.

#### 5.1.2.1 Diagramas de Harker

Los diagramas donde se grafican óxidos contra  $\text{SiO}_2$  son conocidos como diagramas de Harker. En este caso, se grafica el  $\text{SiO}_2$  en el eje-x contra los elementos más relevantes en el eje-y (Fig. 32).

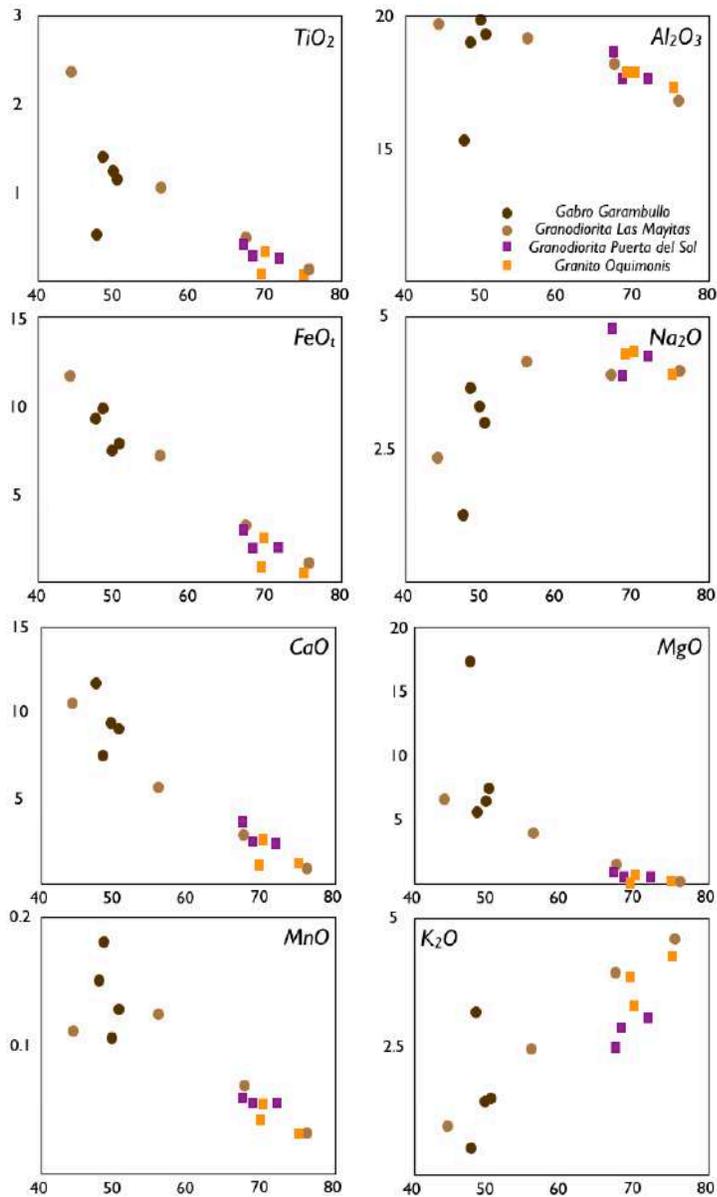


Figura 32. Diagramas de variación multielementos de sílice tipo Harker para el área de estudio.

Los diagramas Harker de la Figura 32 presentan algunos comportamientos y tendencias que son relevantes mencionar:

- La Granodiorita Puerta del Sol está empobrecida en MnO, CaO, MgO, FeOt, TiO<sub>2</sub> y enriquecido en K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- El Granito Oquimonis se comporta con una concentración mayor más constante de  $\text{SiO}_2$  en relación al anterior. También se encuentra empobrecido en  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeOt}$ ,  $\text{TiO}_2$  y enriquecido en  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- El Gabro Garambullo es bajo en  $\text{SiO}_2$  y con un rango estrecho en su contenido. Por otra parte, muestra composiciones elevadas tanto en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeOt}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MnO}$ . La muestra (1121095G) es relativamente distinta a otras, mostrando un enriquecimiento en  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{MgO}$  y empobrecimiento en  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Las muestras de la Granodiorita Las Mayitas, presentan una gran variación de  $\text{SiO}_2$ . También presenta una tendencia decreciente en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeOt}$ ,  $\text{TiO}_2$  a medida que aumenta la concentración de  $\text{SiO}_2$  en tanto que con los elementos  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  muestran un comportamiento inverso. Lo anterior sugiere cristalización fraccionada de las diferentes facies que componen la Granodiorita Las Mayitas.

### 5.1.3 Diagrama AFM

Con los mismos datos de óxidos se presenta un diagrama ternario AFM (Alcalis [ $\text{Na}_2\text{O}$  +  $\text{K}_2\text{O}$ ], óxidos de Fe total [ $\text{FeO}$  +  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ] y  $\text{MgO}$ )(Fig. 33). El uso más común para el diagrama AFM es para distinguir entre tendencias de diferenciación toleíticas y calcoalcalinas en las serie magmática subalcalina. Kuno (1968) e Irvine y Baragar (1971) presentan líneas discriminatorias para dividir los datos introducidos en las dos series anteriormente mencionadas. La línea de Kuno ofrece un espacio más restringido al campo de la serie toleítica, mientras que la línea de Irvine y Baragar es más homogénea en su distribución.

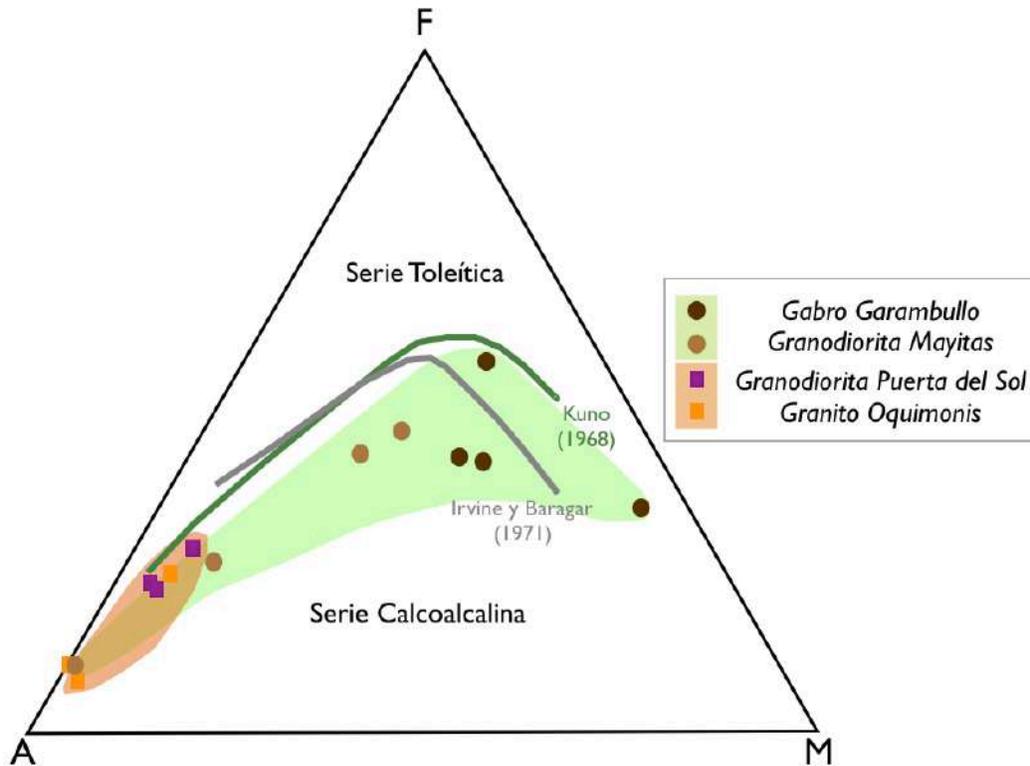


Figura 33. Diagrama de variación AFM para el área de Puerta del Sol. Mostrando las 2 series magmáticas principales. En color verde se muestra la serie magmática del magmatismo miocénico, mientras que en color naranja se encuentra la serie magmática eocénica.

Los datos presentados en la Figura 33 muestran que los cuerpos intrusivos analizados pertenecen a la serie calcoalcalina según el límite de Irvine y Baragar (1971) a excepción de dos muestras pertenecientes a la Granodiorita Las Mayitas y al Gabro Garambullo (03-19-10-3G y 1121095). Sin embargo, para la curva de Kuno (1968) estas dos muestras y todas las demás analizadas se consideran pertenecientes a la serie calcoalcalina. También se observa un comportamiento que se asocia a una serie magmática. Es por eso, que en la figura se muestra la serie magmática miocénica, es decir, el magmatismo asociado a la extensión en Sonora. En contraste, se puede observar el campo de la serie magmática eocénica, es decir, magmatismo relacionado al batolito laramídico de Sonora, producto de subducción.

#### 5.1.4. Diagrama discriminante de ambiente tectónico de Shand

El diagrama Shand (Maniar y Piccoli, 1989), es una alternativa a las categorizaciones SIAM, o de magnetita-ilmenita a los granitoides ya que existe confusión en las definiciones y características. Este diagrama (Fig. 34) sirve para clasificar el ambiente tectónico en el que se produce un granitoide. Los parámetros de clasificación se basa en los óxidos mayores de  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$  y  $NaO$  recalculados en concentraciones molares.

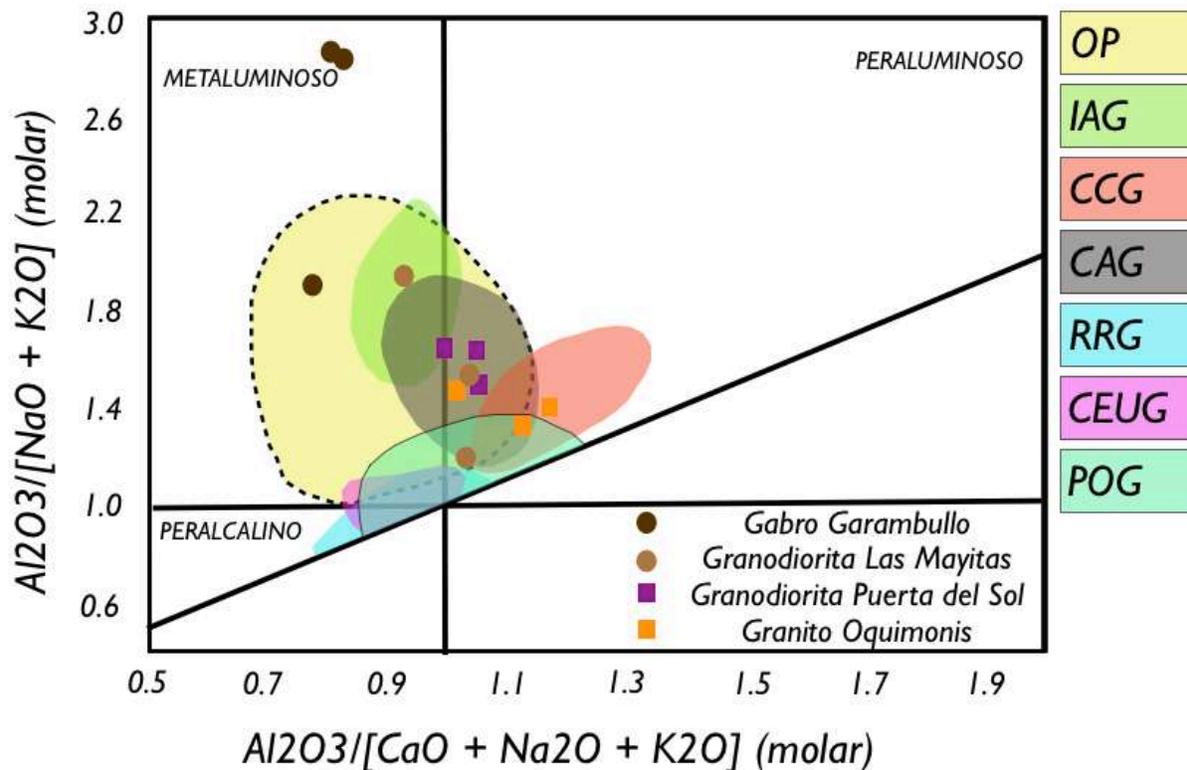


Figura 34. Diagrama Shand discriminante de ambiente tectónico para el área de Puerta del Sol. Las unidades están expresadas en concentraciones molares. IAG = granitoides de arco insular, CAG = granitoides de arco continental, CCG = granitoides de colisión continental, POG = granitoide post-orogénico, RRG = granitoides con relación a rift, CEUG = granitoides de levantamiento continental epirogénico, OP = plagiogranitos oceánicos. Mod. de Maniar y Piccoli (1989).

Los resultados observados en la Figura 34 son los siguientes:

- La Granodiorita Puerta del Sol incide dentro de los campos peraluminosos hacia los metaluminosos.

- El Granito Oquimonis se presenta dentro del campo peraluminoso, al igual que todos los granitos de dos micas presentes dentro de los intrusivos íamáficos.
- Para el Gabro Garambullo cae en el campo metaluminoso (excluyendo una muestra), con alta relación de alúmina sobre álcalis.
- Para la Granodiorita Las Mayitas también se excluyó un análisis; las muestras consideradas caen indistintamente en los campos metaluminoso y peraluminosos. La tendencia en esta relación va de las facies máficas a las félsicas.

La mayor parte de las unidades de granitoides se ubican en el campo de los granitos de arco continental.

## **5.2 Elementos Traza**

Los elementos traza son aquellos que se encuentran presentes en una roca en concentraciones menores a 0.1 wt %, es decir, concentraciones menores a 1000 partes por millón (ppm). Los estudios en elementos traza forman una parte muy importante en los estudios petrológicos y sirven, a veces, de mejores discriminantes que los óxidos mayores.

Para este estudio, se realizaron 11 análisis de elementos traza (Tabla V). Tres para la Granodiorita Puerta del Sol, tres para el Granito Oquimonis, cuatro para el Gabro Garambullo y una para la Granodiorita Las Mayitas.

### **5.2.1 Elementos de tierras raras (REE)**

Los elementos de tierras raras (REE) tienen una importante aplicación para la petrología ínea, más importante que cualquier otro grupo de elementos trazas. Los REE están compuestos por las series de metales con números atómicos del 57 al 71- desde La a Lu. Los REE suelen estar agrupados en miembros con ligero número atómico llamados 'elementos de tierras raras ligeras' (LREE), mientras que los que poseen un número atómico pesado son llamados 'elementos de tierras raras pesadas' (HREE). El elemento divisorio entre LREE y HREE es el Eu. Es decir, La a Eu se consideran LREE y de Eu a Lu se consideran HREE.

Químicamente, las REE son muy similares en sus propiedades físicas y químicas. Esto es porque todas forman iones relativamente inmóviles con valencia 3+ de radio iónico parecido. Se comporta de tal manera que aumenta el número atómico mientras disminuye el radio iónico.

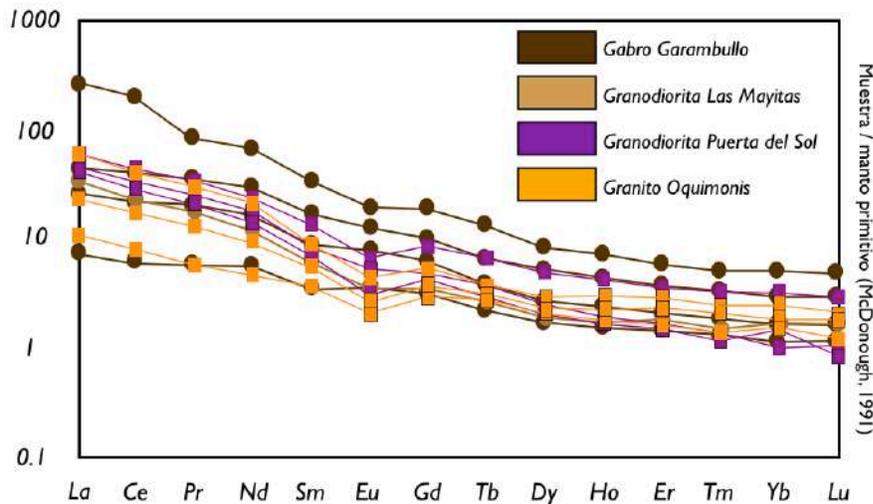


Figura 35. Diagrama de REE normalizadas contra el manto primitivo (McDonough *et al.*, 1991)

Tomando los valores de normalización del manto primitivo (Fig. 35) utilizando los valores de McDonough *et al.* (1991) y la condrita (Fig. 36) con los valores de Nakamura (1974) se realizaron dos diagramas de REE con valores normalizados. El diagrama de espectros muestra que la mayor área de espectro es ocupada por el Gabro Garambullo el cual se encuentra anormalmente enriquecido en LREE. El análisis 724092G, el cual corresponde al espectro altamente enriquecido en LREE fue tomado de una zona de mezcla de magmas donde se presenta una gran cantidad de pegmatitas asimiladas por el magma máfico.

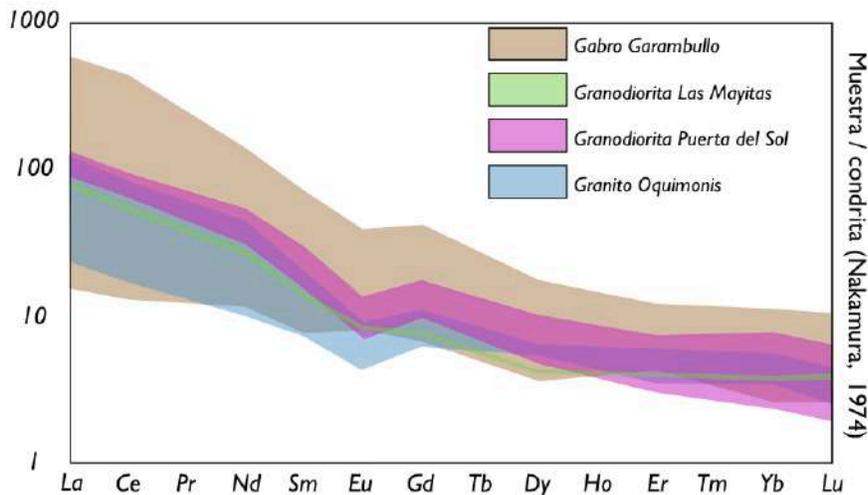


Figura 36. Diagrama de espectros REE normalizados para la condrita (Nakamura, 1974).

El espectro que corresponde a la Granodiorita Puerta del Sol, se comporta homogéneamente presentando un enriquecimiento en LREE y una anomalía negativa en Eu para finalizar con un empobrecimiento en HREE.

El espectro para el Granito Oquimonis se observa relativamente empobrecido en LREE, comparada con la Granodiorita Puerta del Sol, presenta una anomalía negativa en Eu y se presenta empobrecido en HREE. Un detalle que es conveniente mencionar acerca de la firma geoquímica que presenta el Granito Oquimonis es la similitud que presenta con la firma de otros granitos aledaños. El Granito de Huépac (Macías Valdez, 1992; Radelli *et al.*, 1995), también llamado batolito de Aconchi (Roldán-Quintana, 1991) es un granito peraluminoso de dos micas con granate que presenta una firma REE muy similar a la del Granito Oquimonis (Fig 37). Este tipo de evidencias sugieren una origen cogenético.

En el caso del espectro para el Gabro Garambullo, se puede observar un gran enriquecimiento en LREE, lo cual indica fraccionamiento importante de granate y/o ortopiroxeno, o bien, la incorporación de una fase mineral concentradora de este tipo de REE, como el apatito o allanita. No presenta empobrecimiento en Eu respecto a las otras muestras, pero si un enriquecimiento en Gd. También se pueden observar

concentraciones en HREE superiores a los demás análisis lo que es indicativo de un magma primitivo.

Finalmente, la Granodiorita Las Mayitas presenta un espectro medio en concentración de LREE relativo a los demás análisis, no presenta una anomalía negativa en Eu relativamente a los demás análisis y su concentración en HREE es homogéneo y se encuentra ligeramente enriquecido en Lu.

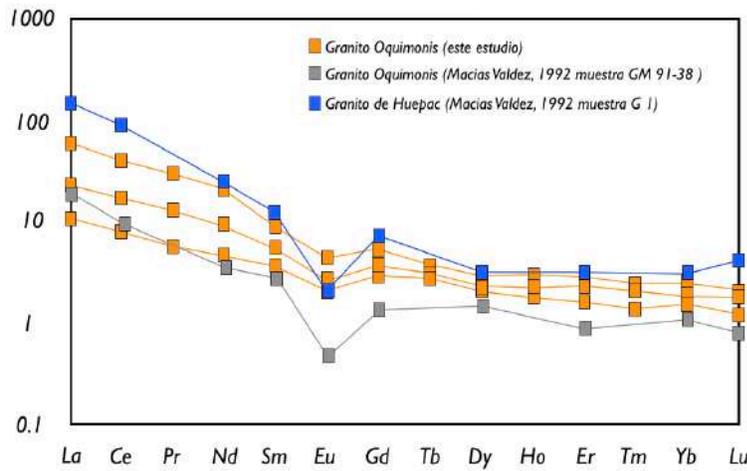


Figura 37. Diagrama comparativo de los análisis REE para el Granito Oquimonis y el Granito de Huépac analizados por Macías-Valdez (1992) y el Granito Oquimonis, según este estudio.

Muestra / manto primitivo (McDonough, 1991)

## 6. Discusión y conclusiones

Existen en Sonora granitoides similares a la Granodiorita Puerta del Sol y al Granito de dos micas Oquimonis. El batolito el Jaralito comparte similitudes geoquímicas y cronológicas con la Granodiorita Puerta del Sol. El granito peraluminoso de dos micas Oquimonis comparte grandes similitudes petrográficas, geoquímicas y cronológicas con el Granito de Huépac, también llamado batolito de Aconchi por otros autores (Roldán-Quintana, 1979; Roldán-Quintana, 1991; Lugo-Zazueta, 2006) con el que presenta una firma de REE muy parecida, lo cual sugiere una consanguineidad o una misma génesis magmática. El Granito de Huépac o batolito de Aconchi fue fechado por el método K/Ar en muscovita rindiendo una edad de 36 Ma (Roldán-Quintana, 1979) y por el método Ar/Ar en muscovita rindiendo una edad de meseta de 40Ma (Lugo Zazueta, 2006) lo cual lo hace contemporáneo a la edad U/Pb de 41.8 Ma para este plutón.

Los plutones Garambullo y Las Mayitas pertenecen a un pulso magmático bimodal del Mioceno Temprano por lo que se sitúan dentro del contexto tectónico regional del *Basin and Range*. Cronológicamente, este pulso magmático del Mioceno Temprano se puede ligar a la gran cantidad de enjambres de diques máficos reportados del área y que han sido delimitados por fechamientos Ar/Ar entre 26 y 19 Ma (Wong y Gans, 2008). Es también, cronológicamente idéntico a la extensión producida por los complejos de núcleo metamórfico de la zona la cual, en Sonora, está constreñida entre 25 y 16 Ma (Wong *et al.*, 2010). Se podría considerar su relación como fuente magmática de las coladas andesíticas y basálticas presentes en los sedimentos de la Formación Belleza (Vega-Granillo, 1996), fechadas por Wong y Gans (2008) en  $17.8 \pm 0.2$  Ma. El magmatismo bimodal representado por coladas volcánicas en Sonora se encasilla entre ~25 y ~18 Ma (González-León *et al.*, 2010), lo cual lo hace contemporáneo a los plutones bimodales miocénicos de Puerta del Sol.

El hecho de que el Gabro Garambullo y la Granodiorita Las Mayitas sean un evento plutónico de aproximadamente 20 Ma y que no presenten deformación, indica que aunque su emplazamiento fue contemporáneo a la extensión relacionada a los complejos de núcleo metamórfico, estos plutones se encontraban todavía a

profundidad durante la exhumación posterior al periodo de máxima deformación que afectó a la Granodiorita Puerta del Sol y al Granito Oquimonis. Varios autores (Parsons y Thompson, 1993; Lister y Baldwin, 1993) apoyan la hipótesis de que el magmatismo es generador de fallamiento normal de bajo ángulo y el evento plutónico bimodal del Mioceno Temprano pudieran estar relacionados a un fenómeno de esta naturaleza.

La falla de despegue de Mazatán cuya edad de actividad se precisa del Oligoceno tardío al Mioceno medio afecta produciendo una fábrica milonítica en los plutones Puerta del Sol y Oquimonis y se prolonga desde el complejo de núcleo metamórfico de Mazatán hasta el de Aconchi. De acuerdo a fechamientos Ar/Ar, este proceso ocurrió de ~28 Ma a ~11 Ma (Lugo-Zazueta, 2006; Wong y Gans, 2008). Se tiene evidencia en fechamientos de termocronología para situar a ésta deformación en Puerta del Sol entre 22.5 a 16 Ma.

El estudio de cartografía, geocronología y geoquímica aporta suficiente información para integrar al área de Puerta del Sol al marco tectónico asociado al magmatismo laramídico y a la extensión terciaria *Basin and Range* en Sonora. Geoquímica y geocronológicamente se tiene evidencia para definir a la granodiorita Puerta del Sol y al granito Oquimonis como dos granitoides del Eoceno Medio de afinidad calcoalcalina relacionados a las etapas tardías de la subducción de la placa Farallón debajo de Norteamérica. Se define al Gabro Garambullo y a la Granodiorita Las Mayitas como un pulso magmático bimodal del Mioceno Temprano, relacionado, al menos cronológicamente, al proceso extensivo *Basin and Range*.

Por lo tanto, se puede concluir que:

La Granodiorita Puerta del Sol, consitituye un pulso magmático calcoalcalino del Eoceno Medio relacionado a la subducción, perteneciente a la orogenia Larámide. Comparte similitudes químicas, texturales y cronológicas con el batolito El Jaralito (Roldán-Quintana, 1991).

El Granito peraluminoso de dos micas Oquimonis pertenece también al pulso magmático peraluminoso tardío de la orogenia Larámide. Comparte similitudes mineralógicas, texturales, químicas, y cronológicas con el granito de Huépac (también llamado batolito de Aconchi) y con el granito peraluminoso de dos micas de Mazatán.

El Gabro Garambullo es un plutón máfico del Mioceno Temprano ligeramente calcoalcalino. Su edad de 20 Ma, lo relaciona con el periodo de extensión producido por la falla de despegue de Mazatán en Puerta del Sol y el emplazamiento de un gran enjambre de diques máficos presentes en la zona noroeste de este estudio.

La Granodiorita Las Mayitas que presenta una gran variedad de enclaves, constituye el último pulso magmático importante en el área al estar fechado en 19 Ma (K/Ar). Representa el pulso diferenciado del Gabro Garambullo, alcanzando concentraciones claramente félsicas.

Durante el Eoceno Tardío y el Mioceno Temprano ocurre un proceso de extensión a lo largo de una falla normal de bajo ángulo que exhuma los plutones del área de Mazatán, Puerta del Sol y de Aconchi. Evidencia de esto es la fábrica milonítica presente en el área y los fechamientos Ar/Ar que indican una exhumación durante este periodo. El Gneiss Palofierral es una franja de deformación que se desarrolla a lo largo del Granito Oquimonis y la Granodiorita Puerta del Sol. La relación estructural que este desplazamiento tiene con el Gneiss Palofierral aún no es clara, pero suponemos que se trata de una zona de deformación asociada a la falla de despegue de Mazatán ya que su edad Ar/Ar de 22.6 Ma lo hace contemporáneo a tal evento.

Un trabajo centrado en métodos estructurales y termocronológicos, seguramente ayudará a esclarecer con detalle la relación que se tiene entre los complejos de núcleo metamórfico de Sonora, especialmente los que se desarrollan a lo largo de la falla de despegue de Mazatán.

## 7. Bibliografía

- Anderson, T.H., Silver, L.T., Salas, G.A., 1980, Distribution and U-Pb of some lineated plutons, northwestern Mexico, *in*: Crittenden Jr., M.D., Coney, P.J., Davis, G.H. (eds.): Cordilleran Metamorphic Core Complexes, Geological Society of America, Memoir 153, p. 269-286.
- Bronner, G., Radelli, L., 1996, Study of a NE-SW Eocene compressive phase in the Paleocene granites of the Aconchi Massif, central Sonora, Mexico: Boletín del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, v. 13 (2), p. 1-9.
- Calles-Montijo, R., 1999, Evolución tectonosedimentaria de las cuencas terciarias: porción sur cuenca de Ures y Punta de Agua, Sonora central, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología Tesis de Maestría en Ciencias, 67 p.
- Coney, P.J., 1980, Cordilleran metamorphic core complexes: An overview, *in*: Crittenden Jr., M.D., Coney, P.J., Davis, G.H. (eds.): Cordilleran Metamorphic Core Complexes, Geological Society of America, Memoir 153, p. 7-34.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983, El Batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México (AIMMGM), Convención Nacional XV, Guadalajara, Jal., p. 63-95.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., Marchal, M., 1980, A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses - its relationships with current nomenclature: Chemical Geology, v. 29, p. 183-210
- Didier, J., 1991, The various types of enclaves in the Hercynian granitoids of the Massif Central, France, *in*: Didier, J., Barbarin, B. (eds.): Enclaves and granite petrology (Developments in petrology 13), Elsevier, p. 135-153.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., and Alsdorf, D., 2007, The Shuttle Radar Topography Mission: Reviews of Geophysics, v. 45, 33 p.

- Gans, P.B., 1997, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: implications for the tectonic evolution of northwestern Mexico: *Tectonics*, v. 16 (3), p. 388-408.
- González-León, C.M., McIntosh, W.C., Lozano-Santacruz, R., Valencia-Moreno, M., Amaya-Martínez, M., Rodríguez-Castañeda, J.L., 2000, Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi quadrangles), northwest Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 112, p. 600-610.
- González-León, C.M., Valencia, V., López, M., Bellon, H., Valencia Moreno, M.A., Calmus, T., 2010, The Arizpe sub-basin: sedimentary and magmatic evolution of the Basin and Range in north-central Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 27 (2), p. 292-312.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p. 523-548.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basalt magmas, *in*: Hess, H. H. & Poldervaart, A. A. (eds.) *Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition*, 2. New York: Interscience, p. 623–688.
- Lister, G.S., Baldwin, S.L., 1993, Plutonism and the origin of metamorphic core complexes: *Geology*, v. 21 (7), p. 607-610.
- Lugo-Zazueta, R.E., 2006, Extensión Basin and Range en la Sierra de Aconchi, Sonora, México: Análisis Termocronológico Basado en Ar/Ar y Trazas de Fisión: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría en Ciencias-Geología, 77 p.
- Macías-Valdez, G., 1992, Geoquímica (elementos mayores, trazas y tierras raras) del Granito de Huépac (Sonora), implicaciones petrogenéticas y tectónicas: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 52 p.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids: *Geological Society of America Bulletin*, v. 101, p. 635-643.

- McDonough, W.F., Sun, S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E., Hofmann, A.W., 1991, K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Ross Taylor Symposium volume.
- Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 38, p. 757-775.
- Nourse, J.A., Anderson, T.H., Silver, L.T., 1994, Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico: *Tectonics*, v.13 (5), p. 1161-1182.
- Parsons, T., Thompson, G.A., 1993, Does magmatism influence low-angle normal faulting?: *Geology*, v. 21 (3), p. 247-250.
- Paterson, S.R., Fowler Jr., T.K., Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S., Miller, R.B., 1998, Interpreting magmatic fabric patterns in plutons: *Lithos* 44, p. 53-82.
- Radelli, L., 1986, An essay on the southern Basin and Range: *Boletín del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora*, v. 3 (1), p. 51-146.
- Radelli, L., Lucero-Bernal, V., Macías-Valdez, G., 1995, The Huepac continental volcanic arc of central Sonora, Mexico: Eocene compressional deformation, magma underplating, crustal melting, and magmatism: *Boletín del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora*, v. 12 (1), p. 109-124.
- Raisz, E., 1959, *Landforms of Mexico*: Cambridge, Massachusetts, Geographic Branch of the Office of Naval Research, scale 1: 2,445,000.
- Ramos-Velázquez, Calmus, T., Valencia, V., Iriondo, A., Valencia-Moreno, M., Bellon, H., 2008, U-Pb and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  geochronology of the coastal Sonora batholith: New insights on Laramide continental arc magmatism: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25 (2), p. 314-333.
- Richard, D., 1991, De la subduction à l'extension intra-continentale: plutonisme et gisements de tungstène de l'Etat de Sonora (Mexique): Paris, Université de Paris-Sud. Orsay. Thèse, 745 p.
- Roldán-Quintana, J., 1979, Geología y yacimientos del distrito de San Felipe, Sonora: Instituto de Geología, Revista, Universidad Nacional Autónoma de México, v. 8, p. 1-8.
- Roldán-Quintana, J., 1991, Geology and chemical composition of the Jaralito and Aconchi batholiths in east-central, Sonora, Mexico, *in*: Pérez-Segura, E., Jacques-

- Ayala, C. (eds.): Studies in Sonoran Geology, Geological Society of America, Special Paper 254, p. 69-80.
- Scherkenbach, D.A., Sawkins, F.J., Seyfried, W.E., 1985, Geologic, fluid inclusion, and geochemical studies of the mineralized breccias at Cumobabi, Sonora, Mexico: *Economic Geology*, v. 80 (6), p. 1566-1592.
  - Spencer, J.E., 2010, Structural analysis of three extensional detachment faults with data from the 2000 Space-Shuttle Radar Topography Mission. *GSA Today*, v. 20 (8), p. 4-10.
  - Streckeisen, A., 1976, To each plutonic rock its proper name: *Earth Science Reviews*, v. 12, p. 1-33.
  - Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M., Patchett, P.J., Zurcher, L., Hodkinson, D.G., Roldán-Quintana, J., 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113 (11), p. 1409-1422.
  - Vega-Granillo, R., Calmus, T., 2003, Mazatan metamorphic core complex, Mexico: Structures along the detachment fault and its exhumation evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, p. 193-204.
  - Wodzicki, W.A., 1995, The evolution of Laramide igneous rocks and porphyry copper mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico: University of Arizona, PhD thesis, 181 p.
  - Wong, M.S., Gans, P.B., 2003, Tectonic implications of early Miocene extensional unroofing of the Sierra Mazatan metamorphic core complex, Sonora, Mexico: *Geology*, v.31 (11), p. 953-956.
  - Wong, M.S., Gans, P.B., 2008, Geologic, structural, and thermochronologic constraints on the tectonic evolution of the Sierra Mazatán core complex, Sonora, Mexico: New insights into metamorphic core complex formation: *Tectonics* v. 27, 35 p.
  - Wong, M.S., Gans, P.B., Scheier, J., 2010, The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico: *Journal of Geophysical Research*, v. 115, 19 p.

