



# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Departamento de Geología  
MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA

Mineralización de fierro, tipo skarn, en el contacto entre la formación Mina México y las rocas paleozoicas de plataforma carbonatada en Sonora Centro-oriental, municipio de Bacanora, México: una propuesta para la exploración de yacimientos de fierro.

## TESIS

Que para obtener el grado de:  
Maestro en Ciencias-Geología

PRESENTA:

Gonzalo de Jesús Ibarra Dessens

Director de tesis:

M.C. Ricardo Amaya Martínez

Hermosillo, Sonora, Octubre, 2019



# 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

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a *CONACYT* por el apoyo que me dio para concluir con mi posgrado con No. de becario 249512 y CVU 377399 en el período 2010 – 2012.

A Dios por la oportunidad de permitirme en haber realizado estos estudios de una manera muy satisfactoria.

A la memoria de mis padres Ventura y Gonzalo, a mis hermanos Icela y Pedro por su continuo apoyo, tanto moral como económico, para poder terminar mis estudios.

Gracias a mi esposa Margarita y mis hijos Gonzalo y Assyria que me han comprendido en los momentos difíciles que hemos pasado y que de no haber sido por su apoyo no hubiese concluido con este proyecto.

Al M.C. Ricardo Amaya Martínez director de tesis, que me dio más del tiempo necesario la paciencia y motivación para terminar este trabajo. Además, gracias a su extensa y reconocida experiencia fue que logré mi trabajo. Finalmente, agradezco todas las facilidades que me brindo para encaminarme y estar en un nivel competitivo, facilitándome una extensa bibliografía y de sus experiencias vividas con sus colegas investigadores John H. Stewart y Forrest G. Poole.

Agradezco al Dr. Efrén Pérez que con su apoyo y consejos pude lograr finalizar este proyecto; reconociendo su gran experiencia académica y profesional; además de su continuo soporte económico.

Al Dr. Francisco Paz, por sus apreciados comentarios y sugerencias como revisor-sinodal de esta tesis y sobre todo por confiar en mí para poder terminar mis estudios.

Al Dr. Jaime Roldan por sus consejos, sugerencias y observaciones realizadas en mis actividades de campo y durante mis cursos de maestría.

Quiero también agradecer a mi gran amigo y compañero Dr. David García que desinteresadamente me ha brindado su tiempo y paciencia de apoyarme tanto con sus conocimientos como por el apoyo moral para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Rogelio Monreal Coordinador de Maestría por el apoyo brindado y finalmente, a un número interminable de personas que me apoyaron durante mis estudios de maestría; así como también a alumnos de la licenciatura en geología que colaboraron en la cartografía geológica de las áreas de estudio y en una diversidad de actividades de gabinete y laboratorio.

## Contenido

CAPÍTULO I .....	1
I.- Introducción .....	1
1.1. Localización de las áreas estudiadas y vías de acceso .....	2
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Metodología .....	5
CAPITULO II .....	9
2. Tectónica .....	9
2.1. Cinturón Ouachita-Marathon-Sonora .....	9
2.2. Orogenia Larámide .....	12
2.3. Sierras y Valles Paralelos “ <i>Basin and Range</i> ” .....	13
2.4. Geología regional .....	14
2.4.1 Paleozoico de plataforma (secuencias miogeoclinales).....	14
2.4.2. formación Mina México (foredeep) .....	14
2.4.3. Paleozoico de cuencas oceánicas profundas (secuencias eugeoclinales).....	16
2.4.4. Grupo Barranca .....	17
2.4.5. Formación Tarahumara .....	18
2.4.6. Rocas Intrusivas laramídicas .....	19
2.4.7. Diques andesíticos.....	21
2.4.8. Formación Báucarit. ....	22
2.4.9. Rocas volcánicas extrusivas Formación Lista Blanca.....	22
2.5 Estratigrafía del área de estudio .....	23
2.5.1. Calizas de plataforma (Miembro La Cueva) .....	24
2.5.2. formación Mina México rocas siliciclásticas .....	24
2.5.3. Formación Tarahumara .....	24
2.5.4. Rocas intrusivas laramídicas.....	25
2.5.5. Formación Báucarit .....	25
2.6. Geología de las áreas de estudio.....	27
2.6.1. Geología del área La Cuesta de Fierro.....	27
2.6.1.1. Calizas de Plataforma (Miembro La Cueva) .....	27
2.6.1.2 Rocas siliciclásticas formación Mina México.....	29
2.6.1.3. Cuerpos intrusivos locales.....	30
2.6.2. Geología del área rancho San Marcos.....	33

2.6.2.1. Secuencia de cuerpos alóctonos de Sonora .....	33
2.6.2.2. Cuarcita alóctona (Ordovícico).....	33
2.6.2.3. Lutitas carbonosas.....	33
2.6.2.4. Secuencia siliciclástica de cuenca profunda (Formación Rancho Nuevo).....	34
2.6.2.5. Calizas de plataforma (Miembro la Cueva) .....	35
2.6.2.6. Rocas siliciclásticas de cuenca <i>foredeep</i> (formación Mina México).....	36
2.6.2.7. Rocas plutónicas laramídicas .....	38
CAPÍTULO III .....	40
3.- Petrografía del Área de estudio .....	40
3.1. Petrografía La Cuesta de Fierro .....	40
3.2. Petrografía rancho San Marcos .....	47
CAPITULO IV .....	54
4.- Geología Estructural.....	54
4.1. Transición entre Orogenia Larámide y la extensión Basin and Range .....	58
CAPÍTULO V .....	61
5.- Geoquímica .....	61
5.1. Geoquímica de los Elementos Mayores.....	61
5.2 Cálculo de La Norma CIPW .....	62
5.3. Diagramas Harker La Cuesta de Fierro .....	63
5.4. Los Aracnigramas de REE de La Cuesta de Fierro.....	68
5.5. Patrones multielementales (spider diagram).....	70
CAPITULO VI .....	73
6.- Geocronología U/Pb.....	73
6.1. Descripción del Método Utilizado .....	73
6.2. Muestras Seleccionadas .....	73
CAPITULO VII .....	77
7.- Yacimientos de tipo skarn .....	77
7.1. Factores que controlan la evolución hidrotermal de los yacimientos .....	78
7.2. Skarn de hierro de las áreas de estudio .....	78
7.2.1. Etapas de formación de los yacimientos tipo skarn de Fe .....	80
7.2.1.1. Zona progrado .....	82
7.2.1.2. Metamorfismo Retrogrado .....	86
7.2.1.3. Metasomatismo .....	87

7.2.1.4. Silicificación .....	88
7.3. Reacciones de la mineralización de Fe dentro del skarn con las rocas huéspedes. ....	90
CAPITULO VIII. ....	92
8.- Conclusiones .....	92
Bibliografía.....	95
ANEXOS .....	I

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Plano de localización, del área de estudio. ....	4
Figura 2.- Yacimientos tipo skarn de hierro en Sonora, tomado y modificado Pérez-Segura (1985), en rojo cuerpos estudiados en las cercanías del poblado de Bacanora, en Sonora centro oriental. En color azul indica la ubicación de los cuerpos de hierro reportados en Sonora. ....	8
Figura 3.- Cinturón Orogénico Ouachita Marathon Sonora, tomado de Poole <i>et al.</i> , 2005. ....	9
Figura 4.- Distribución del Cinturón Orogénico Ouachita-Marathon-Sonora, en color café la cabalgadura y los límites de los sedimentos del Paleozoico de plataforma y cuenca oceánica. Tomado de Poole <i>et al.</i> , 2005. ....	10
Figura 5.- Distribución de rocas de plataforma continental, cuenca oceánica ( <i>foredeep</i> ) y Paleozoico alóctono de Sonora central (Modificado de Poole <i>et al.</i> , 2005). ....	16
Figura 6.- Afloramiento de la Formación Tarahumara al sur del poblado de Bacanora sobre el camino a Guaycora. Nótese los grandes fragmentos piroclásticos de rocas de composición félsica (riolitas) y los efectos de la alteración hidrotermal, que caracterizan a esta unidad. ....	19
Figura 7.- Rocas intrusivas en contacto. Fotografía mostrando rocas intrusivas en el área de estudio; en contacto por falla. Localidad; entrada a La Cuesta de Fierro. ....	20
Figura 8.- Dique de composición andesítica cortando intrusivo Laramídico. ....	21
Figura 9.- A: Afloramiento de Rocas volcánicas (basaltos), Formación Lista Blanca rocas volcánicas (basaltos) sur del poblado de Bacanora. B: vista panorámica de La Formación Lista Blanca, flujo volcánico de rocas félsicas (riolitas) sobre el arroyo Bacanora. ....	23
Figura 10.- Columna estratigráfica esquemática de la Porción de Centro oriental de Sonora, mostrando el cuerpo de hierro entre la formación Mina México y las Calizas de plataforma modificada de Poole-Amaya Martínez (2005). ....	26
Figura 11.- Sección esquemática, al sur de la estructura mineral Mina México (modificado de Poole – Amaya Martínez (2005). ....	26
Figura 12.- Plano geológico del área La Cuesta de Fierro modificado de la carta Geológico Minera H12 D55 1:50,000 del SGM (2004). ....	28
Figura 13.- A: Vista local de rocas de la fMM. B: Estratificación delgada fMM, La Cuesta de Fierro. C: Detalle de la fMM mineralización de los sulfuros de hierro, poblado la Estrella. D: Sección delgada característica de la secuencia granos de cuarzo redondeados y carbonatos. ....	30
Figura 14.- Cuerpos graníticos cercanos a los afloramientos de los cuerpos de hierro, La Cuesta de Fierro. ....	31
Figura 15.- A: plano geológico del área La Cuesta de Fierro, B: Sección geológica La Cuesta de Fierro, unidades litológicas concordantes con las estructuras del yacimiento, (cuerpo de magnetita). ....	32
Figura 16.- Afloramiento perteneciente a la Formación Rancho Nuevo (intercalación de lodolitas, argilitas, pedernal, areniscas turbidíticas, cuerpos de caliza), en las cercanías al rancho San Marcos. ....	34
Figura 17.- A: Vista panorámica de las Calizas de plataforma con estratos de gruesas potencias Miembro la Cueva, cerro La Zacatera, B: misma secuencia a detalle de las capas delgadas de caliza. ....	35
Figura 18.- A: Fósiles crinoideos localizados en la base del cerro B: Calizas de plataforma con niveles delgados de fósiles Fusulínidos Pérmico tardío, C, D: Niveles deformados fósiles fusulínidos, parte media del cerro la Zacatera. ....	36



Figura 19.- A: Estratificación de delgada a media de la formación Mina México, B: Niveles delgados de calcarenitas dentro de la formación Mina México. ....	37
Figura 20.- A: Fragmentos de fósiles trazas pertenecientes de la plataforma. B: Panorámica de niveles de escalaritubas C, D: detalle de los niveles de escalaritubas en la secuencia foredeep de la formación Mina México. ....	38
Figura 21.- A: Vetas de feldespato potásico cortando cuerpo intrusivo félsico, B: enclaves de granodiorita en granito de feldespato alcalino.....	39
Figura 22.- Plano tomado de Google Earth (2015), mostrando las muestras recolectadas en el área de La Cuesta de Fierro.....	41
Figura 23.- A: Vista panorámica de la formación Mina México localizada en las coordenadas de UTM E 647663 N 3201720 con vista al SW, B: Detalle de la estratificación delgada, C: muestra de mano en superficie fresca, D: lamina delgada luz polarizada plana, mostrando la mineralización de granos subhedrales de cuarzo en colores blancos, en colores negros minerales opacos de los sulfuros que corresponden a pirita, y en los intersticiales rellenos de arcillas productos de la descomposición los feldespatos. ....	42
Figura 24.- A: Muestra GD10 – 09. localizada en las coordenadas UTM E 648112 y N 3202030, en contacto con otro intrusivo, B: muestra de mano del intrusivo, C: lámina delgada en luz polarizada plana apreciándose los minerales ferromagnesianos (biotitas y hornblendas, y opacos correspondientes a minerales sulfurosos, D: lámina delgada, vista con nicoles cruzados minerales de color blanco correspondiendo a cuarzo, plagioclasas y feldespato potásico, se aprecian minerales ferromagnesianos de color café marron tonos verdes, biotita y colores pleocroicos hornblenda. ....	43
Figura 25.- A: Muestra GD10-10, en contacto con micro monzogranito de biotita y hornblenda, en la entrada a la mina, La Cuesta de Fierro, B: muestra de mano de intrusivo, este fue fechado con una edad de $60.11 \pm 0.48$ ma, C: lamina delgada luz polarizada plana D: vista de lamina delgada nicoles cruzados. ....	44
Figura 26.- Muestra GD10-11 corresponde a una roca de origen ígneo, localizada en las coordenadas UTM E 654334 N 3196662.....	45
Figura 27.- Muestra GD10-12, con coordenadas de localización UTM E 654 334 N 3196 662.....	46
Figura 28.- Muestra GD- 10-15 localizada en las coordenadas UTM E 654 161 N 3196 948.....	47
Figura 29.- Plano geológico del área del rancho San Marcos, donde se aprecia la distribución de las rocas ígneas en contacto con las rocas sedimentarias lo que provocó la formación de los minerales de hierro, plano modificado de Amaya Martínez, (2005).....	48
Figura 30.- A: Muestra de mano con referencia GD12-23, con coordenadas de localización UTM E 0654474 y N 3184413, B.- Lámina delgada. ....	49
Figura 31.- A: Muestra de mano con referencia GD12-28, con coordenadas de localización UTM E 0654055 y N 3184239, B.- Lámina delgada. ....	50
Figura 32.- A: Muestra de mano con referencia GD12-29, con coordenadas de localización UTM E 0654981 y N 3184690, B: Lámina delgada. ....	51
Figura 33.- A: Muestra de mano con referencia GD12-30, con coordenadas de localización UTM E 0656705 y N 3186294, B: Lámina delgada. ....	53
Figura 34.- Sección esquemática de las relaciones estructurales de las rocas alóctonas con las secuencias de aguas someras dentro de la plataforma, las fallas normales de bajo ángulo. Tomado de Amaya-Martínez (2005). ....	55
Figura 35.- Proyección estereográfica (hemisferio inferior) de datos del comportamiento de las capas de la secuencia carbonatada y siliciclástica, A y B: datos tomados de La Cuesta de Fierro	

realizado por T. Calmus y M. Valencia (2010), C y D: datos tomados en campo de los rumbos y echados de las rocas carbonatadas y las rocas siliciclásticas del cerro La Zacatera cercanos al skarn El Potrerito. ....	56
Figura 36.- Proyección estereográfica (hemisferio inferior) en el gráfico se aprecia al menos de 5 patrones de fracturamiento, el más importante con rumbo SW-NE 30° de 36 estructuras tomadas en el cerro la Zacatera.....	57
Figura 37.- A: Caliza con niveles de fósiles deformados parte medio del cerro La Zacatera, B: pliegue recumbente con vergencia del eje al SW, rocas cercanas al poblado de Bacanora, parte sur, debido a la deformación. ....	57
Figura 38.- Falla San Marcos falla tipo normal y se caracteriza por la repetición de las capas de las rocas siliciclásticas de la formación Mina México, primer plano y tercer plano, quedando las calizas de plataforma en el segundo plano. ....	59
Figura 39.- Diagramas tipo Harker del porcentaje de óxidos mayores contra el índice de diferenciación ( $Q+Ab+Or+Ne$ ): A: Gráfico de $Al_2O_3$ , contra el índice de diferenciación; B: Gráfico de CaO contra el índice de diferenciación y C: Gráfico del $SiO_2$ contra el índice de diferenciación.....	64
Figura 40.- Diagramas tipo Harker del porcentaje de óxidos mayores contra el índice de diferenciación ( $Q+Ab+Or+Ne$ ): A: Gráfico de $Na_2O$ , contra el índice de diferenciación; B: Gráfico del $K_2O$ contra el índice de diferenciación. ....	66
Figura 41.- Diagrama TAS de Middlemost (1994) para la clasificación de rocas plutónicas de las áreas: La Cuesta de Fierro en círculos rojos y Rancho San Marco en círculos negros. Se anexa la línea de discriminación de Irvine & Baragar (1971) que separa los dominios Alcalinos de Subalcalinos.....	67
Figura 42.- Diagrama $K_2O/SiO_2$ normalizado según Peccerillo & Taylor (1976) de los intrusivos de La Cuesta de Fierro, rancho San Marcos.....	68
Figura 43.- Gráfico de Sun & McDonough, 1989 de las tierras raras normalizado con condrita tipo C1, de las muestras de La Cuesta de Fierro. ....	70
Figura 44 Gráfico de Sun and McDonough, 1989 de multielementos normalizado al manto primitivo, las muestras corresponden a La Cuesta de Fierro.....	72
Figura 45.- Equipo de espectrometría de masas para el análisis geocronométrico de U/Pb en zircones, laboratorio de estudios isotópicos del Centro de Geociencias de la Unam en Juriquilla Querétaro.....	73
Figura 46.- A: Fotografía correspondiente a los zircones utilizados para el análisis de geocronología las Muestras GD10-10, B: fotografía de los zircones seleccionados para el análisis de geocronología de la muestra GD12-23. ....	75
Figura 47.- Resultados de los datos de los zircones heredados que fueron analizados a la muestra GD10-10, donde se aprecia una edad de 60.11 Ma $\pm$ 0.48, con un 95 % de confiabilidad arrojando los resultados una edad del Paleógeno. ....	76
Figura 48.- Diagramas de resultados para los análisis de la muestra GD12-23 y donde se muestra una edad de 71.57 Ma $\pm$ 0.44 con una confiabilidad del 95 %, correspondiendo a la edad del Cretácico, Superior, Maastrichtiense. ....	76
Figura 49.- Modelo representativo de la mineralización del skarn de Fe, La Cuesta de Fierro Y rancho San Marcos, modificado del modelo de Meinert (1993). ....	78
Figura 50.- Ubicación de las áreas donde afloran los cuerpos de Fe referenciados al poblado de Bacanora.....	80
Figura 51.- Plano a geológico del skarn El Potrerito, (rancho San Marcos), mostrando la aureola de metamorfismo.....	81

Figura 52.- Gráficos de los análisis de las muestras analizadas en el equipo de espectrometría de masas del departamento de Geología. ....	83
Figura 53.- Diagrama $\log fO_2/T$ a la presión P y $XCO_2$ mostrando la temperatura de formación de la andradita en la reacción ( $Ad=Hem+Cal+Qz$ ). tomado de Meinert (1982). ....	84
Figura 54.- Diagrama ternario mostrando la relación de los resultados de los análisis de las muestras analizadas de granates en el microscopio de barrido electrónico de la zona de skarn el Potrerito, área rancho San Marcos .....	86
Figura 55.- Vetilla de calcita delimitando la zona progradada de la retrogradada con minerales de calcita epidota clorita, en la zona progradada los granates alcanzan dimensiones hasta los 2.5 cm y al acercarse a la zona retrogradada van disminuyendo el tamaño. (Rancho San Marcos). ....	87
Figura 56.- A cuerpos de magnetita dentro de la secuencia carbonatada, se aprecian vetillas tardías cortando la mineralización de magnetita B: mineralización de magnetita en la zona progradada en contacto con la zona de granates. ....	88
Figura 57.- A: Etapa del metasomatismo donde se aprecia mineralización de especularita rodeada en la periferia de material silíceo. B: otra vista de esta zona de metasomatismo misma mineralización dentro de las rocas carbonatadas.....	89
Figura 58.- Secuencia paragenética de las alteraciones progradada y retrogradada del skarn de hierro del área del rancho San Marcos y La Cuesta de Fierro. ....	89
Figura 59.- A: Cuerpos de magnetita encontrados en el arroyo Agua Verde en La Cuesta de Fierro. B: Estructura de cuerpo mineralizado de magnetita, localizado en el rancho San Marcos.....	90

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Resultados del cálculo de la norma CIPW, de las áreas La Cuesta de Fierro y Rancho San Marcos.....	62
Tabla 2.- Concentración de los elementos de las tierras raras (REE) en partes por millón ppm. ....	69
Tabla 3.- Concentración de las tierras raras (REE) normalizados con condrita tipo C1. ....	69
Tabla 4.- Concentración de los elementos utilizados en el diagrama multielemental (spider diagram) normalizados al manto primitivo (Sun and McDonough, 1989).....	71
Tabla 5.- Cálculo de fórmulas estructurales para los granates analizados al MEB y composición. ..	85

## ANEXOS

Anexo 1.- Muestras de las áreas de estudio, (La Cuesta de Fierro, rancho San Marcos). ....	.I
Anexo 2.- Petrografía del área La Cuesta de Fierro.....	II
Anexo 3.- Tabla de resultados de análisis de los elementos (Geoquímica) del área La Cuesta de Fierro.....	VIII
Anexo 4 A.- Tabla de Resultados de los análisis de zircones por el método U/Pb para la muestra GD10-10.....	IX
Anexo 4 B.- Tabla de Resultados de los análisis de zircones por el método U/Pb para la muestra GD12-23.....	X
Anexo 5.- Microscopio de barrido electrónico análisis de las muestras de granate tablas y gráficos.....	XI

## RESUMEN

La porción centro oriental del Estado de Sonora, en los alrededores del poblado de Bacanora, se caracteriza por la existencia de una amplia variedad de tipologías de mineralización, dentro de las cuales se incluyen y destacan yacimientos tipo pórfidos de cobre, epitermales, vetas de Au-Ag y skarns de Cu, Pb, Zn, W y Fe.

Esta investigación se relaciona con las características y detalles de los yacimientos de Fe, tipo skarn, que han sido anteriormente reportados y que se ubican en las áreas La Cuesta de Fierro y los alrededores del rancho San Marcos, en donde se observaron características muy similares en cuanto a su origen, relaciones litológicas, tipo de mineralización, y sobre todo su relación recurrente con las rocas que contienen a este tipo de yacimientos.

La mineralización de hierro, representada principalmente por cuerpos irregulares de magnetita, con transformación parcial a hematita, tiene su origen en la interacción de varios factores, pero principalmente con el emplazamiento de los magmas félsicos que generaron un conjunto de granitoides, asociados con la generación de un evento hidrotermal, en la cual los fluidos encontraron condiciones favorables para la formación del depósito mineral, particularmente en el contacto entre dos unidades litológicas distintivas; calizas paleozoicas del Pérmico inferior y una secuencia detrítica-turbidítica siliciclástica, tipo *flysch*, del Pérmico inferior-medio (formación Mina México), que en conjunto conforman y representan la parte superior de la plataforma carbonatada (Miogeoclinal).

Estudios estratigráficos de detalle realizados en los últimos diez años en esta región, permiten considerar y proponer que los sedimentos que constituyen a la secuencia siliciclástica fueron depositados, de manera transicional y concordante sobre los estratos paleozoicos carbonatados, en cuencas alargadas y paralelas (*foredeep*) que se desarrollaron sobre las rocas carbonatadas de la plataforma, previo al cabalgamiento tectónico de la secuencia del Paleozoico alóctono (Eugeoclinal), depositada en cuencas oceánicas profundas.

El objetivo principal de este trabajo es tomar en consideración una integración de la información existente, producto de un conjunto de estudios detallados litológicos, mineralógicos, geoquímicos y radiométricos, es el de proponer un modelo genético que sea funcional y razonable, a manera de guía o aplicación de criterios, para la exploración futura de este tipo de mineralización de hierro.

En varias localidades en el estado de Sonora existen áreas en donde se reportan las mismas relaciones litológicas: secuencias paleozoicas carbonatadas – sedimentos paleozoicos detríticos siliciclásticos y emplazamientos de rocas

granitoides, mismas que se pudieran considerar como potencialmente susceptibles de contener cuerpos mineralizados a profundidad, cuyo origen se interpreta que debió haberse dado en condiciones similares a lo observado en los cuerpos minerales ubicados en los alrededores del poblado de Bacanora.

Los zircones obtenidos en las muestras colectadas en los afloramientos graníticos (granitoides) cercanos a los cuerpos de magnetita, indican edades de emplazamiento con rangos ligeramente diferentes:  $60.11 \pm 0.48$  Ma para la localidad de La Cuesta de Fierro y de  $71.57 \pm 0.44$  Ma, para el rancho San Marcos.

Los depósitos de hierro estudiados contienen un porcentaje de 64 % de hierro, y corresponden a mineralizaciones de magnetita, hematita especular y goethita, conteniendo en menores proporciones sulfuros de cobre y hierro. Estudios anteriores, que permiten establecer datos de cálculo de recursos, en estos yacimientos de hierro, indican que en el yacimiento de La Cuesta de Fierro se estima un total de 1 millón de toneladas y para los ubicados en los alrededores del rancho San Marcos, se estiman reservas probables en el rango de 5 millones de toneladas (Pérez- Segura, 1985).

# CAPÍTULO I

## I.- Introducción

Actualmente en el estado de Sonora se observa que la distribución de los depósitos de hierro se ubica sobre una franja, orientada NW-SE. Ubicada en la porción central del estado, con una mayor tendencia a concentrar en el extremo oeste (Pérez Segura, 1985). La formación de estos yacimientos de Fe, tipo skarn, cuyo origen se relaciona con el emplazamiento de magmas félsicos, encontraron condiciones favorables en el contacto, transicional y concordante, entre las rocas carbonatadas paleozoicas (Pérmico inferior) de la plataforma y las rocas siliciclásticas detríticas de la formación Mina México, aprovechando la mayor reactividad de los estratos de caliza, mismos que han sido reemplazados, con el consecuente metasomatismo de los mismos, en donde las rocas siliciclásticas funcionaron como un sello e impidieron la circulación de los fluidos hidrotermales hacia los niveles superiores.

Por otro lado, la estrecha relación genética que tiene este tipo de yacimientos minerales con la evolución y cristalización de cuerpos magmáticos de dimensiones batolíticas, como ha sido señalado por Titley y Beane (1981), Seedorff (2005) y Sillitoe (2010), quienes sugieren una gran posibilidad de encontrar otros depósitos minerales asociados a este ambiente magmático-hidrotermal, como son cuerpos de brechas magmáticas (*breccia pipes*), skarns de Cu-Zn-Pb, W y Fe.

Los depósitos de hierro en el estado de Sonora, relacionados a zonas de skarn han sido poco estudiados en detalle, por lo que a la fecha es difícil de estimar; sin embargo, Pérez Segura (1985) define a los yacimientos de este tipo, como una relación de zonas de skarn hospedados en la mayoría de las veces en calizas paleozoicas, y en menor proporción en rocas mesozoicas calcáreas, igualmente afectados por intrusivos ílamídicos.

Uno de los depósitos de este tipo, investigados recientemente, es el reportado por Robles-Andrade (2007), mediante una tesis de licenciatura, en la que describe un cuerpo de hierro, tipo skarn “El Garabato”, en el municipio de Suaqui Grande; sin embargo, en este yacimiento los estratos favorables de calizas difieren en edad, con respecto a los estratos carbonatados estudiados en La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos, en el primero referenciado, las calizas forman parte de un conjunto litológico referido como Formación Tarahumara, del Cretácico Superior-Paleógeno y en los segundos, corresponden con rocas carbonatadas del Pérmico inferior. La escasa información existente relacionada con este tipo de yacimientos es producto y consecuencia de la reducida investigación realizada en el estado de Sonora y también en parte a que la mineralización tipo skarn de Fe (cuerpos de magnetita) por lo general tienen bajo valor económico, combinado con un método deficiente para su explotación. Este trabajo contribuye como una guía para facilitar la exploración de este tipo de yacimientos.

### **1.1. Localización de las áreas estudiadas y vías de acceso**

El área de estudio se encuentra en la región centro-oriental del estado de Sonora, ubicándose a 250 km al este de la ciudad de Hermosillo, localizada dentro de la Provincia de Cuencas y Sierras Paralelas (*Basin and Range*). La región se encuentra dominada por La Sierra de Santo Niño, una estructura geológica de tipo horst, orientada N-NW, que se levanta de los 600 m a los 1600 m sobre el nivel del mar, que está bordeada al oriente por el semigráben de Bacanora y al poniente por el gráben del Río Yaqui.

En el área se estudiaron dos localidades la parte suroeste de Bacanora correspondiendo al área 1: La Cuesta de Fierro, ubicada entre las coordenadas UTM 3'202,000 - 3'201,000 N y 647,000 - 648,000 E y área 2: al sur de Bacanora, en el rancho San Marcos, delimitado por las coordenadas UTM 3'186,500 – 3'187,500 N y 656,500 – 657,500 E.

El acceso principal es la carretera estatal No.20 que comunica Hermosillo-Sahuaripa, pasando por los poblados y rancherías de Mazatán, La Estrella, El Torreoncito. a cuatro km de este último se localiza el área correspondiente a La Cuesta de Fierro. Se continúa sobre la misma carretera (20) hacia el poblado de Bacanora, donde se transita sobre un camino vecinal de terracería Bacanora-Guaycora, donde existe una bifurcación que conecta con el rancho San Marcos, ubicado a 44 km hacia el sur Figura 1.





Figura 1.- Plano de localización, del área de estudio.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es definir la relación litológica, estratigráfica, estructural y tectónica que identifican a los yacimientos de hierro tipo skarn en esta región, con la finalidad de establecer criterios de correlación con otros yacimientos similares que han sido reportados en otras localidades y, determinar los factores involucrados para la generación de este tipo de depósitos, apoyados por objetivos específicos como el geoposicionamientos de puntos y la realización de cartografía a detalle escala 1:5000, poniendo énfasis en las relaciones estructurales y la estratificación entre la formación Mina México y las calizas de plataforma. Permitiendo determinar las características particulares en cada uno de ellos, complementándose con estudios petrográficos-minerográficos, geoquímicos y radiométricos sobre las rocas encajonantes y las zonas mineralizadas y específicamente sobre el tipo de roca intrusiva presente. La integración de toda información determinó establecer la correlaciones de estas características observadas en estos yacimientos, mismas que finalmente se consideran apropiadas para ser utilizadas como una propuesta exploratoria, a manera de una guía, para la identificación y localización en otras regiones del estado.

## 1.3. Metodología

Para poder alcanzar y cumplir con la meta y objetivos principales involucrados y contemplados en esta investigación, se calendarizó la realización de una serie de actividades de gabinete y campo, estructuradas de manera consecutiva, siguiendo una metodología secuencial, misma que se describe a continuación:

La **primera etapa** consistió en recabar información bibliográfica, con base tanto a nivel local como regional, la información esta constituida por trabajos de tesis, que se relacionan con la elaboración de tesis de licenciatura, maestría y

doctorado, donde se puso mayor énfasis en la estratigrafía, geológica estructural, paleontología y yacimientos minerales. Dentro de esta primera etapa fue la de elaborar un plano geológico base, producto del análisis y actualización de la información de la carta geológica Bacanora (H12D55), 1:50, 000.

Durante la **segunda etapa** se realizaron tres salidas al campo, específicamente a las localidades de La Cuesta de Fierro y alrededores del rancho San Marcos Figura 2. Las actividades realizadas durante esta etapa consistieron en realizar un reconocimiento geológico, con cartografía a semidetalle 1: 10,000, sobre secciones o caminamientos previamente seleccionados, de los cuales se obtuvieron datos estratigráficos; así como también datos estructurales en las unidades aflorantes, utilizando para tal efecto una brújula tipo Brunton y un aparato de geoposicionamiento global marca Garmin modelo Dakota 20. Los datos más importantes (rumbos, echados, fallas, etc.) que definen las características originales y las deformaciones posteriores, se graficaron en estereogramas (hemisferio inferior) en el software Dips. En esta misma etapa se colectaron más de 60 muestras de roca de las diferentes unidades sedimentarias, volcánicas e intrusivas, que una vez que seleccionadas, se elaboraron 35 láminas delgadas, en las instalaciones del Departamento de Geología, las laminas más representativas de las unidades fueron seleccionadas para el estudio al microscopio petrográfico. De la misma manera, se obtuvieron 25 muestras representativas, de rocas y de mineralización, que una vez escogidas, algunas de ellas fueron analizadas por geoquímica y radiometría.

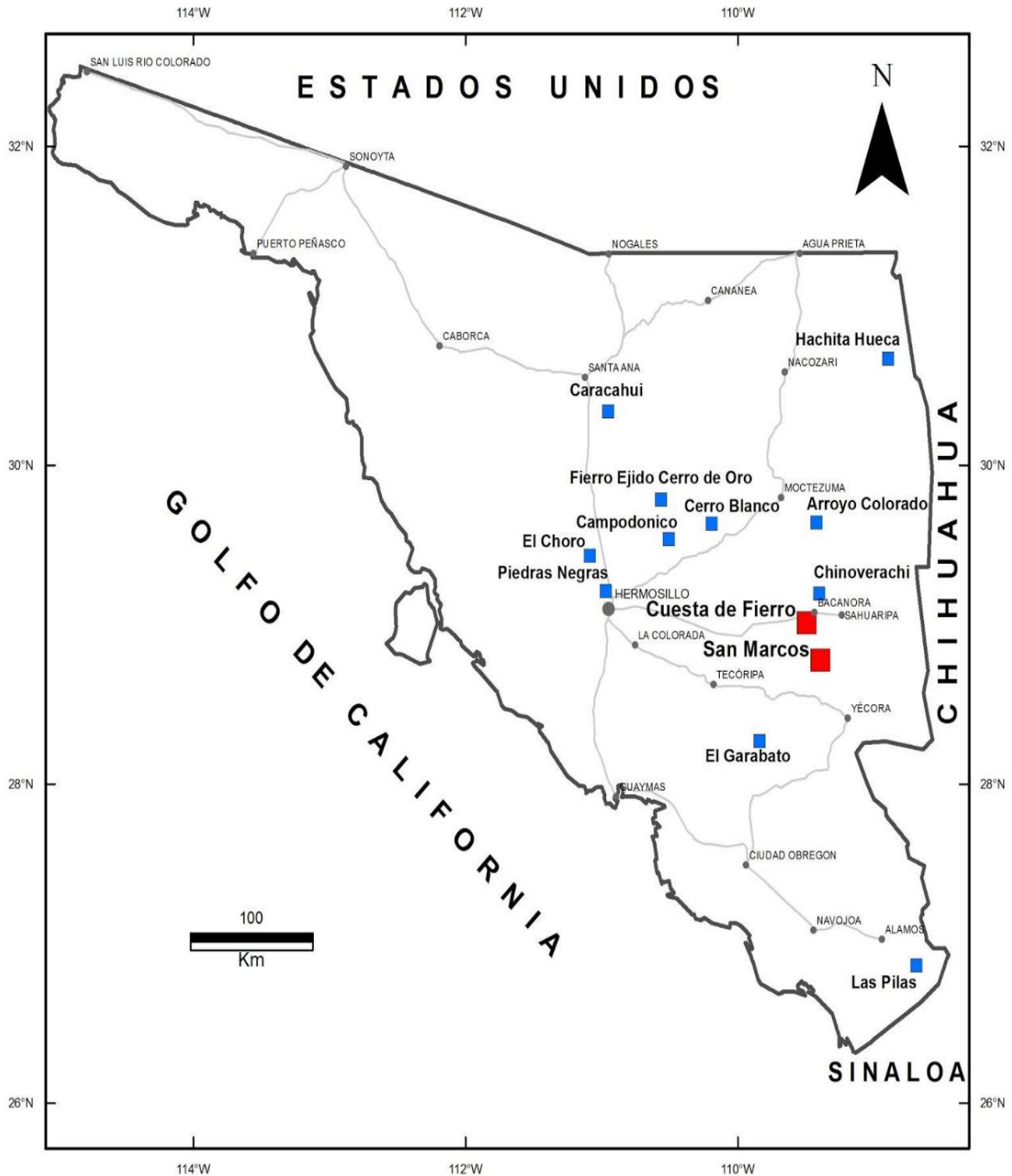
En la **tercera etapa**, se realizaron actividades de gabinete y laboratorio, consistente en el vaciado de toda la información obtenida en las fases previas, sobre todo lo relacionado con los datos generados en las salidas de campo, lo cual permitió elaborar un plano geológico a semidetalle de las dos localidades. En esta misma etapa se realizaron los estudios petrográficos de las 35 láminas; para el caso de las rocas pertenecientes a intrusivos, se efectuó un análisis petrográfico modal, basado en un conteo de 400 puntos por lámina, utilizando el diagrama de Streckeisen, 1976, para asignarle el nombre apropiado a cada uno de ellos.

Ocho muestras (GD10-05, GD10-09, GD10-10, GD10-11, GD10-12, GD10-15, GD10-16, GD10-19) fueron elegidas del area de La cuesta de Fierro para los análisis geoquímicos de elementos mayores y traza, en el laboratorio de ALS CHEMEX, adicionalmente, tres muestras (GD12-23, GD12-28, GD12-29) de rocas seleccionadas de los alrededores del rancho San Marcos, dos de origen intrusivo y un dique lamprofídico se analizaron por elementos mayores en los laboratorios Geolab de la UNAM.

También se realizó la geocronología de dos muestras de intrusivos (GD10-10, GD12-23) que fueron procesadas y fechadas por el método de U/Pb en circones en el Centro de Geociencias de la UNAM en Juriquilla Querétaro. Estas dos muestras de intrusivos se encuentran afectando a la secuencia sedimentaria formando cuerpos de Fe (skarns).

Para la determinación de temperaturas de formación, se utilizaron diagramas empíricos basados en la mineralogía presente. La caracterización de la mineralogía se llevó a cabo mediante petrografía de láminas delgadas y análisis de difracción de rayos X (DRX) en el Departamento de Geología y también se llevo a cabo un análisis de granate al microscopio de barrido electrónico con energía dispersiva (MEB-EDS) en el Departamento de Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora.

Para la interpretación de datos del estudio geoquímico se utilizó el programa Ipetwin, y para el análisis estructural se utilizó en programa Dips.



**Figura 2.-** Yacimientos tipo skarn de hierro en Sonora, tomado y modificado Pérez-Segura (1985), en rojo cuerpos estudiados en las cercanías del poblado de Bacanora, en Sonora centro oriental. En color azul indica la ubicación de los cuerpos de hierro reportados en Sonora.

## CAPITULO II

### 2. Tectónica

#### 2.1. Cinturón Ouachita-Marathon-Sonora

La Orogenia Ouachita-Marathon-Sonora (OMS) es un cinturón de aproximadamente 3,000 km de largo, conformado por un conjunto de afloramientos de rocas paleozoicas deformadas que constituyen el margen meridional (sur) del Cratón de Laurentia (Norteamérica), extendiéndose desde Arkansas (Ouachita), continuando hacia el suroeste a través de Texas (Marathon) y hacia el suroeste a través de Chihuahua y Sonora. Este sistema orogénico formado durante el Paleozoico Tardío, corresponde a un evento de subducción y colisión. La estratigrafía regional y las relaciones estructurales indican una continuidad original física del cinturón Orogénico Ouachita-Marathon-Sonora, desfasada en tiempo y espacio, a lo largo de todo el margen sureste de Laurentia, Poole *et al.*, 2005 (Figura 3).

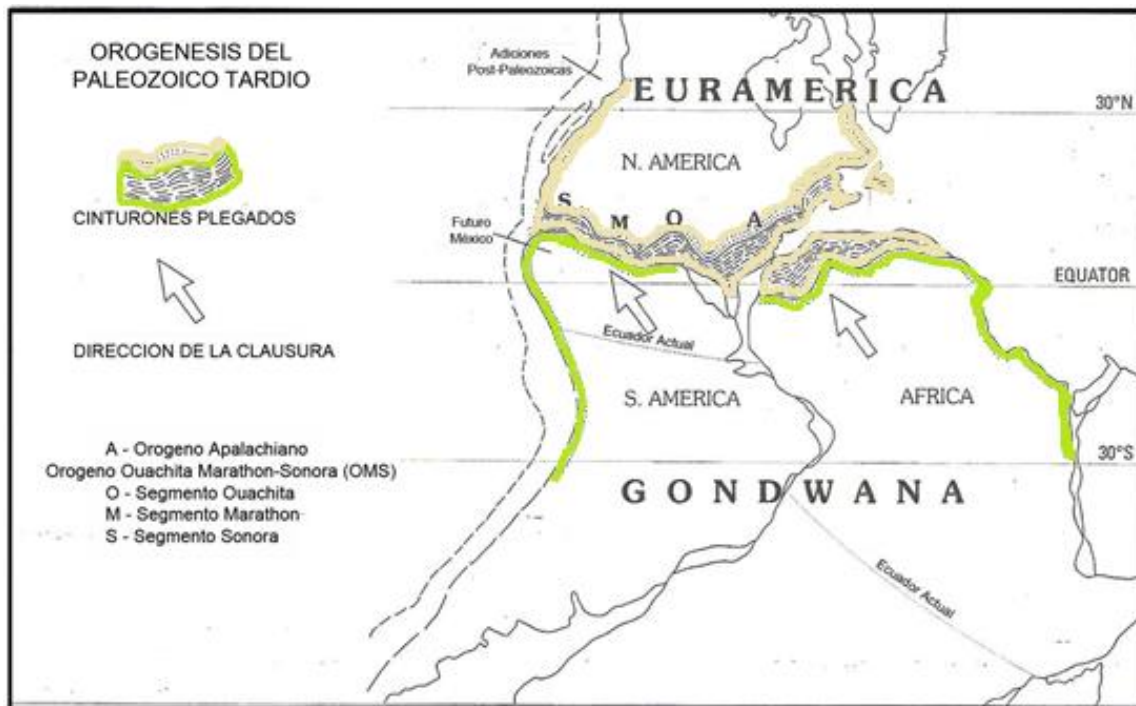
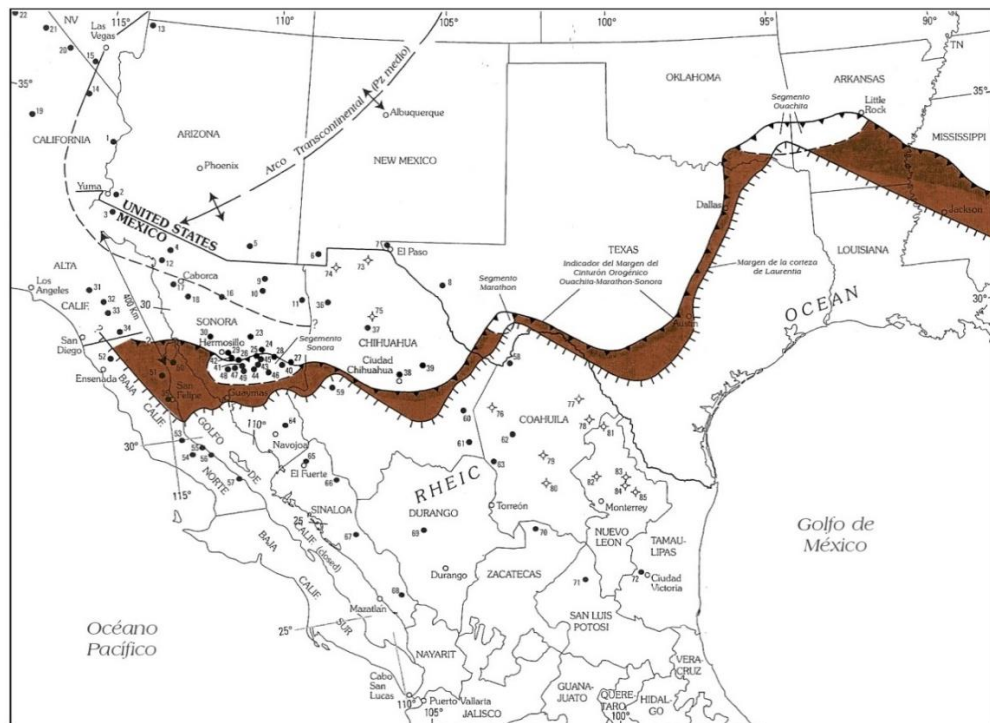


Figura 3.- Cinturón Orogénico Ouachita Marathon Sonora, tomado de Poole *et al.*, 2005.

En este cinturón orogénico, en las regiones de Arkansas, Oklahoma y Texas, los sedimentos de cuenca se encuentran fuertemente deformados y plegados, cabalgando hacia el continente a los sedimentos de Laurentia. Lo mismo es observado en Estado de Sonora (Figura 4), donde los sedimentos paleozoicos depositados en ambiente de cuenca oceánica, están sobre el talud continental, se encuentran cabalgando a una secuencia de sedimentos siliciclásticas y turbidíticos, representados por estratos decimétricos y métricos de arenisca de cuarzo de granulometría fina a muy fina, con intercalaciones de niveles de calcarenitas y en ocasiones *grainstone* bioclásticos, que contienen material y fósiles derivados de los estratos paleozoicos de la plataforma carbonatada.



**Figura 4.-** Distribución del Cinturón Orogénico Ouachita-Marathon-Sonora, en color café la cabalgadura y los límites de los sedimentos del Paleozoico de plataforma y cuenca oceánica. Tomado de Poole *et al.*, 2005.

Esta secuencia siliciclástica, tipo *flysch*, referida informalmente como formación Mina México, se le asigna una edad del pérmico inferior-medio y ha sido depositada en cuencas o depresiones alargadas de tipo “*foredeep*” (antefosa), orientadas sensiblemente Este-Oeste, que fueron desarrolladas sobre los estratos pérmicos miogeoclinales (parte final de la plataforma carbonatada) a consecuencia de inflexiones de la corteza y carga litostática, producto de la colisión entre Gondwana y Laurentia, durante el Pérmico temprano-medio, lo que provoca que los sedimentos de cuenca oceánica sean transportados tectónicamente y forzados a cabalgar a los sedimentos siliciclásticos de la formación Mina México, que ya habían sido depositados de manera transicional y concordante sobre los niveles superiores de la secuencia carbonatada.

Los cabalgamientos iniciaron en el Devónico en el noreste de los Estados Unidos y concluyeron al final del Paleozoico (Pérmico Superior) y probablemente al principio del Mesozoico en Sonora. La deformación en la Orogenia Ouachita-Marathon-Sonora comienza en el Misisípico en los tres sectores y termina en el Pensilvánico Superior en las Montañas de Ouachita, Pérmico Inferior en la región de Marathon, y en el Pérmico Superior en Sonora, (Poole *et al.*, 2005).

Desde la ruptura de Pangea, la placa de Norte América en su extremo oeste ha sido un límite de placas convergente, la placa Pacífico durante la subducción ha sido fragmentada produciendo otras placas oceánicas como: Kula (o Vancouver) y Farallón. En el oeste de México, la subducción de cuencas oceánicas fue seguida por la colisión de bloques que corresponden respectivamente a arcos magmáticos intra-oceánicos o bloques continentales, los cuales provienen del desprendimiento del mismo continente durante la fase de extensión jurásica que fragmentó la margen continental en el noroeste de México.



## 2.2. Orogenia Larámide

Durante el Cretácico Tardío y Paleógeno, (90-40 Ma) (Damon *et al.*, 1983) el norte de México estuvo sujeto a un evento compresivo correspondiente a la Orogenia Larámide, provocando un engrosamiento de la corteza causando transportes tectónicos y cabalgaduras, con emplazamientos importantes de grandes volúmenes de rocas ígneas. La Orogenia Larámide produjo cinturones con plegamiento en el noroeste de México (Sonora, Baja California y Sinaloa), así como abundante actividad magmática relacionada a la formación de depósitos minerales. En Sonora las estructuras anteriormente referidas, fueron afectadas por una fase extensional cenozoica (28 Ma.) llamada *Basin y Range*, la cual dificulta la identificación o reconocimiento de las estructuras laramídicas en Sonora.

Sin embargo, varias estructuras en el norte del estado han sido atribuidas a dicha orogenia. De manera general, con base en el análisis de la deformación observada en Sonora y Arizona. Taliaferro (1933) fue el primero en mencionar cabalgamientos que involucran a rocas del Grupo Cabullona del Cretácico superior en la región nororiental de Sonora.

Rangin (1977, 1982), cartografió estas estructuras tangenciales en el Cerro Cabullona y en las sierras de San José, Anibacachi y El Caloso, y concluyó que corresponden a fallas laterales jurásicas reactivadas.

El estado de Sonora ha sido afectado por varios eventos tectónicos produciendo efectos de compresión y también de distensión. La evolución tectónica y magmática fue controlada durante el Cretácico tardío y gran parte del Cenozoico por la subducción de la Placa Farallón con la Placa de Norte América (Rangin, 1977).

Durante este tiempo en Sonora existían varios dominios paleogeográficos, dentro de los cuales sobresalen dos en particular: uno en el occidente representado por un arco volcánico y otro al oriente representado por una cuenca que ha sido interpretada como la continuación de la cuenca Chihuahua (Rangin, 1977).

El registro de las anomalías magnéticas en la parte oceánica preservada (ahora incorporada a la Placa Pacífico) muestra una aceleración de la acreción

oceánica durante el Cretácico tardío-Paleógeno. La migración del magmatismo calciocalino hacia el oriente permite correlacionar esta aceleración con un aumento de la velocidad de subducción y una disminución paulatina del ángulo de subducción, lo cual permite un acoplamiento entre la placa subducida y la placa superior que se manifiesta por una compresión moderada en Sonora. La migración del magmatismo hacia el este culmina durante el Oligoceno con la edificación de la Sierra Madre Occidental.

Durante el proceso de subducción, se produjeron varios eventos compresivos asociados o seguidos por incrementos de la actividad magmática. El último evento compresivo, ocurrido durante el proceso de subducción, corresponde a la Orogenia Larámide, La fase tectónica en la región corresponde a un cambio en la cinemática general, relacionado con el cese progresivo de la subducción durante el Mioceno Medio- Tardío.

Reconocer una fase de deformación atribuida a la Orogenia Larámide y su interpretación se dificulta en cuanto a la amplitud o la existencia de los cabalgamientos. McKee *et al.*, (2005) retoman la interpretación de Jones (1966), quien consideraba que el evento larámide se caracterizó principalmente por levantamientos diferenciales de bloques y que los cabalgamientos son en realidad, la expresión de fallas normales de bajo ángulo o de deslizamientos gravitacionales.

### **2.3. Sierras y Valles Paralelos “*Basin and Range*”**

Posteriormente a la Orogenia Larámide, tanto en Sonora como en gran parte de la cordillera, se produjo un evento extensional considerado en realidad una fase orogénica el cual originó la formación de la provincia fisiográfica *Basin and Range* referida en español como Sierras y Valles Paralelos. A este evento se asocia la exhumación de diferentes niveles litológicos y estructurales de la corteza media a superior.

Las estructuras asociadas a la compresión larámide y a la extensión cenozoica tiene una amplia distribución a lo largo del flanco occidental de Norte

América, y son en términos generales, paralelas a la trinchera. Tal como es el caso de los cabalgamientos que se ubican en el extremo occidental de la cordillera y de las cuencas y sierras alargadas según una dirección N-S a NNW-SSE; así como también, el cinturón de núcleos complejos metamórficos. Reconocer la existencia de los elementos estructurales originales y la relación geométrica, entre la subducción y la evolución geológica del noroeste de México, es difícil de entender o visualizar los procesos que controlaron esta evolución (Calmus, 2011).

## **2.4. Geología regional**

### **2.4.1 Paleozoico de plataforma (secuencias miogeoclinales)**

Las rocas paleozoicas en la región centro-oriental de Sonora están representadas por secuencias sedimentarias de gran espesor, que se identifican por su litología y las condiciones en su ambiente de depósito. Litológicamente corresponden a potentes estratos de rocas carbonatadas, con menor proporción de niveles siliciclásticos, que fueron depositadas en un ambiente marino caracterizado por amplias y extensas plataformas marinas (mares epicontinentales) de profundidad somera y aguas templadas, que son referidos genéricamente, en la literatura estratigráfica del Paleozoico de Norteamérica, como **secuencias miogeoclinales** o de plataforma carbonatada, representados en la base por calizas y dolomías depositadas en aguas poco profundas en ambientes de supramarea, e intermarea, conteniendo intercalaciones menores de estratos de *siltstone*, areniscas y en menor proporción con niveles delgados de conglomerado, graduando y estando coronado hacia la cima, por rocas carbonatadas de edad Misisípico-Pérmico temprano.

### **2.4.2. formación Mina México (foredeep)**

Otra de Las secuencias litológicas distintivas, que aflora en la región de Bacanora, es La formación Mina México descrita al sur del poblado, conformando parte de la sierra El Encinal y el cerro La Zacatera (Hewett y Schmidt, 1978),

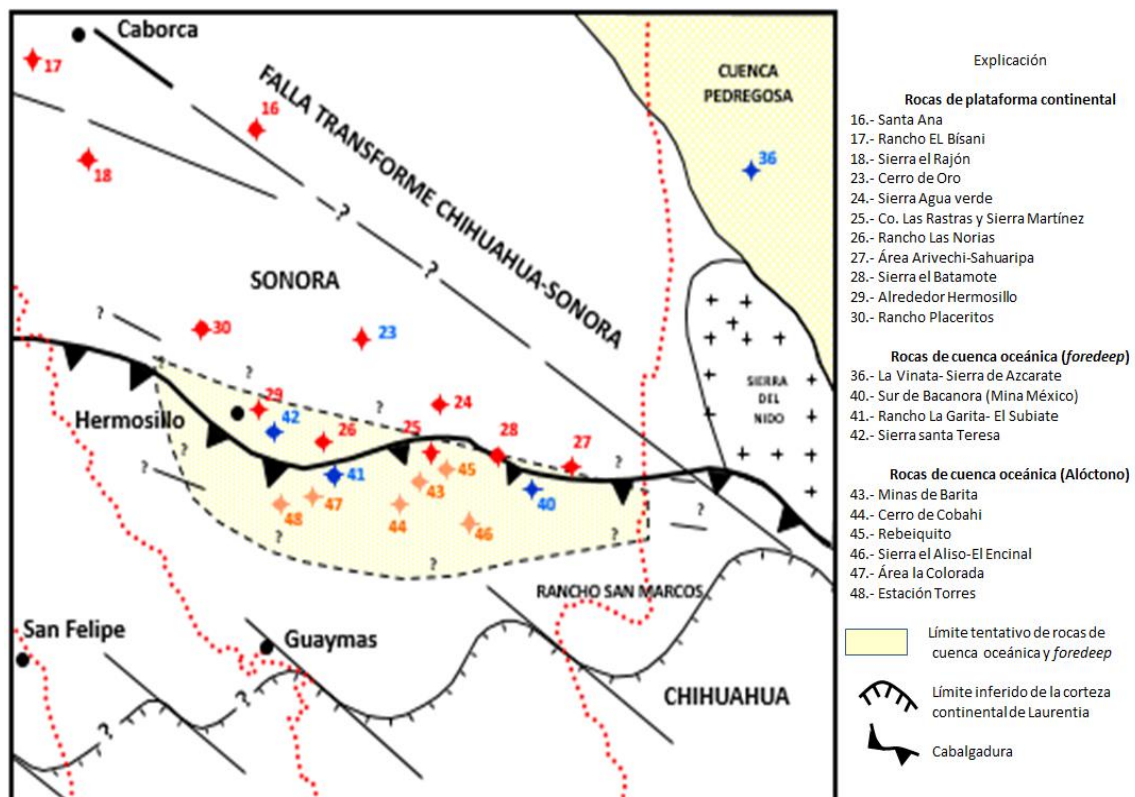
siendo la roca que hospeda a la estructura mineral vetiforme de la Mina México, de la cual toma su nombre. De acuerdo con sus características, granulométrica y mineralógica, esta secuencia corresponde a una unidad sedimentaria siliciclástica y turbidítica, tipo *flysch*, depositada sobre los estratos carbonatados de la cima de la plataforma y en un ambiente marino de transición, entre plataforma y talud continental. El depósito de esta secuencia forma estratos decimétricos de arenisca de cuarzo con un tamaño de grano fino a medio con formas angulares y subredondeadas, con porcentajes variables de feldespato, la estratificación varía de manera gradual, entre delgada a media, localmente se observan niveles con una estratificación laminar, sobre todo en aquellos intervalos en donde se incrementa la presencia de material de granulometría muy fina, tipo argilita-lutita. La secuencia siliciclástica tiene un espesor estimado de 1000 m aproximadamente, a la cual le asignaron una edad del Pérmico temprano-medio en base a su posición estratigráfica y la presencia de macro y microfósiles (fusulínidos y conodontos).

Los estudios sedimentológicos, estratigráficos y geocronológicos realizados en Sonora centro-oriental en los últimos 10-15 años, proporcionan una distintiva y significativa información que permiten establecer que los sedimentos siliciclásticos y turbidíticos, tipo *flysch*, de la formación Mina México del Pérmico Temprano-Medio, fueron depositados en cuencas tipo *foredeep* y contienen detritos derivados de varias fuentes, tanto de Laurentia, como de Gondwana. Este tipo de cuencas, orientadas sensiblemente este-oeste, se desarrollaron sobre los estratos de la cima de la plataforma carbonatada de Laurentia (miogeoclinal).

Los estratos de La formación Mina México tienen una tendencia general en el área NE-NW, las cuales a su vez están siendo cubiertas estructuralmente mediante una cabalgadura por rocas de cuenca profunda o talud continental del Paleozoico alóctono de Sonora (Poole *et al.*, 2005).

### 2.4.3. Paleozoico de cuencas oceánicas profundas (secuencias eugeoclinales)

En algunas localidades de las regiones del centro y centro-oriental de Sonora afloran estratos de lutita carbonosa, pedernal y cuarcita, con niveles de menor espesor de caliza y dolomía, con rangos de edades desde el Ordovícico hasta el Pérmico, teniendo un rango de espesor estimado de 2000 m (Radelli *et al.*, 1987; Poole y Madrid, 1987, 1988). Estos sedimentos fueron depositados en ambientes marinos, sobre cuencas de mayor profundidad, particularmente sobre el talud continental y son referidos por algunos investigadores como **secuencias eugeoclinales** o **Cuerpos Paleozoicos Alóctonos de Sonora**. La secuencia siliciclástica, tipo *flysch*, referida informalmente como formación Mina México, fue cabalgada por rocas correspondientes al alóctono producido por el cierre del mar de Rheico en la sutura Ouachita-Marathon-Sonora, tal como se ilustra en el plano geológico de las áreas donde afloran estas secuencias (Figura 5).



**Figura 5.-** Distribución de rocas de plataforma continental, cuenca oceánica (*foredeep*) y Paleozoico alóctono de Sonora central (Modificado de Poole *et al.*, 2005).

#### 2.4.4. Grupo Barranca

Los últimos descubrimientos estratigráficos reportados y que afloran en los alrededores del rancho San Marcos, corresponden al Grupo Barranca (comunicación personal, Amaya-Martínez y Poole, 2006), que fueron fechados por el método de U/P en zircones y que indican una edad de 274 a 280 Ma. Esta unidad probablemente corresponda a la base del Grupo Barranca (Formación Arrayanes) y está constituida por estratos de conglomerado, con intercalaciones de arenisca y cuarcita, con intervalos menores de lutita, con un espesor estimado de 700 m.

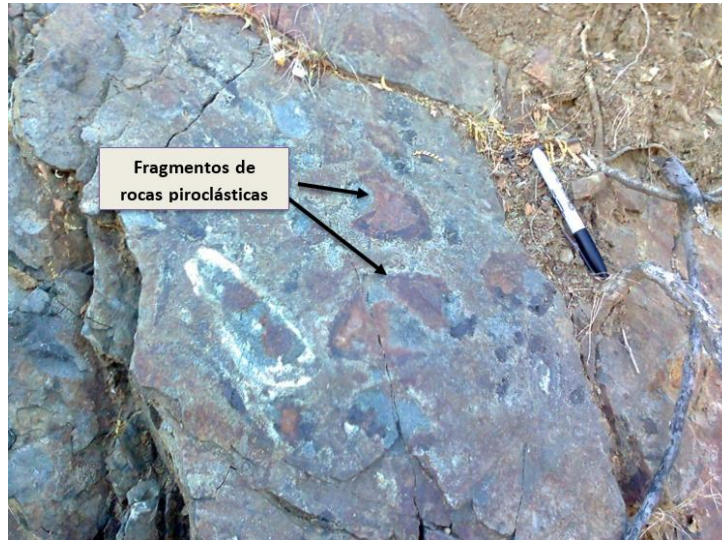
Desde un punto de vista estratigráfico y de acuerdo con las edades radiométricas, se interpreta que estas rocas fueron depositadas discordantemente sobre las rocas de los cuerpos alóctonos de cuencas profundas, posterior a que fueron transportadas tectónicamente sobre los sedimentos siliciclásticos de La formación Mina México.

Las rocas que definen al Grupo Barranca afloran principalmente en las regiones de San Javier, La Barranca y Tecoripa (porción centro este del estado de Sonora) con un espesor aproximado de 3000 m. El Grupo Barranca se relaciona con depósitos continentales y de ambientes marinos someros, que fueron acumulados en una cuenca tipo *rift* o *pull-apart*, aparentemente formada por fallamiento transtensional (Stewart y Roldan-Quintana, 1991). Dumble (1900), describe un conjunto de rocas sedimentarias en los alrededores de San Javier y Tónichi, representado por estratos de lutitas, areniscas y conglomerados a la que denominó División Barranca a la cual divide en tres miembros: inferior, medio y superior. King (1939) realizó un reconocimiento regional y modifica de rango de División a Formación Barranca; más tarde Alencáster (1961) propone modificar a Grupo Barranca y considera elevar a rango de formación a cada uno de los miembros, quedando de la base a la cima, Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyotes.

#### 2.4.5. Formación Tarahumara

Esta unidad, de acuerdo con sus relaciones estratigráficas y edades, se interpreta que han sido depositadas discordantemente sobre las rocas del Grupo Barranca y son a su vez cubiertas de la misma manera por las rocas volcánicas del Paleógeno. La Formación Tarahumara, que se caracteriza e identifica por un conjunto de secuencias volcánicas y volcanoclásticas, está constituida por flujos y derrames volcánicos y rocas piroclásticas y fue descrita originalmente por Dumble (1901), en el arroyo El Obispo, a las cuales se le asignó una edad cretácica por relación estratigráfica y presencia de pseudoformas de fósiles en unos niveles de caliza intercalados con los derrames volcánicos, posteriormente Wilson y Rocha (1946), estudiaron rocas similares que afloran en el arroyo Tarahumara, ubicado al noreste del poblado de la Barranca, donde se definió niveles de aglomerados y brechas de composición andesítica a dacítica, que se caracterizan por presentar ocasionalmente intercalaciones de rocas sedimentarias, sobre todo en su porción media (Dumble, 1901; Wilson y Rocha 1946; Mc Dowell *et al.*, 2001).

A este conjunto de rocas volcánicas y volcanoclásticas andesíticas, con un espesor estimado entre los 500 y 900 m, se le asigna una edad entre 86 y 68 Ma, de acuerdo con información sobre circones, que corresponde al Cretácico superior-Paleógeno y a nivel de afloramiento es identificable por presentar efectos evidentes de una alteración hidrotermal, tipo propilítica, a consecuencia del emplazamiento de las rocas graníticas laramídicas (Mc Dowell *et al.* 2001). Hacia su base existen derrames, brechas y aglomerados, en la parte media y superior se reporta niveles de toba riolítica y dacítica, con intercalaciones de arenisca tobácea, lutitas, calizas y pedernal. En un contexto tectónico, se interpreta que esta potente secuencia de la Formación Tarahumara representa una porción de un arco volcánico continental Laramídico en Sonora que se desarrolló durante el Cretácico tardío y Paleógeno. Wilson y Rocha 1946; Mc Dowell *et al.*, 2001. Figura 6.

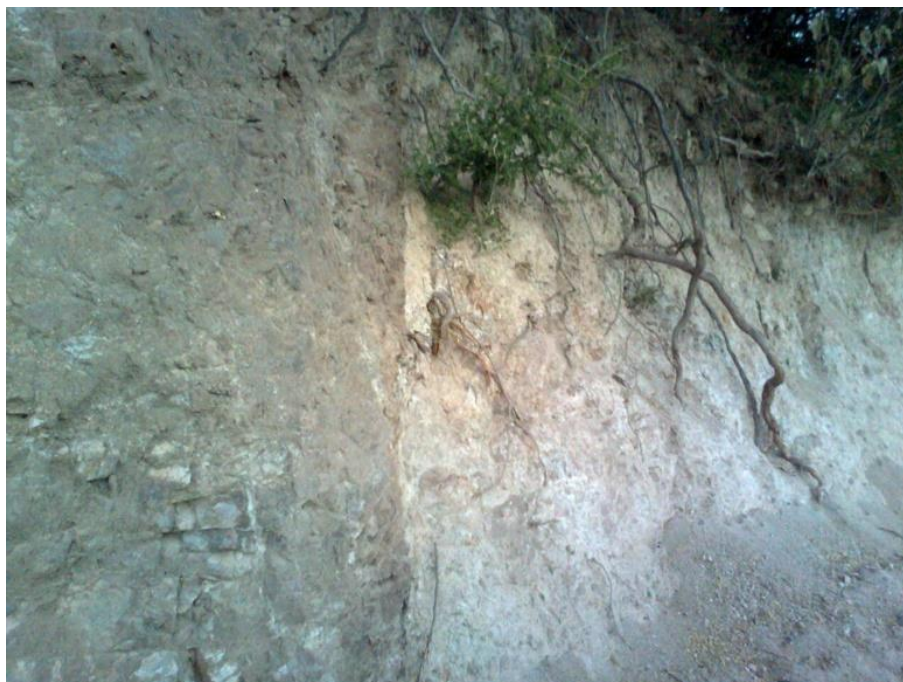


**Figura 6.-** Afloramiento de la Formación Tarahumara al sur del poblado de Bacanora sobre el camino a Guaycora. Nótese los grandes fragmentos piroclásticos de rocas de composición félsica (riolitas) y los efectos de la alteración hidrotermal, que caracterizan a esta unidad.

#### **2.4.6. Rocas Intrusivas Iaramídicas**

Durante la subducción de la placa Farallón hacia el continente generó una serie de cuerpos intrusivos (granitoides), que en general se describen como emplazamientos múltiples, con rangos de edad de 90 a 40 Ma. En el área de estudio se han localizado estos intrusivos de composición de granodiorita a microgranitos y sienogranitos con edades de 90 a 60 Ma, la edad de estas rocas está ubicada desde el Cretácico superior-Paleógeno (Damon *et al.*, 1983). En la Figura 7, se observa dos cuerpos de rocas intrusivas en contacto, mostrando dos de las variedades de rocas intrusivas que afloran en el área, foto tomada rumbo al poblado de Bacanora, en el área de La Cuesta de Fierro.





**Figura 7.-** Rocas intrusivas en contacto. Fotografía mostrando rocas intrusivas en el área de estudio; en contacto por falla. Localidad; entrada a La Cuesta de Fierro.

Rocas ígneas, aflorando en los alrededores de la localidad de La Cuesta de Fierro, han sido fechadas en afloramientos definidos por un conjunto de granitoides, vinculados a un batolito complejo que intrusión a los dos conjuntos anteriores, las composiciones de las rocas van de tonalita-granodiorita a sienogranito. Las edades en estas rocas son variables; se han reportado fechas de U-Pb en zircones a 90-89 Ma (Pérez-Segura *et al.*, 2009), y otras de K-Ar en biotita y hornblenda hacia los 60 Ma (Pubellier, 1987; Damon *et al.*, 1983), actualmente para su tesis de licenciatura Elena Pineda (comunicación oral) reporta edades de 90 Ma en zircones por el método de U-Pb, lo cual sugiere la interacción de un arco magmático que evolucionó, en tiempo y espacio, desde el oeste hacia el este.

En La Cuesta de Fierro se fechó uno de los cuerpos intrusivos con número de control GD10-10 descrito como un monzogranito de biotita de grano medio. Con una edad de  $60.11 \pm 0.48$  Ma y otro intrusivo fechado fue en el área del rancho San Marcos, la muestra se etiquetó con número de control de GD12-23

descrita también como un monzogranito de biotita y hornblenda de grano medio con edad de  $71.57 \pm 0.44$  Ma., utilizando el método de U-P en zircones, estas rocas varían tanto en su tamaño de grano como en la composición. Estos cuerpos graníticos son cortados por vetas de feldespatos y frecuentemente se aprecian enclaves dentro de los mismos intrusivos y que sean probablemente de la roca encajonante.

#### **2.4.7. Diques andesíticos**

Las rocas intrusivas Laramídicas son cortadas por diques de composición andesítica, que tienen una potencia de 1.5 m de espesor Figura 8, estos están orientados con un rumbo NE y su echado al SE, tiene una textura afanítica de coloración verdosa en superficie de interperismo, con minerales feldespatos con una alteración moderadas a arcillas.



**Figura 8.-** Dique de composición andesítica cortando intrusivo Laramídico.

#### **2.4.8. Formación Báucarit.**

Las unidades anteriores son cubiertas por una serie de rocas sedimentarias continentales con intercalaciones volcánicas que corresponden a la Formación Baucarit. Dicha formación fue llamada inicialmente División Báucarit (Dumble 1900) y fue redefinida por King (1939) como Formación Báucarit, tal y como se le conoce hoy en día, se divide en miembro inferior el cual consta de uno o más flujos de basaltos intercalados con aglomerados basálticos conteniendo fenocristales de olivino alterado, augita y hornblenda. El miembro superior consiste principalmente de tobas con un espesor significativo de rocas clásticas de grano grueso (conglomerado y arenisca), que sobreyacen en discordancia a rocas que van desde el Paleozoico-superior al Oligoceno superior. La formación está constituida por sedimentos clásticos bien consolidados compuestos de alternancias de conglomerados polimícticos con intercalaciones de lentes de estratos de areniscas y niveles de arcillas, en algunas de las localidades presentan derrames de andesitas y basaltos y tobas riolíticas, en diferentes niveles de la secuencia cuyos depocentros probablemente fueron cuencas continentales cerradas (McDowell *et al.*, 1997).

#### **2.4.9. Rocas volcánicas extrusivas Formación Lista Blanca**

Las rocas volcánicas que se describen en las cercanías de las áreas de estudio son de composición variable y afloran cuerpos de composición máfica como basaltos, andesitas y rocas de composición félsica (riolitas), que corresponden a La Formación Lista Blanca, la cual sobreyace en concordancia al Grupo Baucarit, asignándole una edad de cenozoico. King (1939) le asignó inicialmente una edad del Cretácico, Morales-Montaña *et al.* (1990) reportan edades de  $10.4 \pm 0.2$  Ma fechadas por K-Ar las rocas corresponden a un flujo latítico en la parte superior. La secuencia está compuesta por flujos de lavas riolítica, intercalados por niveles de toba, ignimbrita y arenisca tobácea.

Roldan Quintana (2002) reporta que la Formación Lista Blanca se encuentra sobreyacida por basaltos de olivino recientes formando mesetas, en la región de Mesa Grande.

En la región de Bacanora afloran cuerpos similares de andesitas y basaltos con olivino fuertemente alterados a arcillas y zeolitas, formando pequeñas mesetas en las partes baja del cerro la Zacatera, Figura 9.



**Figura 9.-** A: Afloramiento de Rocas volcánicas (basaltos), Formación Lista Blanca rocas volcánicas (basaltos) sur del poblado de Bacanora. B: vista panorámica de La Formación Lista Blanca, flujo volcánico de rocas félsicas (riolitas) sobre el arroyo Bacanora.

## 2.5 Estratigrafía del área de estudio

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio son rocas paleozoicas (Ordovícico) que corresponden a rocas sedimentarias que fueron depositadas en cuencas profundas y corresponden a cuarcitas de grano fino a medio y lutitas de color claro con fósiles de graptolitos, aflorando en los alrededores del rancho San Marcos y la parte sur del cerro La Zacatera con espesores de aproximadamente de 130 m y corresponden a la Formación El Mezquite. Debido a los procesos estructurales y tectónicos posteriores, estas rocas paleozoicas de cuencas profundas pueden mostrar una diversidad de contactos por falla con cualquier unidad litológica, cuya edad sea anterior e incluso posterior al cabalgamiento.

### **2.5.1. Calizas de plataforma (Miembro La Cueva)**

Las calizas de plataforma corresponden al Miembro La Cueva del Grupo Santo Domingo y son sedimentos que fueron depositadas en aguas someras y presentan contenidos de fósiles como crinoides, restos de bivalvos, fusilínidos del Paleozoico (Pérmico inferior), la secuencia tiene un espesor aproximado entre los 800 a los 1000 m, la unidad aflora en la sierra de La Campanería, Los Alisos y La Zacatera, y se encuentra en forma concordante con rocas siliciclásticas.

### **2.5.2. formación Mina México rocas siliciclásticas**

La formación Mina México son depósitos de detritos siliciclásticos y sedimentos de rocas carbonatadas que identifican a la unidad y que fueron depositados en cuencas alargadas tipo *flysch*, del Pérmico inferior-medio, los espesores de esta secuencia son entre los 2000 m, la unidad aflora en la sierra de La Campanería, Los Alisos y La Zacatera.

### **2.5.3. Formación Tarahumara**

La Formación Tarahumara se encuentra de una manera discordante con las rocas siliciclásticas de La formación Mina México, la composición de la unidad comprende un conjunto de secuencias de flujos volcánicos y rocas piroclásticas vulcano-sedimentarias a la cual se le asignó una edad Cretácica (90 a 70 Ma) y que afloran en la parte sur del poblado de Bacanora sobre el camino rumbo al poblado de Guaycora, su espesor aproximado corresponde en el área entre los 100 m.

#### **2.5.4. Rocas intrusivas laramídicas**

Las rocas laramídicas corresponden a un conjunto de cuerpos intrusivos con edades que van desde los 90 a 60 Ma y que afectaron a las unidades descritas anteriormente, la diversidad de composición granodiorítica a microgranitos de hornblenda y biotita, afloran en las áreas de estudio, y que fueron las rocas que aportaron los fluidos para el depósito de los cuerpos mineralizados en el estado de Sonora.

#### **2.5.5. Formación Báucarit**

Esta unidad está contemplada como un complejo de rocas asociadas a un arco magmático, y están en discordancia o contacto por falla por unidades de roca clásticas y volcánicas del Cenozoico, su espesor va hasta los 850 m, La formación está constituida por sedimentos clásticos bien consolidados compuestos de alternancias de conglomerados polimícticos con intercalaciones de lentes de estratos de areniscas y niveles de arcillas, en algunas de las localidades presentan derrames de andesitas y basaltos y tobas riolíticas. La edad de la Formación Báucarit se ha atribuido al Mioceno Inferior- Mioceno Medio, Cochemé, 1985.

La variedad litológica del área es muy diversa y se representa en la columna estratigráfica y perfil esquemático de las Figuras 10 y 11.



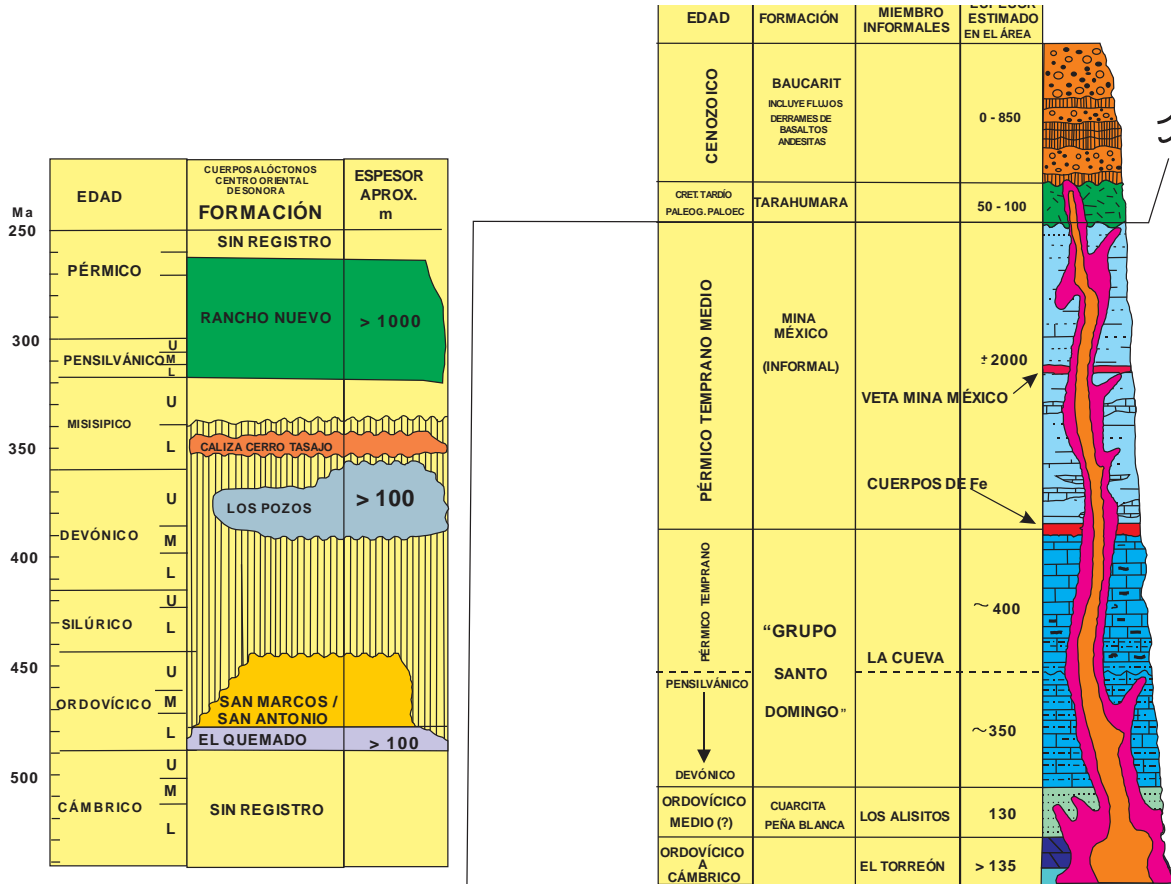


Figura 10.- Columna estratigráfica esquemática de la Porción de Centro oriental de Sonora, mostrando el cuerpo de hierro entre la formación Mina México y las Calizas de plataforma modificada de Poole-Amaya Martínez (2005).

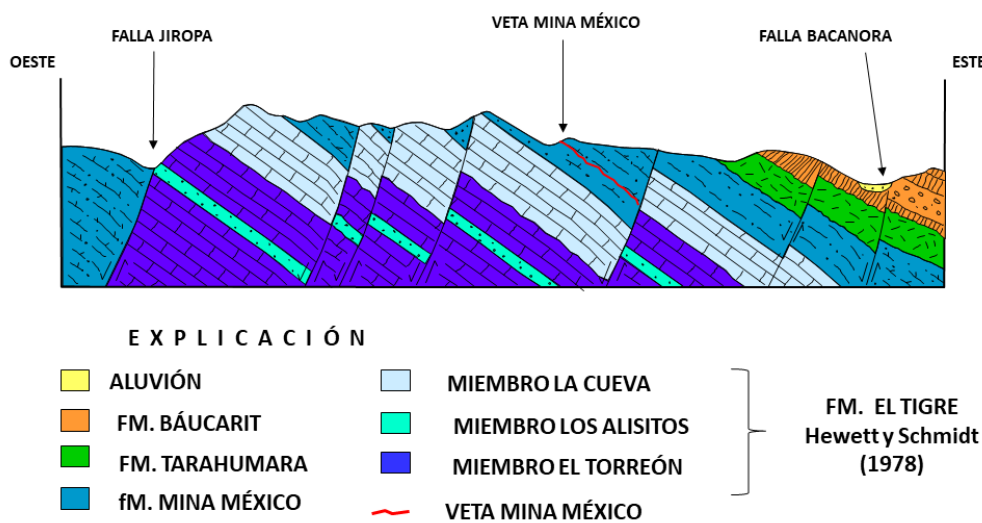


Figura 11.- Sección esquemática, al sur de la estructura mineral Mina México (modificado de Poole – Amaya Martínez (2005)

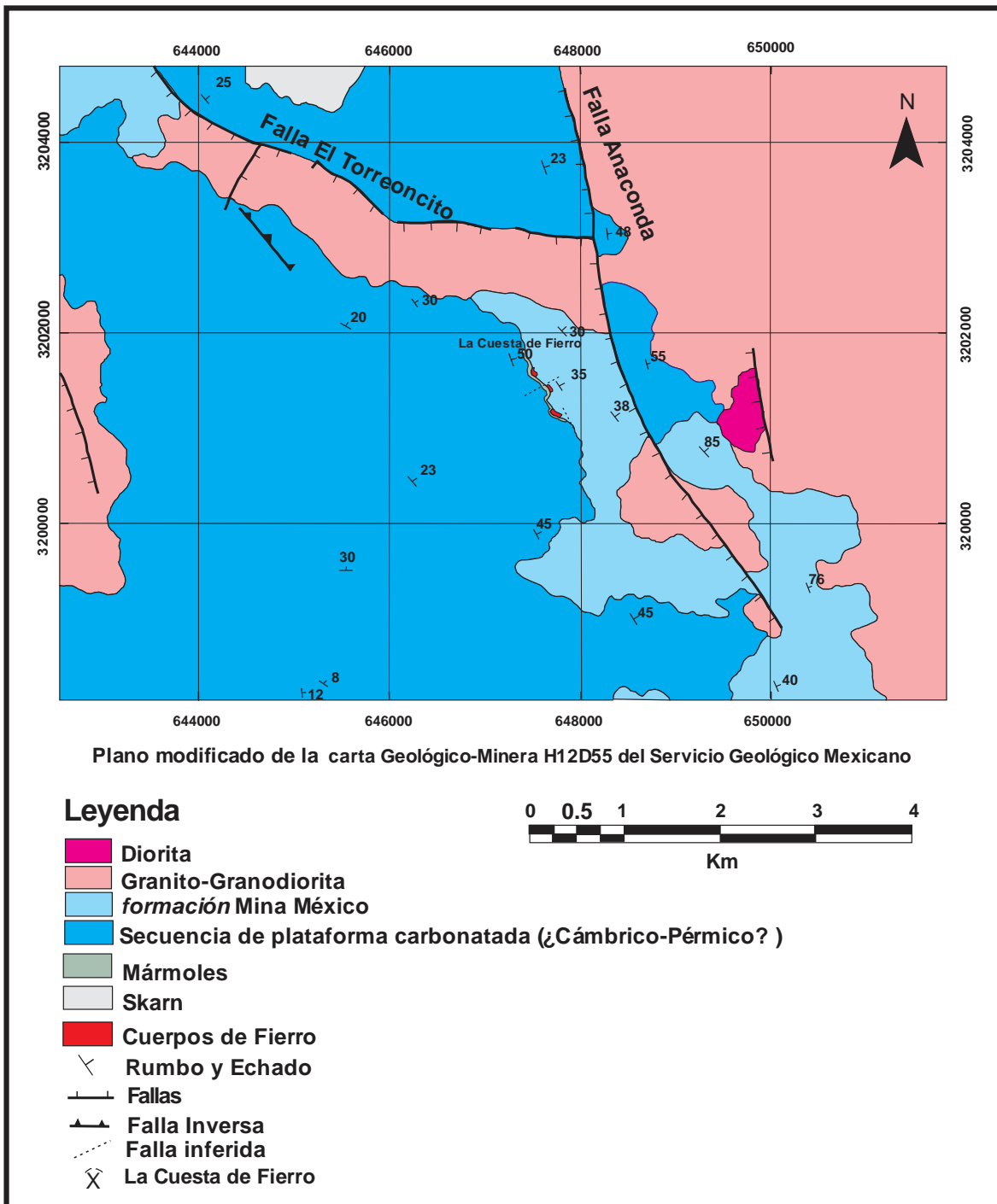
## **2.6. Geología de las áreas de estudio**

### **2.6.1. Geología del área La Cuesta de Fierro**

#### **2.6.1.1. Calizas de Plataforma (Miembro La Cueva)**

Dentro del contexto geológico del área de estudio, se encuentran diferentes tipos de rocas y que se describen a continuación: las rocas más antiguas localizadas es en la parte occidental-noroccidental y que corresponden a la secuencia gruesa de rocas sedimentarias carbonatadas del Paleozoico de aguas someras correspondientes a la plataforma, estas rocas son calizas y tienen un espesor aproximado de 1000 m; esta secuencia se caracteriza por el contenido de fósiles como crinoideos y fusulínidos del Pérmico temprano, en algunas partes de la secuencia de calizas se encuentra con un alto grado de recristalización localizada hacia la parte oriental, estos cambios que sufrieron las rocas calizas fue por un proceso de metasomatismo causado por un evento de metamorfismo de contacto causado por la intrusión de cuerpos ígneos laramídicos de composición granítica y granodiorítica. Las rocas calizas presentan una coloración de intemperismo de gris claro a gris oscuro y con tonos rojizos por la oxidación de los sulfuros de hierro (pirita). Los rumbos de las capas varían de NW35°- 45°SE y con un echado promedio de los 35° al NE. Esta unidad carbonatada presenta cuatro familias de fracturas, dos de ellas corresponden a la deformación de la orogenia Larámide con un rumbo NW-SE y SW-NE, y las restantes a una fase distensiva correspondiente al Basin and Range. Estos son segmentados por fallas de tipo normal con rumbo E-W y que favorecen la exposición de estos cuerpos intrusivos. Ver Figura 12.





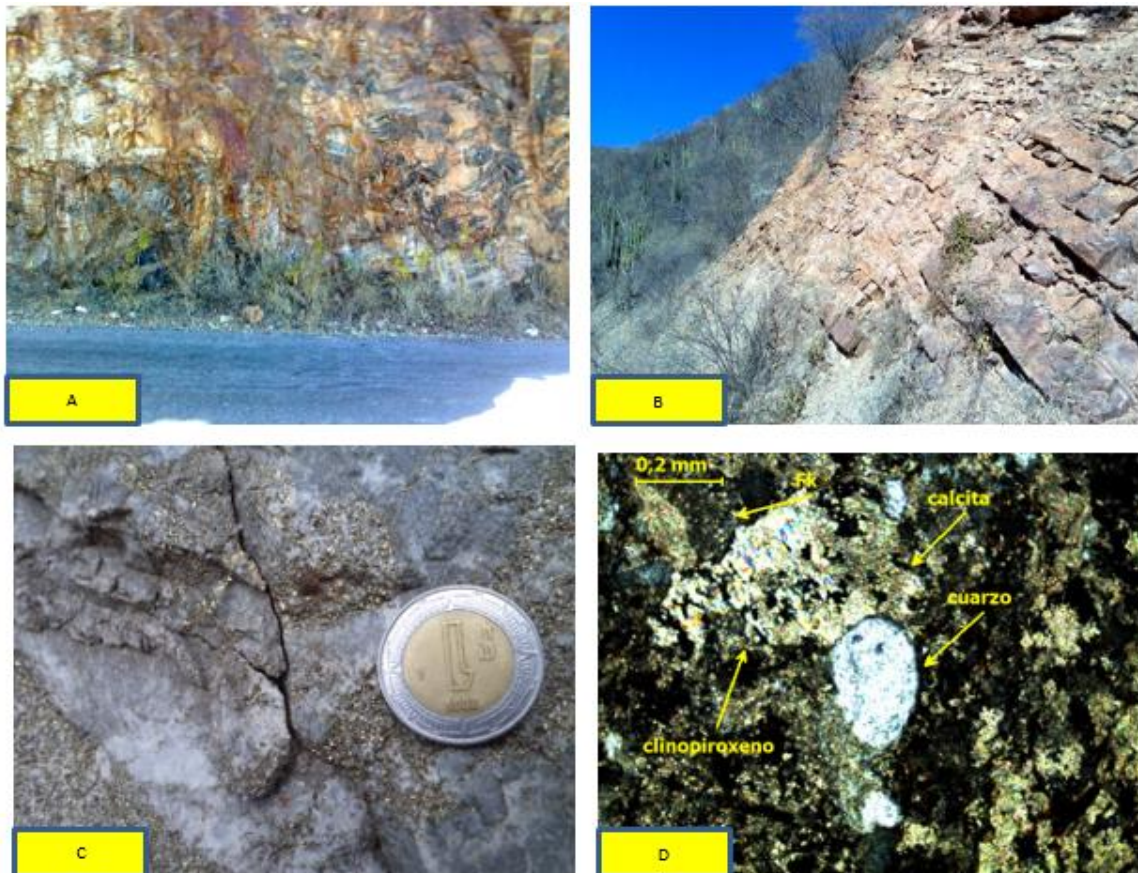
**Figura 12.-** Plano geológico del área La Cuesta de Fierro modificado de la carta Geológico Minera H12 D55 1:50,000 del SGM (2004).

### 2.6.1.2 Rocas siliciclásticas formación Mina México.

Esta unidad está constituida por rocas paleozoicas, mismas que se componen de rocas detríticas principalmente lutitas carbonosas de color gris claro y niveles de calcarenitas de color grisáceo con limolitas de color amarillo ocre, en menor proporción existen areniscas de grano fino de color rojizo producto de la oxidación de los sulfuros de hierro (pirita). Localmente esta secuencia se encuentra metamorfozada e intensamente fracturada. Inicialmente esta secuencia fue nombrada informalmente por Hewett y Schmidt (1978) como formación Mina México, haciendo referencia a la unidad litológica que contiene una mina de plata con ese nombre (Mina México) y que se localiza al sur del poblado de Bacanora (Figura 13). Esta secuencia siliciclástica se encuentra de forma concordante con las calizas de plataforma (Miembro La Cueva).

Estas unidades litoestratigráficas tienen una relación con la Sierra de Santa Teresa (NE de la ciudad de Hermosillo) donde se describen unidades similares con una zona transición clara de calcarenitas entre las calizas y las limolitas que constituyen la base de la formación Mina México, (fMM) descrita por Poole y Amaya-Martínez (2005).

En general, estos estratos siliciclásticos muestran una coloración café-rosa claro en superficie fresca, y en superficie intemperizada tiene una coloración café-grisácea a café amarillenta, con la presencia de una característica oxidación (debido a la lixiviación-alteración de los sulfuros de hierro). Un elemento distintivo en esta unidad siliciclástica son las intercalaciones de niveles turbidíticos calcáreos (calcarenitas) o *grainstone* bioclásticos, de ambiente turbidítico con un contenido variable de fósiles como fusulínidos, crinoides, bivalvos y briozoarios en su mayoría recristalizados, que fueron derivados y transportados de la secuencia de plataforma. Así mismo, es frecuente observar niveles en donde existe la presencia de fósiles traza del tipo *escalarituba*, *nereites*, *lophoctenium*, *cosmorhapse*, que indican un ambiente de depósito de aguas más profundas, en comparación con el depósito que se le atribuye a la secuencia de plataforma.



**Figura 13.-** A: Vista local de rocas de la fmm. B: Estratificación delgada fmm, La Cuesta de Fierro. C: Detalle de la fmm mineralización de los sulfuros de hierro, poblado la Estrella. D: Sección delgada característica de la secuencia granos de cuarzo redondeados y carbonatos.

### 2.6.1.3. Cuerpos intrusivos locales

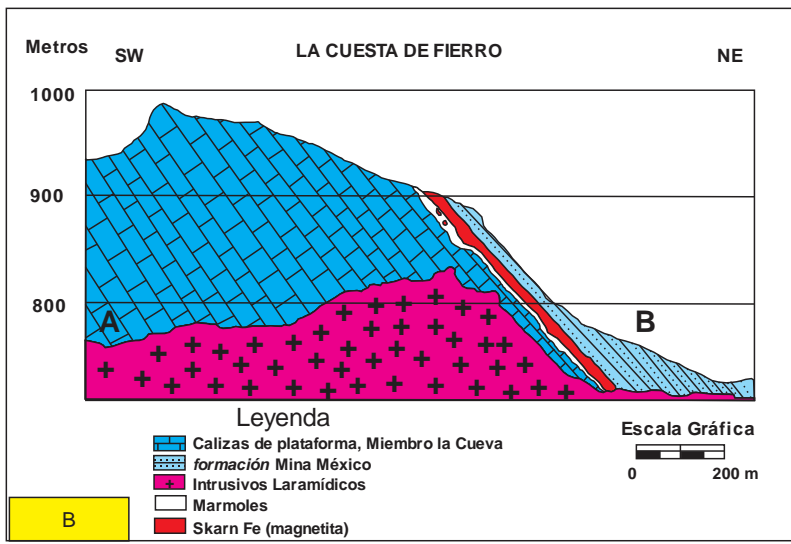
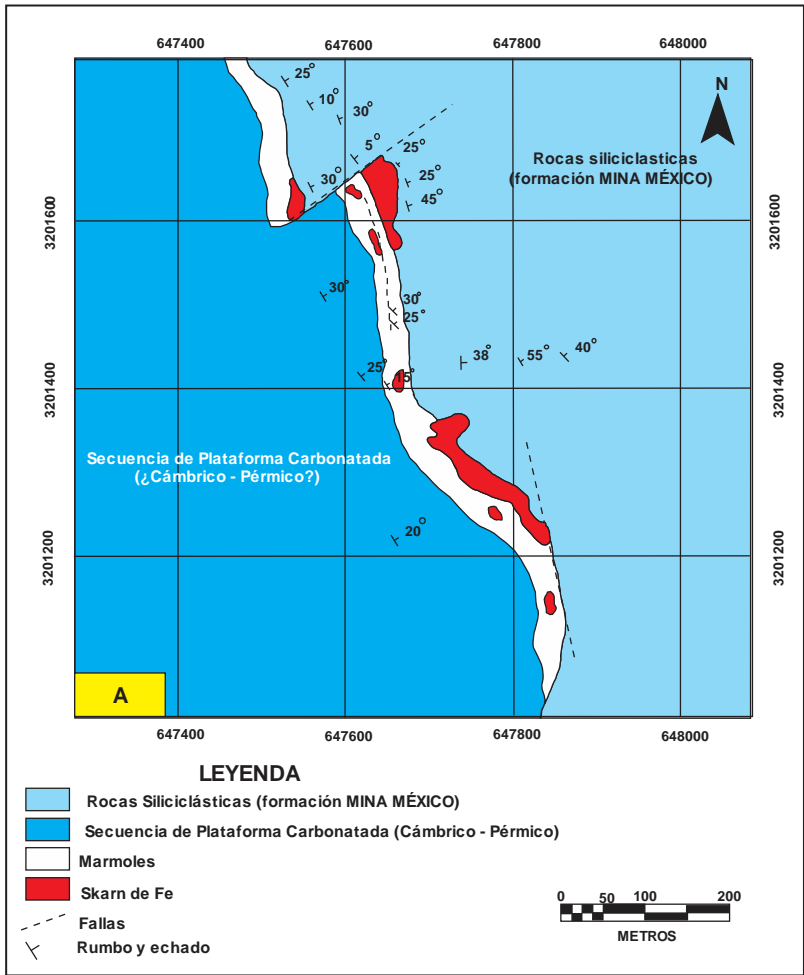
Las rocas intrusivas existentes en el área afloran en la parte central afectando la secuencia de calizas de plataforma en la parte noreste. Corresponden a dioritas y monzodioritas, basado en el estudio modal con el conteo de 400 puntos en lámina delgada de acuerdo al diagrama de Streckeisen (1976), en la Figura 14 se muestran dos cuerpos intrusivos en contacto, uno de ellos marcado con el código de muestra GD10-09, identificado como una microgranodiorita de biotita y hornblenda, el otro cuerpo intrusivo emplazado posteriormente identificado con la clave de muestra GD10-10, se identificó como una monzogranito de biotita de grano medio, esta roca fue fechada por el método

de U-Pb en zircones, y el resultado fue una edad de  $60.11 \pm .048$  Ma., ambos intrusivos se localizan cercanos a los cuerpos de magnetita del área de La Cuesta de Fierro.



**Figura 14.-** Cuerpos graníticos cercanos a los afloramientos de los cuerpos de hierro, La Cuesta de Fierro.

Se realizó un mapeo geológico de La Cuesta de Fierro (Figura 15 A) y una sección esquemática cortando perpendicularmente la mineralización de los cuerpos de magnetita, (Figura 15 B).



**Figura 15.-** A: plano geológico del área La Cuesta de Hierro, B: Sección geológica La Cuesta de Hierro, unidades litológicas concordantes con las estructuras del yacimiento, (cuerpo de magnetita).

## **2.6.2. Geología del área rancho San Marcos**

### **2.6.2.1. Secuencia de cuerpos alóctonos de Sonora**

Esta área se encuentra con una litología de características similares al área de La Cuesta de Fierro. Las rocas más antiguas que afloran en los alrededores del rancho San Marcos corresponden a una secuencia sedimentaria alóctona que son de una secuencia eugeoclinal (sedimentos de ambientes profundos) que se encuentra cabalgando las rocas siliciclásticas de la formación Mina México, estos paquetes de rocas afloran en los alrededores del rancho San Marcos. Con una edad Ordovícico temprano - Pérmico medio.

Esta secuencia turbidítica está conformada por sedimentos clásticos (silíceos y carbonatados) de granulometría fina a media con texturas tipo *grainstone* y/o calcarenitas, depositada en ambientes marinos de cuencas oceánicas profundas. Regionalmente este conjunto de rocas está referido como “Cuerpos paleozoicos alóctonos de Sonora”, (Radelli *et al.*, 1987).

### **2.6.2.2. Cuarzita alóctona (Ordovícico)**

Esta unidad está compuesta de cuarcitas de grano fino a medio y de color en superficie de amarillo a rojizo por las oxidaciones de los sulfuros de hierro (pirita). Se localizan cuerpos aislados de menores dimensiones fuertemente oxidados a hematita con potencias de estratos de 2 m y con un espesor máximo aproximado de la unidad de 130 m.

### **2.6.2.3. Lutitas carbonosas**

La secuencia descrita anteriormente sobreyacen a rocas fósiles, de color gris claro y tonos rojizos, correspondiendo a un paquete de lutitas carbonosas con contenidos de fósiles graptolitos y con un espesor aproximado de 15 m.



#### 2.6.2.4. Secuencia siliciclástica de cuenca profunda (Formación Rancho Nuevo)

Dentro de la secuencia de los Cuerpos alóctonos de Sonora aflora en los alrededores del rancho San Marcos una unidad muy deformada, (plegada y fracturada) con una descriptiva de estratos delgados intercalados por lodolitas, argilitas, pedernal, areniscas turbidíticas, cuerpos de caliza y algunos estratos de dolomías, de edad Misisípico superior perteneciente a la Formación Rancho Nuevo (Figura 16).



**Figura 16.-** Afloramiento perteneciente a la Formación Rancho Nuevo (intercalación de lodolitas, argilitas, pedernal, areniscas turbidíticas, cuerpos de caliza), en las cercanías al rancho San Marcos.

### 2.6.2.5. Calizas de plataforma (Miembro la Cueva)

Se trata de una secuencia carbonatada depositada en profundidades someras de la plataforma que se le atribuye una edad del Pérmico inferior-medio y que aflora desde las partes bajas hasta las más altas del cerro La Zacatera, con una altitud de superior a los 1200 msnm.

Las rocas calizas tienen color de interperismo gris oscuro a claro y con tonos cafés a rojizos, estas rocas tienen una estratificación paralela, sus espesores varían de los 20 cm a hasta los 15 m, presenta un fuerte fracturamiento resultado de una deformación plástica producto de las cabalgaduras y la distensión laramídica, se caracterizan por calizas *mudstone*, *grainstones* y mármoles, Figura 17.



**Figura 17.-** A: Vista panorámica de las Calizas de plataforma con estratos de gruesas potencias Miembro la Cueva, cerro La Zacatera, B: misma secuencia a detalle de las capas delgadas de caliza.

En la base del cerro, dentro de las calizas se llegan a apreciar algunos fósiles como crinoideos que aún se preservan a pesar de la fuerte deformación y recristalización producto de la intrusión de las rocas plutónicas que afloran cercanas a ellas. En la parte media del cerro se localizaron fusulínidos orientados concordantes con la estratificación apareciendo en repetidas ocasiones, los niveles con contenidos de fósiles alcanzan espesores entre los 10 y 20 cm, se aprecian además deformaciones en ellos. (Figura 18).





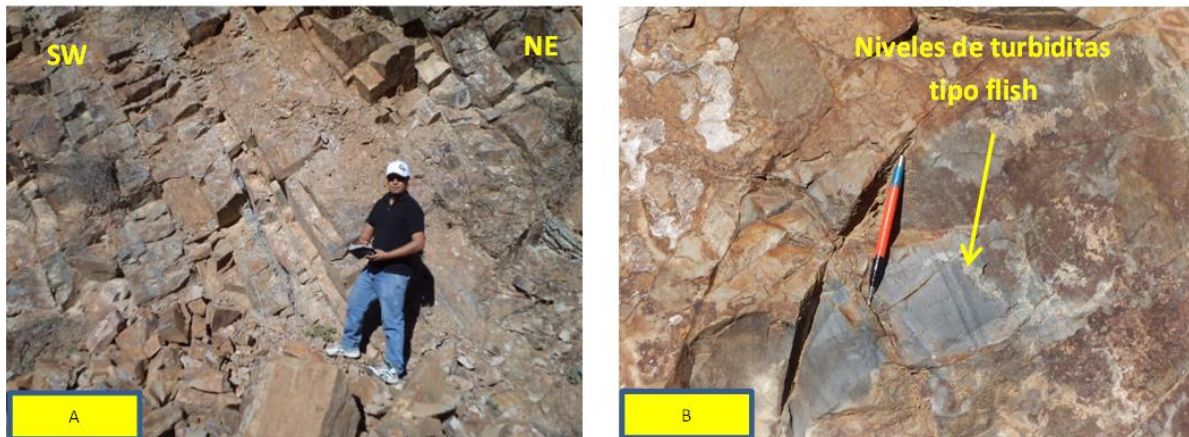
**Figura 18.-** A: Fósiles crinoideos localizados en la base del cerro B: Calizas de plataforma con niveles delgados de fósiles Fusulínidos Pérmico tardío, C, D: Niveles deformados fósiles fusulínidos, parte media del cerro la Zacatera.

#### **2.6.2.6. Rocas siliciclásticas de cuenca *foredeep* (formación Mina México)**

La secuencia de rocas siliciclásticas de la formación Mina México se caracterizó al sur del rancho San Marcos por Poole y Amaya Martínez (2005) fue fechado por el método de U-Pb en zircones y comparada con otras secuencias siliciclásticas que fueron correlacionables y son localizadas en Sonora central (Mazatán).

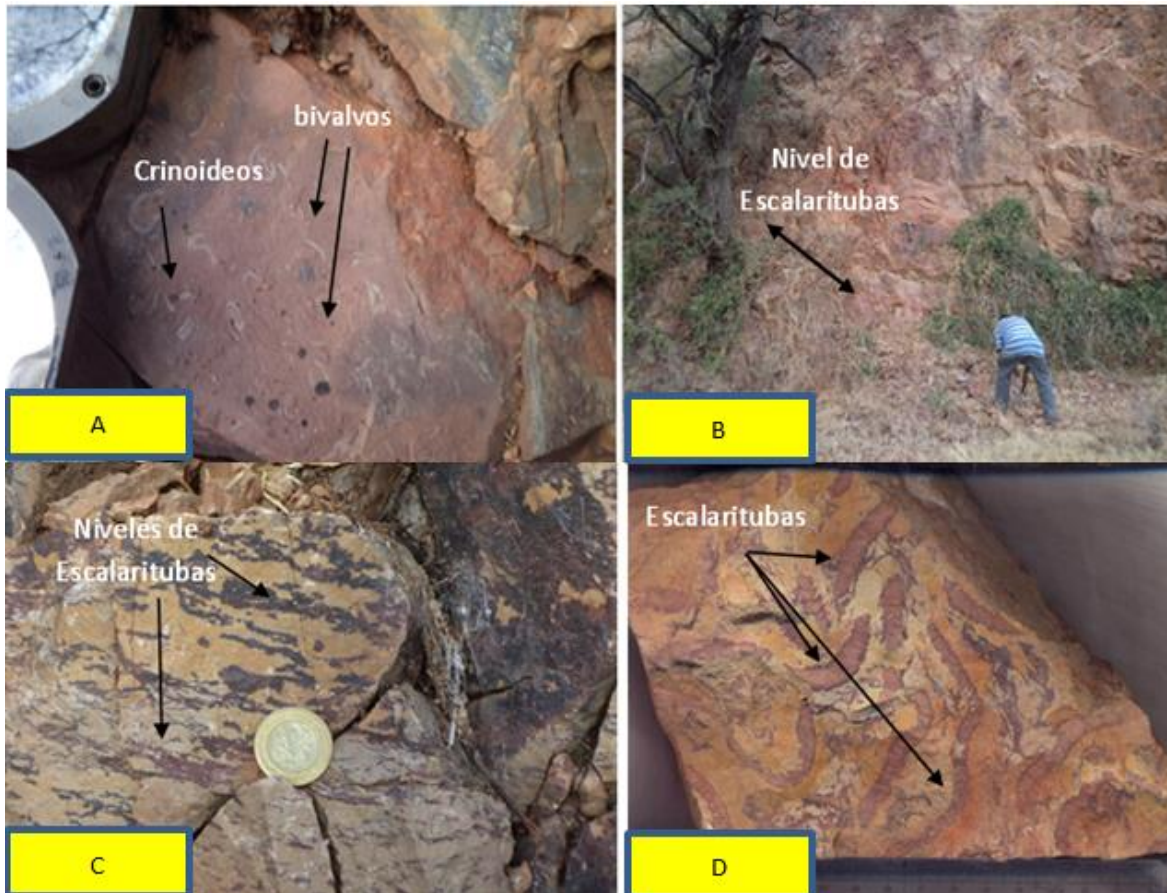
La secuencia de estratos siliciclásticos y turbidíticos de la formación Mina México son rocas que están en contacto concordante con las calizas de la

plataforma del Miembro La Cueva, lo que relaciona esta área con La Cuesta de Fierro. Las rocas tienen colores de interperismo café y de tonos rojo y amarillo por la presencia de los óxidos de fierro y en superficie fresca con tonos de grises claros (Figura 19). Son de grano fino (limolitas) y, ocasionalmente, afloran dentro de esta secuencia lutitas, y niveles turbidíticos, con intercalaciones de carbonatos con alternancias de pedernal. La secuencia presenta un fuerte fracturamiento, preferencial con rumbo NE-SW, algunos niveles presentan fósiles como nereites, escalaritubas, estos últimos se localizaron niveles hasta los dos metros de espesor en las cercanías del área (Figura 20).



**Figura 19.-** A: Estratificación de delgada a media de la formación Mina México, B: Niveles delgados de calcarenitas dentro de la formación Mina México.





**Figura 20.-** A: Fragmentos de fósiles trazas pertenecientes de la plataforma. B: Panorámica de niveles de escalaritubas C, D: detalle de los niveles de escalaritubas en la secuencia foredeep de la formación Mina México.

### 2.6.2.7. Rocas plutónicas laramídicas

Las rocas plutónicas fueron localizadas en las cercanías de los cuerpos de magnetita del área La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos. Existe una amplia diversidad de composición de los granitoides. Se seleccionaron dos muestras con los códigos GD10-10 en La Cuesta de Fierro y GD10-23 en el rancho San Marcos para realizar el análisis de fechado por el método de U-Pb en zircones arrojando los siguientes resultados  $61.11 \pm 0.48$  Ma para la muestra GD10-10 y  $71.57 \pm 0.44$  Ma para la muestra GD12-23. Las rocas de composición félsica se encuentran cortadas por vetillas de feldespato alcalino (ortoclasa), con espesores entre los 10 y 12 cm como una fase tardía de hidrotermalismo, y con enclaves de granodiorita como se aprecian en la Figura 21.



**Figura 21.-** A: Vetas de feldespato potásico cortando cuerpo intrusivo félsico, B: enclaves de granodiorita en granito de feldespato alcalino.

Las rocas que afloran cercanas a los cuerpos mineralizados varían en su composición desde una composición de sienogranitos y granitos de feldespato alcalino, a monzogranito. Estos cuerpos afloran en las partes bajas y son cortados por los arroyos principales del área.

## **CAPÍTULO III**

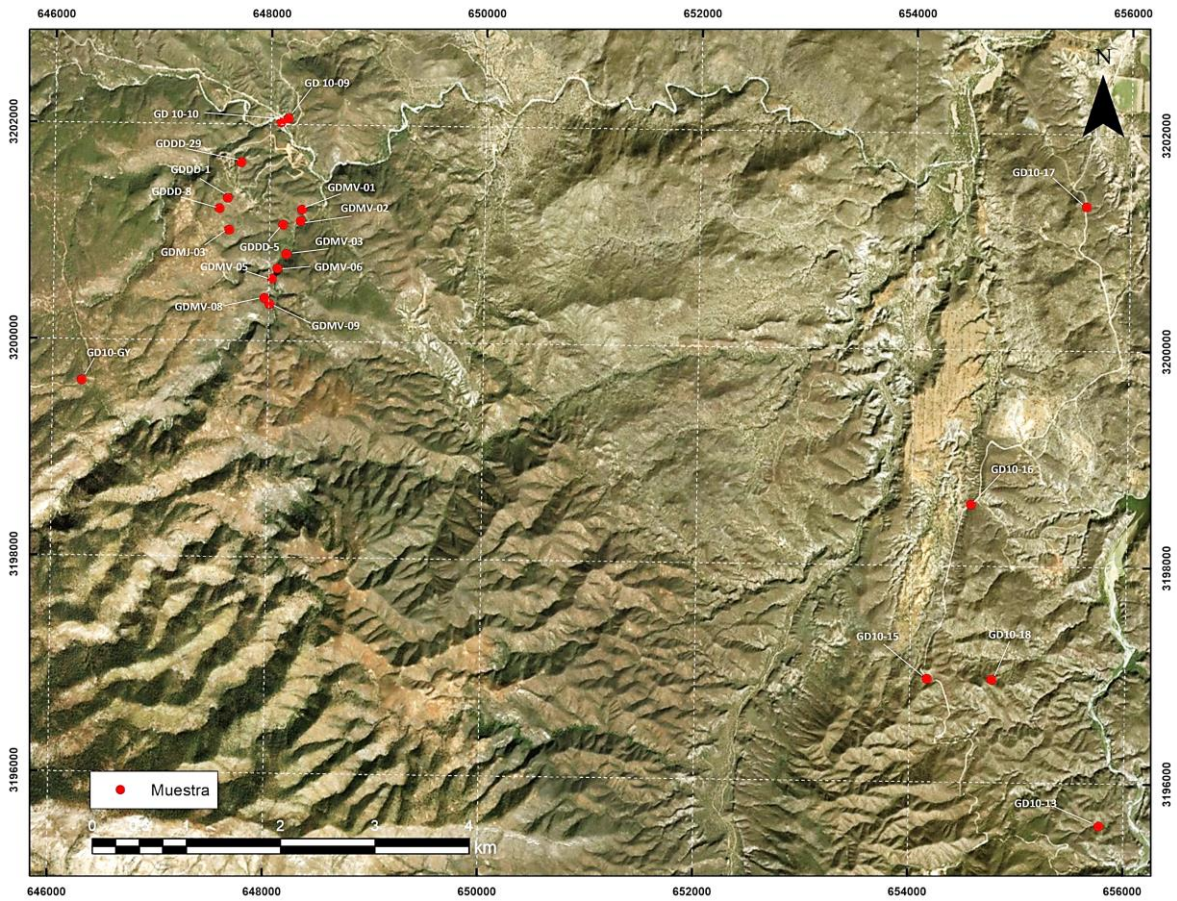
### **3.- Petrografía del Área de estudio**

Para el estudio petrográfico se realizó una recolección de muestras del área de La Cuesta de Fierro para identificar los diferentes tipos de rocas que afloran en los alrededores, posteriormente se seleccionaron 25 de las muestras para su descripción.

#### **3.1. Petrografía La Cuesta de Fierro**

En el estudio petrográfico del área, incluyen a las rocas que afloran en las cercanías de los cuerpos de magnetita, con la finalidad de saber el contexto litológico general del comportamiento y la relación existente entre los plutones y el cuerpo mineralizado. En la Figura 22 se muestra con puntos en rojo los lugares donde se recolectaron las muestras y que corresponden a rocas sedimentarias, los cuerpos de hierro y de las distintas rocas granitoides laramídicas que se localizan en la parte sur oeste de La Cuesta de Fierro (ver Anexo 1 y 2), se han descrito una variedad de estos cuerpos intrusivos que han sido fechados como describe Pérez-Segura (2009), de los plutones que afloran de la Sierra El Santo Niño.

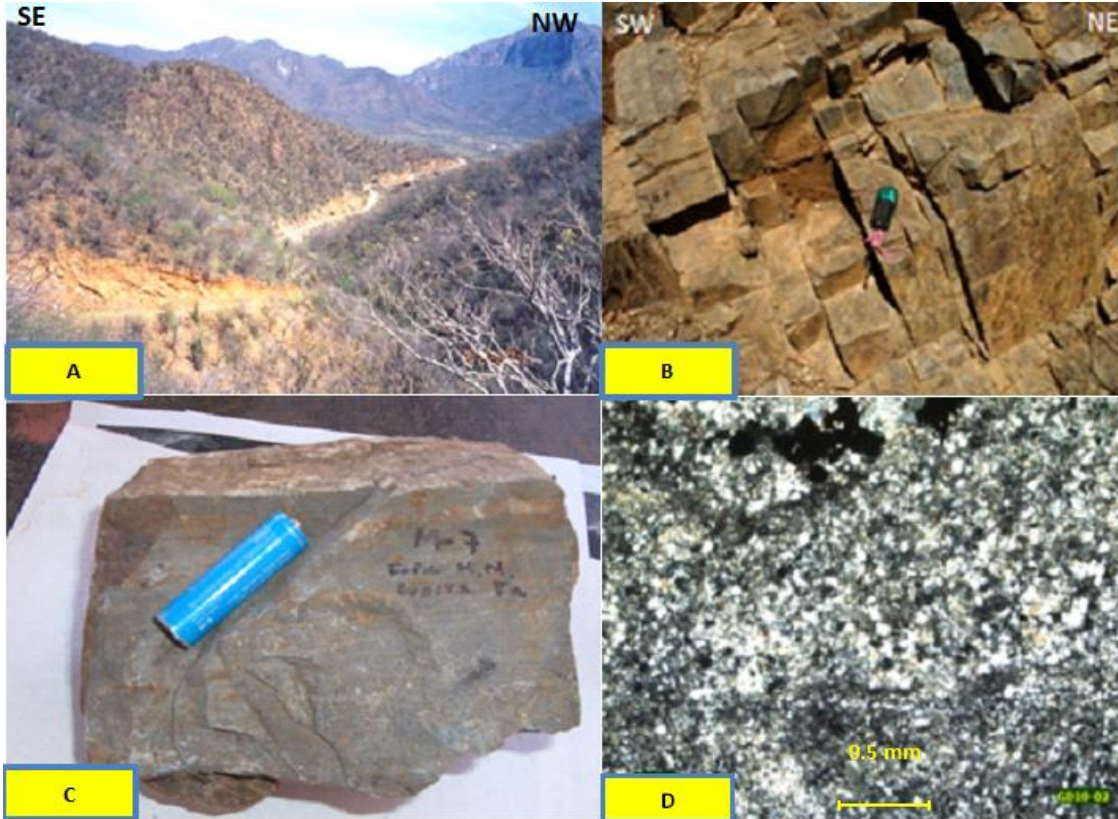




**Figura 22.-** Plano tomado de Google Earth (2015), mostrando las muestras recolectadas en el área de La Cuesta de Fierro.

Las muestras recolectadas en campo y por orden secuencial se realizan la descripción correspondiente al área de La Cuesta de Fierro, en las Figuras de la 23 a la 28 que corresponden a rocas siliciclásticas y granitoides y los alrededores.

## GD10-07



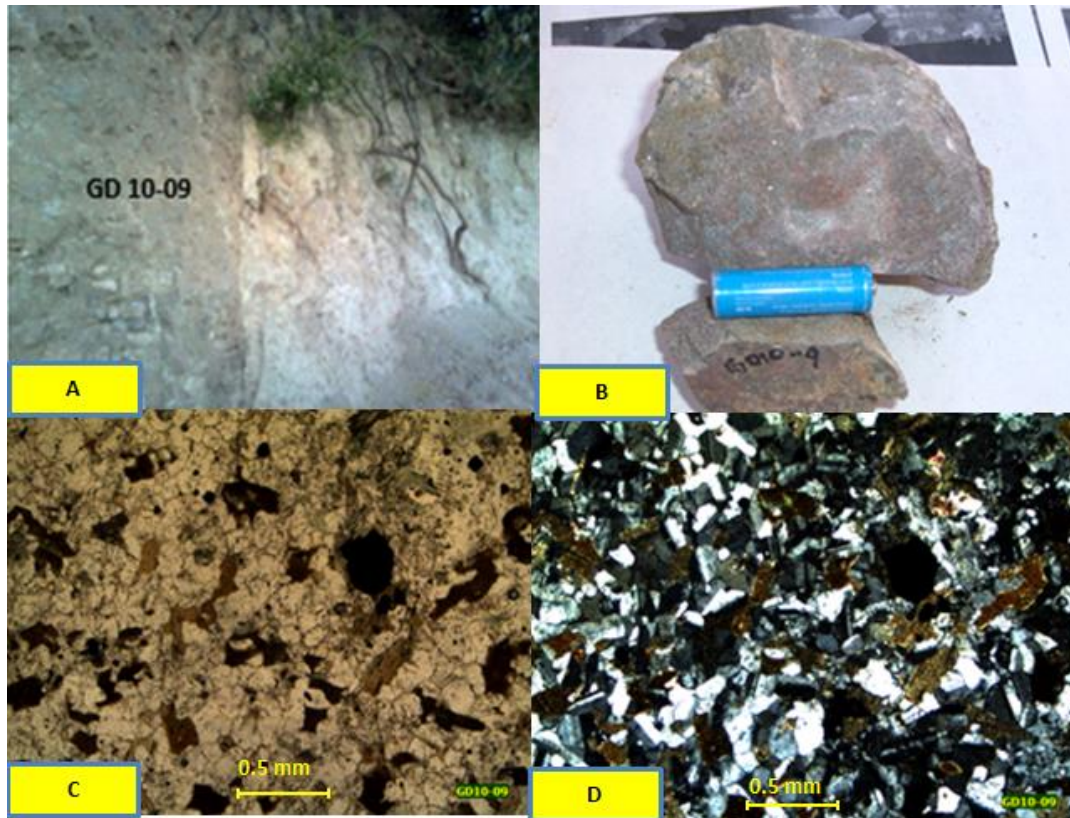
**Figura 23.-** A: Vista panorámica de la formación Mina México localizada en las coordenadas de UTM E 647663 N 3201720 con vista al SW, B: Detalle de la estratificación delgada, C: muestra de mano en superficie fresca, D: lamina delgada luz polarizada plana, mostrando la mineralización de granos subhedrales de cuarzo en colores blancos, en colores negros minerales opacos de los sulfuros que corresponden a pirita, y en los intersticia rellenos de arcillas productos de la descomposición los feldespatos.

Roca sedimentaria siliciclástica de estratificación delgada y de coloración de intemperismo café claro con tonos amarillos producto de la oxidación de los minerales sulfurosos, en superficie fresca es de color gris claro a tonos oscuros a negros, el rumbo de capa es hacia el NW  $60^\circ$  SE basculadas al NE  $75^\circ$  la roca presenta un fracturamiento preferencial hacia el SE, megascópicamente se aprecian cristales de cuarzo de formas arredondadas con tamaños milimétricos en una matriz cuarzo-feldespática y arcillosa. Hay presencia de minerales sulfurosos (pirita) de formas euhedrales con tamaños de uno a dos milímetros, fuertemente alterados a hematita, con fracturas rellenas de calcita. Microscópicamente la matriz, hecha de cristales finos de cuarzo de 0.2 mm a 0.4 mm en forma subredondeadas, presenta alteración moderada de los cristales de biotita a clorita,



se observan pequeños minerales opacos de los sulfuros de hierro, se observan además fracturas rellenas de calcita y vetillas de minerales ferromagnesianos posteriores que cortan a las vetillas de calcita, minerales accesorios se observan en estas fracturas como la esfena, la textura es granoblástica. Se define como una **Arenisca de grano fino** correspondiente a la formación Mina México.

### GD10-09



**Figura 24.-** A: Muestra GD10 – 09. localizada en las coordenadas UTM E 648112 y N 3202030, en contacto con otro intrusivo, B: muestra de mano del intrusivo, C: lámina delgada en luz polarizada plana apreciándose los minerales ferromagnesianos (biotitas y hornblendas, y opacos correspondientes a minerales sulfurosos, D: lámina delgada, vista con nicoles cruzados minerales de color blanco correspondiendo a cuarzo, plagioclasas y feldespato potásico, se aprecian minerales ferromagnesianos de color café marron tonos verdes, biotita y colores pleocroicos hornblenda.

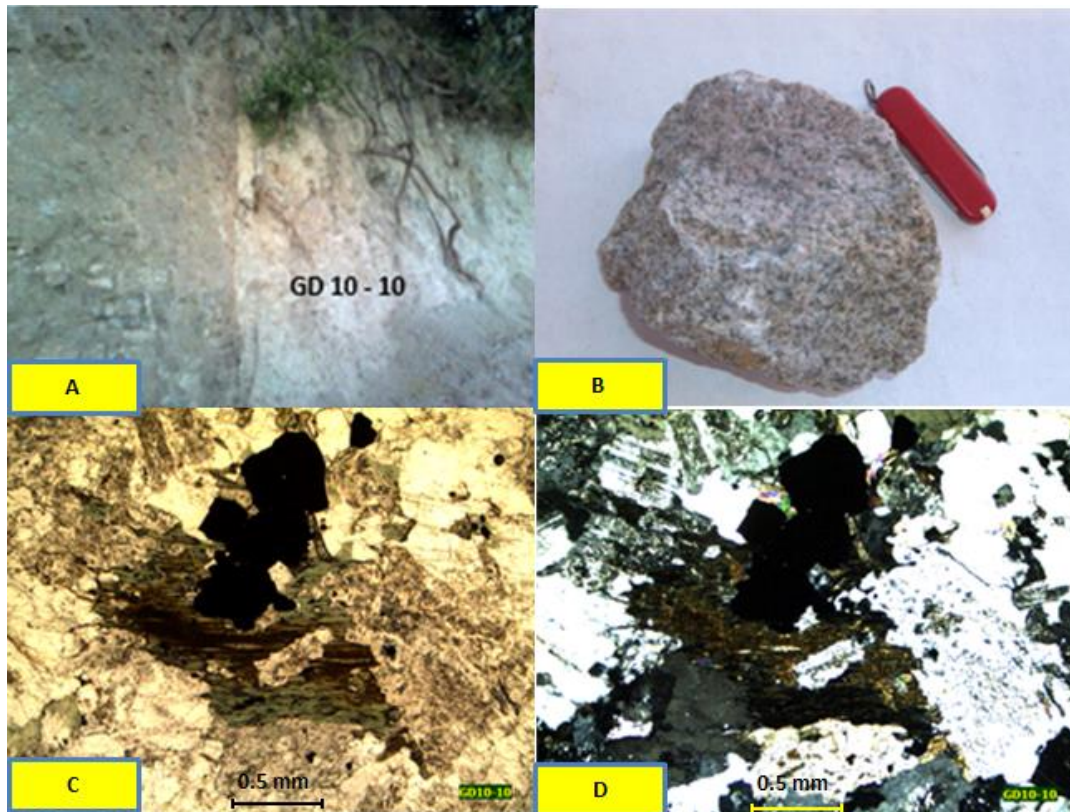
Megascópicamente la roca es de origen ignea, de grano fino. Es una roca holocristalina con textura hipidiomórfica, con un porcentaje de cristales anhedrales de cuarzo del 20 %, los feldespatos potásicos con un 15 % y de formas subhedrales, predominan cristales prismáticos y euhedrales de plagioclasa en un 65%. Los minerales ferromagnesianos corresponden a cristales subhedrales de



biotita, en gran parte cloritizada y hornblenda, parcialmente alterada. Se observan también minerales opacos de óxidos Fe-Ti y sulfuro de hierro (pirita), y como minerales accesorios, microcristales de apatito, que muestran formas alargadas.

La roca se clasifica como **Micro-granodiorita, de biotita y hornblenda.**

#### GD10-10



**Figura 25.-** A: Muestra GD10-10 localizada en las coordenadas UTM E 648112 y N 3202030, en contacto con micro monzogranito de biotita y hornblenda, en la entrada a la mina, La Cuesta de Fierro, B: muestra de mano de intrusivo, este fue fechado con una edad de  $60.11 \pm 0.48$  ma, C: lamina delgada luz polarizada plana mostrando minerales claros, cuarzo y en tonos café amarillo los feldespatos K, ferromagnesianos en tonos verdes y café marron, correspondientes a biotitas, y en color negro minerales opacos correspondientes a los sulfuros, D: vista de lamina delgada nicols cruzados.

Roca ígnea con una textura holocristalina, hipidiomórfica granular, con cristales anhedrales de cuarzo porcentaje del 15 %, los feldespatos potásicos correspondientes a la ortosa, y algunas alteradas a arcillas en un 30 % con un porcentaje del 65 %, las plagioclasas de formas rectangulares algunas incluidas en los feldespatos alcalinos, con un porcentaje del 20 %. También están presentes

minerales ferromagnesianos como biotita y hornblenda parcialmente alterados a clorita. Esta roca se clasificó como **Monzogranito de biotita de grano medio**.

#### GD10-11

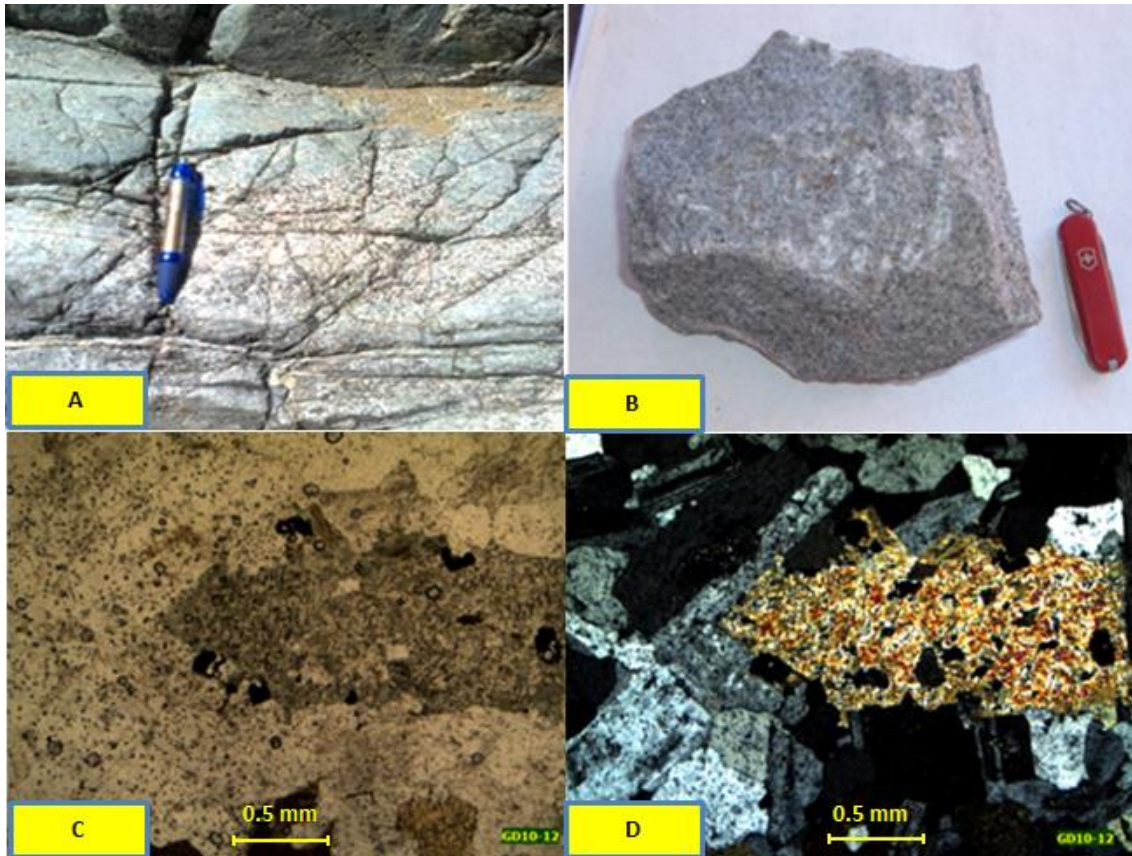


**Figura 26.-** Muestra GD10-11 corresponde a una roca de origen ígneo, localizada en las coordenadas UTM E 654334 N 3196662.

Roca de origen ígneo presenta fuerte alteración y con un intemperismo esferoidal, y está en contacto con un dique pegmatítico con una textura granular, fuertemente alterado. Petrográficamente la roca tiene mesostasis de grano fino, su textura es hipidiomórfica granular, se observan cristales de cuarzo de grano fino a medio anhedral y subhedral con los bordes redondeados con un 12 %, cristales de feldespatos potásico de grano fino y de formas tabulares y con un porcentaje del 40 %, las plagioclasas elongadas con la macla de la albita, y con porcentajes del 48 %. Los minerales de biotita presentan una orientación. Hay presencia de minerales opacos como sulfuros de hierro y accesorios esfena, roca descrita como **Monzogranito de grano fino**.



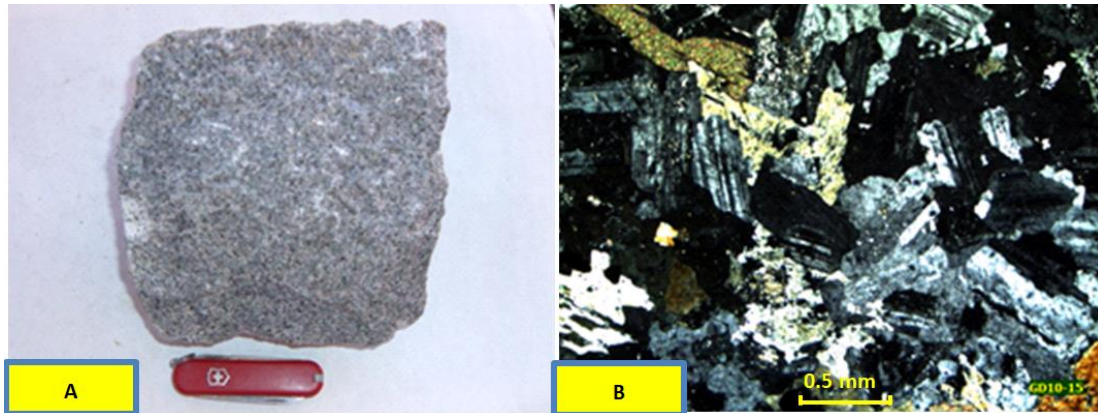
## GD10-12



**Figura 27.-** Muestra GD10-12, con coordenadas de localización UTM E 654 334 N 3196 662.

Roca ígnea plutónica que presenta una textura hipidiomórfica, con cristales de cuarzo de formas anhedrales y subhedrales con un porcentaje de 10 %, los feldespato alcalinos con formas tabulares en un 65 % y las plagioclasas euhedrales tabulares bien definidos con un porcentaje de 25 %, hay presencia de minerales ferromagnesianos de biotita y clinopiroxeno fuertemente alterado. Entre los minerales accesorios se observan pequeños cristales de zircón incluidos en biotita, esfena. La roca se describe como **Monzogranito de grano medio**.

## GD10-15

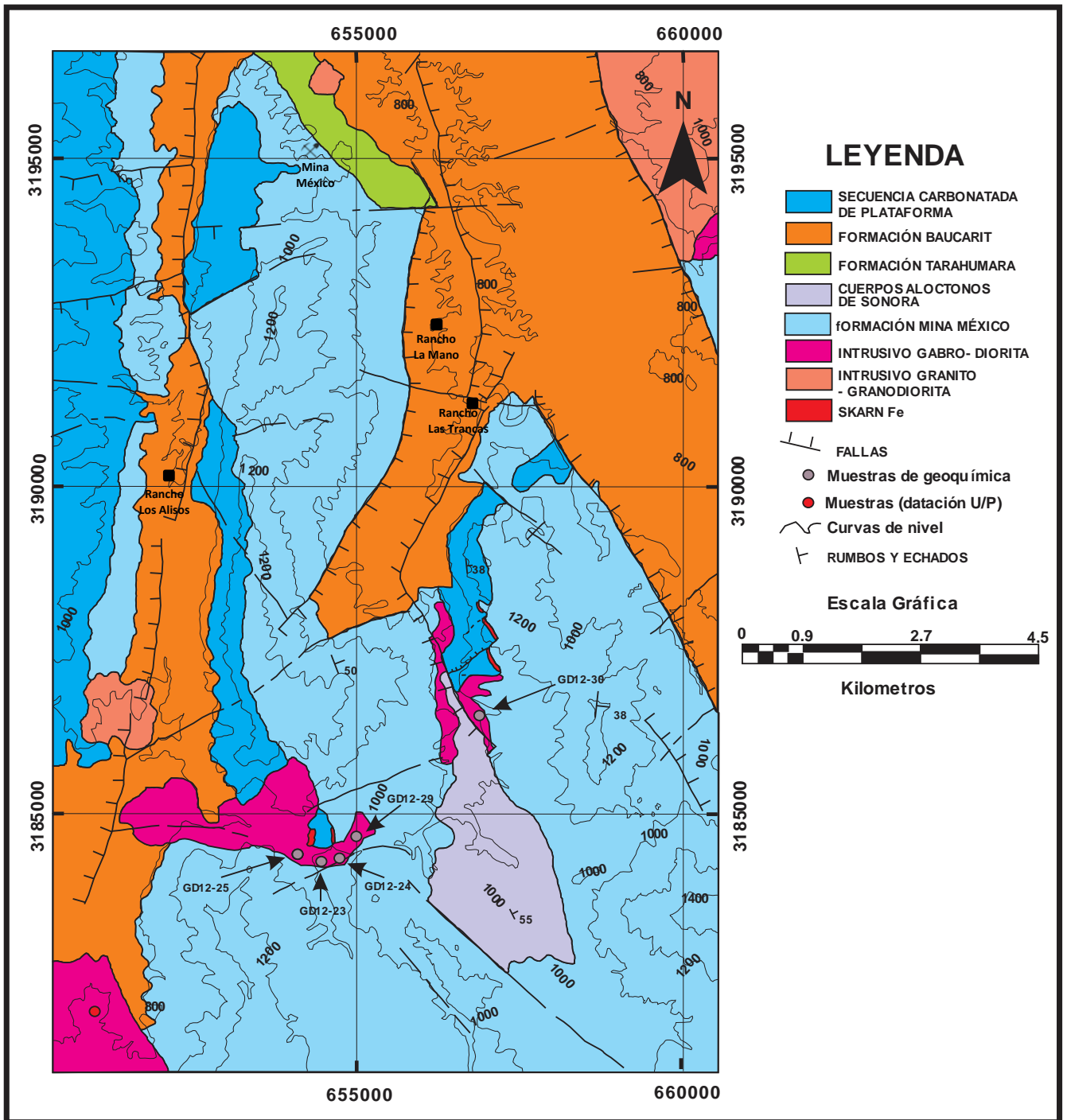


**Figura 28.-** Muestra GD- 10-15 localizada en las coordenadas UTM E 654 161 N 3196 948.

Roca plutónica, con textura hipidiomórfica granular, con cristales de cuarzo anhedrales con un porcentaje del 22 %, cristales de feldespato potásico elongados con alteración moderada a clorita con un porcentaje del 18 %, presenta plagioclasas subhedrales con la macla de la albita con un porcentaje del 60 %, se observan minerales máficos como biotita y pequeñas inclusiones de minerales opacos. Los minerales accesorios son zircón y esfena incluidos en cuarzo. La roca fue descrita como una **Granodiorita de biotita**.

### 3.2. Petrografía rancho San Marcos

Las muestras recolectadas en el área del rancho San Marcos, se marcan en el plano de la Figura 29, la litología de esta área es muy similar a la que se describió en el área de La Cuesta de Fierro, las muestras corresponden a rocas paleozoicas de origen sedimentario y de rocas de composición granítica de edad laramídica, se realizaron láminas delgadas para el estudio petrográfico y corresponden calizas *mudstone* y *grainstone*, además de rocas siliciclásticas que corresponden a la formación Mina México. Las rocas intrusivas son de composición monzodiorita-monzogranito. En esta área se fechó la muestra GD12-23 que corresponde a una edad de  $71.57 \pm 0.44$  Ma.

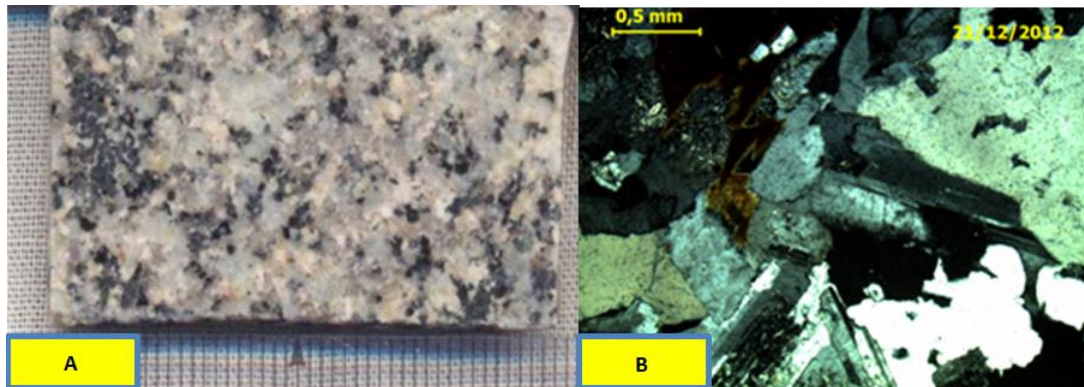


**Figura 29.-** Plano geológico del área del rancho San Marcos, donde se aprecia la distribución de las rocas ígneas en contacto con las rocas sedimentarias lo que provocó la formación de los minerales de hierro, plano modificado de Amaya Martínez, (2005).



Descripción de la petrografía de las muestras colectadas en el área del rancho San Marcos porción sur del poblado de Bacanora, Sonora, mostradas en las figuras de la 30 a la 33.

### GD12-23



**Figura 30.-** A: Muestra de mano con referencia GD12-23, con coordenadas de localización UTM E 0654474 y N 3184413, B.- Lámina delgada.

..

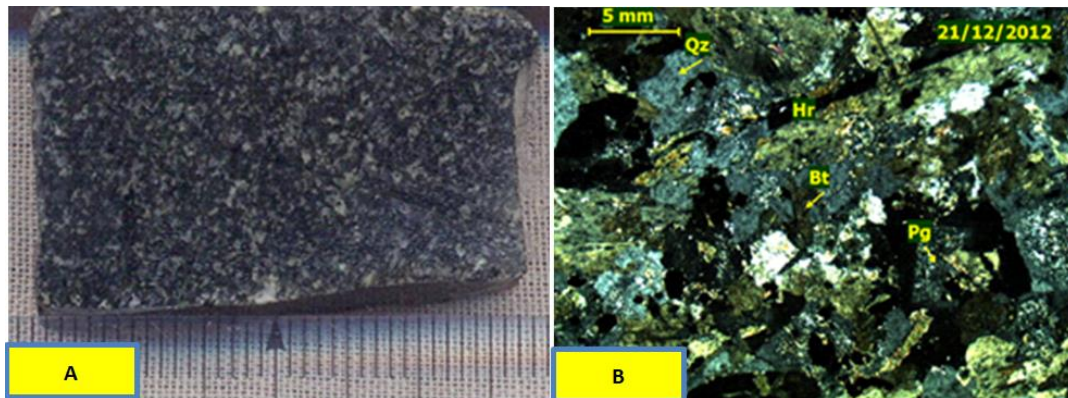
Macroscópicamente la muestra se describió como una roca leucocrática con textura fanerítica, con cristales de cuarzo de formas anhedrales y subhedrales, los tamaños no exceden el mm, se distribuye en un 25%, los feldespatos alcalinos con cristales de ortoclasas de formas anhedrales y subhedrales y con tamaños no mayor de 2 mm, y su porcentaje corresponde al 40%, también se aprecian plagioclasas con una alteración moderada a arcillas y porcentualmente con un 20%. Los minerales ferromagnesianos corresponden a hornblenda y biotita en un 14 %, la roca es ligeramente magnética, con minerales opacos del 1%.

La petrografía corresponde a una roca leucocrática, de textura hipidiomórfica. Presenta cristales de cuarzo de formas anhedrales y subhedrales y con tamaños hasta de 2.5 mm, algunos con extinción ondulante producto de una posible deformación, posterior al evento de emplazamiento, estos cristales se aprecian con golfos de corrosión, y con inclusiones de pequeños cristales de zircones de tamaño de 0.2 mm, los feldespatos alcalinos son de formas subhedrales y tamaños hasta de 2 mm con una alteración argílica hasta en un 40

% de los cristales, algunos presentan una textura perítica, los cristales alargados corresponden a ortoclasa y los fragmentos anhedrales a la pertita, las plagioclasas en forma euhedrales de tabletas y con macla polisintética, unas con alteración potásica, otras con alteración a arcillas + sericita hasta en un 70 %. Las plagioclasas presentan una ligera zonación, su tamaño no excede los 3.5 mm. Hay inclusiones de biotita secundaria, tanto en los feldespatos potásicos como en las plagioclasas, con una alteración a clorita, los minerales ferromagnesianos a biotita y hornblenda, con una alteración a clorita desde un 10 % al 90 %. La hornblenda se observa con una alteración a biotita hasta en un 20 %, hay presencia de minerales opacos que corresponden a sulfuros de hierro (pirita).

La roca es un **Monzogranito de biotita y hornblenda**, con mineralización de sulfuros de hierro (pirita) con una alteración argílica en los feldespatos alcalinos y plagioclasas y con una ligera cloritización.

#### GD12-28



**Figura 31.-** A: Muestra de mano con referencia GD12-28, con coordenadas de localización UTM E 0654055 y N 3184239, B.- Lámina delgada.

Roca ígnea melanocrática, con textura fanerítica de color verde oscuro, densa y medianamente magnética, la roca en su totalidad está conformada de minerales ferromagnesianos, con pequeños cristales de plagioclasas de formas tabulares y con tamaños menores de 1 mm, los ferromagnesianos de hornblenda y biotita con cristales alargados como agujas hasta de 3 mm, se aprecian

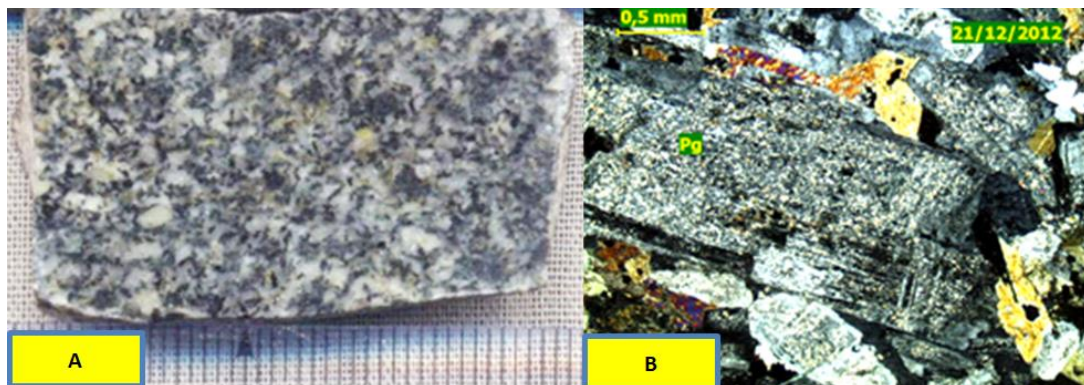
tonalidades de verde más claro que corresponden a la alteración de los ferromagnesianos a clorita.

Composición global de la roca: cuarzo 7 %, feldespatos potásicos 10 % plagioclasas 28 %, ferromagnesianos 50 % opacos 5 %.

La petrografía corresponde a una roca melanocrática de origen ígneo, con textura microgranítica, se aprecian cristales de feldespatos alcalinos de formas subhedrales y en tamaños hasta de 1.3 mm, la alteración es sericítica en un máximo del 80 %. Los cristales de plagioclasas son de formas elongadas y con una alteración potásica, y otras a arcillas + sericita, las plagioclasas muestran macla polisintética o de la albita, se aprecia minerales de microclina con su maclado característico.

Los ferromagnesianos corresponden a hornblenda y biotita, alterados a clorita + arcillas, con presencia de epidota y esfena, minerales opacos de formas anhedrales, y pueden corresponder a sulfuros de hierro (pirita) y con tamaños máximos de 0.6 mm. La composición general de la lámina es de: cuarzo 10 %, feldespatos potásicos 10 %, plagioclasas 35%, ferromagnesianos 40%, opacos 5%. La roca es un **Lamprófido de hornblenda ± clinopiroxenos – plagioclasas**, de tipo Spesartita (Streckeisen, 1978).

### GD12-29



**Figura 32.-** A: Muestra de mano con referencia GD12-29, con coordenadas de localización UTM E 0654981 y N 3184690, B: Lámina delgada.



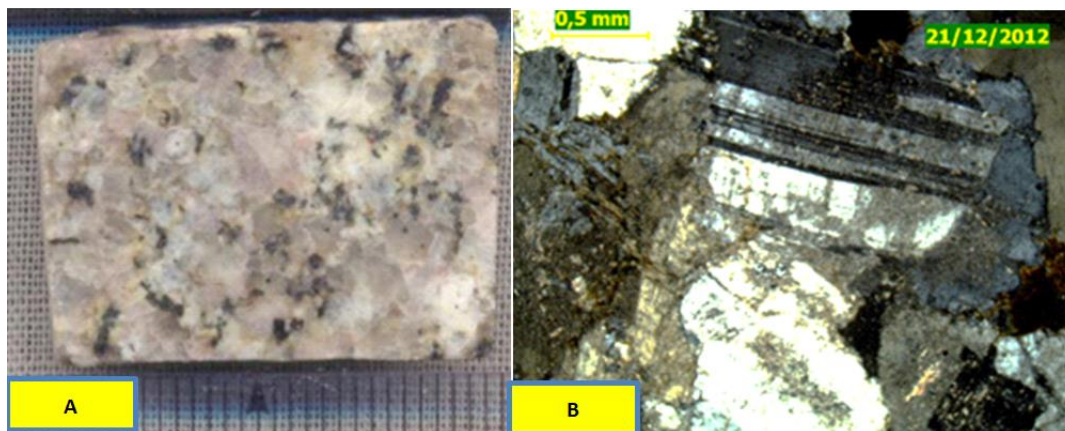
Roca hololeucocrática de composición granítica de color gris verdoso, con tonos blanquecinos, y de textura fanerítica, roca ligeramente magnética, los cristales de feldespato potásico de formas anhedrales y subhedrales y de tamaños hasta de 3 mm; las plagioclasas son de formas alargadas y con tamaños de hasta 4 mm; los minerales ferromagnesianos están en formas de agujas y corresponden a la hornblenda y con tamaños que no exceden los 3 mm, la biotita de formas tabulares y formas basales. Los minerales opacos corresponden a magnetita, con una ligera oxidación, minerales de alteración clorita y epidota.

La petrografía corresponde a una roca mesocrática ígnea de composición granítica holocristalina, hipidiomórfica, los feldespatos potásicos están en formas alargadas y no exceden de 1.0 mm, presentan alteración argílica, con sericita + arcillas; las plagioclasas tienen formas de tabletas y tamaños hasta de 2.25 mm. algunas tienen alteración potásica, otras tienen alteración sericítica; se aprecia zonación en las plagioclasas y una alteración progresiva del 20 al 80 % de sericítica + arcillas. Los ferromagnesianos corresponden a la hornblenda y biotita, y con una alteración de clorita hasta de un 70 %. Minerales de epidota, biotita secundaria en las plagioclasas y esfena ocasional. Los minerales opacos corresponden a magnetita.

La composición global de la lámina es de: cuarzo 8 %, feldespato potásico 22 %, plagioclasas 48% ferromagnesianos 20 %, opacos 2 %.

La roca es descrita como una **Monzodiorita de grano medio a fino de biotita >> hornblenda alterada a sericita-clorita-epidota.**

## GD12-30



**Figura 33.-** A: Muestra de mano con referencia GD12-30, con coordenadas de localización UTM E 0656705 y N 3186294, B: Lámina delgada.

Roca ígnea de composición granítica con una textura holocristalina, hipidiomorfa. Los cristales son anhedrales de cuarzo y con tamaños de 2.65 mm, con puntos triples y presentan golfos de corrosión, se aprecian en las líneas de crecimiento microinclusiones fluidas bifásicas correspondientes a la fase tardía de fluidos, presentan una extinción oblicua. Los feldespatos alcalinos son de formas anhedrales y subhedrales y con tamaños de hasta 4 mm que corresponde a la ortoclasa y microclina; se aprecian alterados a sericita. Las plagioclasas están en forma de tabletas y con tamaños de hasta los 3.5 mm presentando macla polisintética, algunas alteradas a Fk + arcillas y sericita hasta en un 60 %; las plagioclasas, según su ángulo de extinción, corresponden a albita-oligoclasa, la biotita es hidrotermal con una alteración propilítica con clorita hasta en un 80 %, los minerales opacos corresponden a sulfuros de Fe y magnetita, hay presencia de epidota y esfena.

La composición de la roca corresponde a: cuarzo (25%), feldespato potásico (45%), plagioclas (20%), ferromagnesianos (9%) y opacos (1%). La roca fue descrita como un **Sienogranito de biotita**.

## CAPITULO IV

### 4.- Geología Estructural

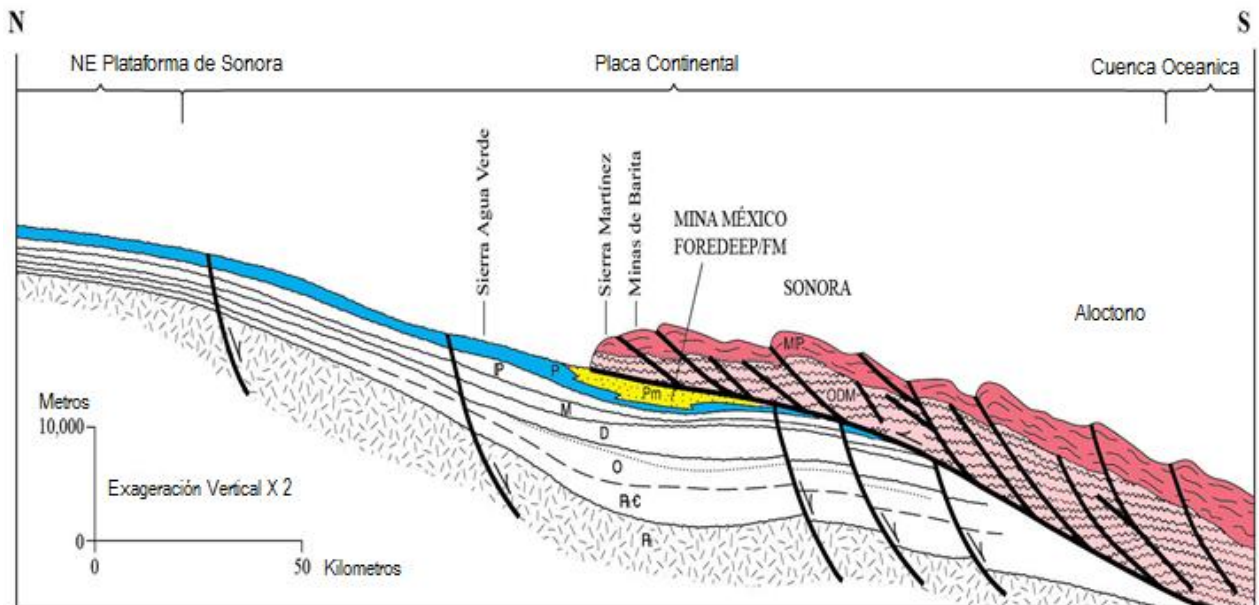
En Sonora centro-oriental los rasgos estructurales están representados por deformaciones compresivas y distensivas, lo que da una morfología en consecuencia.

Las estructuras que afectan la litología en la región corresponden a fallas normales con una orientación NNW-SSE con echados al SW y NE, como las fallas La Campanería, El Novillo, La Estrella, Santo Domingo, San Marcos, Palmarito y Alisitos, fallas con rumbos que corresponden a una orientación NE-SW y con echados hacia el NW y SE como la falla el Zázachi, el Cochi. Estas fallas están en un dominio de deformación frágil y dan origen a las cuencas y sierras lineales en el área.

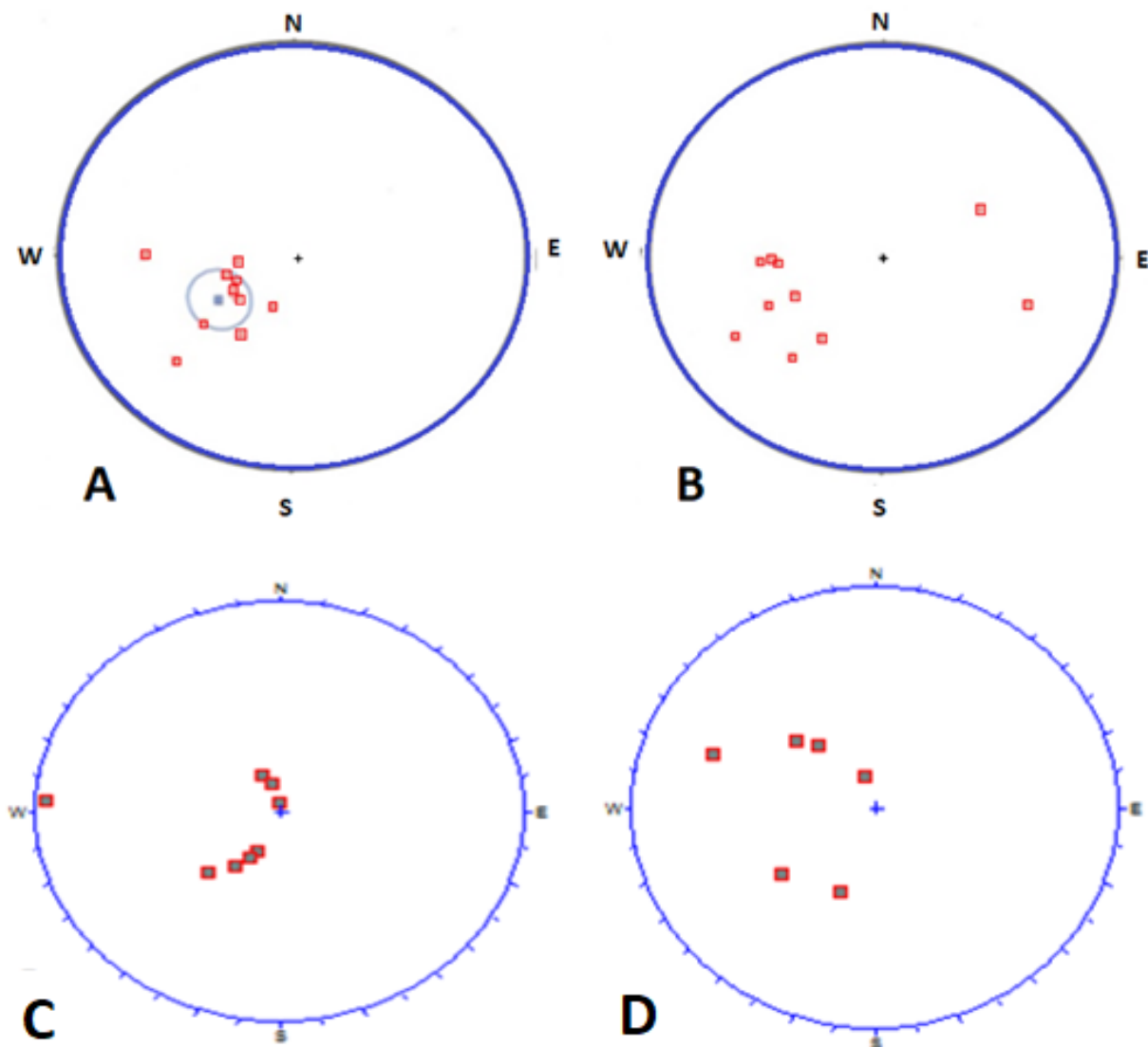
La deformación compresiva está dada por fallas inversas (cabalgadura) formando pliegues anticlinales y sinclinales, aparecen también micropliegues en las rocas paleozoicas sedimentarias con un rumbo de NW-SE y SW-NE, la tectónica de placas juega un papel importante para el dominio de las fallas inversas que depositan a los cuerpos alóctonos de cuencas profundas sobre el talud en una cuenca *foredeep* que corresponde a las rocas siliciclásticas de la formación Mina México (Figura 34).

En las áreas de estudio la Cuesta de Fierro y rancho San Marcos, las rocas de la plataforma carbonatada y las rocas siliciclasticas guardan una relación transicional y concordante con los yacimientos de magnetita han sido afectados por fallas normales posteriores a la deposición, en la figura 35 se muestra los rumbos y echados de las rocas carbonatadas de la plataforma y las rocas siliciclasticas de la formación Mina México mediante el estereograma realizado en el programa estereonet, la figura 36, mediante el mismo programa se realizaron mediciones de las fracturas producto de las fallas resultando un patron de fracturas que desplazan los cuerpos de hierro en un sentido lateral y aparentan ser

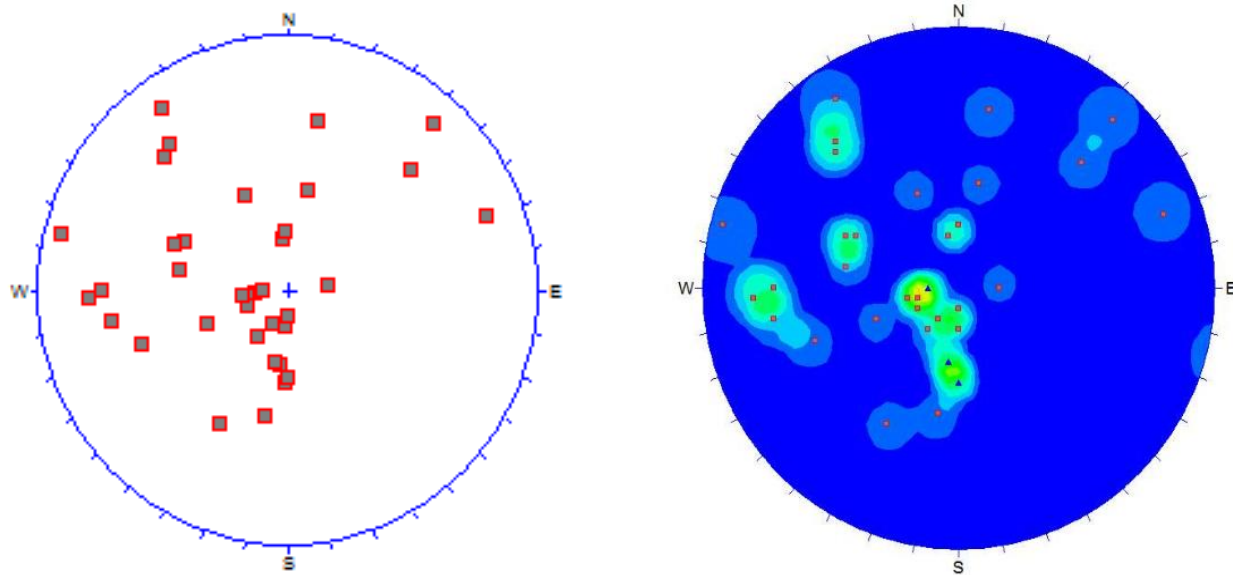
eventos de distinta deposición de los yacimientos de magnetita. Este control estructural se presenta de la misma característica en el área del rancho San Marcos, debido a la falla San Marcos genera otra familia de fallas en el sentido NE-SW desplazando los cuerpos de magnetita.



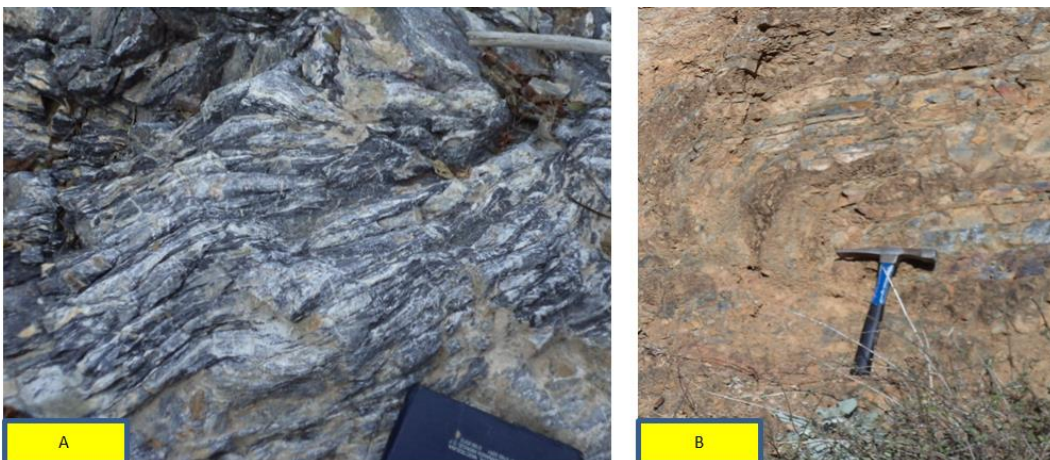
**Figura 34.-** Sección esquemática de las relaciones estructurales de las rocas alóctonas con las secuencias de aguas someras dentro de la plataforma, las fallas normales de bajo ángulo. Tomado de Amaya-Martínez (2005).



**Figura 35.-** Proyección estereográfica (hemisferio inferior) de datos del comportamiento de las capas de la secuencia carbonatada y siliciclástica, A y B: datos tomados del reporte La Cuesta de Fierro realizado por T. Calmus y M. Valencia (2010), C y D: datos tomados en campo de los rumbos y echados de las rocas carbonatadas y las rocas siliciclásticas del cerro La Zacatera cercanos al skarn El Potrerito.



**Figura 36.-** Proyección estereográfica (hemisferio inferior) en el gráfico se aprecia al menos de 5 patrones de fracturamiento, el más importante con rumbo SW-NE 30° de 36 estructuras tomadas en el cerro la Zacatera.



**Figura 37.-** A: Caliza con niveles de fósiles deformados parte medio del cerro La Zacatera, B: pliegue recumbente con vergencia del eje al SW, rocas cercanas al poblado de Bacanora, parte sur, debido a la deformación.

La deformación Laramídica presenta tres dominios tectónicos diferentes, que se distribuyen como se describen a continuación:

Un dominio noroccidental donde prevalecen estructuras de tipo dúctil aflorando gracias a la exhumación de rocas del basamento durante el Cenozoico;

Un dominio central caracterizado por una deformación de tipo capa gruesa, con bloques levantados a lo largo de fallas inversas con echados fuertes;

Un dominio oriental, transicional desde el punto de vista estructural, entre el dominio central y la Sierra Madre Oriental, afloran gruesas secuencias sedimentarias marinas o continentales facilita una deformación tangencial superficial de tipo capa delgada. En cuanto a la edad de la deformación, los estudios coinciden en proponer que la orogenia Larámide haya perdurado desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno a lo largo del cinturón orogénico.

#### **4.1. Transición entre Orogenia Larámide y la extensión Basin and Range**

Posteriormente a la Orogenia Larámide, tanto en Sonora como en gran parte de la Cordillera, se produjo un evento extensional llamado *Basin and Range*, el cual originó la formación de la provincia fisiográfica llamada Sierras y Valles Paralelos. A este evento se atribuye la exhumación de diferentes niveles estructurales de la corteza media a superior.

En el noreste de Sonora, en donde la exhumación asociada a la fase *Basin and Range* fue de menor magnitud, el *Basin and Range* Sur, donde se ubica Sonora, se caracteriza por la elevación promedio más baja, el flujo de calor más bajo y una actividad tectónica menor. Debido a la extensión, Sonora presenta una morfología caracterizada por sierras y valles paralelos, que corresponden en general a sistemas de *horsts* y *grabens* o a semi-*grabens* escalonados. Las estructuras Laramídicas observadas se generaron en la corteza superior.

En el oriente de Sonora y principalmente en Chihuahua y Durango, la extensión *Basin and Range* fue acompañada por un volcanismo máfico de entre aproximadamente 30 y 20 Ma (Swanson y McDowell, 1984; Montigny *et al.*, 1987; Paz-Moreno, 1992; Aranda-Gómez *et al.*, 2000). Dicho volcanismo corresponde principalmente a basaltos y andesitas del sur de la Cordillera denominadas SCORBA por Cameron *et al.* (1989), los cuales, según dichos autores, forman probablemente la mayor extensión de rocas basálticas cenozoicas de América del Norte. Estas rocas volcánicas, que poseen una afinidad geoquímica e isotópica por un arco afectado por un régimen extensional, evidencian un cambio tectónico



fundamental aún dentro del proceso de subducción de la placa Farallón. Sin embargo, su posición intra-arco (Cameron *et al.*, 1989) o tras-arco (Eaton, 1984) todavía se discute. Tanto en Sonora como en Arizona, se ha reconocido dos estilos de deformación extensional durante el Cenozoico: uno se caracteriza por tasas altas de deformación, el desarrollo y la exhumación de zonas de cizalla dúctil que corresponden a fallas normales de bajo ángulo Figura 38 y la asociación con un magmatismo félsico; mientras que el otro, se caracteriza por tasas bajas de deformación, fallas de ángulo alto que penetran profundamente en la corteza superior y una asociación con un volcanismo máfico y félsico.



**Figura 38.-** Falla San Marcos falla tipo normal y se caracteriza por la repetición de las capas de las rocas siliciclásticas de la formación Mina México, primer plano y tercer plano, quedando las calizas de plataforma en el segundo plano.

El primer estilo de deformación se desarrolló en la parte dúctil de la corteza y del manto superior, facilitado probablemente por el alto flujo de calor subsecuente al evento magmático Laramídico y un acercamiento de las isothermas hacia la superficie, asociado al adelgazamiento de la corteza. Se caracteriza por la presencia de fallas normales con desarrollo de rocas miloníticas que afloran en la actualidad a lo largo del cinturón de los complejos de núcleo metamórfico. Al segundo estilo se atribuye el desarrollo de una morfología de sierras y valles paralelos.



En Sonora las estructuras y la cronología del magmatismo asociado indican que los fenómenos extensionales profundos y superficiales ocurridos de forma sincrónica a partir del Oligoceno. De esta forma, la morfología característica de los complejos de núcleo metamórfico con sus zonas dómicas y exhumación de zonas corticales medias, coexiste con la morfología propia de la provincia fisiográfica denominada Sierras y Valles (*Basin and Range*).

## **CAPÍTULO V**

### **5.- Geoquímica**

El magmatismo de los granitoides está referenciado al período Cretácico tardío, en el cual fueron intrusionadas las rocas detríticas y carbonatadas del Paleozoico. Esta actividad magmática corresponde al Batolito Larámide de Sonora.

Un total de 11 muestras fueron recolectadas en las áreas de estudio para analizar por geoquímica, de las muestras recolectadas en campo se analizaron 8 de ellas en los laboratorios de ALS CHEMEX y corresponden al área de La Cuesta de Fierro, el objetivo del análisis de estas muestras fue determinar los elementos mayores (por ICP–AES) y los trazas (por ICP–MS). Las tres muestras restantes se recolectaron en el área del rancho San Marcos las que fueron analizadas en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la UNAM, Ciudad de México. El análisis de estas muestras fue solo por elementos mayores por método de FRX.

#### **5.1. Geoquímica de los Elementos Mayores**

Las rocas ígneas estudiadas que afloran en la región de Bacanora, Son., corresponden a rocas intrusivas de naturaleza granitoide, estos cuerpos plutónicos están asociados a una masa más grande (Batolito Las Moras) al que hace referencia Pérez-Segura (2006) para el área de la mina La Esperanza.

En el estudio primeramente referenciamos el área la Cuesta de Fierro (SW del poblado de Bacanora) y la porción Sur, rancho San Marcos, se contempla un panorama general de los tipos de rocas de los alrededores de las áreas mineralizadas a estudiar, y dentro del entorno se describen muestras desde basaltos, diques andesíticos e intrusivos que varían de dioritas y monzogranitos, a granodioritas. A continuación, se muestran los resultados geoquímicos más relevantes y el cálculo de la norma CIPW Tabla 1.

## 5.2 Cálculo de La Norma CIPW

Tabla 1.- Resultados del cálculo de la norma CIPW, de las áreas La Cuesta de Fierro y Rancho San Marcos.

	La Cuesta de Fierro						Rancho San Marcos					
	andesita	diq. Mdiar.	Granod.	Granod.	Monzogr.	Monzogr.	Monzogr.	Sienogr.	diq. lamp	Monzodio.	Monzogr.	
MAYORES	GD10-16	GD10-05	GD10-09	GD10-15	GD10-12	GD10-11	GD10-10	GD10-19	GD12-28	GD12-29	GD12-23	
SiO <sub>2</sub>	57,00	59,90	59,40	60,90	65,20	66,20	67,50	72,80	45,85	52,81	66,83	
TiO <sub>2</sub>	1,01	0,70	0,78	0,81	0,68	0,77	0,47	0,19	2,22	1,35	0,51	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,20	17,15	17,40	16,65	16,00	15,90	15,40	14,15	16,14	16,36	15,04	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,29	4,96	6,45	6,07	4,99	5,96	3,80	1,48	12,4	8,25	4,33	
MnO	0,13	0,09	0,09	0,08	0,08	0,05	0,06	0,07	0,14	0,14	0,06	
MgO	2,97	2,03	2,79	2,71	2,03	1,03	1,45	0,34	7,40	5,02	1,48	
CaO	5,88	3,72	5,50	4,99	4,06	3,38	3,17	1,29	8,84	7,79	2,56	
Na <sub>2</sub> O	3,82	5,22	3,95	3,61	3,35	3,13	3,16	4,26	3,17	3,19	2,97	
K <sub>2</sub> O	2,62	2,72	1,67	2,73	3,58	3,63	3,55	3,52	1,50	2,03	4,40	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,45	0,21	0,22	0,24	0,19	0,21	0,14	0,06	0,35	0,50	0,12	
LOI	2,27	2,56	1,49	0,68	0,80	0,79	1,48	0,50	1,24	1,27	1,36	
<b>Total</b>	<b>99,64</b>	<b>99,26</b>	<b>99,74</b>	<b>99,47</b>	<b>100,96</b>	<b>101,05</b>	<b>100,18</b>	<b>98,66</b>	<b>99,25</b>	<b>98,7</b>	<b>99,65</b>	
<b>NORMA CIPW</b>												
Qz	6,96	6,82	11,80	12,91	18,43	22,79	25,29	31,17		2,13	23,48	
Or	15,88	16,60	10,03	16,31	21,10	21,37	21,23	21,17	9,03	12,30	26,42	
Ab	33,17	45,64	33,99	30,89	28,28	26,39	27,07	36,69	20,67	27,68	25,54	
An	22,63	15,84	25,24	21,41	18,01	15,48	15,09	6,16	25,88	24,95	12,19	
Ne									3,62			
Di	3,79	1,62	0,99	1,82	0,81				13,67	9,53		
Hyp	12,59	10,02	13,90	12,65	10,10	9,06	7,95	2,62		17,05	8,69	
Ol									18,20			
Mt	1,27	1,01	1,29	1,20	0,98	1,17	0,75	0,30	2,48	1,66	0,86	
Ilm	1,97	1,38	1,51	1,56	1,29	1,46	0,91	0,37	4,31	2,64	0,99	
Ap	1,09	0,51	0,53	0,58	0,45	0,50	0,34	0,14	0,85	1,21	0,29	
Cor						1,13	0,91	1,14			1,01	
<b>ID*</b>	<b>56,01</b>	<b>69,06</b>	<b>55,83</b>	<b>60,11</b>	<b>67,80</b>	<b>70,56</b>	<b>73,59</b>	<b>89,03</b>	<b>33,32</b>	<b>42,10</b>	<b>75,44</b>	
<b>Mgv**</b>	<b>52,63</b>	<b>49,06</b>	<b>50,44</b>	<b>51,23</b>	<b>48,91</b>	<b>28,91</b>	<b>47,31</b>	<b>35,09</b>	<b>58,41</b>	<b>58,88</b>	<b>44,57</b>	

\*Índice de Diferenciación:  $ID = Q+Ab+Or+Ne$

\*\*Valor de Mg':  $Mgv = 100(Mg/Mg+Fe^{2+})$

La mayoría de las rocas analizadas son sobresaturadas en SiO<sub>2</sub> que se manifiestan con la presencia de cuarzo normativo, a excepción de GD12-28 (lamprofido de tipo Espesartita) que es subsaturado en SiO<sub>2</sub>, con los valores más elevados en óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>> 2.2 %) y contenidos normativos de nefelina, olivino y Pl>Or. Las muestras GD10-10, GD10-11 y GD10-19 y GD12-23 que son las más ricas en SiO<sub>2</sub> (>66.20%), consistente con los más altos valores en cuarzo normativo y las más pobres en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<15.90%) con presencia de corindón normativo, que es característico de rocas hiperaluminosas. Presentan los índices de diferenciación más elevados con valores mayores del 70.5%.

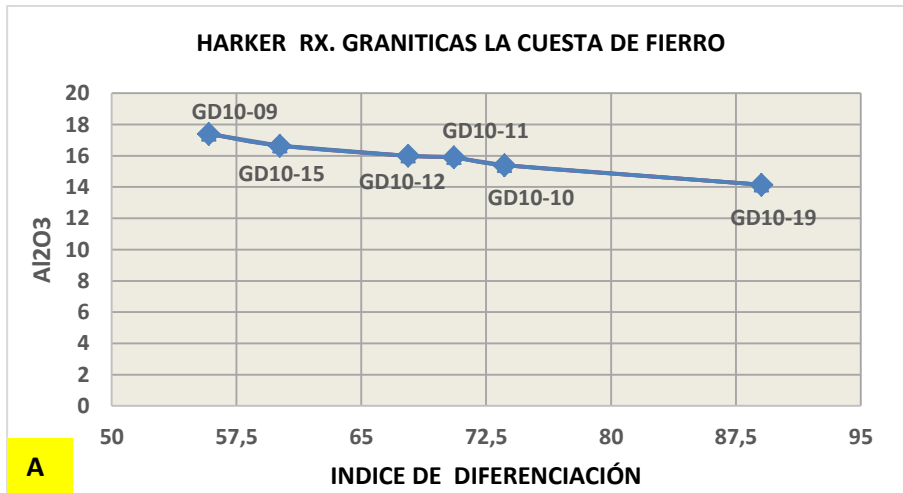
### 5.3. Diagramas tipo Harker de La Cuesta de Fierro

Para determinar el comportamiento de las muestras granitoides recolectadas en el área de La Cuesta de Fierro, se utilizaron diagramas tipo Harker para graficar los óxidos mayores, de los resultados de los análisis de las muestras recolectadas, contra el índice de diferenciación  $ID = (Q+Ab+Or+Ne)$  que arrojó la tabla de la Norma CIPW (Tabla 1), se establece una correlación entre los intrusivos analizados.

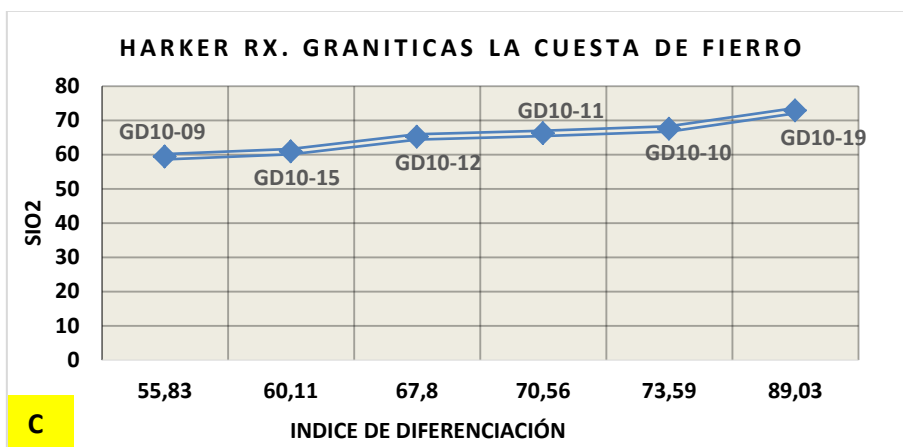
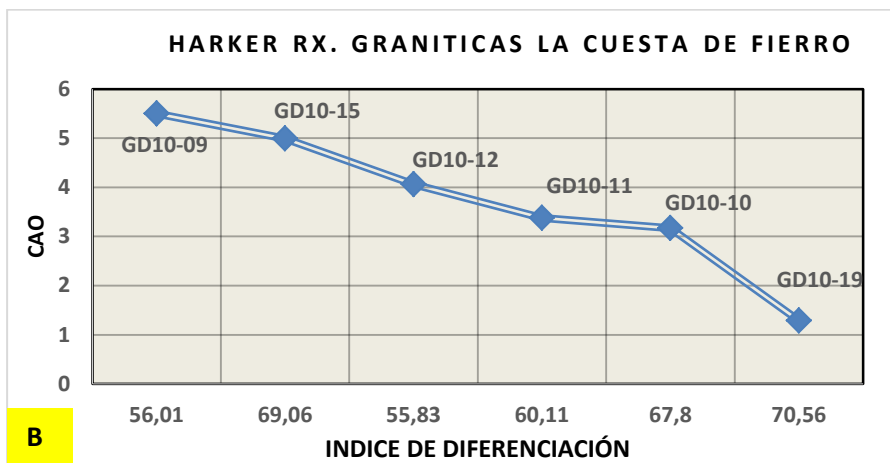
En la Figura 39 se aprecia en el gráfico de la alúmina ( $Al_2O_3$ ) [A] y el de óxido de calcio (CaO) [B], un comportamiento regular con una correlación negativa con respecto al índice de diferenciación, siendo más acentuada en B.

En el caso del  $Al_2O_3$ , se puede explicar por el fraccionamiento regular y no muy acentuado de la plagioclasa. Y para el CaO por el fraccionamiento del clinopiroxeno y del reemplazamiento regular de la plagioclasa cálcica por la sódica.

En cambio, para el gráfico de  $SiO_2$  [C], aunque la tendencia sigue siendo regular, presenta una correlación ligeramente positiva con respecto al índice de diferenciación, donde a medida que se diferencian las rocas el silicio se incrementa como era de esperarse.



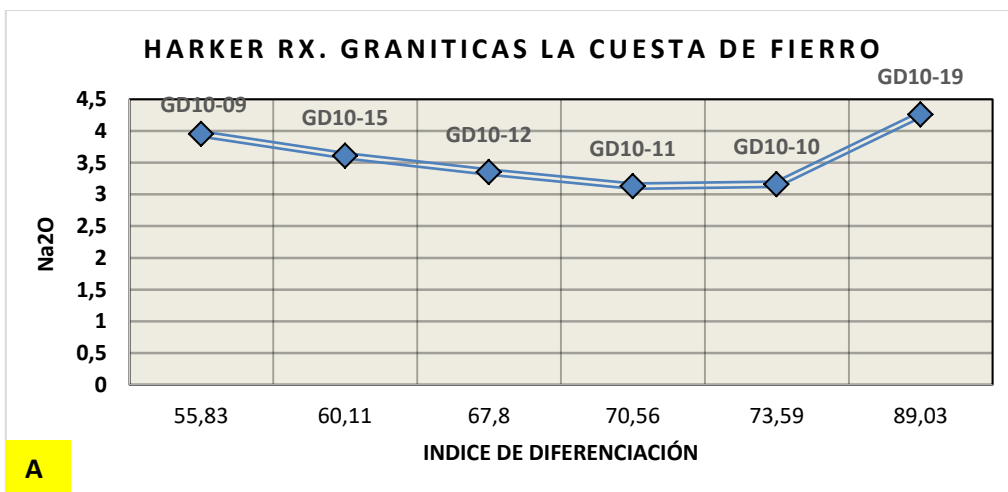
No.	Muestra	Descripción
1	GD10-09	Granodiorita
2	GD10-15	Granodiorita
3	GD10-12	Monzogranito
4	GD10-11	Monzogranito
5	GD10-10	Monzogranito
6	GD10-19	Sienogranito



**Figura 39.-** Diagramas tipo Harker del porcentaje de óxidos mayores contra el índice de diferenciación ( $Q+Ab+Or+Ne$ ): A: Gráfico de  $Al_2O_3$ , contra el índice de diferenciación; B: Gráfico de  $CaO$  contra el índice de diferenciación y C: Gráfico del  $SiO_2$  contra el índice de diferenciación

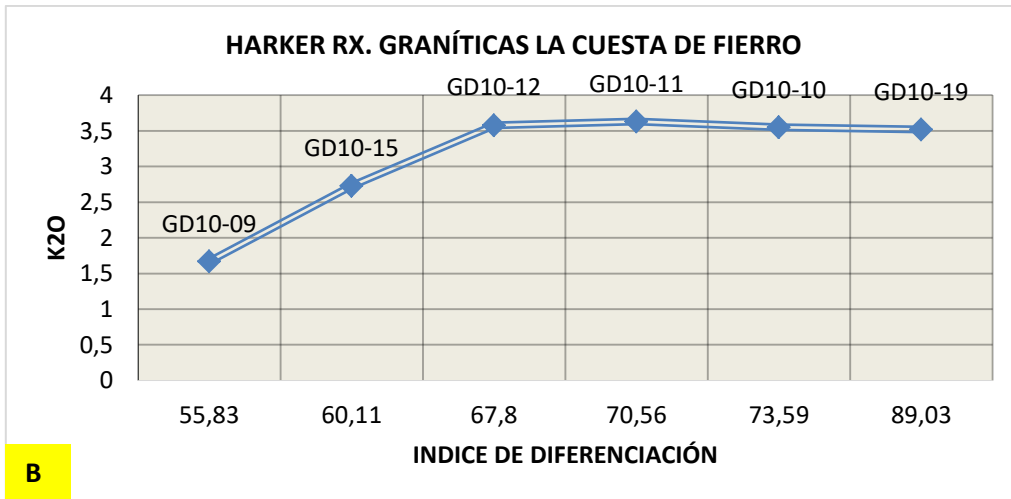
En la Figura 40 A, gráfico de Na<sub>2</sub>O contra el índice de diferenciación, se observa una tendencia irregular en el comportamiento de las diferentes muestras, aunque en términos generales presenta una correlación negativa regular hasta que se estabiliza en las muestras GD10-11 GD10-10, para después al final la curva cambia la tendencia hacia una correlación positiva con el valor más elevado en Na<sub>2</sub>O en la muestra más diferenciada GD10-19. Esta tendencia irregular se puede explicar por el efecto de la fuerte movilidad que presenta el sodio con alteración de la roca o por la asimilación de materiales corticales.

Para el caso de la Figura 40 B, del gráfico de K<sub>2</sub>O contra el índice de diferenciación, se presenta una tendencia regular con una correlación positiva en el primer segmento y después se estabiliza y se vuelve constante en las muestras GD10-12 a la GD10-19, esta tendencia regular es un comportamiento normal del potasio con el efecto de la diferenciación.



No.	Muestra	Descripción
1	GD10-09	Granodiorita
2	GD10-15	Granodiorita
3	GD10-12	Monzogranito
4	GD10-11	Monzogranito
5	GD10-10	Monzogranito
6	GD10-19	Sienogranito





**Figura 40.-** Diagramas tipo Harker del porcentaje de óxidos mayores contra el índice de diferenciación ( $Q+Ab+Or+Ne$ ): A: Gráfico de  $Na_2O$ , contra el índice de diferenciación; B: Gráfico del  $K_2O$  contra el índice de diferenciación.

A manera de conclusión del comportamiento de los óxidos mayores en los diagramas tipo harker de las figuras 39 y 40, se puede decir que muestran una tendencia característica de una diferenciación por Cristalización Fraccionada, donde las pequeñas variaciones se pueden explicar ya sea por el efecto de la alteración de la roca o por el efecto de una baja asimilación cortical de estas rocas.

Con el propósito de clasificar geoquímicamente las rocas ígneas intrusivas, los elementos mayores fueron graficados en el diagrama TAS para rocas plutónicas de Middlemost (1994), que caen en el dominio sub-alcalino según la línea discriminante de Irvine y Baragar (1971) y se distribuyen en el diagrama desde dioritas gabroicas hasta granitos. En cambio, la muestra GD12-28 que corresponde al lamprófido de tipo Espesartita, se ubica en el dominio alcalino, Figura 41.

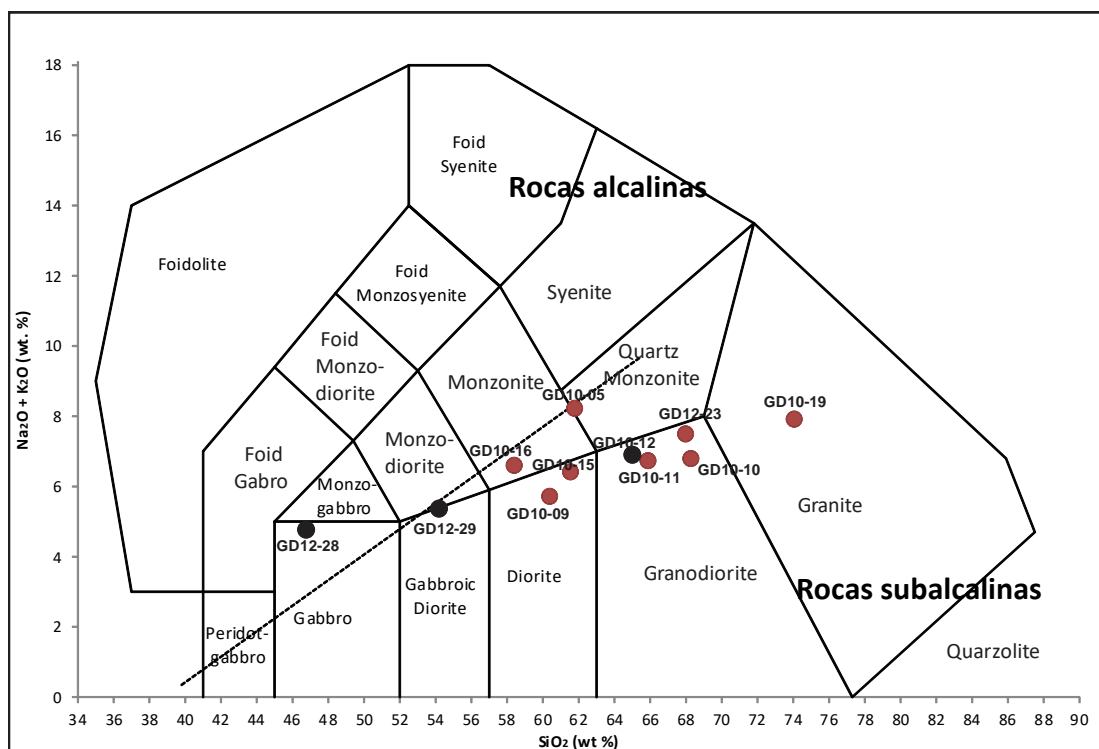
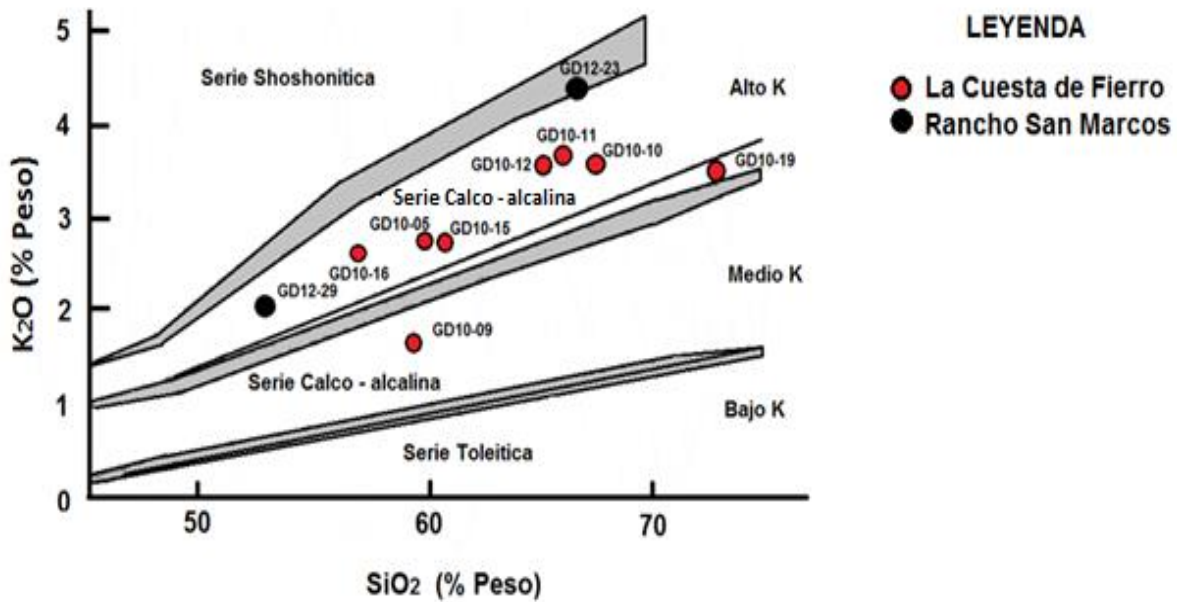


Figura 41.- Diagrama TAS de Middlemost (1994) para la clasificación de rocas plutónicas de las áreas: La Cuesta de Fierro en círculos rojos y Rancho San Marco en círculos negros. Se anexa la línea de discriminación de Irvine & Baragar (1971) que separa los dominios Alcalinos de Subalcalinos.

Este conjunto de rocas intrusivas sub-alcalinas que se caracterizan por su grado de sobresaturación en  $\text{SiO}_2$ , ver Tabla 1, son ricas en una mineralogía modal de biotita-hornblenda, típicas del magmatismo calcoalcalino de la región.

Para mostrar el grado de enriquecimiento en  $\text{K}_2\text{O}$  de las rocas intrusivas calcoalcalinas y sobre la base de las ideas de Peccerillo & Taylor (1976), se empleó el diagrama  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  normalizado figura 42, donde se puede apreciar que la mayoría de las muestras ocupan el campo alto potasio, o cercano a este, consistente con las rocas formadas en las posiciones más alejadas de la trinchera.



**Figura 42.-** Diagrama  $K_2O/SiO_2$  normalizado según Peccerillo & Taylor (1976) de los intrusivos de La Cuesta de Fierro, rancho San Marcos

#### 5.4. Los Aracnigramas de REE de La Cuesta de Fierro

Se realizó el diagrama multielemental de las tierras raras (REE) normalizado de Sun and McDonough (1989), ver Figura 43, que incluye la totalidad de los lantánidos: del lantano al lutencio (números atómicos 57- 71), que pertenecen al Grupo IIIa, de la tabla periódica y que se caracteriza por sus propiedades físicas y químicas y por tener valencia +3. Los gráficos se realizaron para ocho muestras tomadas en el área de La Cuesta de Fierro, ver Tabla 2 y sus valores normalizados en Tabla 3. En conjunto, los elementos de las tierras raras por sus afinidades físicas y químicas, los hacen un grupo geológicamente muy compacto, lo que permite evaluar a través de las formas de los espectros, visibles en estos diagramas las afinidades petrogenéticas de las rocas ígneas, ver Figura 43.

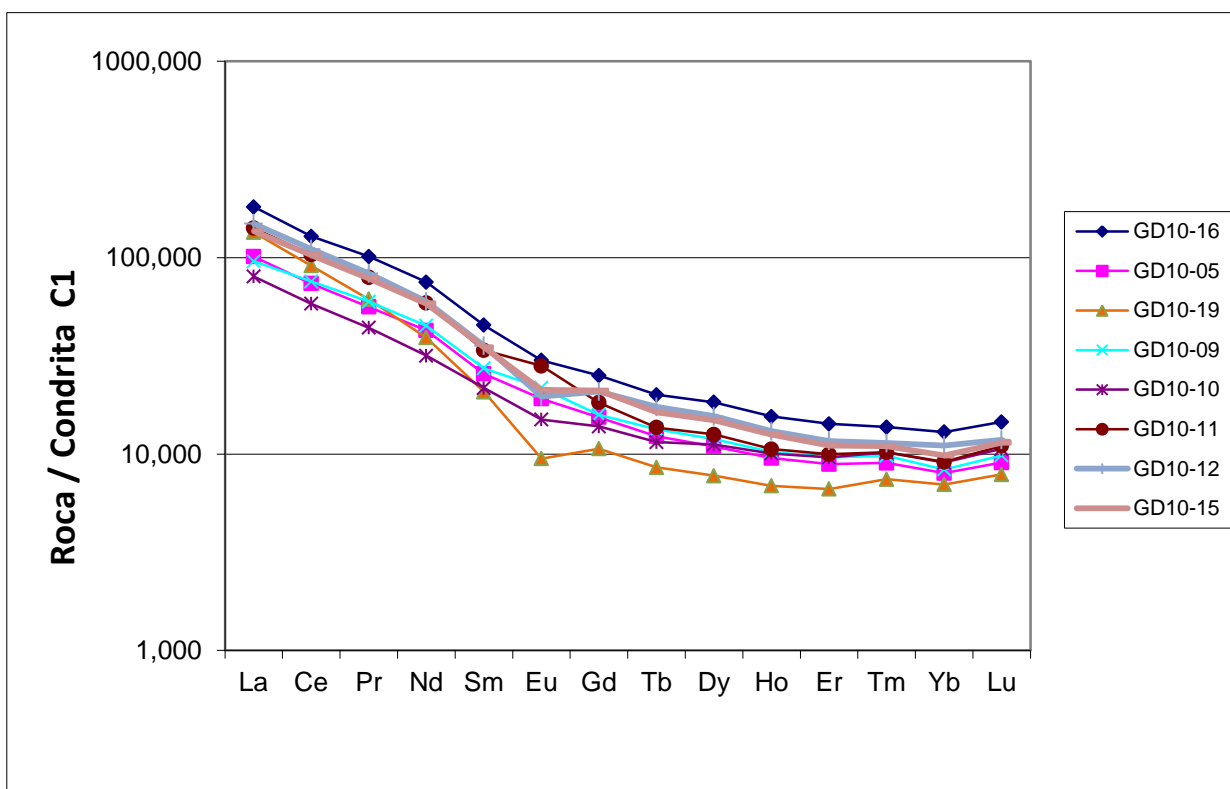
**Tabla 2.- Concentración de los elementos de tierras raras (REE) en partes por millón (ppm).**

	GD10-16	GD10-05	GD10-19	GD10-09	GD10-10	GD10-11	GD10-12	GD10-15	S & M 1989
La	43	24	31.9	22.7	19	33.5	35.3	32.3	0.2370
Ce	78.6	45.2	55.8	46.3	35.7	63.5	67.6	63.1	0.6120
Pr	9.64	5.33	5.84	5.68	4.18	7.55	7.89	7.45	0.0950
Nd	35.1	19.9	18.3	21	14.8	27.5	27.9	27.2	0.4670
Sm	6.94	3.92	3.17	4.18	3.32	5.17	5.45	5.34	0.1530
Eu	1.74	1.11	0.55	1.26	0.87	1.63	1.14	1.23	0.0580
Gd	5.16	3.16	2.19	3.26	2.84	3.76	4.28	4.33	0.2055
Tb	0.75	0.46	0.32	0.5	0.43	0.51	0.65	0.61	0.0374
Dy	4.66	2.78	1.97	3.03	2.84	3.2	3.96	3.77	0.2540
Ho	0.88	0.54	0.39	0.58	0.57	0.6	0.74	0.71	0.0566
Er	2.36	1.47	1.1	1.59	1.59	1.65	1.93	1.83	0.1655
Tm	0.35	0.23	0.19	0.25	0.26	0.26	0.29	0.28	0.0255
Yb	2.2	1.36	1.19	1.42	1.54	1.55	1.88	1.67	0.1700
Lu	0.37	0.23	0.2	0.25	0.27	0.28	0.3	0.29	0.0254

**Tabla 3.- Concentración de las tierras raras (REE) normalizados con condrita tipo C1.**

	GD10-16	GD10-05	GD10-19	GD10-09	GD10-10	GD10-11	GD10-12	GD10-15
La	138.71	77.42	102.90	73.23	61.29	108.06	113.87	104.19
Ce	97.28	55.94	69.06	57.30	44.18	78.59	83.66	78.09
Pr	79.02	43.69	47.87	46.56	34.26	61.89	64.67	61.07
Nd	58.50	33.17	30.50	35.00	24.67	45.83	46.50	45.33
Sm	35.59	20.10	16.26	21.44	17.03	26.51	27.95	27.38
Eu	23.67	15.10	7.48	17.14	11.84	22.18	15.51	16.73
Gd	19.92	12.20	8.46	12.59	10.97	14.52	16.53	16.72
Tb	15.82	9.70	6.75	10.55	9.07	10.76	13.71	12.87
Dy	14.47	8.63	6.12	9.41	8.82	9.94	12.30	11.71
Ho	12.26	7.52	5.43	8.08	7.94	8.36	10.31	9.89
Er	11.24	7.00	5.24	7.57	7.57	7.86	9.19	8.71
Tm	10.80	7.10	5.86	7.72	8.02	8.02	8.95	8.64
Yb	10.53	6.51	5.69	6.79	7.37	7.42	9.00	7.99
Lu	11.49	7.14	6.21	7.76	8.39	8.70	9.32	9.01
(La/Lu) <sub>n</sub>	12.455	11.183	17.094	9.731	7.542	12.822	12.611	11.937
(La/Yb) <sub>n</sub>	14.020	12.658	19.228	11.467	8.850	15.503	13.468	13.874
(La/Sm) <sub>n</sub>	4.000	3.952	6.496	3.506	3.695	4.183	4.181	3.905
(Gd/Lu) <sub>n</sub>	1.724	1.698	1.353	1.612	1.300	1.660	1.763	1.845
Eu/Eu*	0.851	0.934	0.604	1.006	0.845	1.079	0.696	0.758

En el conjunto de los espectros de REE de la Figura 43, se aprecia una tendencia relativamente regular con un paralelismo entre los espectros, donde la muestra GD10-16 que corresponde a la andesita es el más enriquecido del conjunto y la muestra GD10-19, que es un sienogranito, el más diferenciado con su espectro el más empobrecido y diferente a resto, presenta el más alto cociente de las REE livianas (La/Sm)<sub>n</sub> ~6.5 donde el promedio es próximo a 4.0, así como también la más acentuada anomalía negativa en europio Eu/Eu\* 6.0, similar a GD10-15 que son las más bajas y diferentes al conjunto restante, ver figura 43. Estas anomalías negativas en Eu son indicativas del fraccionamiento de la plagioclasa y por otro lado el paralelismo entre los espectros puede significar una asociación genética entre las rocas.



**Figura 43.-** Gráfico de Sun & McDonough, 1989 de las tierras raras normalizado con condrita tipo C1, de las muestras de La Cuesta de Fierro.

### 5.5. Patrones multielementales (spider diagram)

Patrones multielementales son diagramas con patrones de un amplio rango de los elementos traza incompatibles, que fueron normalizados al manto primitivo según Sun and MacDough, 1989, Tabla 4.

Estos diagramas están agrupados en el incremento de la incompatibilidad de los elementos traza que contempla tanto las REE como otras trazas, Figura 44.

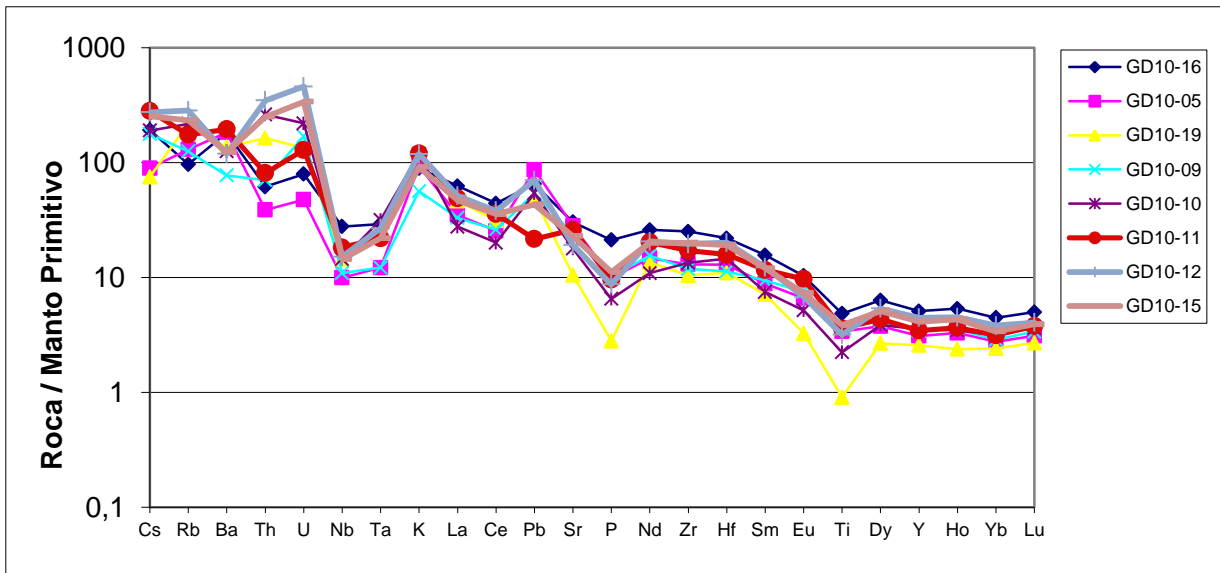
**Tabla 4.- Concentración de los elementos utilizados en el diagrama multielemental (spider diagram) normalizados al manto primitivo (Sun and McDonough, 1989).**

	GD10-16	GD10-05	GD10-19	GD10-09	GD10-10	GD10-11	GD10-12	GD10-15
<b>Cs</b>	192.174	89.565	75.217	177.826	190.435	281.304	273.913	253.478
<b>Rb</b>	96.535	130.236	217.323	125.354	217.323	174.803	264.252	233.071
<b>Ba</b>	180.999	183.145	136.357	77.550	125.769	195.307	119.187	122.907
<b>Th</b>	61,765	38,706	163,529	70,471	262,353	81,059	347,059	250,588
<b>U</b>	79,524	47,619	133,333	169,524	219,524	129,048	459,048	338,571
<b>Nb</b>	27,770	9,958	14,446	10,940	14,446	18,233	15,147	14,446
<b>Ta</b>	29,268	12,195	24,390	12,195	31,707	21,951	26,829	21,951
<b>K</b>	89,226	93,273	118,911	56,364	119,268	120,059	118,523	91,636
<b>La</b>	62,591	34,934	46,434	33,042	27,656	48,763	51,383	47,016
<b>Ce</b>	44,282	25,465	31,437	26,085	20,113	35,775	38,085	35,549
<b>Pb</b>	64,865	86,486	48,649	54,054	54,054	21,622	70,270	43,243
<b>Sr</b>	30,427	28,246	10,521	23,934	17,820	25,972	19,194	22,891
<b>p</b>	21,210	9,967	2,805	10,277	6,510	9,613	8,706	11,150
<b>Nd</b>	25,923	14,697	13,516	15,510	10,931	20,310	20,606	20,089
<b>Zr</b>	25,179	13,036	10,446	11,875	13,393	17,143	19,554	20,000
<b>Hf</b>	22,006	12,945	11,003	11,327	14,563	15,858	20,065	19,094
<b>Sm</b>	15,631	8,829	7,140	9,414	7,477	11,644	12,275	12,027
<b>Eu</b>	10,357	6,607	3,274	7,500	5,179	9,702	6,786	7,321
<b>Ti</b>	4,858	3,390	0,907	3,718	2,230	3,597	3,180	3,840
<b>Dy</b>	6,323	3,772	2,673	4,111	3,853	4,342	5,373	5,115
<b>Y</b>	5,099	3,099	2,571	3,429	3,560	3,451	4,462	4,132
<b>Ho</b>	5,366	3,293	2,378	3,537	3,476	3,659	4,512	4,329
<b>Yb</b>	4,462	2,759	2,414	2,880	3,124	3,144	3,813	3,387
<b>Lu</b>	5,000	3,108	2,703	3,378	3,649	3,784	4,054	3,919



En el diagrama multielemental de la Fig. 44, al igual que para las REE de la Fig. 43, se puede apreciar un claro paralelismo entre los espectros, que muestran de nueva cuenta una posible afinidad genética entre las rocas.

Presentan además una marcada dispersión entre los pares Th-U. Se presentan las marcadas anomalías negativas en Ti con las más acentuadas en el par Nb-Ta que son características e interpretadas como efecto de la subducción. Por otra parte, la marcada anomalía negativa en P y positiva en Pb son indicadores del efecto de la adición de sedimentos ya sea durante la subducción o por asimilación cortical durante el emplazamiento del magmatismo.



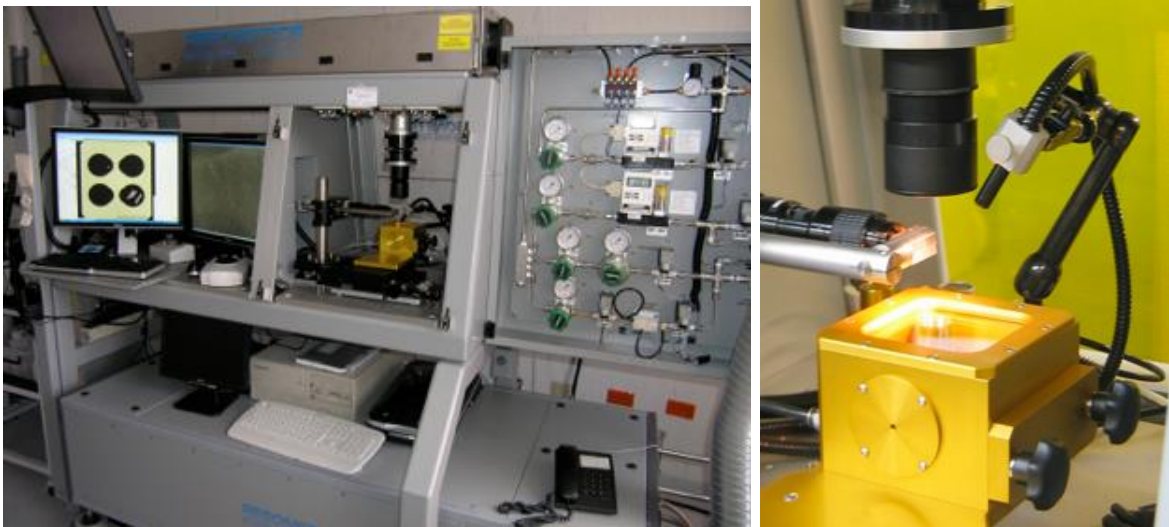
**Figura 44** Gráfico de Sun and McDonough, 1989 de multielementos normalizado al manto primitivo, las muestras corresponden a La Cuesta de Fierro.

## CAPITULO VI

### 6.- Geocronología U/Pb

#### 6.1. Descripción del Método Utilizado

El método de geocronología U/Pb, en las últimas décadas han existido grandes avances con lo que respecta a exactitud y precisión, con un grado de aceptación muy alto, acercándose al valor real y con la capacidad de poder reproducirlo o repetir la medición. El avance en la geocronología de este método se debe a la mejora en la espectrografía de masas inducida por ablación laser (LA-ICPMS), Figura 45.

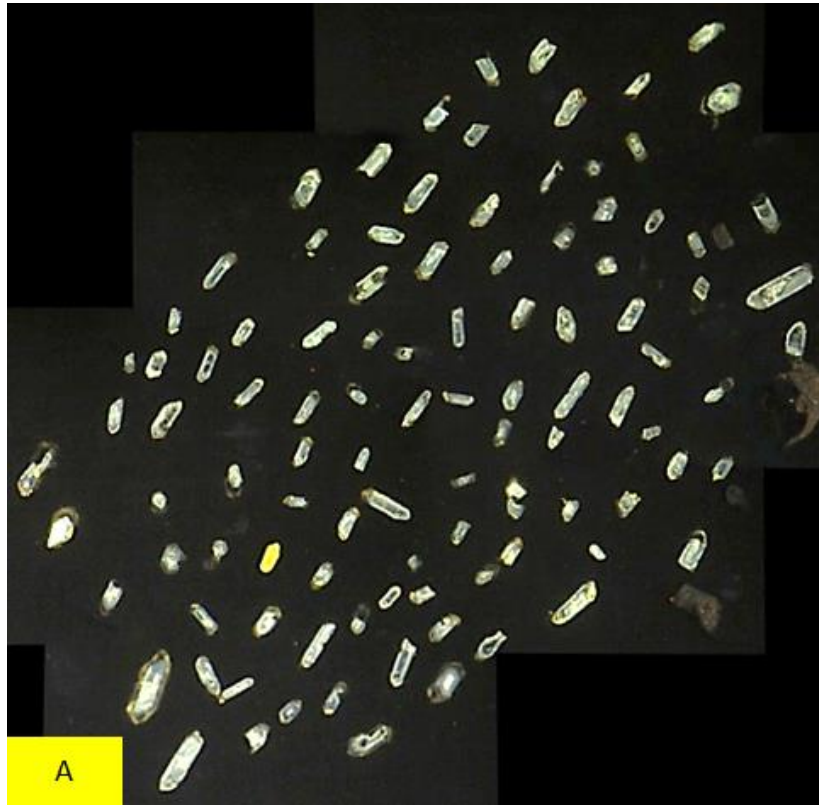


**Figura 45.-** Equipo de espectrometría de masas para el análisis geocronométrico de U/Pb en zircones, laboratorio de estudios isotópicos del Centro de Geociencias de la Unam en Juriquilla Querétaro.

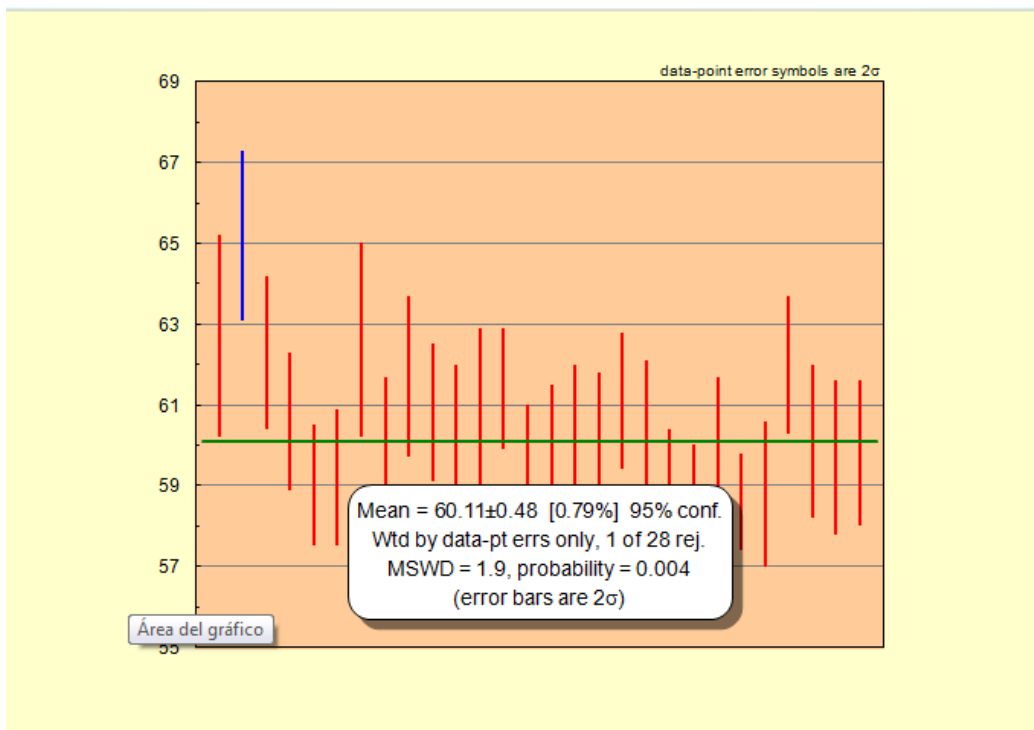
#### 6.2. Muestras Seleccionadas

El estudio de análisis de zircones con el método de U/Pb para el fechamiento de rocas, se realizó a dos de las muestras de origen ígneo que se ubicaron en las cercanías de los cuerpos de magnetita, las muestras seleccionadas fueron marcadas con los codigos GD10-10 para La Cuesta de Fierro GD12-23, para el rancho San Marcos.

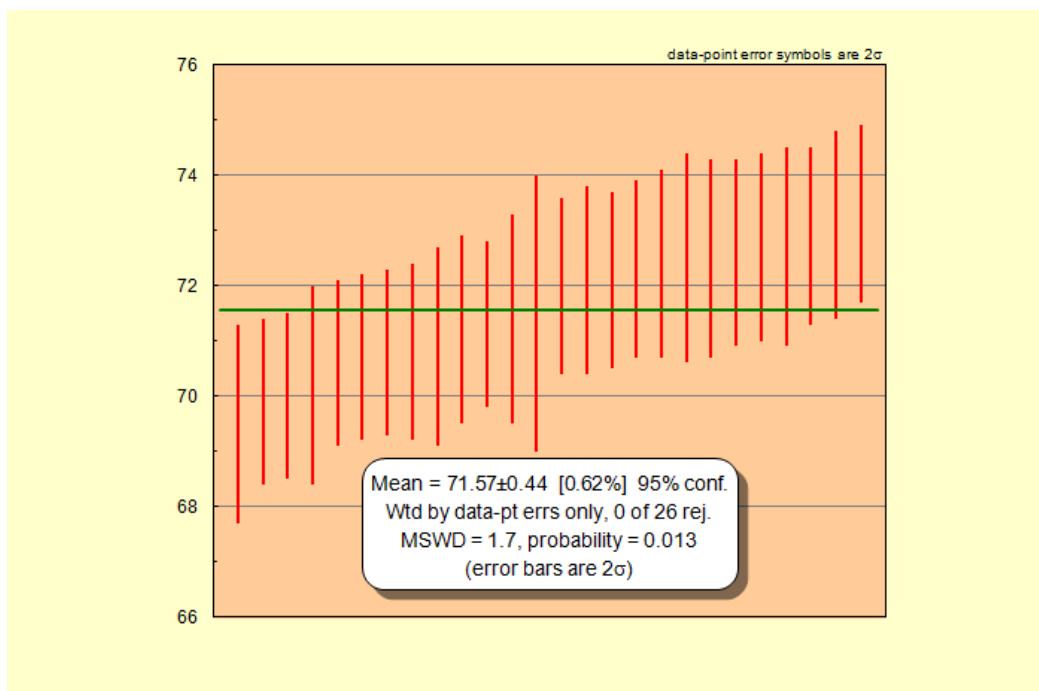
Después de la selección de ambas muestras en campo, se redujeron a un tamaño entre 1" hasta ¼", empaquetándose en bolsas plásticas bien selladas, para ser enviadas al Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro. Primeramente fueron atacadas por digestiones acidas para separar los zircones del resto de cada una de las muestras (GD10-10 Y GD12-23), posteriormente se seleccionaron los zircones Figura no. 46. en el análisis se utilizó un espectrógrafo de masas inducido de ablación láser (LA-ICPMS). Los zircones seleccionados, son perforados por un laser de 35 a 25  $\mu\text{m}$ , el material liberado se transporta a un espectrometro de masas acoplado a una fuente de plasma en donde es analizado la cantidad de U y se asume una temperatura de cierre para el sistema mineral de U y Th en el zircón es de  $\approx 900^\circ \text{C}$ , los resultados arrojados de las muestras (ver Anexo 3), son graficados y se intersecta la media de los resultados para determinar la edad correspondiente a cada una de las muestras, en la Figura 47 corresponde a la muestra GD10-10 con un resultado de  $60.11 \text{ Ma} \pm 0.48$ , de edad Paleógeno y en la Figura 48 corresponde a la muestra GD12-23 con una edad de  $71.57 \text{ Ma} \pm 0.44$  correspondiendo a la edad del Cretácico, Superior, Maastrichtiense.



**Figura 46.-** A: Fotografía correspondiente a los zircons utilizados para el análisis de geocronología las Muestras GD10-10, B: fotografía de los zircons seleccionados para el análisis de geocronología de la muestra GD12-23.



**Figura 47.-** Resultados de los datos de los zirrones heredados que fueron analizados a la muestra GD10-10, donde se aprecia una edad de 60.11 Ma  $\pm$  0.48, con un 95 % de confiabilidad arrojando los resultados una edad del Paleógeno.



**Figura 48.-** Diagramas de resultados para los análisis de la muestra GD12-23 y donde se muestra una edad de 71.57 Ma  $\pm$  0.44 con una confiabilidad del 95 %, correspondiendo a la edad del Cretácico, Superior, Maastrichtiense.

## **CAPITULO VII**

### **7.- Yacimientos de tipo skarn**

Los yacimientos del tipo skarn generalmente son producidos por metamorfismo de contacto entre un intrusivo y rocas sedimentarias de composición carbonatada, su morfología puede ser extremadamente irregular, extendiéndose sobre estructuras planares como fallas y diaclasas o asimilando la roca encajonante. Los depósitos económicos tipo skarn pueden ser tener una mineralogía muy variada y los principales tipos de skarn pueden ser de Au, W, Cu, Zn, Pb, Ag, y Fe.

En el área de estudio se localizan cuerpos de hierro (magnetita) del tipo skarn que fueron formados por rocas intrusivas afectando a la secuencia carbonatada metamorfizándola y produciendo minerales calcosilicatados de Ca, Fe, Mg, Al, de grano grueso, derivados de las rocas preexistentes para formar en una primera etapa por un metamorfismo de contacto y producir una aureola de contacto o patrón de zonación reconocible en campo, en el transcurso del tiempo la temperatura disminuye produciendo fluidos hidrotermales que dan origen a la etapa de metasomatismo alterando la textura y la mineralogía inicial (Einaudi 1981).

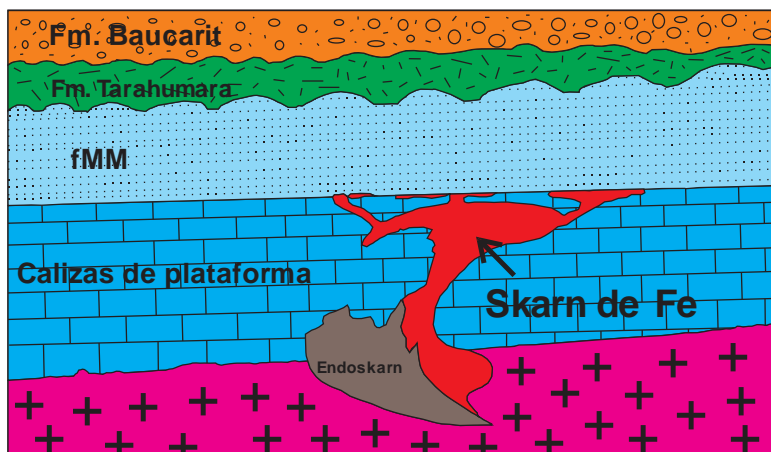
La mayoría de los skarn están ligados genéticamente a rocas ígneas, de modo que un modelo que permite explicar su ocurrencia y la variedad de metales asociados debe ser petrogenético y así es el modelo Meinert (1993), este modelo esta relacionando y dependen principalmente de la fuente de los magmas y el marco tectónico de la región (Figura 49).



## 7.1. Factores que controlan la evolución hidrotermal de los yacimientos

De acuerdo al modelo de Meinert, se modificó para el modelo de la porción sur de Bacanora y de acuerdo a las asociaciones de los metales asociados a el skarn dependen principalmente de la fuente de los magmas y el marco tectónico de la región, por otra parte, los factores que controlan la evolución hidrotermal de los sistemas tipo skarn se dan a continuación:

- A). - Presión (profundidad de formación).
- B). - Estado de oxidación del magma (fugacidad del oxígeno).
- C). - Grado de diferenciación del magma (cristalización fraccionada).
- D).- Tipo de separación del fluido (fase volátil respecto a la cristalización del plutón).



**Figura 49.-** Modelo representativo de la mineralización del skarn de Fe, La Cuesta de Fierro Y rancho San Marcos, modificado del modelo de Meinert (1993).

## 7.2. Skarn de hierro de las áreas de estudio

En las áreas de estudio La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos, se encuentran evidencias de mineralizaciones de cuerpos de magnetita, localizados en una zona de metamorfismo de contacto, y una alteración hidrotermal producido por el emplazamiento de rocas intrusivas de composición granitoide, de tipo calcoalcalino. Según la clasificación de Chapell y White (1992) corresponderían a los granitos del tipo I (*igneous*), que se generaron en el ambiente geotectónico

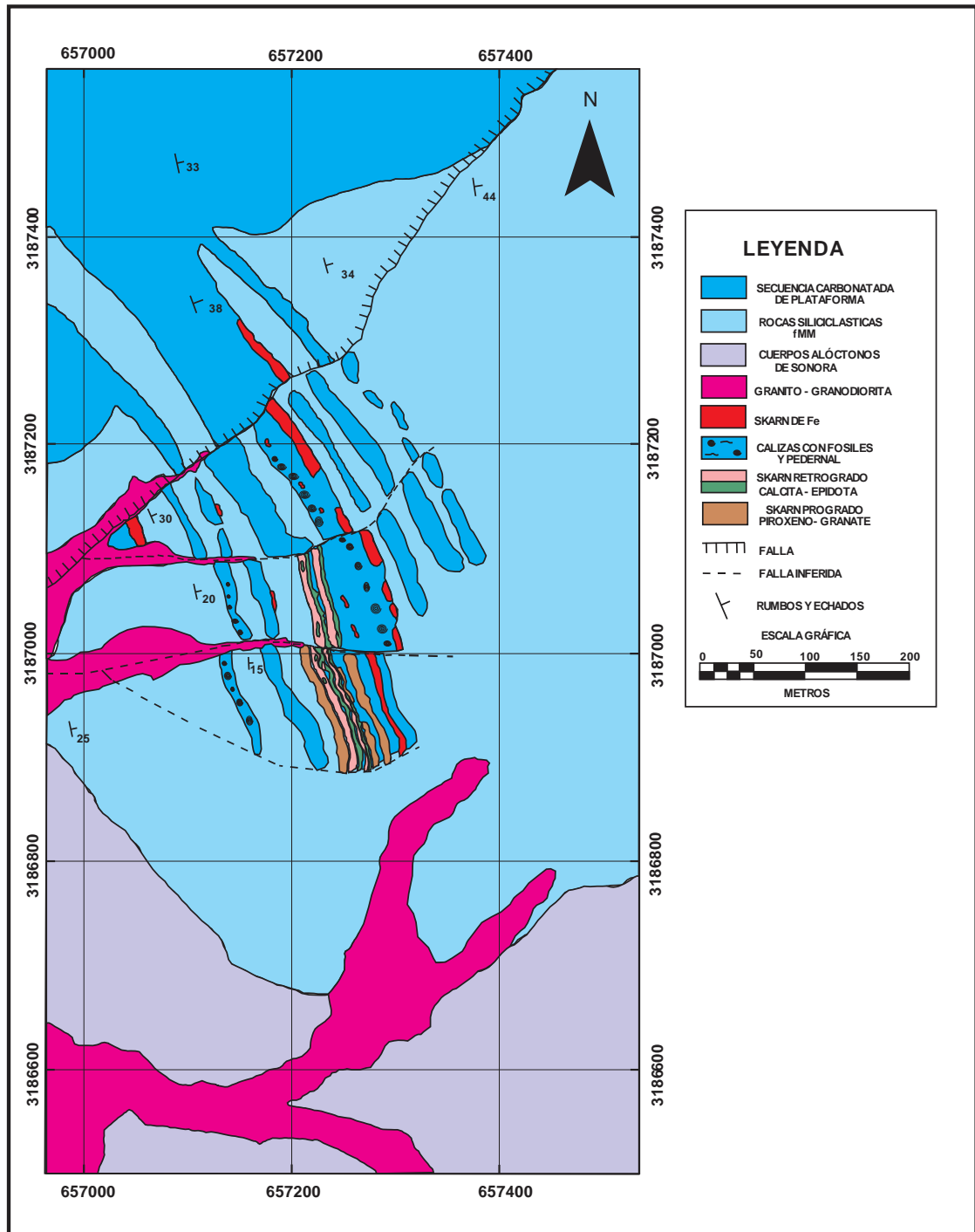
arco volcánicos (Pearce *et al*, 1984), y que están en contacto con rocas carbonatadas de la plataforma y las rocas siliciclásticas de la antefosa o (cuenca *foredeep*) del Paleozoico. Los skarns de estas áreas formaron cuerpos de magnetita con espesores entre los 5 a los 20 m con extensiones variables emplazados en el contacto anteriormente descrito. Por la naturaleza de la distribución de estos cuerpos, el área se dividió en dos zonas. La primera la zona ubicada al sur oeste del poblado de Bacanora y donde afloran al menos cuatro cuerpos mineralizados, el cuerpo más representativo por su potencial económico y distribución mineralógica es La Cuesta de Fierro, en la zona sur afloran al menos tres cuerpos mineralizados con potencial para la explotación. el principal cuerpo de toda la zona y de mayor magnitud dadas sus características nos referimos al skarn El Potrerito, localizado dentro de las coordenadas UTM 3187000 N 657000 E, 3187000 N 657500 E y 3187500 N 657000 E, 3187500 N 657500 E, al norte del rancho San Marcos Figura 50. A este cuerpo nos referiremos en los párrafos subsecuentes para hablar de la paragénesis de los cuerpos de hierro que fueron emplazados en las dos áreas de estudio, nos referimos al skarn El Potrerito por tener mejor desarrollada su aureola de metamorfismo, su mineralogía y por la formación de un skarn de granate Figura 51, se utilizó para definir las condiciones de temperatura de las etapas formación de estos yacimientos de magnetita.



**Figura 50.-** Ubicación de las áreas donde afloran los cuerpos de Fe referenciados al poblado de Bacanora.

### **7.2.1. Etapas de formación de los yacimientos tipo skarn de Fe**

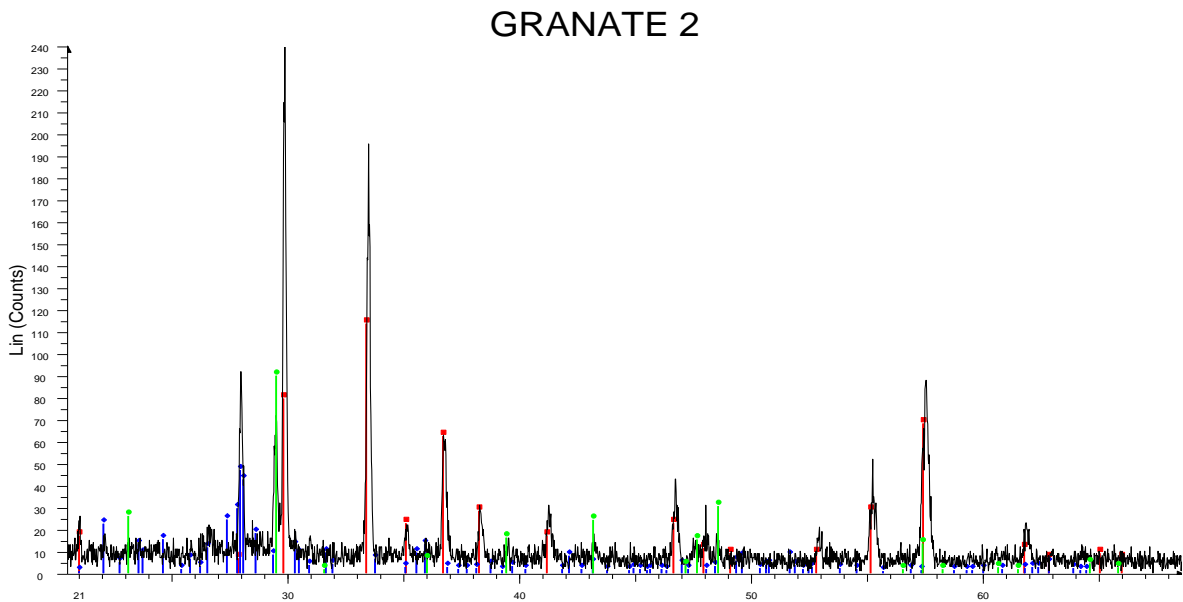
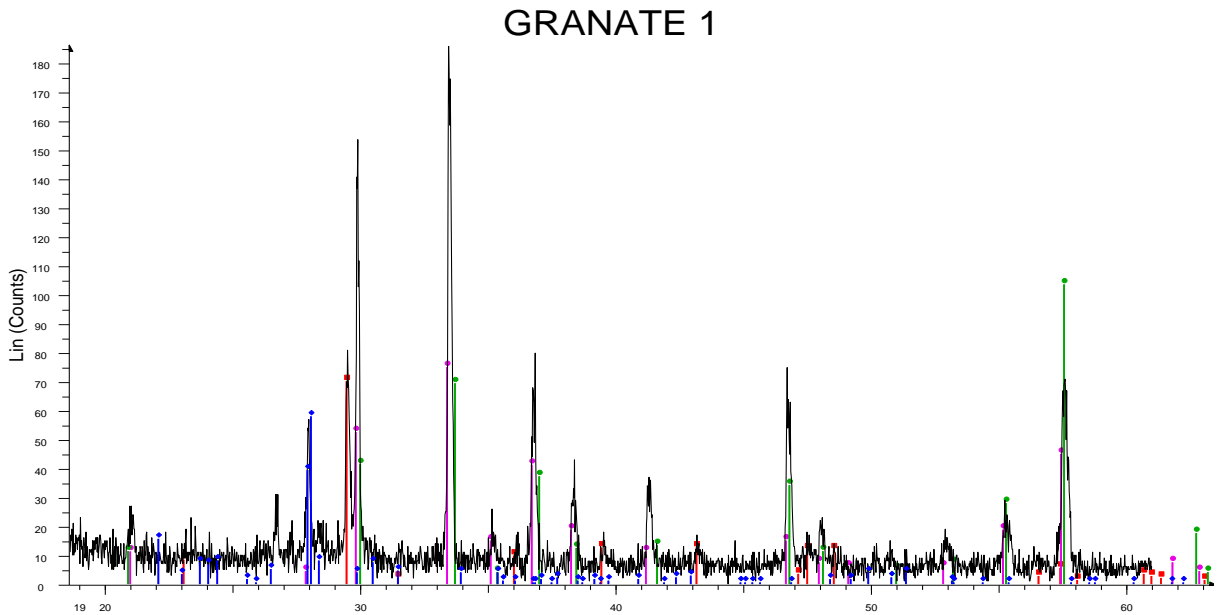
El proceso de metamorfismo de contacto es generado probablemente por la intrusión de una granodiorita de biotita de  $71.57 \text{ Ma} \pm 0.44$ , y que se puso en contacto con las rocas carbonatadas de la plataforma (Miembro La Cueva). Generalmente para este tipo de yacimientos (skarn de Fe) durante los emplazamientos se generan minerales de granates y piroxenos que alcanzan las temperaturas máximas de formación de entre los  $300^\circ$  a  $550^\circ \text{ C}$ , de acuerdo con Einaudi *et al* (1981).



**Figura 51.-** Plano a geológico del skarn El Potrerito, (rancho San Marcos), mostrando la aureola de metamorfismo.

### 7.2.1.1. Zona progrado

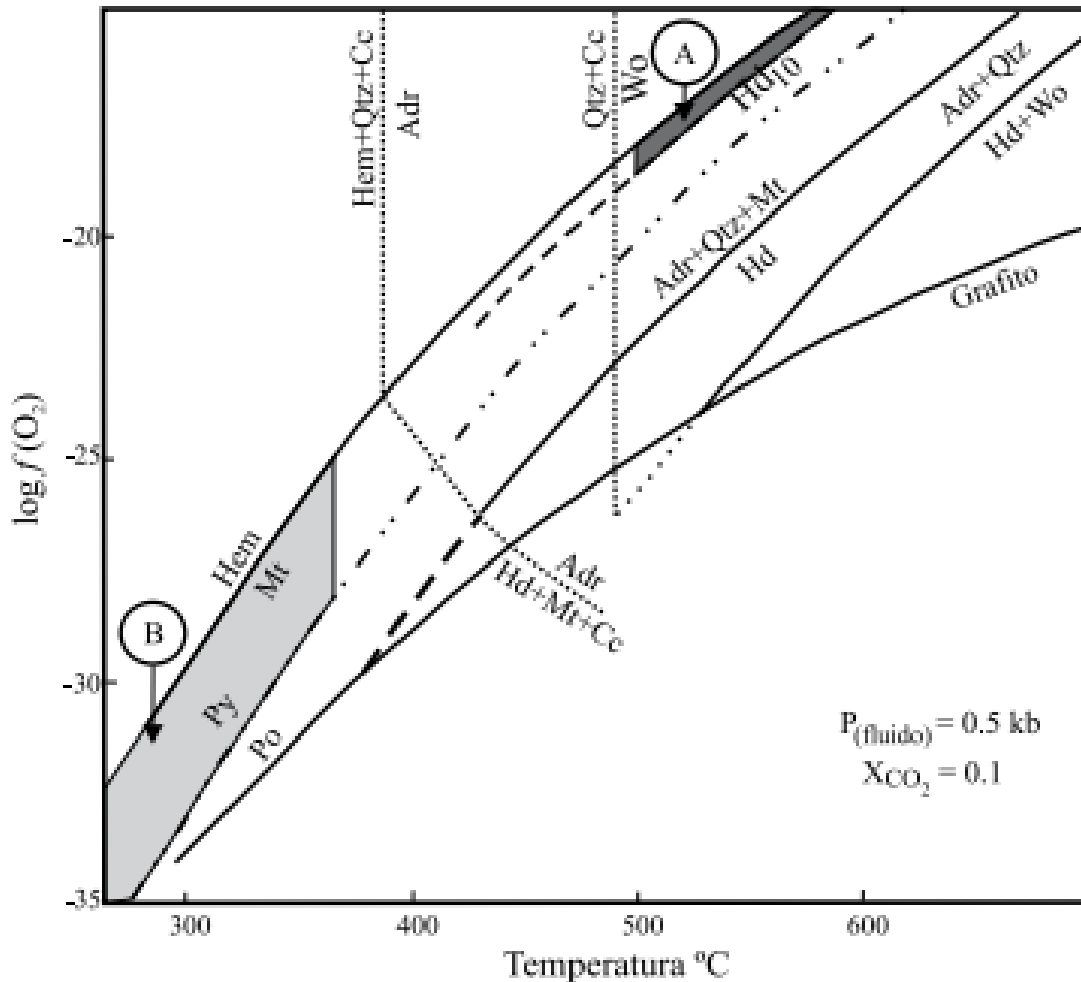
El metamorfismo progrado es la primera etapa dada por la paragénesis de los minerales anhidros de mayor temperatura en el skarn, la mineralización de esta aureola de metamorfismo del skarn El Potrerito, está representada primeramente por una skarn de granates en su mayoría andradita ( $\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_3$ ), de tamaños de 0,5 a 1 cm y con longitud mineralizada de aproximadamente 25 m. de acuerdo con datos de difracción de rayos X la composición de los granates es esencialmente andradítica (Figura 52). Algunos análisis efectuados al microscopio electrónico de barrido dan composiciones de andradita (45-72 %), grosularita (13-42%9 y almandita (9-15%). Según los datos termodinámicos de la bibliografía (Meinert, 1982) las condiciones de temperatura mínima para la andradita son de 385°C (Figura 53). Los granates observados alcanzan tamaños de 0.1 cm a 0.5 cm, en una franja emplazada de un espesor de 12m. Esta zona muy diferenciada en el skarn progrado con una dimensión de los 25 m de ancho, el tamaño del granate se incrementa llegando a medir hasta 1.5 cm y presencia de minerales piroxenos (clinopiroxenos) hasta en un 15 % y con tamaños de 0.2 cm.



- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">■</span> 00-011-0696 (I) - Uvarovite, syn - <math>\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3</math> - Y: 47.30 %</li> <li><span style="color: blue;">◆</span> 00-020-0020 (D) - Anorthite, ordered - <math>\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8</math> - Y: 19.54 %</li> <li><span style="color: green;">■</span> 00-024-0027 (D) - Calcite - <math>\text{CaCO}_3</math> - Y: 37.42 %</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">■</span> 00-005-0586 (*) - Calcite, syn - <math>\text{CaCO}_3</math> - Rhombo.H.axes - S-Q 13.1 %</li> <li><span style="color: blue;">◆</span> 00-041-1480 (I) - Albite, calcian, ordered - <math>(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8</math> - Triclinic - S-Q 20.4 %</li> <li><span style="color: magenta;">◆</span> 00-011-0696 (I) - Uvarovite, syn - <math>\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3</math> - Cubic - S-Q 28.0 %</li> <li><span style="color: green;">■</span> 00-003-1136 (D) - Andradite - <math>\text{Ca}_3\text{Fe}_2+3(\text{SiO}_4)_3/3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2+3\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2</math> - Cubic - S-Q 38.6 %</li> </ul> |
|---|---|

**Figura 52.-** Gráficos de los análisis de las muestras analizadas en el equipo de espectrometría de masas del departamento de Geología.





**Figura 53.-** Diagrama  $\log f\text{O}_2/T$  a la presión  $P$  y  $X_{\text{CO}_2}$  mostrando la temperatura de formación de la andradita en la reacción ( $\text{Ad}=\text{Hem}+\text{Cal}+\text{Qz}$ ). tomado de Meinert (1982).

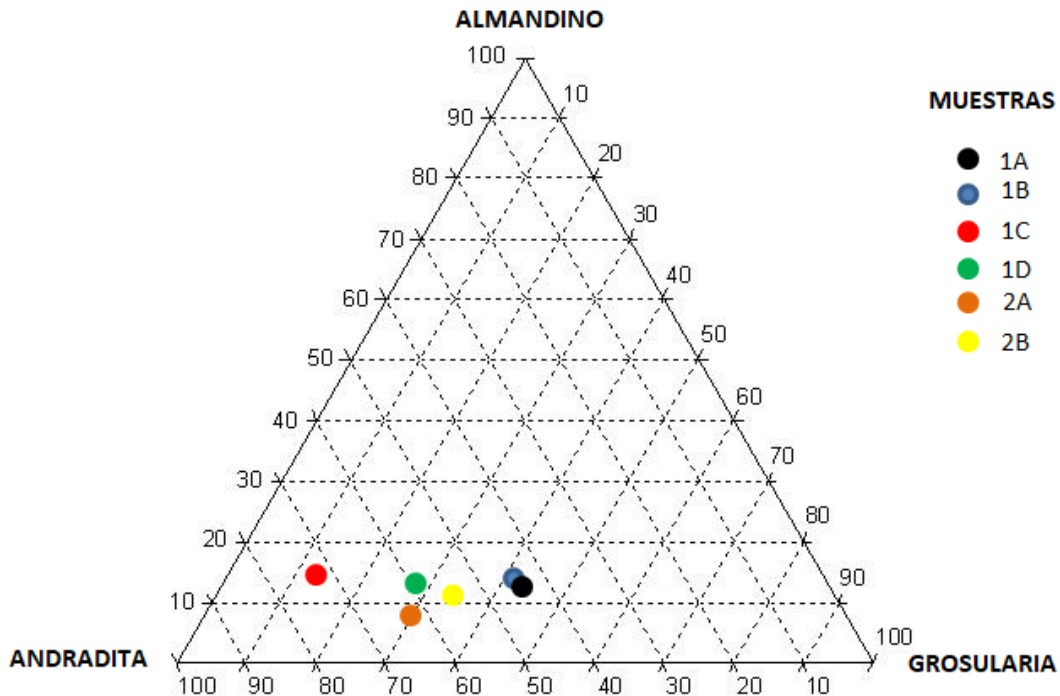
Para determinar la composición de los granates en la zona programada se seleccionaron dos muestras de granates que se analizaron en el microscopio de barrido electrónico (ver anexo 5), los resultados de los análisis de las bandas de formación o zoneamiento del cristal analizado se utilizó mediante el cálculo de las formulas estructurales, generando la Tabla 5, utilizada para conocer la composición de los granates que fueron formados en el skarn.

Tabla 5.- Cálculo de fórmulas estructurales para los granates analizados al MEB y composición.

	Muestras							
	1A	1B	1C	1D	2A		2B	
SiO <sub>2</sub>	30,48	40,06	39,67	40,03	38,94	SiO <sub>2</sub>	39,67	
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	TiO <sub>2</sub>	0,00	
ZrO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	ZrO <sub>2</sub>	0,00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,33	9,86	4,72	7,54	7,40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,98	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> calc.	13,39	12,44	18,86	14,98	18,20	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> calc.	15,68	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	
FeO calc.	5,89	6,50	7,31	7,24	4,28	FeO calc.	5,54	
MnO	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	MnO	0,00	
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	MgO	0,00	
CaO	32,25	32,06	31,32	31,71	33,00	CaO	32,70	
Total	101,31	101,25	101,88	101,50	101,82	Total	101,57	
Si	3,121	3,170	3,203	3,195	3,106	Si	3,156	
Al <sup>iv</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Al <sup>iv</sup>	0,000	
somme	3,121	3,170	3,203	3,195	3,106	somme	3,156	
Al <sup>vi</sup>	0,962	0,920	0,449	0,709	0,696	Al <sup>vi</sup>	0,748	
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Ti	0,000	
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Cr	0,000	
Fe <sup>3+</sup>	0,796	0,741	1,146	0,900	1,092	Fe <sup>3+</sup>	0,939	
somme	1,759	1,660	1,595	1,609	1,788	somme	1,687	
Fe <sup>2+</sup>	0,389	0,430	0,494	0,483	0,286	Fe <sup>2+</sup>	0,369	
Mn	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	Mn	0,000	
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Mg	0,000	
Ca	2,731	2,718	2,709	2,712	2,820	Ca	2,788	
somme	3,121	3,170	3,203	3,195	3,106	somme	3,156	
Total	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	Total	8,000	

Pyrope	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Pyrope	0.0
Almandin	12.5	13.6	15.4	15.1	9.2	Almandin	11.7
Spessartine	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	Spessartine	0.0
Andradite	45.3	44.6	71.8	55.9	61.1	Andradite	55.6
Uvarovite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Uvarovite	0.0
Grossulaire	42.2	41.1	12.7	29.0	29.7	Grossulaire	32.7
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		100.0

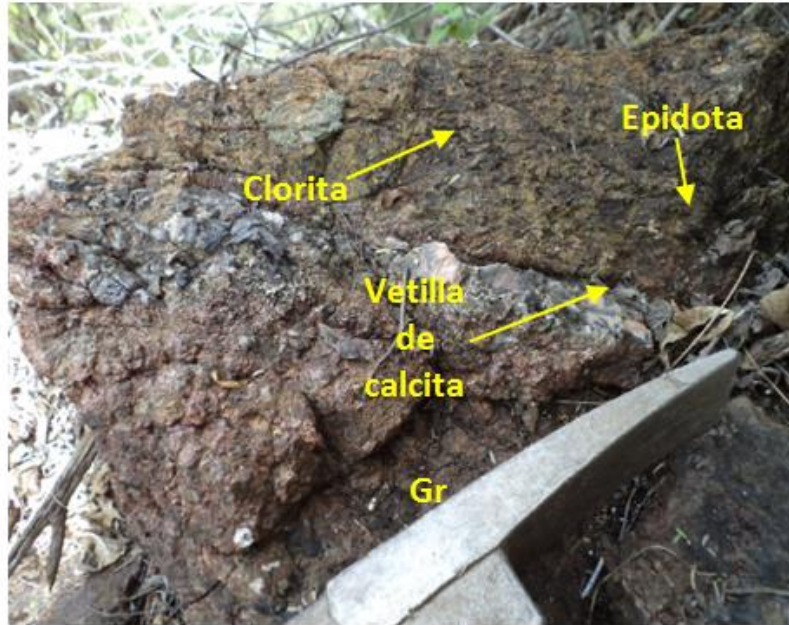
De los resultados de los porcentajes de los granates de la Tabla no. 3 se graficaron en un diagrama ternario que integra a los minerales de almandino ( $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{SiO}_4$ , grosularia  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiO}_4$  y andradita  $\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_2$ , Figura 54



**Figura 54.-** Diagrama ternario mostrando la relación de los resultados de los análisis de las muestras analizadas de granates en el microscopio de barrido electrónico de la zona de skarn el Potrerito, área rancho San Marcos

### 7.2.1.2. Metamorfismo Retrogrado

El metamorfismo retrogrado ocurrió con el descenso de temperatura de los intrusivos y da paso a la formación de minerales hidratados que está representado en la mineralogía de acuerdo con los cambios de temperatura. En la zona de metamorfismo retrograda el skarn el potrerito, está representada en dos etapas, la etapa temprana está constituida por una franja de epidota ( $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ ), en contacto con la zona de andradita, Figura 54 junto a la zona de epidota se encuentra en contacto una franja de clorita ( $\text{Mg,Fe}^{2+}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})$ ) y que viene a ser la zona más alejada del intrusivo, durante la formación de esta etapa también se formaron los minerales de calcita con diferentes tonalidades que van del gris, rosa y blanco, e inclusiones de minerales de Fe.

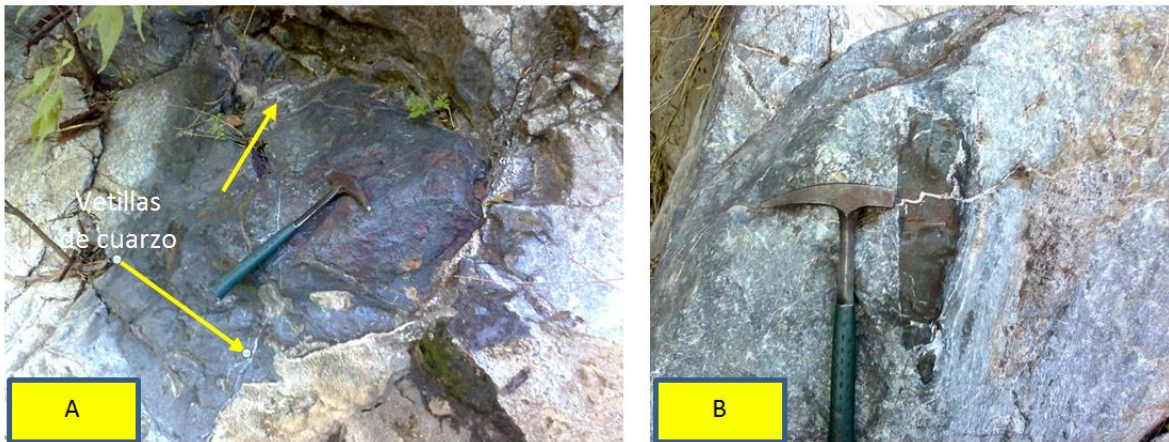


**Figura 55.-** Vetilla de calcita delimitando la zona progradada de la retrogradada con minerales de calcita epidota clorita, en la zona progradada los granates alcanzan dimensiones hasta los 2.5 cm y al acercarse a la zona retrogradada van disminuyendo el tamaño. (Rancho San Marcos).

### 7.2.1.3. Metasomatismo

La segunda etapa del metamorfismo de retrogrado (metasomatismo), está conformada por sulfuros compuesta por pirita ( $\text{FeS}_2$ ), una vez que la pirita dejó de precipitar porque de acuerdo con la disminución de las fugacidades de azufre (S), e incremento de las fugacidades de oxígeno inicia la precipitación de la magnetita ( $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y especularita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

La aparición de cuerpos aislados de magnetita y con tamaños hasta de un metro de espesor corresponde a esta etapa (metasomatismo), donde los fluidos mineralizantes percolaron los skarns previamente formados. El evento final es el emplazamiento de vetillas centrimétricas de cuarzo que cortan a los cuerpos de magnetita Figura 56.

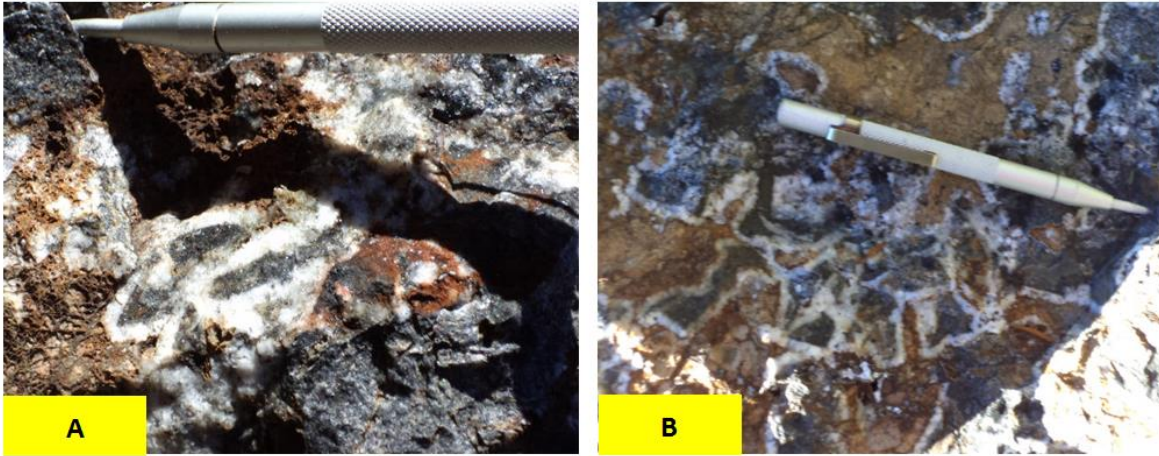


**Figura 56.-** A cuerpos de magnetita dentro de la secuencia carbonatada, se aprecian vetillas tardías cortando la mineralización de magnetita B: mineralización de magnetita en la zona prograda en contacto con la zona de granates.

#### 7.2.1.4. Silicificación

Después de la etapa de la formación del skarn es la silicificación producidos por los fluidos hidrotermales para rellenar las fracturas que cortan a los cuerpos de hierro, con relleno de las fracturas por carbonatos, óxidos y cuarzo, en esta etapa, también la silicificación la emplaza una mineralización muy característica de sílice rodeando a los óxidos de hierro (especularita) con formas lenticulares emplazadas en un espesor de 40 cm y lateralmente aparece en solo aproximadamente en los 10 m y localizados cercanos a los cuerpos de hierro, en esta etapa tardía de la silicificación Figura 57, después de reconocer todos los minerales formados en el skarn podemos decir que la zona prograda esta constituida por minerales de piroxeno y granates, posteriormente la zona de metamorfismo retrograda constituye los minerales de clorita, epidota y el metasomatismo los minerales que se dan en el orden de aparición en la figura no. 58.





**Figura 57.-** A: Etapa del metasomatismo donde se aprecia mineralización de especularita rodeada en la periferia de material silíceo. B: otra vista de esta zona de metasomatismo misma mineralización dentro de las rocas carbonatadas.

Paragénesis de la mineralización dentro de la aureola de contacto				
Skarn de	mineral	progradante	retrogrado	hidrotermalismo
Fierro	Granate	—————		
Rancho San Marcos,	piroxeno	—————		
	calcita		—————	
La Cuesta de Fierro	clorita		- - - - -	
	epidota		- - - - -	
	cuarzo		—————	- - - - -
	magnetita			—————
	hematita			- - - - -
	silicificación			—————

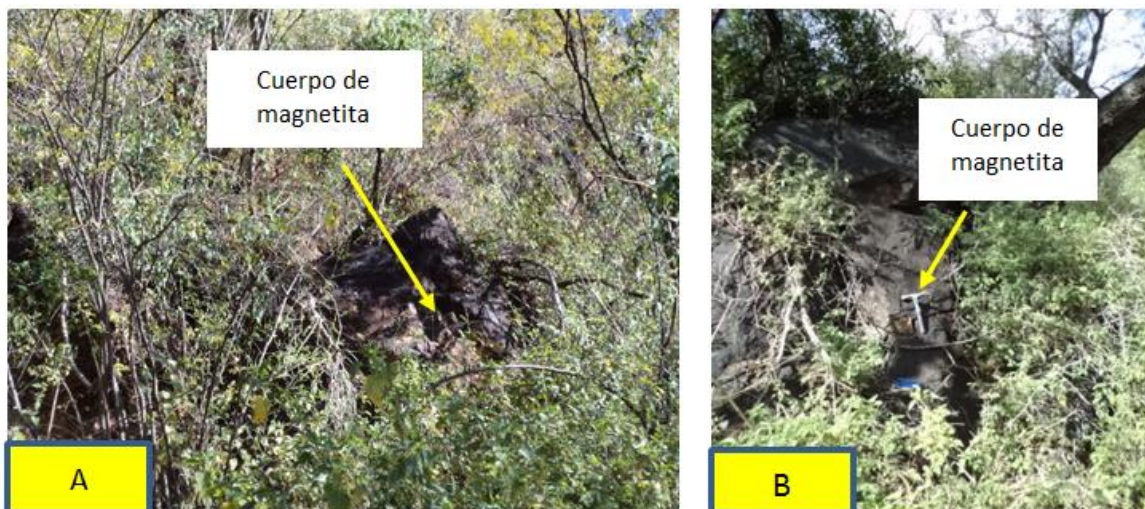
**Figura 58.-** Secuencia paragenética de las alteraciones progrado y retrogrado del skarn de hierro del área del rancho San Marcos y La Cuesta de Fierro.



### 7.3. Reacciones de la mineralización de Fe dentro del skarn con las rocas huéspedes.

Los cuerpos mineralizados de hierro (magnetita) tienen una orientación NW- y con un echado que varía de los 30 a 45° al NE, las dimensiones de los cuerpos son variables y van desde los 5 hasta los 25 metros de espesor y de longitudes hasta los 200 metros, estos cuerpos mineralizados son cortados por fallas normales, donde se observan una repetición de capas de las secuencias de la plataforma y la formación Mina México, aparentando ser cuerpos aislados o eventos distintos.

Este tipo de emplazamiento se localiza en la parte S-SW del poblado de Bacanora, al menos tres yacimientos con importancia económica para el poblado mencionando a los yacimientos como La Cuesta de Fierro, Chinoverachi, y rancho San Marcos (Skarn El Potrerito), además de otros cuerpos de condiciones similares encontrados en la exploración que se realizó para el estudio de este trabajo, figura 59, reflejan un potencial económico y de condiciones particulares de emplazamiento a los yacimientos que ya han iniciado su explotación (La Cuesta de Fierro, Chinoverachi).



**Figura 59.-** A: Cuerpos de magnetita encontrados en el arroyo Agua Verde en La Cuesta de Fierro. B: Estructura de cuerpo mineralizado de magnetita, localizado en el rancho San Marcos.

Los cuerpos de magnetita que afloran en La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos tienen la misma ocurrencia, con un contacto directo entre las rocas carbonatadas y las rocas siliciclásticas de la formación Mina México.

En la parte detrítica no afloran cuerpos mineralizados de hierro en forma de vetas que tengan un valor importante económicamente, solo se llegan a emplazar vetillas de óxidos de hierro hematítico-limonítico de pequeñas proporciones, cortando angularmente la estratificación de las rocas siliciclásticas. Con estas características de es los cuerpos de hierro tipo skarn es claro que el emplazamiento se dio en las rocas carbonatadas que actuaron como una trampa para los fluidos mineralizantes, mientras que la secuencia detrítica solamente fue un sello que facilitó al emplazamiento de los cuerpos masivos y quedaron atrapados entre la secuencia paleozoica. Es claro que existió un fuerte control estratigráfico que canalizó el emplazamiento de los fluidos ricos en hierro para formar los depósitos de La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos.

## CAPITULO VIII.

### 8.- Conclusiones

Los cuerpos de magnetita que afloran en varias regiones de la localidad de Sonora Central y en especial los estudiados en La Cuesta de Fierro y rancho San Marcos, corresponden a un evento ígneo-metamórfico entre la secuencia carbonatada de plataforma y las rocas siliciclásticas de la formación Mina México. Estos cuerpos mineralizados corresponden a exoskarn proximal de magnetita, emplazado en rocas que corresponden a profundidades someras de la plataforma paleozoica, demostrado por la cantidad y buena calidad de conservación de fósiles encontrados en la cercanía de los cuerpos de Fe, aunque algunos se encuentran muy recristalizados por el metamorfismo de contacto que generó la mineralización.

El cuerpo de magnetita se encuentra localizado entre las secuencias de rocas carbonatadas y una secuencia siliciclástica perteneciente a una edad paleozoica del Pérmico inferior medio ya referida por otros autores, que confirman que es la misma unidad correspondiente a una cuenta de *Foredeep* que está en contacto con las calizas de la plataforma.

Los cuerpos de magnetita se encuentran concordantes con las unidades de rocas carbonatadas y siliciclásticas y lo confirma la barrenación realizada en el año del 2010 por la compañía Explorex S.A. de C.V. en donde dos de los barrenos cortaron las dos unidades y el cuerpo de magnetita.

Las condiciones del emplazamiento son de carácter estructural y no litológico, como sucede en otras vetas encontradas en la región, como lo es la veta correspondiente a la Mina México (veta de plata).

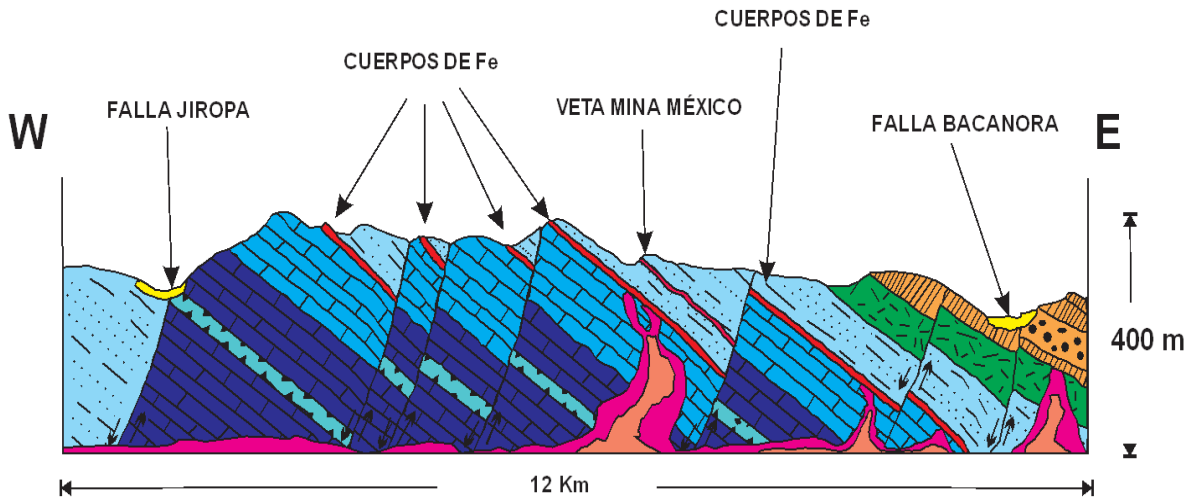
En los recorridos que se realizaron por ambas áreas, se encontraron cuerpos de magnetita con la misma potencia entre las mismas unidades y algunos cuerpos en forma de lentes cortados por vetillas de cuarzo tardías.

Con respecto a la muestras GD12-28 que fue muy relativa por los valores altos en titanio > 2.2 % nefelina normativa, ausencia de cuarzo y por tener










porcentaje de  $PI > Or$ , corresponde a un dique lamprofídico del tipo espesartita, con características similares a los diques de Hermosillo.

Como conclusión final podemos decir que se tiene una alta posibilidad de encontrar cuerpos mineralizados del tipo skarns de magnetita en el contacto de estas dos unidades litológicas y tuvieron las condiciones favorables para el emplazamiento de estos cuerpos. También existen otros cuerpos mineralizados en las cercanías de Hermosillo donde se localiza la formación Mina México y las rocas carbonatadas de la plataforma, en el cerro la Flojera, que aflora un cuerpo de magnetita muy similar a las condiciones de emplazamiento del área sur de Bacanora. Otro de los cuerpos de magnetita localizado en el poblado de Bacerac con condiciones de emplazamiento similares, con la mineralización de magnetita concordante entre unidades de rocas carbonatadas de la plataforma y rocas siliciclásticas. Por último, se localizó un cuerpo de galena argentífera en el área del picacho de Cobachi, emplazado también entre el contacto de las rocas carbonatadas de la plataforma y rocas siliciclásticas de la formación Mina México.

En de los recorridos que se hicieron sobre las rocas carbonatadas y las rocas siliciclásticas no se encontraron cuerpos mineralizados de magnetita, solamente en el contacto entre las unidades mencionadas. Esta relación es muy importante y puede servir como un modelo o una guía para la identificación y localización de este tipo de yacimientos del tipo skarn de Fe en Sonora.



**LEYENDA**

- |  |                    |   |                    |  |
|--|--------------------|---|--------------------|--|
|   | ALUVIÓN            |    | MIEMBRO LA CUEVA   | } FM. EL TIGRE<br>HEWETT Y SCHMIDT<br>(1978) |
|   | FM. BAUCARIT       |    | MIEMBRO LOS ALISOS |  |
|   | FM. TARAHUMARA     |    | MIEMBRO EL TORREÓN |  |
|   | FM. MINA MÉXICO    |   | VETA MINA MÉXICO   |  |
|  | CUERPOS GRANITICOS |  | SKARN Fe           |  |

**Modelo propuesto de la mineralización de los cuerpos de magnetita entre las rocas carbonatadas y las rocas siliciclasticas de la formación Mina México en la porción sur de Bacanora Son. (Modificado de Poole – Amaya Martínez (2005).**

## Bibliografía

- Alencaster de Cserna, G. (1961). Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del estado de Sonora. *Parte I en paleontología del Triásico superior de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11*, p. 1-18.
- Calmus, T. (2011). Capítulo 7: Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico. (T. Calmus, Ed.) *Panorama de la Geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118(118)*, 227-266.
- Cocheme, J.J., (1985). Le magmatisme dans le Nord-Ouest de Mexique. Cartographie de la région de Yécora- Maycoba-Mulatos. Illustratio magmática de la fin d'un régime en subduction et du passage à un régime distensif. Thèse Doct. Etat, Univ. Aix-marseille III, 209 p.
- Cornell, M. (26 de 6 de 2017). *Stereonet use*. Obtenido de <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>
- Damont, P. E., Shafiqullah, M., & Roldán-Quintana, J. y. (1983). El batolito Larámide (90-40 Ma) de Sonora. *Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgista y Geólogos de México, Convención Nacional 15*, p. 63-95.
- Drewes, & Harald. (1978). The Cordilleran orogenic belt between Nevada and Chihuahua. *Geological Society of America Bulletin v. 89*, p. 641-657.
- Dumble, E. T. (1900). Notes on the Geology of Sonora, Mexico. *Transaction of the society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME)*, v. 29, p. 122-152.
- Dumble, E. T. (1901). Cretaceous of Obispo Canyon, Sonora, Mexico. *Texas Academy of Sciences Transactions v. 4*, p. 81.
- Einaudi, Meinert, & Newberry, R. J. (1981). Skarn deposits, in Skinner, B.J. ed. *Economic Geology, Seventy-fifth Anniversary Volume*, p. 317-391.
- Hewett, R. L. (1978). Geology of the Cerro la Zacatera area, Sonora, Mexico. *Flagsraff Arizona, Northern Arizona University, M. S. thesis*, 99 p.
- Irvine, T.N., & Baragar, W.R.A. (1971). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa*. v. 8, p. 523-548.
- Jones, R. W. (1996). Differential vertical uplift - A major factor in the structural evolution of southeastern Arizona. *Arizona Geological Society Digest*, v. 8, p. 97-124.
- King, R. E. (1939). Geological reconnaissance in the northern Sierra Madre Occidental of Mexico. *Geological Society of America Bulletin v. 50*, p. 1625-1722.
- Krantz, R. W. (1989). Laramide structures of Arizona, in Jenney, J.P., y Reynolds, S.J., eds.,. *Geological evolution of Arizona: Arizona Geological Society Digest*, v. 17, p. 463-483.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Amaya-Martínez, R. (1997). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 109, p. 1349-1360.

- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Amaya-Martínez, R. (1997). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 109, p. 1349–1360.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Connelly, J. (2001). Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 521–531.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Connelly, J. N. (2001). Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 521–531.
- McKee, J. W., McKee, M. B., & Anderson, T. H. (2005). Mesozoic basin formation, mass-gravity sedimentation, and inversion in northeastern Sonora and southeastern Arizona in Anderson, T.H; Nourse, J.A; McKee, J.W; y Steiner, M.B.eds. The Mojave-Sonora megashear hypothesis-development, assessment and alternatives. *Geological Society of America Special paper 393*, p. 481-507.
- Meinert, L. D. (1982). Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico. *Economic Geology*, v. 77, p. 919–949.
- Meinert, L. D. (1992). Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, v. 19, p. 919–949.
- Meinert, L. D. (2005). World skarn deposits. *Econ. Geol. 100<sup>th</sup> Aniv. Vol.*, 299-336.
- Middlemost, E.A.K. (1994). Naming materials in the, magma/igneous rocks system. *Earth Sci Rev.*, v.37, p. 215-224.
- Morales-Montaño, M., & Cota-Reyna, J. (1990). Nuevas localidades Cámbricas en Sonora. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 22, no. 3, p. 70.
- Ochoa-Landín, L., Pérez-Segura, E., Del Río-Salas, R., & Valencia-Moreno, M. (2011). Depósitos minerales de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología, boletín 118, cap. 9*, p. 299-331.
- Pearce, J. A., Harris, N. B., & Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956–983.
- Peccerillo, A. & Taylor, R.S. (1976). Geochemistry of the Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 28, p. 63-81.
- Pérez Segura, E. (1985). Carta Metalogenética de Sonora 1; 250, 000, una impresión de la metalogénia de Sonora. *Gobierno del Estado de Sonora y Energéticos, publicación 7*, p. 10-13.
- Pérez Segura, E. (2006). Estudio Metalogenético de los yacimientos de Ni-Co (Cu-Zn) de La Esperanza, Sonora Central. *Caracterización de los depósitos y relaciones con el magmatismo Laramídico. Tesis doctoral Ciencias de la Tierra, Juriquilla Querétaro*, p. 213 anexos Tabla X.



- Poole, F. G., & Madrid, R. J. (1988). Allochthonous Paleozoic eugeoclinal rocks of the Barita de Sonora mine area, central Sonora, Mexico in Rodríguez-Torres, Rafael, ed, *El Paleozoico de la Región Central del Estado de Sonora. Libroto Guía de la Excursión Geologica para segundo simposio sobre la Geología y Minería del Estado de Sonora, Excursiones de campo, Instituto de Gelogía, Universidad Autónoma de México, Hermosillo Sonora*, p. 32-41.
- Poole, F. G., & Madrid, R. J. (1988). Comparison of allochthonous Paleozoic eugeoclinal rocks in the Sonoran, Marathon, and Antler orogens. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 20, no. 7, p. 267.
- Poole, F. G., Perry, W. J., Madrid, R. J., & Amaya, M. (2005). Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia. *Stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model.*, *Geological society of America Special*, p. 393.
- Pubellier, M. (1987). Relations entre domaines cordillérain et mésogéen au nord du Mexique; étude géologique de la vallée de Sahuaripa, Sonora central. *Paris, Université Pierre et Marie Curie, tesis doctoral*, p. 219 .
- Radelli, L., Menicucci, S., Mesnier, H. P., Aráux-Sánchez, E., Calmus, T., Amaya-Martínez, R., . . . and Soto-Contreras, L. A. (1987). Allochthonous Paleozoic bodies of central Sonora. *Universidad de sonora, Boletín del Departamento de Geología, Boletín Segunda Época*, P. 1-15.
- Rangin, C. (1977). Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, v. 1, p. 44–47.
- Rangin, C. (1982). Contribution à l'étude géologique du système cordillérain mesozoïque du nord-ouest du Mexique. *Paris, Université Pierre et Marie Curie, tesis doctoral*, P. 588 .
- Robles-Andrade, P. (2007). Caracterización geológica y mineralógica del skarn de hierro “El Garabato”, municipio de Suaqui Grande, Sonora. *Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de licenciatura*, P. 81.
- Roldán-Quintana, J. S. (2002). Caracterización geológico-geoquímica y evolución del arco magmático Mesozoico-Terciario entre San Carlos y Maycoba, sur de Sonora [D.C. tesis]. *Ciudad México, Universidad Nacional Autónoma de México*, P. 185.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, J. A., . . . Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits-characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 251–298.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, v. 105, p. 3-41.
- Stewart, J. H., & Roldán-Quintana, J. (1991). Upper Triassic Barranca Group. *Nonmarine and shallow-marine rift-basin deposits of northwestern Mex-* Downloaded from special papers.gsapubs.org on march 6, 2012.

- Stock, J. M., & Molnar, P. (1988). Uncertainties and implications of the Late Cretaceous and Tertiary position of North America relative to the Farallon, Kula, and Pacific plates. *Tectonics*, v. 6, p. 1339-1384.
- Streckeisen, A. (1978). USGS subcommittee of the systematic of igneous rocks. *Classification and nomenclature of volcanic rocks, Lamprophyres, carbonatites and melilitite rocks. Vol 143*, p. 1-14.
- Sun, S.S & McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: *Saunders, D.A. & Norry, M.J. [eds.] Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. London, special publications, v. 42*, p. 313-335.
- Taliaferro, N. (1933). An occurrence of Upper Cretaceous sediments in northern Sonora. *Journal of Geology*, v. 41, p. 12-37.
- Titley, S. R., & Beane, R. E. (1981). Porphyry copper deposits; Part I. Geological setting, petrology, and tectonogenesis, in Skinner, B.J., ed. *Economic Geology Seventy-Fifth Anniversary Volume*, p. 214-235.
- Vega-Granillo, R., & Aráuz-Sánchez, E. (1985). Estudio geológico de la Sierra La Campanería y sus yacimientos minerales. *Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, Departamento de Geología Boletín*, v. 2, no. 1 y 2, p. 74-84.
- Vega-Granillo, R., & Aráuz-Sánchez, E. (1988). Estratigrafía del Paleozoico en el área del Rancho Las Norias, Sonora central, in Rodríguez-Torres, R., ed., *El Paleozoico de la Región Central del Estado de Sonora. Libro Guía de la Excursión Geológica para segundo simposio sobre la Geología y Minería del Estado de Sonora*, p. 14-24.
- Wilson, F. I., & Rocha, S. V. (1949). Coal deposits of the Santa Clara district near Tonichi, Sonora, Mexico. *United State Geological Survey Bulletin*, 962A, p. 80.

## ANEXOS

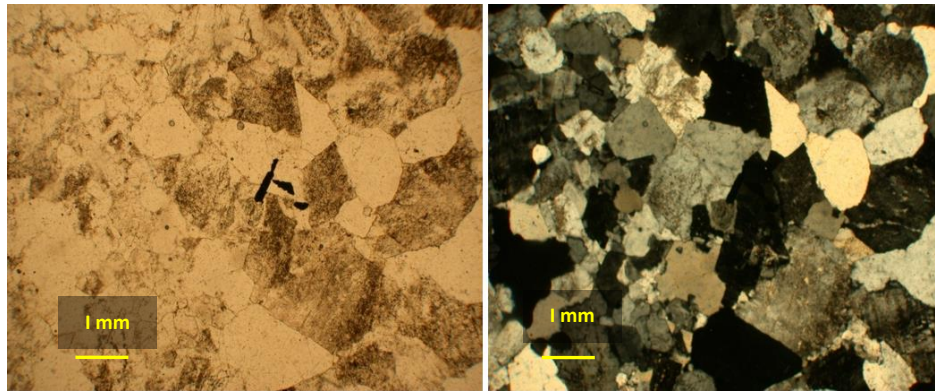
### Anexo 1.- Muestras de las áreas de estudio, (La Cuesta de Fierro, rancho San Marcos).

MUESTRA	UBICACIÓN	TEXTURA	MINERALOGÍA	ALTERACIÓN	CLASIFICACIÓN	ESTUDIO	OBSERVACIONES
GDMJ-03	E 0648112 N 3201097	Masiva	Magnetita, hematita,		Skarn	Mineragáfico	Cuerpo de Fierro,
GDMV-01	E 0648294 N 3201210	Cristalina	Q, Fk, biotita, pirita		arenisca de grano fino	Petrográfico	
GDMV-02	E 0648269 N 3201111	Cristalina	Cuarzo, feldespato K, sericita, pirita, hematita, arcillas		Roca siliciclástica, con granos de Qz, arcillas	Petrográfico	Roca siliciclástica, con granos de Qz, arcillas,
GDMV03	E 0648143 N 3200789	Cristalina	Calcit, magnetita, pirita		Caliza	Petrográfico	
GDMV-05	E 0648065 N 3200667	Cristalina	Calcita, hematita, pirita, magnetita		Caliza con intercalaciones de pedernal	Petrográfico	
GDMV-06	E 0648034 N 3200579	Cristalina			Caliza Fe	Petrográfico	
GDMV08	E 0648010 N 3200325	Cristalina	Calcita, magnetita, pirita, hematita		Caliza recristalizada	Petrográfico	Caliza recristalizada, con granates mal formados
GDMV-09	E 0647979 N 3200379	Masiva	Magnetita, hematita, bornita	oxidación	Skarn	Mineragáfico	Cuerpo de magnetita
GD10-01	E 641020 N3204616	Fanerítica	Q, Fk, P, horblenda y biotita, pirita	oxidación	Microgranito de grano fino	petrográfico	Granito en contacto con areniscas fuertemente fracturada y oxidadas
GD10-07	E 647663 N3201728	Cristalina	Cuarzo, calcita, pirita, hematita, feldespatos K, P	oxidación	Arenisca Wacka de cuarzo	Petrográfico	Pertenece a la Formación Mina México
GD10-09	E 648110 N3202030	Fanerítica	Cuarzo, Fk, P, horblenda, Biotita, magnetita, pirita		Granodiorita de horblenda y biotita	Petrografico, geoquímico,	
GD10-10	E 648112 N3202030	Fanerítica	Cuarzo, Fk, P, horblenda, Biotita, sericita	sericita	Granito de feldespato alcalino	Petrográfico, geoquímico, geocronológico	
GD10-11	E 654334 N 3196662	Fanerítica	Cuarzo, Fk, P, biotita		Granito de grano fino	petrográfico	Cortados por diques pegmatíticos
GD10-13	E 655764 N3195604	Sacaroide	Cuarzo, Fk, oxidos limoniticos		Arenisca de grano fino		Se presentan fosiles Nereites, Escalaritubas.
GD10-15	E 654161 N 3196948	Fanerítica	Cuarzo, Fk, P, horblenda, Biotita		Granodiorita de horblenda y biotita	petrográfico	Roca con enclaves de granito de Fk.
GD10-16	E 655583 N3198574	Afanítica	Olivinos, zeolitas	Sericita	Basalto interbaucarit	Petrográfico, geoquímico	
GD10-18	E 654750 N3202705	Piroclástica			Roca volcanica		Formación Tarahumara
GD10-19	E 640557 N3203949	Fanerítica	Cuarzo, fk, plagioclasas, biotita		Granito de grano grueso	Petrográfico	Granito cortado por un dique diorítico

MUESTRA	UBICACIÓN	TEXTURA	MINERALOGÍA	ALTERACIÓN	CLASIFICACIÓN	ESTUDIO	OBSERVACIONES
GD-12-01	E 657527 N3183994	Granoblástica	cuarzo	oxidacion	cuarcita		Cuarcita con alternancias de lutitas carbonosas y fósiles graptolitos
GD12-04	E 656762 N 3186714	Afanítica	Cuarzo, arcillas		Lutita carbonosa		Intercalaciones de lutitas entre las areniscas de la Formación Mina México
GD-12-05	E 656929 N 3187019	Fanerítica	Cuarzo, Fk, Plagioclasas	sericitica	Granito de grano fino	petrografico	Granito con vetillas de feldespato alcalino
GD12-06	E 657191 N 3187207	Cristalina	Calcita. Pirita,	silicificacion	Caliza recristalizada		Caliza en contacto con skarn de fierro
GD12-07	E 657220 N 3187275	Masiva	Magnetita, hematita, granate		Cuerpo de fierro		Cuerpo de fierro altamente magnético, con un espesor de 20 m.
GD12-08	E 657225 N 3187267	Cristalina	Cuarzo feldespato K, pirita, magnetita, hematita		Arenisca de grano fino		Arenisca corresponde a la Formación Mina México en contacto con el cuerpo de fierro
GD12-13	E 657250 N 3182829	Aglomerática	Cuerzo, Fk, fragmentos de roca volcánica, pirita	silicificacion	Conglomerado Baucarit	petrografico	Unidad conglomeratica discordante con cuarcitas (aloctono)

## Anexo 2.- Petrografía del área La Cuesta de Fierro

### GD10-01

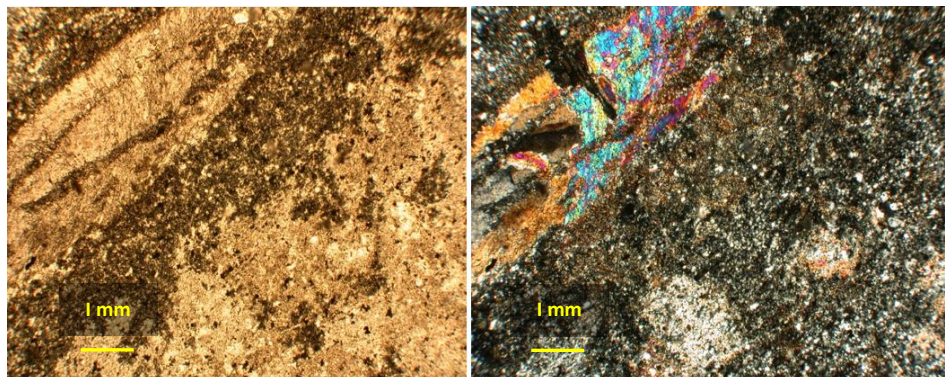


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca de origen igneo, con una textura hipidiomôrfica granular, ocasionalmente textura granofidica con granos anhedral y subhedral, de cuarzo en un 35 %, feldespatos K, se observan microclina con inclusiones de cuarzo, en un 45 % del de feldespatos alcalinos, y las minerales plagioclasas con un 20%, dando como descripción de roca un **leucogranito de feldespato alcalino de grano grueso**.

### GD10-02



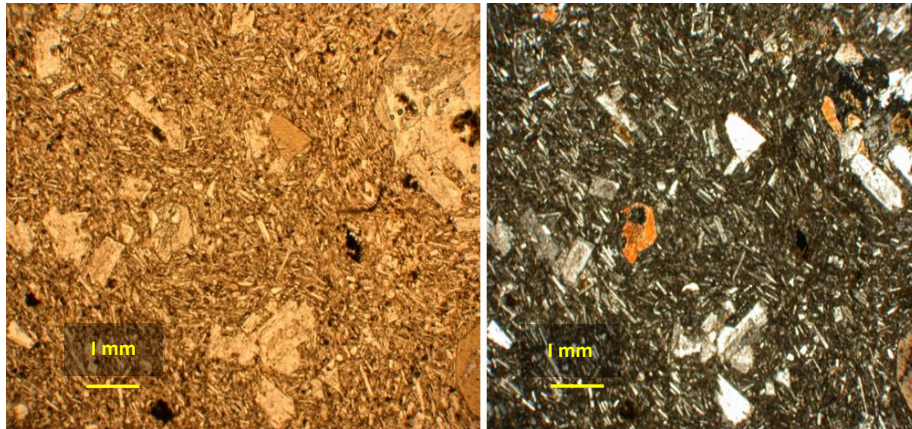
A Luz natural

B Luz polarizada

Roca sedimentaria con cristales finos de cuarzo de 0.2 mm a 0.4 mm en forma anhedral, presenta alteración de los cristales de biotita a clorita, se observan pequeños minerales de opacos con probabilidad a sulfuros de fierro, se observan además fracturas rellenas de calcita, minerales accesorios se observan en estas fracturas como la esfena, la textura es granoblástica, descripción de roca **arenisca de grano fino**.



### GD10-03

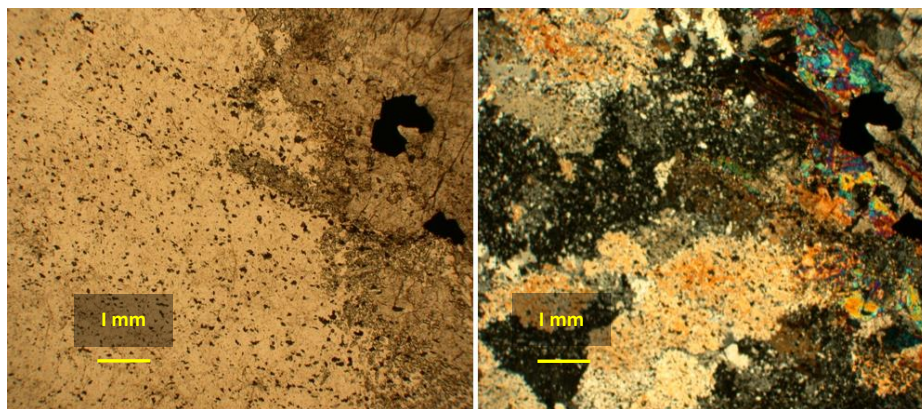


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca intermedia de textura porfídica y ofídica con cristales de feldespato K con inclusiones en una matriz fina, los cristales de feldespato son subhedrales y tabulados, presentando una alteración en el centro de ellos, las plagioclasas también se observan inclusiones estas de forma euhedrales en cristales pequeños presentando la macla de la albita, entre los minerales accesorios observamos esfena y apatitos, cuarzo se presenta ocasionalmente, con minerales de biotita, hornblenda y minerales opacos de los sulfuros de hierro, roca descrita como **andesita**.

### GD10-04

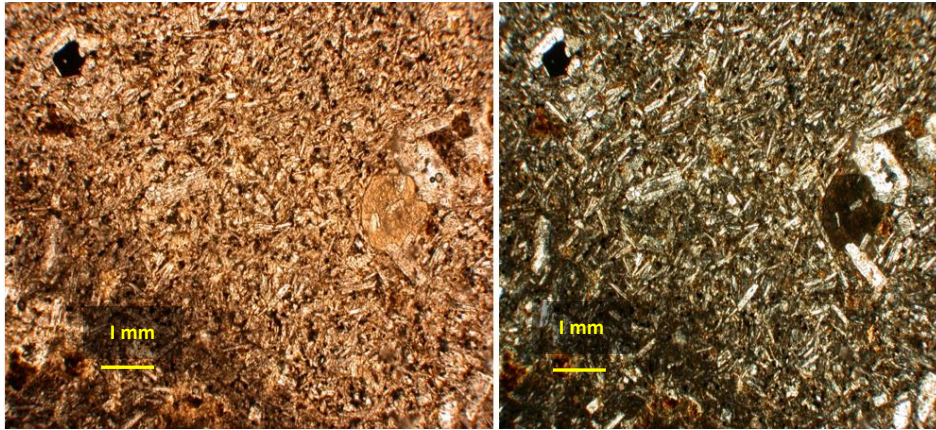


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca sedimentaria con granos de cuarzo subhedrales y con bordes suredondeados, con inclusiones de esfena y apatitos, se observan cristales de calcita, ocasionalmente plagioclasas, minerales tabulares con alineaciones concéntricas probable tremolita de alto relieve y buen clivaje en una dirección. Se presentan cristales de cuarzo con una variación de tamaño muy marcada, con cristales alineados, descripción de roca **arenisca de grano fino a medio**.

### GD10-05

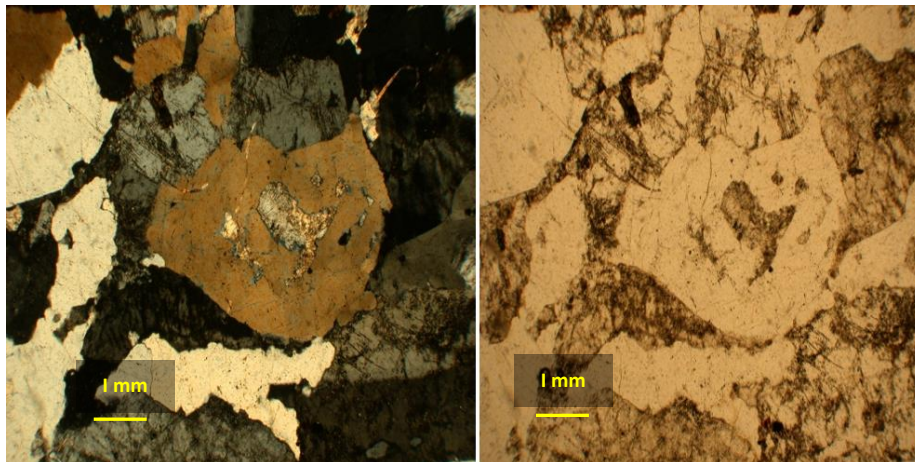


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca volcánica con matriz de grano fino cuarzo feldespática, rodeando a cristales tabulares de plagioclasas, y fenocristales de hornblenda, presenta una textura fluidal, con fractura miento posterior o secundario a la deposición, rellenas de mineral de cuarzo, la hornblenda se observa una alteración y la matriz se introduce haciendo un reemplazamiento, plagioclasas se observa un zoneamiento de crecimiento, además de encontrarse con minerales opacos, probable sulfuro de hierro, presenta también minerales esferulíticos, de color café amarillento, rodeando a cristales de cuarzo, roca descrita como **andesita**

### GD10-06



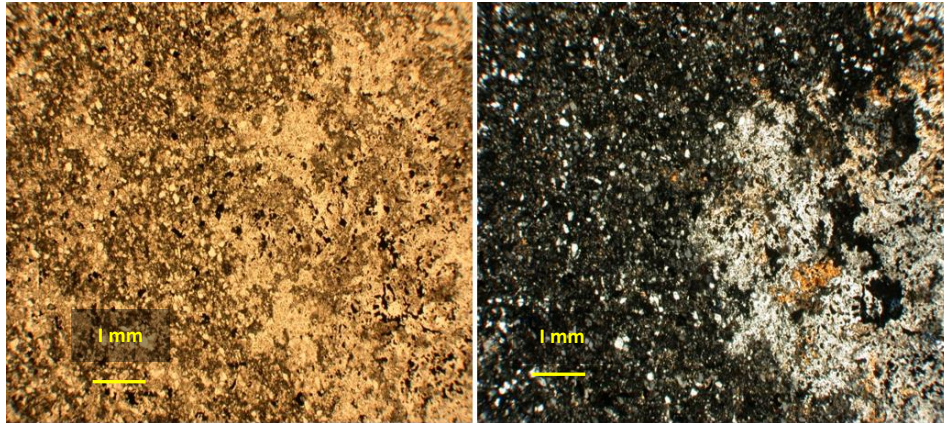
A Luz natural

B Luz polarizada

Roca de origen ígneo, con una textura hipidiomórfica granular, con minerales primarios de cuarzo en forma anhedral y subhedral, se observan minerales de feldespatos K y plagioclasas, minerales opacos escasos a nulos, sulfuros de hierro, roca descrita como **granito alcalino de grano grueso**.



## GD10-08

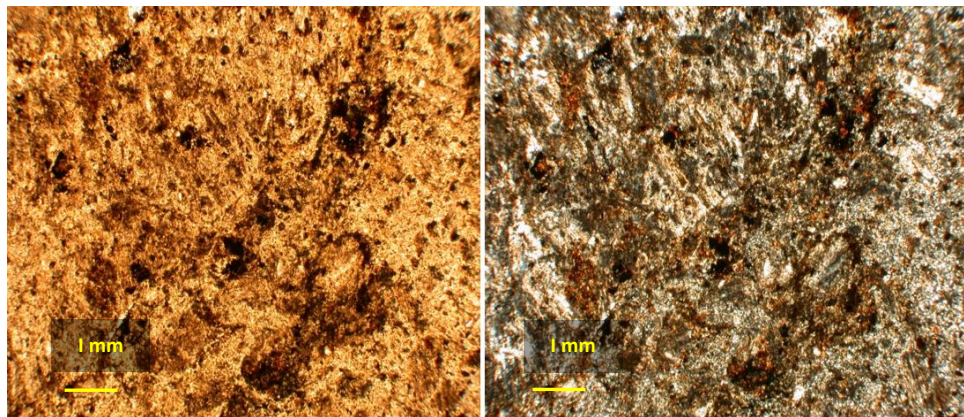


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca sedimentaria con cristales de grano fino de cuarzo anhedral y subhedral, feldespatos K de forma anhedral con inclusiones de plagioclasas, se observan además esqueletos de epidota por producto de la alteración, minerales opacos de sulfuros de fierro, roca descrita como **arenisca de grano fino**.

## GD10-13



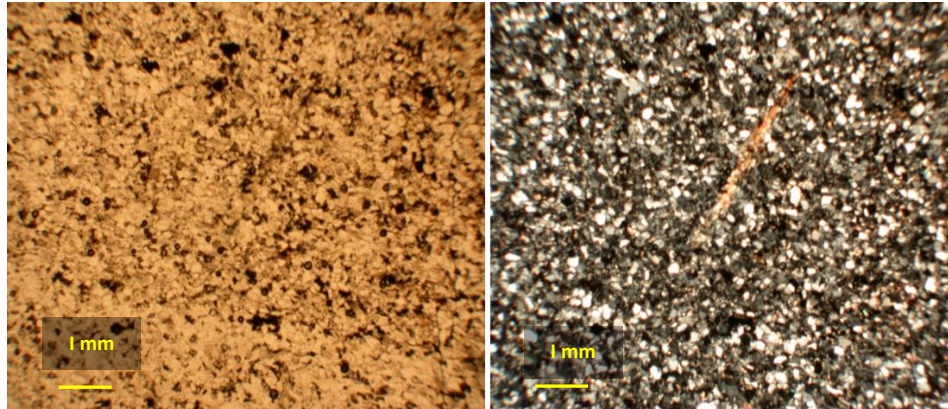
A Luz natural

B Luz polarizada

Roca volcánica intermedia con textura porfídica, los cristales de plagioclasas predominando rodeados de una matriz fina cuarzo feldespática, cristales de feldespato K y en menor cantidad minerales de cuarzo, se observa fenocristales de hornblenda los minerales opacos como óxidos de hierro relleno de fracturas, minerales accesorios como el apatito y el zircón, roca descrita como **andesita porfídica**.



## GD10-14

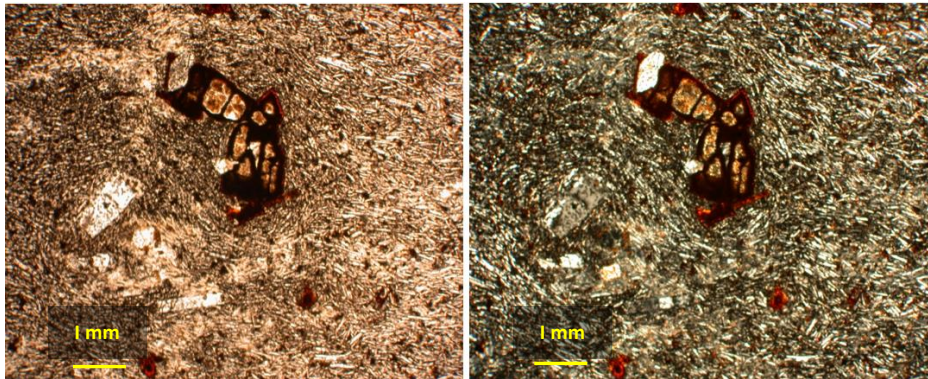


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca sedimentaria con cristales de cuarzo anhedrales y subhedrales además de presentar granos inmaduros de forma angulosa, y con feldespatos k con fuerte alteración, se observan esqueletos de rocas reemplazadas y probables minerales de hornblenda minerales de óxidos de hierro y se identifica pequeños cristales de cuarzo y material arcilloso como cementante, roca descrita como **arenisca feldespática**.

## GD10-16

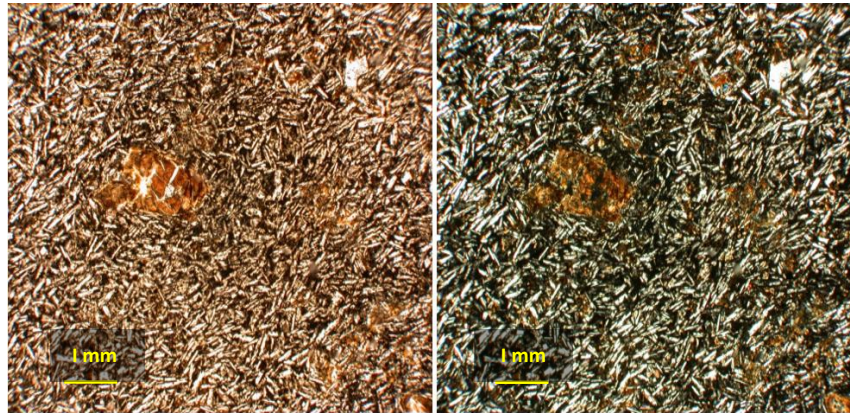


A Luz natural

B Luz polarizada

Roca volcánica, presentando una matriz de grano fino con cristales tabulares de plagioclasas, rodeando a fenocristales de piroxenos (ortopiroxenos) y fenocristales de feldespatos K, se observa minerales de olivino iddingsita, roca descrita como **basalto**.

GD10-17



A Luz natural

B Luz polarizada

Roca volcánica con textura porfídica con una matriz de feldespatos plagioclasa rodeando a fenocristales de olivino, roca volcánica, con pequeños cristales de plagioclasas minerales de olivino presentando una alteración moderada, se observan minerales de óxidos de hierro y ocasionalmente feldespatos K, roca descrita como **basalto**.

**Anexo 3.- Tabla de resultados de análisis de los elementos (Geoquímica) del área La Cuesta de Fierro.**

DESCRIPCION ELEMENTO	MUESTRAS							
	GD10-5	GD10-9	GD10-10	GD10-11	GD10-12	GD10-15	GD10-16	GD10-19
Ag	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba	1280	542	879	1365	833	859	1265	953
Ce	45,2	46,3	35,7	63,5	67,6	63,1	78,6	55,8
Co	14,2	16,6	6	10,2	13,2	16,9	18,6	1,6
Cr	10	50	10	50	10	20	60	<10
Cs	2,06	4,09	4,38	6,47	6,3	5,83	4,42	1,73
Cu	22	221	17	7	12	37	26	<5
Dy	2,78	3,03	2,84	3,2	3,96	3,77	4,66	1,97
Er	1,47	1,59	1,59	1,65	1,93	1,83	2,36	1,1
Eu	1,11	1,26	0,87	1,63	1,14	1,23	1,74	0,55
Ga	20,4	20,9	17,7	19,6	19,5	21	20,1	16,3
Gd	3,16	3,26	2,84	3,76	4,28	4,33	5,16	2,19
Hf	4	3,5	4,5	4,9	6,2	5,9	6,8	3,4
Ho	0,54	0,58	0,57	0,6	0,74	0,71	0,88	0,39
La	24	22,7	19	33,5	35,3	32,3	43	31,9
Lu	0,23	0,25	0,27	0,28	0,3	0,29	0,37	0,2
Mo	2	2	2	2	2	2	3	<2
Nb	7,1	7,8	10,3	13	10,8	10,3	19,8	10,3
Nd	19,9	21	14,8	27,5	27,9	27,2	35,1	18,3
Ni	11	31	8	8	8	11	34	<5
Pb	16	10	10	<5	13	8	12	9
Pr	5,33	5,68	4,18	7,55	7,89	7,45	9,64	5,84
Rb	82,7	79,6	138	111	180,5	148	61,3	138
Sm	3,92	4,18	3,32	5,17	5,45	5,34	6,94	3,17
Sn	1	3	2	1	2	2	2	1
Sr	596	505	376	548	405	483	642	222
Ta	0,5	0,5	1,3	0,9	1,1	0,9	1,2	1
Tb	0,46	0,5	0,43	0,51	0,65	0,61	0,75	0,32
Th	3,29	5,99	22,3	6,89	29,5	21,3	5,25	13,9
Tl	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Tm	0,23	0,25	0,26	0,26	0,29	0,28	0,35	0,19
U	1	3,56	4,61	2,71	9,64	7,11	1,67	2,8
V	120	184	73	109	109	138	140	14
W	2	2	2	2	3	2	2	1
Y	14,1	15,6	16,2	15,7	20,3	18,8	23,2	11,7
Yb	1,36	1,42	1,54	1,55	1,88	1,67	2,2	1,19
Zn	69	81	46	50	71	62	86	18
Zr	146	133	150	192	219	224	282	117



Anexo 4 A.- Tabla de Resultados de los análisis de zircones por el método U/Pb para la muestra GD10-10.

	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>			CORRECTED AGES (Ma)															
	U (ppm) <sup>2</sup>	Th (ppm) <sup>2</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb ±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb ±2σ	Best age (Ma) ±2σ		Disc %						
<b>GD 1010</b>																			
GD1010_1	239	132	0,6	0,068	0,011	0,088	0,016	0,0098	4E-04	0,07578	62,7	3	85	15	960	180	62,7	2,5	26,2
GD1010_2	243	148	0,6	0,071	0,012	0,096	0,019	0,0102	3E-04	0,14383	65,2	2	93	17	900	260	65,2	2,1	29,9
GD1010_3	274	199	0,7	0,0522	0,009	0,068	0,013	0,0097	3E-04	0,15638	62,3	2	67	12	690	170	62,3	1,9	7,0
GD1010_4	409	188	0,5	0,0543	0,009	0,068	0,012	0,0094	3E-04	0,15607	60,6	2	67	11	480	180	60,6	1,7	9,6
GD1010_5	1108	470	0,4	0,0469	0,006	0,071	0,011	0,011	2E-04	0,11732	70,5	4	70	10	230	160	70,5	1,4	-0,7
GD1010_6	368	203	0,6	0,0621	0,009	0,078	0,013	0,0092	2E-04	0,15669	59	2	76	12	730	200	59,0	1,5	22,4
GD1010_7	506	288	0,6	0,0479	0,007	0,061	0,01	0,0092	3E-04	0,08456	59,2	2	59,9	9,6	320	150	59,2	1,7	1,2
GD1010_8	266	144	0,5	0,0515	0,01	0,065	0,013	0,0098	4E-04	0,18955	62,6	2	64	12	530	170	62,6	2,4	2,2
GD1010_9	231	143	0,6	0,056	0,012	0,065	0,015	0,0092	4E-04	0,19291	59,1	3	64	14	740	190	59,1	2,6	7,7
GD1010_1	279	156	0,6	0,064	0,01	0,079	0,014	0,0096	3E-04	0,09232	61,7	2	79	13	850	210	61,7	2,0	21,9
GD1010_1	243	144	0,6	0,0524	0,009	0,067	0,013	0,0095	3E-04	0,1415	60,8	2	66	12	670	240	60,8	1,7	7,9
GD1010_1	418	285	0,7	0,09	0,013	0,108	0,018	0,0086	3E-04	0,32075	55	2	104	16	1410	220	55,0	1,6	47,1
GD1010_1	306	189	0,6	0,0544	0,01	0,069	0,013	0,0094	3E-04	0,19588	60	2	67	13	500	170	60,0	2,0	10,4
GD1010_1	254	174	0,7	0,0518	0,009	0,068	0,013	0,0095	3E-04	0,17087	60,9	2	66	12	610	200	60,9	2,0	7,7
GD1010_1	577	390	0,7	0,053	0,008	0,066	0,011	0,0096	2E-04	0,15047	61,4	2	65	11	330	120	61,4	1,5	5,5
GD1010_1	584	352	0,6	0,0535	0,008	0,067	0,012	0,0092	3E-04	0,16954	59,1	2	66	12	450	210	59,1	1,9	10,5
GD1010_1	1821	1371	0,8	0,0485	0,007	0,08	0,014	0,0121	4E-04	0,0729	77,5	2	78	13	220	150	77,5	2,3	0,6
GD1010_1	306	191	0,6	0,0488	0,008	0,062	0,011	0,0093	3E-04	0,16951	59,7	2	61	11	310	210	59,7	1,8	2,1
GD1010_1	530	308	0,6	0,0649	0,009	0,081	0,014	0,0094	2E-04	0,16958	60,4	2	79	13	710	210	60,4	1,6	23,5
GD1010_2	428	88	0,2	0,0597	0,009	0,078	0,013	0,0094	3E-04	0,03892	60	2	76	12	740	180	60,0	1,8	21,1
GD1010_2	308	183	0,6	0,049	0,008	0,064	0,012	0,0095	3E-04	0,0301	61,1	2	63	11	310	190	61,1	1,7	3,0
GD1010_2	343	259	0,8	0,0523	0,008	0,068	0,012	0,0094	3E-04	0,1564	60,4	2	67	11	510	130	60,4	1,7	9,9
GD1010_2	895	357	0,4	0,0472	0,007	0,079	0,013	0,0119	3E-04	0,29388	76,5	2	77	12	240	120	76,5	2,1	0,6
GD1010_2	599	565	0,9	0,0479	0,008	0,061	0,01	0,0092	2E-04	0,15283	58,9	2	60,4	9,8	230	200	58,9	1,5	2,5
GD1010_2	281	176	0,6	0,0536	0,009	0,067	0,012	0,0091	3E-04	0,17832	58,2	2	66	11	470	150	58,2	1,8	11,8
GD1010_2	344	211	0,6	0,0498	0,008	0,064	0,012	0,0094	3E-04	0,1423	60,1	2	63	11	500	160	60,1	1,6	4,6
GD1010_2	1909	204	0,1	0,0483	0,006	0,0608	0,009	0,0091	2E-04	0,1359	58,6	1	59,9	8,9	240	150	58,6	1,2	2,2
GD1010_2	348	232	0,7	0,0502	0,008	0,064	0,011	0,0092	3E-04	0,184	58,8	2	62	10	480	170	58,8	1,8	5,2
GD1010_2	550	318	0,6	0,062	0,012	0,085	0,019	0,0097	3E-04	0,12491	62	2	82	17	710	240	62,0	1,7	24,4
GD1010_3	319	213	0,7	0,114	0,019	0,157	0,03	0,0098	3E-04	0,00649	62,8	2	147	26	1870	170	62,8	2,1	57,3
GD1010_3	785	378	0,5	0,076	0,014	0,115	0,029	0,011	3E-04	0,11515	70,6	2	111	24	1050	240	70,6	2,0	36,4
GD1010_3	1071	530	0,5	0,101	0,013	0,168	0,025	0,0121	3E-04	0,17086	77,5	2	157	22	1650	220	77,5	1,9	50,6
GD1010_3	274	183	0,7	0,0625	0,01	0,08	0,015	0,0094	3E-04	0,16507	60,1	2	78	14	670	220	60,1	1,9	22,9
GD1010_3	241	167	0,7	0,0521	0,009	0,065	0,013	0,0093	3E-04	0,21961	59,7	2	64	12	530	150	59,7	1,9	6,7
GD1010_3	287	205	0,7	0,0495	0,008	0,06	0,01	0,0093	3E-04	0,15577	59,8	2	59	10	310	140	59,8	1,8	-1,4



Anexo 4 B.- Tabla de Resultados de los análisis de zircones por el método U/Pb para la muestra GD12-23.

				CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>							CORRECTED AGES (Ma)							Disc %	
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb ±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U ±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb ±2σ	Best age (Ma)	±2σ							
<b>GD 1023</b>																			
GD1223_1	1959	553	0,3	0,0486	0,0064	0,074	0,012	0,01108	0,00028	0,156118143	70,9	1,8	72	11	220	160	70,9	1,8	1,5
GD1223_2	423	210	0,5	0,0559	0,0079	0,086	0,014	0,01135	0,00027	0,146129641	72,7	1,7	84	13	570	150	72,7	1,7	13,5
GD1223_3	991	656	0,7	0,0501	0,0071	0,075	0,012	0,01103	0,00023	0,130326383	70,7	1,5	73	11	290	150	70,7	1,5	3,2
GD1223_4	228	124	0,5	0,0531	0,0092	0,078	0,014	0,01115	0,00039	0,19487508	71,5	2,5	76	14	590	160	71,5	2,5	5,9
GD1223_5	793	304	0,4	0,088	0,012	0,134	0,022	0,01124	0,00031	0,49867	72,4	2	128	19	1390	200	72,1	2,0	43,7
GD1223_6	786	431	0,5	0,0507	0,007	0,087	0,014	0,01229	0,00027	0,076793	78,8	1,7	84	13	280	140	78,8	1,7	6,2
GD1223_7	1612	1727	1,1	0,0488	0,0064	0,074	0,011	0,01113	0,00023	0,15277	71,3	1,5	73	11	190	150	71,3	1,5	2,3
GD1223_8	1520	932	0,6	0,0487	0,0069	0,076	0,013	0,01134	0,00029	0,47942	72,7	1,8	75	12	320	120	72,7	1,8	3,1
GD1223_9	882	772	0,9	0,0507	0,0072	0,075	0,013	0,01095	0,00028	0,066479	70,2	1,8	74	12	350	170	70,2	1,8	5,1
GD1223_10	1273	731	0,6	0,0507	0,0073	0,075	0,013	0,0109	0,00024	0,10508	69,9	1,5	73	12	310	230	69,9	1,5	4,2
GD1223_11	1344	817	0,6	0,0498	0,0071	0,076	0,012	0,01125	0,00026	0,068966	72,1	1,7	75	12	230	120	72,1	1,7	3,9
GD1223_12	2643	1344	0,5	0,0488	0,0065	0,073	0,011	0,01104	0,00023	0,035197	70,8	1,5	71	11	140	240	70,8	1,5	0,3
GD1223_13	3389	1978	0,6	0,0494	0,0067	0,088	0,014	0,01304	0,0003	0,75527	83,5	1,9	86	13	330	200	83,5	1,9	2,9
GD1223_14	1421	723	0,5	0,0497	0,0065	0,079	0,012	0,01191	0,00027	0,25454	76,3	1,7	77	11	230	160	76,3	1,7	0,9
GD1223_15	1892	1851	1,0	0,0484	0,0061	0,075	0,011	0,01143	0,00025	0,149129086	73,3	1,6	74	10	180	120	73,3	1,6	0,9
GD1223_16	779	389	0,5	0,0468	0,0064	0,073	0,012	0,01133	0,00027	0,067441	72,6	1,7	71	11	190	120	72,6	1,7	-2,3
GD1223_17	1405	1364	1,0	0,05	0,012	0,08	0,025	0,01172	0,00043	0,22117	75,1	2,8	78	22	330	330	75,1	2,8	3,7
GD1223_18	1600	817	0,5	0,0467	0,0061	0,074	0,011	0,01128	0,00025	0,19339	72,3	1,6	72	11	160	150	72,3	1,6	-0,4
GD1223_19	784	570	0,7	0,0477	0,0066	0,079	0,013	0,01172	0,00027	0,050047	75,1	1,7	77	12	230	140	75,1	1,7	2,5
GD1223_20	1627	794	0,5	0,0482	0,0065	0,076	0,012	0,01129	0,00027	0,15146147	72,4	1,7	74	11	240	140	72,4	1,7	2,2
GD1223_21	1359	909	0,7	0,0471	0,0063	0,075	0,011	0,01124	0,00025	0,151649951	72,1	1,6	74	11	220	170	72,1	1,6	2,6
GD1223_22	855	314	0,4	0,0479	0,0081	0,075	0,015	0,01111	0,00026	0,30793	71,2	1,7	73	14	280	180	71,2	1,7	2,5
GD1223_23	1448	3477	2,4	0,0487	0,0076	0,076	0,014	0,01114	0,00029	0,45036	71,4	1,9	74	13	310	190	71,4	1,9	3,5
GD1223_24	1530	686	0,4	0,048	0,0068	0,076	0,012	0,01114	0,00026	0,144444444	73,1	1,7	74	11	260	170	73,1	1,7	1,2
GD1223_25	803	10127	12,6	0,078	0,01	0,123	0,019	0,01155	0,00028	0,24372	74	4,8	118	18	1180	170	74,0	1,8	37,3
GD1223_26	458	168	0,4	0,0539	0,008	0,091	0,015	0,01222	0,00037	0,10896	78,3	2,4	88	14	390	120	78,3	2,4	11,0
GD1223_27	879	623	0,7	0,0493	0,0066	0,076	0,012	0,01131	0,0003	0,17202	72,5	1,9	74	11	210	130	72,5	1,9	2,0
GD1223_28	1294	622	0,5	0,0484	0,0063	0,076	0,011	0,01138	0,00026	0,157852692	72,9	1,6	74	11	320	170	72,9	1,6	1,5
GD1223_29	1180	506	0,4	0,0481	0,0062	0,074	0,011	0,01131	0,00028	0,166546098	72,5	1,8	73	10	270	140	72,5	1,8	0,7
GD1223_30	3491	2710	0,8	0,0492	0,0069	0,078	0,012	0,01166	0,00034	0,189536878	74,7	2,1	77	12	190	200	74,7	2,1	3,0
GD1223_31	1071	634	0,6	0,0481	0,0063	0,072	0,011	0,01084	0,00028	0,062191	69,5	1,8	70	10	250	200	69,5	1,8	0,7
GD1223_32	1615	852	0,5	0,0483	0,0062	0,073	0,011	0,01105	0,00026	0,4355	70,8	1,6	72	10	190	160	70,8	1,6	1,7
GD1223_33	1243	797	0,6	0,0496	0,0068	0,075	0,012	0,01102	0,00024	0,051036	70,6	1,5	74	11	300	110	70,6	1,5	4,6
GD1223_34	3095	915	0,3	0,049	0,0067	0,073	0,012	0,01092	0,00024	0,4609	70	1,5	71	11	390	360	70,0	1,5	1,4
GD1223_35	2376	2473	1,0	0,0489	0,0059	0,072	0,01	0,01123	0,00025	0,160284951	72	1,6	70,5	9,9	90	110	72,0	1,6	-2,1

1: U and Th concentrations are calculated employing an external standard zircon as in Paton et al., 2010, Geochemistry, Geophysics, Geosystems.

2: 2 sigma uncertainties propagated according to Paton et al., 2010, Geochemistry, Geophysics, Geosystems

<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb ratios, ages and errors are calculated according to Petrus and Kamber, 2012, Geostandards Geoanalytical Research

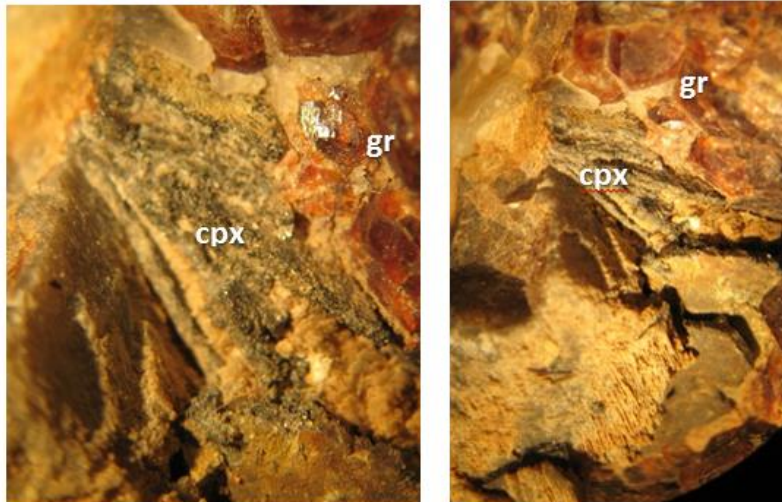
Analyzed spots were 23 micrometers, using an analytical protocol modified from Solari et al., 2010, Geostandards Geoanalytical Research.

Data measured employing a Thermo Xseries QICPMS coupled to a Resonetics, Resolution M050 excimer laser workstation.

**Anexo 5.- Microscopio de barrido electrónico donde se realizaron los análisis de las muestras de granate para la realización de tablas y gráficos.**



Vista general del microscopio de barrido electrónico.



Mineral de piroxeno (diópsido), con granates andradita, muestra observada en microscopio mineragráfico, muestra de mano.



A: Análisis de granates en el microscopio de barrido electrónico.

Tabla de resultados de análisis de la muestra 1A– 1B

GRANATES 1 A					GRANATE 1 B				
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al	5.47	4.91	10.33	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	5.22	4.68	9.86	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si	18.45	15.92	39.48	SiO <sub>2</sub>	Si	18.73	16.15	40.06	SiO <sub>2</sub>
Ca	23.05	13.93	32.25	CaO	Ca	22.91	13.84	32.06	CaO
Fe	13.95	6.05	17.94	FeO	Mn	0.25	0.11	0.32	MnO
O	39.08	59.19			Fe	13.76	5.97	17.70	FeO
Totals	100.00				O	39.14	59.25		
					Totals	100.00			

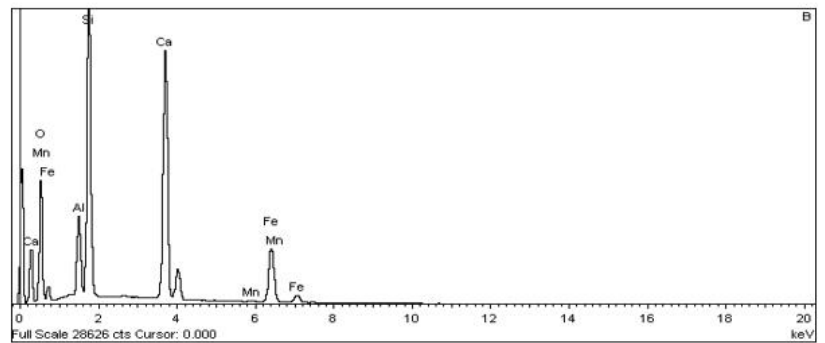
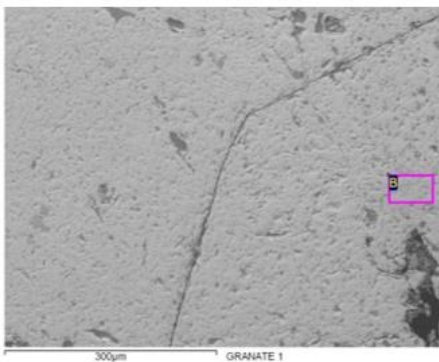
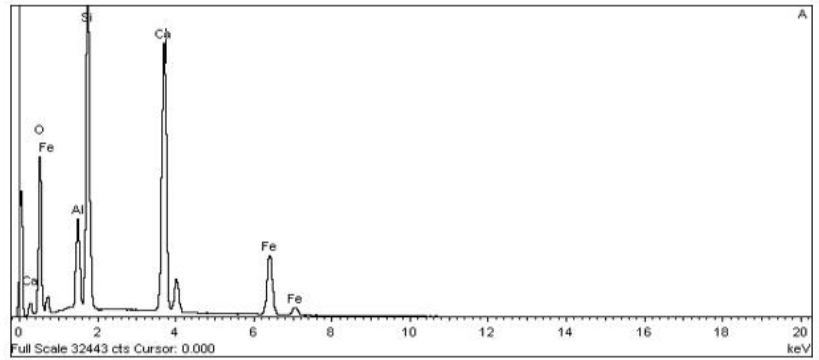
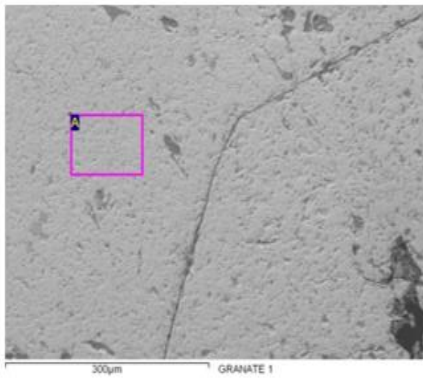


Tabla de resultados del análisis en el microscopio de barrido electrónico y gráficos de granates del skarn El Potrerito, recuadro en rojo en la fotografía punto de análisis y gráficos de resultados.

## Análisis de granates en el microscopio de barrido electrónico

Tabla de resultados de análisis de la muestra 1C- 1D

GRANATE 1 C					GRANATE 1 D				
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al	2.50	2.31	4.72	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	3.99	3.63	7.54	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si	18.55	16.48	39.67	SiO <sub>2</sub>	Si	18.71	16.34	40.03	SiO <sub>2</sub>
Ca	22.39	13.94	31.32	CaO	Ca	22.66	13.87	31.71	CaO
Fe	18.87	8.44	24.28	FeO	Fe	16.11	7.08	20.72	FeO
O	37.70	58.82			O	38.53	59.08		
Totals	100.00				Totals	100.00			

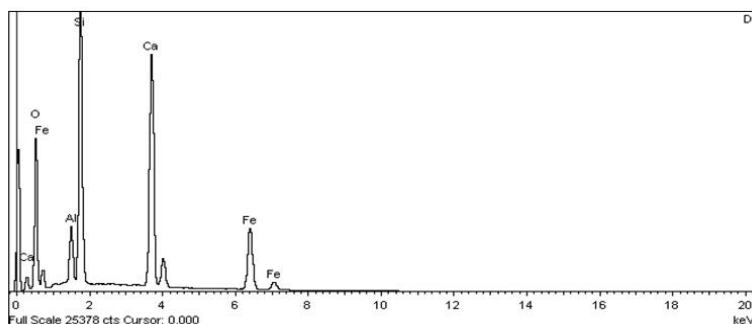
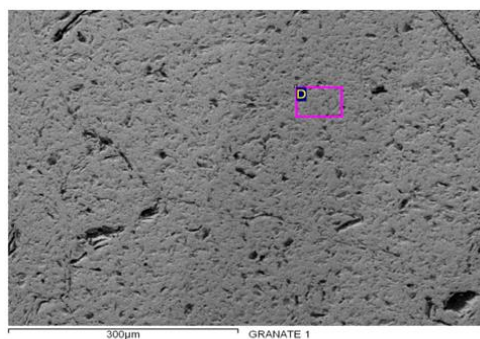
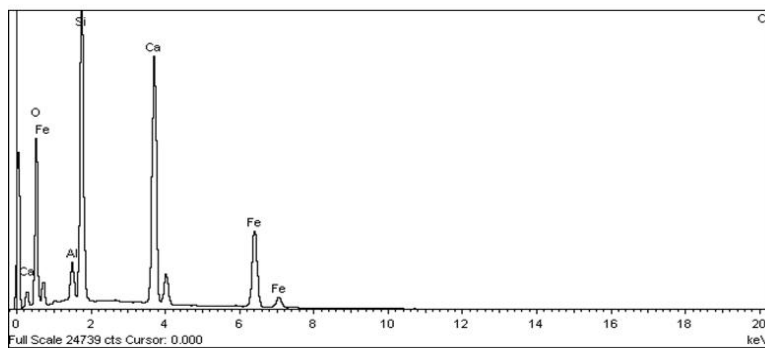
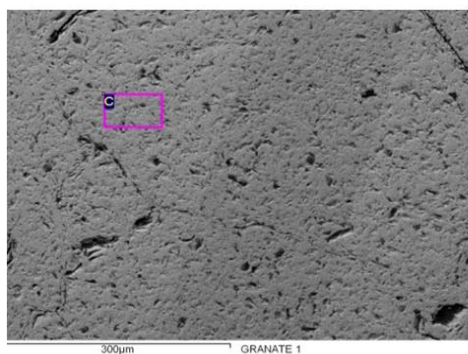


Tabla de resultados del análisis en el microscopio de barrido electrónico de granates del skarn El Potrerito, recuadro en rojo análisis del mineral en la fotografía, y gráficos del análisis.

# Análisis de granates en el microscopio de barrido electrónico

Tabla de resultados de análisis de la muestra 2A– 2B

GRANATE 2 A					GRANATE 2 B				
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al	3.92	3.58	7.40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	4.22	3.83	7.98	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si	18.20	15.97	38.94	SiO <sub>2</sub>	Si	18.54	16.16	39.67	SiO <sub>2</sub>
Ca	23.58	14.50	33.00	CaO	Ca	23.37	14.27	32.70	CaO
Fe	16.06	7.09	20.66	FeO	Fe	15.28	6.70	19.65	FeO
O	38.24	58.88			O	38.59	59.04		
Totals	100.00				Totals	100.00			

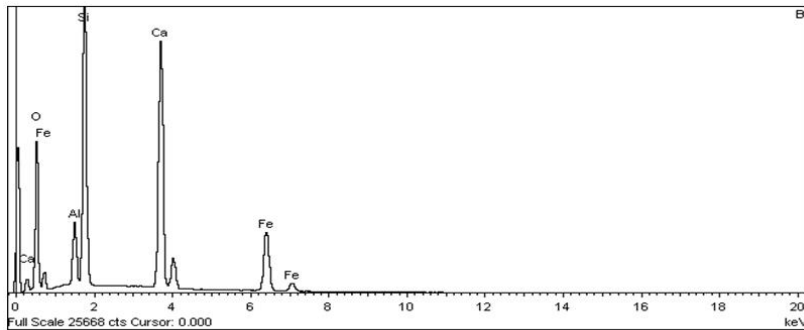
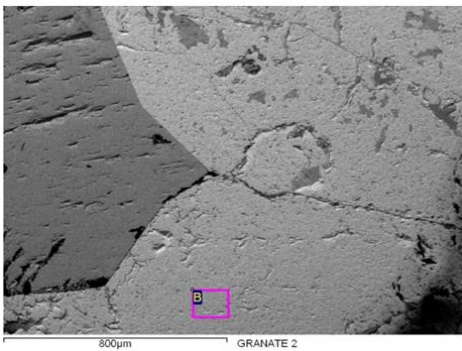
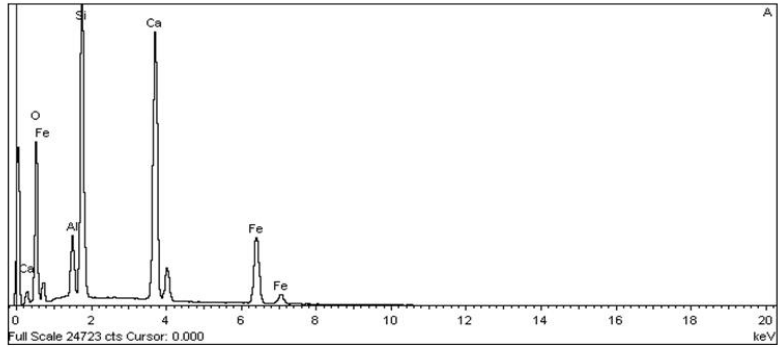
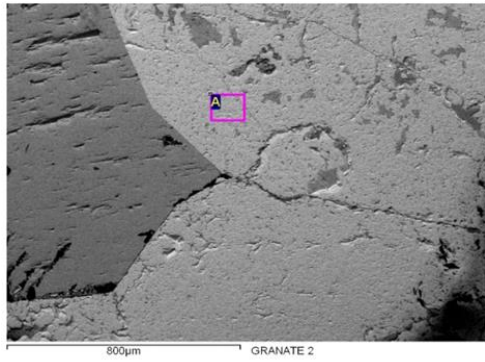


Tabla de resultados del análisis en el microscopio de barrido electrónico de granates del skarn El Potrerito, cuadro en rojo en fotografía punto de análisis, y gráficos del análisis.