



UNIVERSIDAD DE SONORA



**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**“GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ARENISCAS DE
LA FORMACIÓN CINTURA DEL GRUPO BISBEE, SONORA,
MÉXICO”**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA

PRESENTA:

SAIRA ALHELY PACHECO OLIVAS

**DIRECTOR: DR. MADHAVARAJU JAYAGOPAL
CO-DIRECTOR: DR. GUADALUPE INOCENTE ESPINOZA**



HERMOSILLO, SON.

ENERO, 20



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

ÍNDICE

<i>Lista de figuras</i>	<i>i</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>x</i>
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Antecedentes	5
1.4 Justificación	7
1.5 Localización y vías de acceso.....	8
1.6 Metodología	9
1.6.1 Trabajo de campo	9
1.6.2 Trabajo analítico	11
1.6.2.1 Análisis petrográfico	11
1.6.2.2 Análisis geoquímico	14

1.6.2.3 Análisis geocronológico.....	17
CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA	21
2.1 Cuenca Bisbee.....	21
2.1.1 Grupo Bisbee	23
2.1.1.1 Conglomerado Glance	25
2.1.1.2 Formación Morita	27
2.1.1.3 Caliza Mural	29
2.1.1.3 Formación Cintura.....	31
2.2 Estratigrafía del área de estudio	32
2.2.1 Formación Cintura	32
2.2.1.1 Miembro Marquechi.....	35
2.1.1.2 Miembro San Marcos	37
2.1.1.3 Miembro San Juan	41
CAPÍTULO 3. PETROGRAFÍA.....	44
3.1 Introducción	44
3.2 Resultados	45

3.2.1 Descripción petrográfica	45
3.2.1.1 Miembro Marquechi.....	46
3.2.1.2 Miembro San Marcos	48
3.2.1.3 Miembro San Juan	50
3.3 Clasificación de areniscas.....	51
3.4 Procedencia de areniscas.....	55
3.5 Discusión	57
CAPÍTULO 4. GEOQUÍMICA	59
4.1 Introducción	59
4.2 Resultados	59
4.2.1 Elementos de óxidos mayores.....	59
4.2.1.1 Clasificación de la roca	61
4.2.2 Elementos traza	63
4.2.2.1 Elementos de tierras raras (REE).....	66
4.3 Discusiones.....	67
4.3.1 Intemperismo	67

4.3.2 Marco tectónico.....	71
4.3.3 Procedencia.....	79
CAPÍTULO 5. GEOCROLOGÍA	90
5.1 Introducción	90
5.2 Resultados	92
5.2.1 Geocronología en circones	92
5.2.1.1 Miembro Marquechi.....	92
5.2.1.2 Miembro San Marcos	95
5.2.1.3 Miembro San Juan	98
5.2.2 Geoquímica en circones	100
5.2.2.1 Elementos traza y tierras raras (REE).....	100
5.2.2.1.1 Miembro Marquechi	101
5.2.2.1.2 Miembro San Marcos.....	105
5.2.2.1.3 Miembro San Juan.....	109
5.3 Edad máxima de la Formación Cintura	114
5.4 Procedencia de los circones detríticos.....	114

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	119
REFERENCIAS	124

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

Figura 2. Microscopio vertical de polarización LEICA DM750 P del Departamento de Geología, Universidad de Sonora.

Figura 3. A. Trituradora BRAUN CHIPMUNK VD67, **B.** Pulverizadora HERZOG, **C.** Tamiz con las mallas no 50, 100 y 170, y **D.** Limpiador ultrasónico Cole-Parmer 8894 (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM, Hermosillo, Sonora).

Figura 4. A. Trituradora BRAUN CHIPMUNK VD67, y **B.** Pulverizador BICO ING. UA53 (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM).

Figura 5. A. Mesa de concentración gravimétrica Wifley, **B.** Separador magnético isodinámico Frantz, y **C.** Descarga de material magnético del lado izquierdo y del lado derecho el material diamagnético (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM).

Figura 6. Distribución paleogeográfica de la Cuenca Bisbee durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano en el suroeste de Arizona y noroeste de Sonora. Modificado de González-León *et al.* (2008).

Figura 7. Columna estratigráfica de las 4 Formaciones representativas del Grupo Bisbee, de la base a la cima: Conglomerado Glance, Formación Morita, Caliza Mural, Formación Cintura. Modificado de Ramírez-Montoya (2014).

Figura 8. Afloramiento del Conglomerado Glance en el área del Rancho El Sifón, al oeste de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

Figura 9. Afloramiento de la Formación Morita en el área del Rancho El Sifón, al oeste de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

Figura 10. Afloramiento de la Formación Caliza Mural con orbitolinas en el cerro La Muela, al norte de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

Figura 11. Alternancia de areniscas y lutitas en secuencias granodecrecientes de la Formación Cintura en el área del rancho Las Avispas al sur de la Sierra La Ceniza. Viendo al SE. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

Figura 12. Columna estratigráfica de la Formación Cintura, teniendo en la base al Miembro Marquechi, seguido del Miembro San Marcos y en la cima al Miembro San Juan.

Figura 13. Mapa geológico del área de estudio.

Figura 14. A. Afloramiento de la base del Miembro Marquechi, y **B.** Afloramiento de arenisca conglomerática en el área de Cabullona, Sonora.

Figura 15. A. Afloramiento de areniscas del Miembro Marquechi del área de Cabullona, **B.** Arenisca con laminaciones de material orgánico y bioturbación, y **C.** Arenisca con estratificación cruzada, pertenecientes al Miembro Marquechi.

Figura 16. Afloramiento de la secuencia granodecreciente de areniscas y lutitas de la base del Miembro San Marcos, Cabullona, Sonora.

Figura 17. A. Afloramiento de la secuencia grano decreciente de areniscas con coloraciones gris verde-amarillento de la parte media del Miembro San Marcos, y **B.** Intraclastos (*rip-up*).

Figura 18. A. Intercalación de lutitas de coloraciones rojizas-purpuras, **B.** Afloramiento de arenisca conglomerática, y **C.** Lente de conglomerado, de la parte media del miembro San Marcos, en el área de Cabullona, Sonora.

Figura 19. A. Tronco silicificado ubicado en el área de Cabullona, Sonora., y **B.** Arenisca con estratificación cruzada perteneciente al Miembro San Marcos.

Figura 20. A. Afloramiento de areniscas pertenecientes la parte media inferior del Miembro San Juan, **B.** Afloramiento de areniscas con posibles bivalvos erosionados, y **C.** Muestra de arenisca de grano grueso con bivalvos y pelecípodos, en el área de Cabullona, Sonora.

Figura 21. A. Afloramiento de areniscas y lutitas, **B.** Nódulos calcáreos y **C.** Troncos silicificados de la parte superior del miembro San Juan, en el área de Cabullona, Sonora.

Figura 22. Fragmentos de roca (Lt), cuarzo mono y policristalino (Qm-Qp), y algunos feldespatos (F) alterados principalmente a arcillas y sericita. Como accesorios se tienen óxidos de Fe. La calcita (C) se presenta como cementante. **A.** Luz natural, y **B.** Luz polarizada.

Figura 23. Presencia de glauconita (G) en areniscas del miembro Marquechi a lo largo de una lámina donde se tienen óxidos de Fe.

Figura 24. Arenisca de grano grueso del miembro San Marcos. Presenta fragmentos de roca (Lt), feldespatos alterados a arcilla y sericita (F), y cuarzo mono y policristalino (Qm-Qp), algunos de éstos últimos con texturas internas metamórficas. **A.** Luz natural, y **B.** Luz polarizada.

Figura 25. Arenisca de grano grueso del miembro San Juan. Presenta una gran cantidad de fragmentos de roca (Lt), así como feldespatos alterados a arcilla y sericita (F), y Cuarzo monocristalino (Qm). La muscovita aparece como accesorio (Mu). **A.** Luz natural, y **B.** Luz polarizada.

Figura 26. Diagrama de clasificación (Folk, 1980) de las areniscas de los miembros Marquechi (círculos rojos), San Marcos (círculos azules) y San Juan (círculos amarillos) de la Formación Cintura (donde Qt: cuarzo total, Lt: fragmento lítico total y Ft: feldespato total).

Figura 27. Diagramas de procedencia de Dickinson et al. (1983) A. Qt-F-L, y B. Qm-F-Lt para las areniscas de la Formación Cintura. Qm: cuarzo monocristalino, L: fragmento lítico total, Qt: cuarzo total, Lt: fragmento lítico total y Ft: feldespato total.

Figura 28. Diagrama de clasificación geoquímico de las muestras de los miembros de la Formación Cintura recolectadas en el área de Cabullona, Sonora (En base al diagrama de Herron, 1988).

Figura 29. Diagrama de elementos traza **A.** Areniscas pertenecientes a la Formación Cintura normalizados con los valores de Corteza Continental Superior (UCC), tomados de Taylor y McLennan (1985) **B.** Lutitas.

Figura 30. Diagrama A-CN-K, muestra la tendencia de intemperismo químico de las muestras de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura (Nesbitt y Young, 1982), A: Al_2O_3 , CN: CaO^*+Na_2O y K: K_2O .

Figura 31. Diagrama Al_2O_3/SiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ de Bhatia (1983) de las muestras pertenecientes a la Formación Cintura para determinar el ambiente tectónico.

Figura 32. Diagrama TiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ de Bhatia (1983) de las muestras pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura para determinar el ambiente tectónico.

Figura 33. Diagrama Sc/Cr contra La/Y de Bhatia y Crook (1986) de las muestras pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura.

Figura 34. Diagrama de ambiente tectónico de Verma y Armstrong-Altrin (2013) de funciones discriminantes (Arc: Arco, Col: Colisión y Rift, de las muestras de los miembros de la Formación Cintura.

Figura 35. Diagrama de procedencia Hf contra La/Th de Floyd y Leveridge (1987). Donde **GPT**: granitoide permo-triásico, **RVFMC**: roca volcánica félsica mesozoica-cenozoica.

Figura 36. Diagrama La/Sc contra Co/Th Floyd y Leveridge (1987). Donde GPT: granitoide permo-triásico. Las areniscas se muestran representadas por círculos azules, mientras que las lutitas por triángulos verdes.

Figura 37. Diagrama de procedencia de Roser y Korsch (1988) de funciones discriminantes. Las muestras del miembro Marquechi se encuentran representadas por círculos, cuadrados para el miembro San Marcos y triángulos para el miembro San Juan.

Figura 38. Diagrama discriminante Ni contra TiO_2 de Floyd *et al.* (1989) de las muestras de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura.

Figura 39. Diagrama La/Sc contra Th/Co de Cullers (2002) de las muestras pertenecientes a la Formación Cintura.

Figura 40. Patrones de REE normalizados a condrita **A.** Areniscas de la Formación Cintura (utilizando los valores de McDonough y Sun, 1995) y **B.** Lutitas.

Figura 41. Comparación de REE normalizados con condrita; **GBN:** granitos Bloque Norteamérica, **GBC:** granitos Bloque Caborca, **GA:** granito Aibó, **EP:** Esquisto Pinal, **GM:** Granito Mesteñas, **GPT:** granito permo-triásico, **GJS:** granitos jurásicos de Sonora, **MJ:** Metariolita jurásica, **BMT:** Toba Black Mountain, **A.** areniscas y **B.** lutitas de la Formación Cintura.

Figura 42. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y **B.** Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi.

Figura 43. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y **B.** Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos.

Figura 44. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y **B.** Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-21 del miembro San Juan.

Figura 45. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro Marquechi (muestra CFS-07, n= 40), y **B.** Continuación de patrones de REE (n= 39).

Figura 46. Patrones de elementos de tierras raras atípicos de los circones detríticos de la muestra CFS-07, perteneciente al miembro Marquechi (n= 6).

Figura 47. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi.

Figura 48. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro San Marcos (muestra CFS-16, n= 27). **B.** Continuación de patrones de REE (n= 27).

Figura 49. Patrones de elementos de tierras raras atípicos de los circones detríticos de la muestra CFS-16, perteneciente al miembro San Marcos (n= 9).

Figura 50. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos.

Figura 51. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro San Juan (muestra CFS-21, n= 42). **B.** Continuación de patrones de REE (n= 42).

Figura 52. Patrones de elementos de tierras raras atípicos de los circones detríticos de la muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan (n= 16).

Figura 53. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-21 del miembro San Juan.

Lista de tablas

Tabla 1. Muestras de las rocas siliciclásticas de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona, Sonora.

Tabla 2. Lista de láminas delgadas pertenecientes a las areniscas de los miembros de la Formación Cintura.

Tabla 3. Índices de intemperismo químico, utilizados en este estudio.

Tabla 4. Muestras seleccionadas para el análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de la Formación Cintura, en el área de Cabullona.

Tabla 5. Conteo de los componentes principales de las areniscas de los miembros correspondientes a la Formación Cintura, colectadas en Cabullona, Sonora. **Qm:** cuarzo monocristalino, **Qp:** cuarzo policristalino, **P:** plagioclasa, **Fk:** feldespato potásico, **Fm:** microclina, **F:** feldespato **Lvf:** lítico volcánico felsítico, **Lvl:** lítico volcánico con textura tipo “lathwork”, **Lvm:** Lítico volcánico con textura microlítica, **Ls:** lítico sedimentario, **Lm:** lítico metamórfico, **Cem:** cementante, **Mtz:** matriz, **Ch:** pedernal, **MO:** minerales opacos.

Tabla 6. Datos recalculados en porcentaje de la roca total del análisis del conteo de puntos de las areniscas de la Formación Cintura, en el área de Cabullona. (**Qt:** cuarzo total, **F:** feldespato, **L:** lítico, **Qm:** cuarzo monocristalino, **Lt:** Lítico total).

Tabla 7. Concentración de elementos mayores de las lutitas de la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (% en peso).

Tabla 8. Concentraciones de elementos traza (ppm) de las lutitas de la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona.

Tabla 9. Concentraciones de los elementos de tierras raras (ppm) de las lutitas pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (datos normalizados a condrita con los valores de McDonough y Sun (1995).

Tabla 10. Núclidos de largo periodo de vida media, modificado de Cánovas-Picón, 2007.

Tabla 11. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-07, perteneciente al miembro Marquechi (n= 85).

Tabla 12. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-16, perteneciente al miembro San Marcos (n= 63).

Tabla 13. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan (n= 53).

RESUMEN

La Formación Cintura se encuentra dentro del Grupo Bisbee, el cual fue depositado durante el Cretácico Temprano y Tardío en la cuenca Bisbee. Este grupo está caracterizado por sedimentos aluviales, fluviales, deltaicos y marinos, y se encuentra distribuido en la parte central y noroeste de Sonora y al sureste de Arizona. La Formación Cintura se encuentra informalmente dividida en tres miembros (Grijalva-Noriega, 1996), en la base se encuentra el miembro Marquechi, seguido del miembro San Marcos y por último se tiene la depositación del miembro San Juan. A partir de una serie de secciones geológicas se determinó la composición litológica de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura, la cual consiste en secuencias granodecrecientes de areniscas y lutitas, con espesores aproximados de 575 m, 1711 m y 905 m, para los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan, respectivamente. A partir de estas secciones se obtuvo un total de 20 muestras de areniscas y lutitas (14 y 6, respectivamente), con el fin de realizar el análisis petrográfico mediante el método de conteo de puntos, el análisis geoquímico en los elementos de óxidos mayores y de elementos traza, y el análisis geocronológico por medio de U-Pb en los circones detríticos, se tomaron 16 muestras de areniscas, 20 de areniscas y lutitas, y tres muestras; respectivamente. Los resultados del análisis petrográfico indican que las areniscas de la Formación Cintura son arcosas líticas y litarenitas feldespáticas, además las muestras de esta formación, en el diagrama de clasificación de Herron (1988) las muestras son principalmente arcosas, wackas y litarenitas; de igual manera en el análisis petrográfico se obtuvo que las muestras de esta formación están representadas por una procedencia de arco transicional, con tendencia hacia el arco

no-disectado para las areniscas de la base y la cima en el diagrama Qt-F-L; mientras que en el diagrama Qm-F-Lt, la procedencia se mantiene dentro del campo del arco transicional, con algunas areniscas del miembro Marquechi que presentan una procedencia de arco disectado por la mayor cantidad de cuarzo monocristalino presente.

Los resultados de CIA para las areniscas y lutitas (45 – 66, con un promedio de 55 ± 6.0 ; 57 – 74, con un promedio de 67 ± 6.5 ; respectivamente) de la Formación Cintura concuerdan con los valores obtenidos de PIA para las muestras de areniscas y lutitas (44 – 71, con un promedio de 57 ± 7.8 ; 59-89, con un promedio de 75 ± 11.4 ; respectivamente), lo cual indica que la Formación Cintura, presenta un intemperismo bajo en la base, y un intemperismo moderado en la parte media así como en la cima.

Análisis geoquímicos en las muestras pertenecientes al miembro Marquechi presentan un ambiente tectónico principalmente de margen continental activo y pasivo; las del miembro San Marcos son representadas por ambientes de arco de islas continental y margen continental activo; mientras que las del miembro San Juan están representadas por ambientes de arco de islas continental, margen continental activo y pasivo. Los patrones de tierras raras normalizados con condrita, los diagramas de procedencia, así como los elementos traza en los circones, sugieren que las muestras de la Formación Cintura son derivadas principalmente de una fuente félsica.

La geocronología obtenida en los circones detríticos por U-Pb indican cuatro edades principales para el miembro Marquechi: Cretácico, Jurásico, Triásico y

Proterozoico, mientras que para los miembros San Marcos y San Juan, fueron tres edades: Cretácico, Jurásico y Proterozoico. Las edades correspondientes al Proterozoico provienen de la erosión de granitoides del cinturón Grenvilliano, los cuales se encuentran expuestos en el bloque Caborca. Las edades que van de 1.6 a 1.7 Ga corresponden a las rocas metamórficas del Esquisto Pinal, mientras que aquellas entre 1.7 y 1.8 pueden ser derivados de los granitoides presentes en el bloque Caborca. Lo anterior sugiere que la procedencia de estos circones está relacionada a la erosión del basamento proterozoico ígneo-metamórfico de las provincias Yavapai, Mazatzal y Greenville. Los circones más antiguos, seguramente son retrabajados de la provincia Mohave y de rocas más antiguas. La edad más joven de circones detríticos obtenidas de muestras del miembro Marquechi fue de 101.3 Ma, para las del miembro San Marcos fue de 95.3 Ma, y para las del miembro San Juan fue de 90.7 Ma. Esto sugiere que la edad de la Formación Cintura en el área estudiada va del Albiano al Turoniano.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Para el Cretácico sedimentario que aflora en la porción centro y noreste de Sonora se tiene un amplio registro de estudios principalmente estratigráficos, y específicamente el Cretácico Inferior, está caracterizado por rocas sedimentarias pertenecientes al Grupo Bisbee, extendiéndose sus afloramientos hacia el sureste de Arizona.

El Cretácico Temprano del sureste de Arizona, noreste de Sonora y áreas adyacentes en los Estados Unidos y México, fue dominado por una serie de invasiones marinas (González-León y Jacques-Ayala, 1990), y los sedimentos depositados durante este tiempo están representados por el Grupo Bisbee y litologías correlativas, los cuales rellenaron una cuenca longitudinalmente extendida con orientación NW-SE. El Conglomerado Glance constituye la base de este grupo y sobreyaciéndolo lo cubren ascendentemente la Formación Morita, la Caliza Mural y en la cima la Formación Cintura.

La Formación Cintura fue definida por Ransome (1904) como la formación más joven de las que integran al Grupo Bisbee, cuya localidad tipo está en los cerros Cintura (Cintura Hills) en el sureste de Arizona, y aunque este grupo ha sido ampliamente estudiado en Sonora (Rangin, 1977; González-León, 1989; Jacques-Ayala y Potter, 1987; Navarro, 1989; Jacques-Ayala, 1993; Lawton *et al.*, 2004; González-León *et al.*, 2008; Madhavaraju, *et al.*, 2010, 2013a, b, 2015; Madhavaraju y González-León, 2012), solo Jacques-Ayala (1992b) y Grijalva-Noriega (1994, 1996),

han descrito en detalle secciones de la Formación Cintura. En general, esta última formación consiste de capas interestratificadas o alternadas de areniscas y lutitas con algunos horizontes conglomeráticos, formando secuencias ascendentes que gradúan tanto hacia grano grueso como a grano fino. Grijalva-Noriega (1994) dividió a la Formación Cintura en tres miembros estratigráficos informales, los cuales de la base a la cima son: Marquechi, San Marcos y San Juan, respectivamente. El miembro Marquechi (396 m) es la unidad basal y consiste en una secuencia de limolita-arenisca intercalada con caliza fosilífera y lutitas en la base, que determinan ambientes marinos someros y barras de desembocadura y distales de arena. El miembro San Marcos (498 m) incluye intercalaciones de arenisca y lutita con lentes de conglomerados y areniscas de grano grueso en la porción media, depositadas en ambientes de planicie de mareas y canales de mareas. Mientras que el miembro San Juan (253 m) en la cima se caracteriza por secuencias fluviales de areniscas y lutitas, incluyendo secuencias granocrecientes (coarsening upward sequences) de lagos interdistributarios donde se encuentran restos de plantas y mantos de carbón (Grijalva-Noriega, 1994).

Actualmente se cuenta con algunas técnicas para tener una mejor comprensión de las condiciones climáticas y ambientes tectónicos que prevalecieron durante el depósito de los sedimentos, así como también para conocer la procedencia de estos. Una de las técnicas utilizadas como una herramienta muy útil para determinar y discriminar la procedencia y composición de las áreas fuentes es la petrografía de rocas clásticas (Arribas y Arribas, 1991), inclusive para contar con una aproximación de la ubicación y composición de la roca madre (Dickinson, 1970; Blatt *et al.*, 1972; Pettijohn *et al.*, 1987; Dickinson *et al.*, 1983).

La geoquímica de roca total de lutitas generalmente preserva la firma original de la roca fuente y refleja la historia diagenética y de intemperismo (Paikaray *et al.*, 2008). Ciertos elementos traza (Zr, V, Cr, Ni y Ba) incluyendo tierras raras y sus abundancias, son más útiles para caracterizar la procedencia de lutitas en diagramas binarios y ternarios (Nesbitt y Young, 1984, 1989; Roser y Korsch, 1986; Schieber, 1992; Fedo *et al.*, 1995, 1996, 1997; Hayashi *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1998; Campo y Guevara, 2005, Sugitani *et al.*, 2006; Deru *et al.*, 2007; Nagarajan *et al.*, 2007; Madhavaraju y Lee, 2010; Armstrong *et al.*, 2013; Madhavaraju, 2015; Madhavaraju *et al.*, 2016a).

La datación en granos separados de circón detrítico ha sido extensamente utilizada para obtener información respecto a proveniencia, exhumación del área fuente y evolución de la paleogeografía, ya que éste no es afectado por procesos sedimentarios y refleja distribuciones de edades en rocas del terreno de origen (Dickinson y Gehrels, 2003; Bernet y Spiegel, 2004; Anderson, 2005).

En los últimos 25 años se han realizado un reducido número de investigaciones sobre estratigrafía y ambientes deposicionales de la Formación Cintura, sin embargo, no existen investigaciones de las rocas siliciclásticas de esta unidad, orientadas hacia estudios integrales de geoquímica y geocronología. Por lo que se ha concebido esta investigación multidisciplinaria, hacia una clasificación petrográfica basada en conteo de puntos, complementada con estudios geoquímicos y geocronológicos de estas rocas. Es necesario el estudio a detalle de la estratigrafía en secciones de la Formación Cintura, y llevar a cabo un muestreo cuidadoso basado en las variaciones litológicas, para estudios petrográficos, aplicación de técnicas avanzadas de estudios

geoquímicos y geocronológicos. Con la determinación de la geoquímica de elementos mayores, traza y tierras raras en estas muestras, es posible interpretar el marco tectónico y la procedencia de la secuencia sedimentaria estudiada. Los estudios geocronológicos (U-Pb en circones) en las areniscas son una herramienta importante para hacer una interpretación completa de la evolución paleogeográfica, el marco tectónico y las características de procedencia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consiste en realizar un estudio petrográfico de areniscas, determinar mediante un análisis geoquímico y aportar información sobre la edad de la Formación Cintura, con base en fechamientos de circones detríticos en areniscas.

1.2.2 Objetivos específicos

Este estudio tiene como objetivos específicos:

- I. Clasificar petrográficamente y hacer el análisis de procedencia tectónica tradicional para las areniscas de la Formación Cintura.
- II. Caracterizar los elementos mayores, traza y tierras raras en las rocas clásticas de la Formación Cintura, para interpretar las condiciones de paleointemperismo, marco tectónico y características de procedencia de esta secuencia estratigráfica.
- III. Separar circones detríticos en las areniscas.

IV. Determinar edades por medio de fechamiento U-Pb en circones detríticos.

1.3 Antecedentes

El Cretácico Inferior de Sonora ha sido objeto de una amplia cantidad de estudios, ya sea estructurales, tectónicos, geofísicos, litoestratigráficos, bioestratigráficos, entre otros; los cuales se han llevado a cabo en sucesiones estratigráficas expuestas en diferentes localidades, con el propósito de comprender los fenómenos paleotectónicos y paleogeográficos de la Cuenca Bisbee (Dumble, 1902; Ransome, 1904; Taliaferro, 1933; Arellano, 1956; Pérez-Ramos, 1986; Navarro, 1989; González-León y Jacques-Ayala, 1990; Rodríguez-Castañeda, 1991; Monreal, 1994; Jacques-Ayala, 1995; Nourse, 1995).

La Formación Cintura es la unidad más joven del Grupo Bisbee, Ransome (1904) describió esta formación con un espesor máximo de 320 m, la cual está formada por lodolitas y lutitas de color rojo a rojo violáceo, y por areniscas de color gris a gris violáceo verde. La localidad tipo original se encuentra en las Montañas Mule, cerca de Bisbee, Arizona; aunque también posteriormente ha sido descrita al noreste de Sonora en la sierra El Chanate, Santa Ana, Arizpe y Cerro de Oro y al suroeste de Arizona como parte del Grupo Bisbee. Esta formación fue depositada en ambientes marino-marginales en su parte inferior y ambientes fluvial es dentro de meandros en la parte superior, y representan la fase regresiva del mar del Grupo Bisbee (González-León, 1994a).

La Formación Cintura es el resultado de una etapa regresiva en la evolución geológica de la cuenca Bisbee. Durante el Albiano medio, el mar de Bisbee experimentó una regresión importante y la Formación Cintura se depositó en un mar somero, en ambientes deltaicos y en planicies aluviales (Hayes, 1970; Klute, 1991; Jacques-Ayala, 1992c; Jacques-Ayala, 1993; Grijalva- Noriega, 1996). Sin embargo, tuvo lugar una invasión marina relativamente menor, a la mitad del depósito de la Formación Cintura, como lo han reportado González- León (1994a), en el área de Arizpe, y García y Barragán (2003) al norte de la sierra de San Antonio. Grijalva- Noriega (1994) dividió a la Formación Cintura en tres miembros estratigráficos informales: Marquechi en la base, San Marcos en la parte media y San Juan en la cima.

Los estudios petrográficos cuantitativos tienen el fin de determinar la composición de las rocas para entender las características de procedencia y descifrar el marco tectónico de las rocas madre. Los análisis de procedencia se llevan a cabo generalmente para reconstruir la historia antes del depósito de un sedimento o roca sedimentaria. Esto incluye la dirección y distancia, tamaño y arreglo de la región de origen, clima y relieve, y el tipo específico de roca sedimentaria (Pettijohn *et al.*, 1987).

La firma de rocas fuente, los cambios climáticos, el transporte, la historia deposicional y las transformaciones diagenéticas son los factores que controlan la composición del sedimento (Dickinson *et al.*, 1983; Basu, 1985; Dickinson, 1985; McBride, 1985). Se ha demostrado que el fechamiento de circones individuales en U- Pb es una herramienta útil para reconstruir la evolución tectónica de bloques continentales (Condie *et al.*, 2009; Griffin *et al.*, 2004; Rino *et al.*, 2008; Kusnetsov *et*

al., 2010; Veevers y Saeed, 2008; Sevastjanova *et al.*, 2011; Yao *et al.*, 2011; Gehrels, 2012).

1.4 Justificación

Hasta este momento, existen muy pocos estudios realizados sobre la estratigrafía de la Formación Cintura para conocer las condiciones de sus ambientes de depósito (Grijalva-Noriega, 1996). A partir de estos estudios locales, se observa la necesidad de entender mejor y de manera regional las condiciones de paleointemperismo, marco tectónico y características de la procedencia de la Formación Cintura.

En consecuencia, este proyecto propone avanzar hacia el entendimiento de los procesos geológicos que operaron en Sonora durante el Albiano tardío y quizá hasta el Cenomaniano, se propone llevar a cabo estudios geoquímicos de muestras clásticas donde se analicen elementos mayores, traza y tierras raras, estudios petrográficos y estudios geocronológicos (fechamiento U-Pb en circones). El muestreo incluirá las secciones estratigráficas de la Formación Cintura en la localidad este de Cabullona, Sonora. Estos estudios aportarán información que permitirá especular hacia modelos de condiciones de paleointemperismo, marco tectónico y características de la procedencia de las rocas siliciclásticas de la Formación Cintura en Sonora.

1.5 Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en el municipio de Cabullona, al noreste del estado de Sonora. Esta localidad se encuentra a 25 km aproximadamente al sureste de la ciudad de Agua Prieta, y a 16 km al oeste del poblado Cabullona (Figura 1).

Para llegar al área de estudio se toma la carretera Federal No. 14 Moctezuma-Hermosillo, al llegar al poblado de Moctezuma se toma la carretera Federal No. 17 Moctezuma-Agua Prieta hasta llegar al poblado de Cabullona.

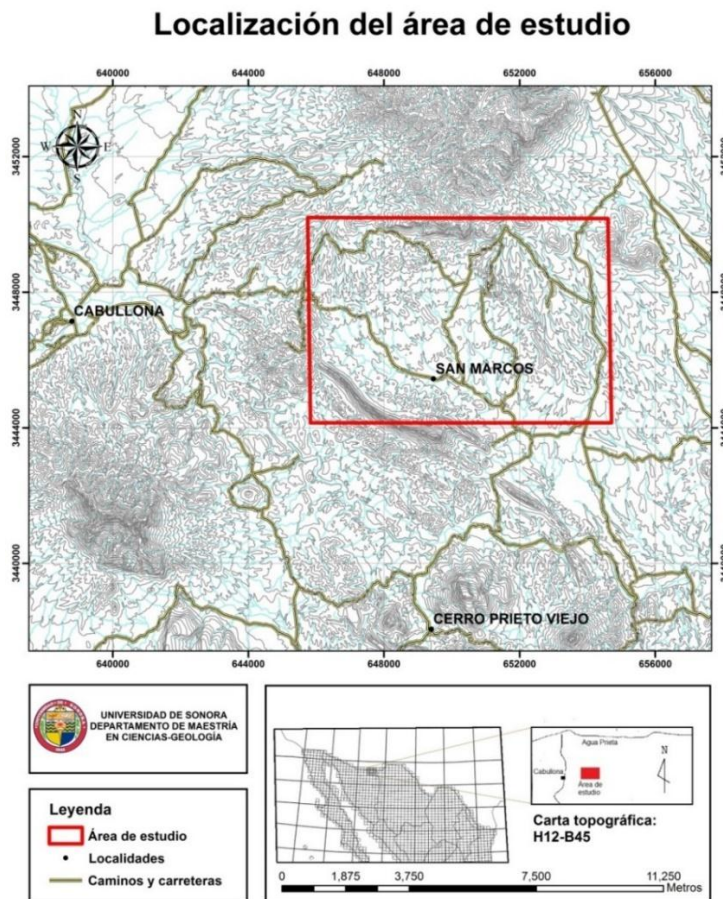


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

1.6 Metodología

Como parte de este proyecto se estudió una serie de secciones detallada de la Formación Cintura en los afloramientos localizados al oriente del poblado de Cabullona en el NE del estado, con el fin de llevar a cabo el análisis petrológico, geoquímico y geocronológico la metodología de este estudio se divide en dos etapas: 1) Trabajo de campo y 2) Trabajo analítico:

1.6.1 Trabajo de campo

De estas secciones se realizó una descripción litológica, un análisis estructural del cual se estableció la base y cima de la secuencia estratigráfica de la Formación Cintura, a partir de los resultados obtenidos en esta inspección de campo a nivel afloramiento se realizó una columna estratigráfica. Por otra parte, se llevó a cabo un muestreo específico de las rocas siliciclásticas pertenecientes a los miembros de esta formación, para realizar los análisis petrográficos, geoquímicos y geocronológicos. Las muestras correspondientes a cada miembro se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Muestras de las rocas siliciclásticas de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona, Sonora.

Formación Cintura				
Miembro	Muestra	Roca	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
Marquechi	CFS-01	Arenisca	31°07'53.19"	109°27'07.65"
	CFS-02	Arenisca	31°07'53.19"	109°27'07.65"
	CFS-03	Arenisca	31°07'53.84"	109°27'03.92"
	CFS-04	Arenisca	31°07'55.16"	109°27'01.53"
	CFS-05	Arenisca	31°07'58.59"	109°26'54.90"
	CFS-06	Lutita	31°08'04.70"	109°26'57.53"
	CFS-07*	Arenisca	31°08'04.43"	109°26'51.57"
San Marcos	CFS-08	Lutita	31°08'08.76"	109°26'44.51"
	CFS-09	Arenisca	31°08'08.76"	109°26'44.51"
	CFS-10	Lutita	31°08'31.27"	109°26'39.16"
	CFS-11	Arenisca	31°08'33.85"	109°26'40.70"
	CFS-12	Lutita	31°08'36.75"	109°26'41.07"
	CFS-13	Arenisca	31°08'41.78"	109°26'40.18"
	CFS-14	Arenisca	31°08'41.78"	109°26'40.18"
	CFS-15	Arenisca	31°08'51.20"	109°26'40.95"
	CFS-16*	Arenisca	31°08'54.88"	109°26'42.06"
	CFS-17	Arenisca	31°08'03.72"	109°26'41.96"
	CFS-18	Lutita	31°08'51.38"	109°30'30.39"
San Juan	CFS-19	Arenisca	31°08'38.31"	109°26'41.08"
	CFS-20	Arenisca	31°09'11.98"	109°26'51.56"
	CFS-21*	Arenisca	31°09'14.98"	109°26'52.46"
	CFS-22	Lutita	31°09'15.14"	109°26'52.00"
	CFS-26	Arenisca	31°09'31.33"	109°26'47.73"
	CFS-27	Arenisca	31°09'39.54"	109°27'08.56"

1.6.2 Trabajo analítico

La segunda etapa consistió en el trabajo de gabinete, donde se llevó a cabo la preparación de las muestras para el análisis petrográfico, geoquímico (elementos mayores y trazas) y geocronológico en los circones detríticos de tres muestras (CFS-07, CFS-16 y CFS-21) correspondientes de los miembros de la Formación Cintura.

1.6.2.1 Análisis petrográfico

El análisis petrográfico se realizó en 16 láminas delgadas de areniscas pertenecientes a los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan de la Formación Cintura (Tabla 2), las láminas delgadas fueron preparadas en el laboratorio de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM; y en el laboratorio de la Universidad de Sonora.

Tabla 2. Lista de láminas delgadas pertenecientes a las areniscas de los miembros de la Formación Cintura.

Formación Cintura			
Miembro	Muestra	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
Marquechi	CFS-01	31°07'53.19"	109°27'07.65"
	CFS-02	31°07'53.19"	109°27'07.65"
	CFS-03	31°07'53.84"	109°27'03.92"
	CFS-04	31°07'55.16"	109°27'01.53"
	CFS-05	31°07'58.59"	109°26'54.90"
San Marcos	CFS-09	31°08'08.76"	109°26'44.51"
	CFS-11	31°08'33.85"	109°26'40.70"
	CFS-14	31°08'41.78"	109°26'40.18"
	CFS-16*	31°08'54.88"	109°26'42.06"
	CFS-17	31°08'03.72"	109°26'41.96"
San Juan	CFS-19	31°08'38.31"	109°26'41.08"
	CFS-20	31°09'11.98"	109°26'51.56"
	CFS-21*	31°09'14.98"	109°26'52.46"
	CFS-23	31°09'20.45"	109°26'50.78"
	CFS-25	31°09'25.36"	109°26'48.36"
	CFS-26	31°09'31.33"	109°26'47.73"

La descripción detallada al igual que el conteo de puntos se realizó en la Universidad de Sonora, por medio de un microscopio vertical de polarización LEICA DM750 P y con un contador de puntos manual (Figura 2). El análisis de conteo de puntos se basó en el método Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al.*, 1984) para la clasificación modal. Se contaron 400 granos del marco clástico por lámina delgada.



Figura 2. Microscopio vertical de polarización LEICA DM750 P del Departamento de Geología, Universidad de Sonora.

Una vez obtenidos los resultados del conteo de puntos por medio del método Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al.*, 1984), estos fueron normalizados a 100, de tal forma que las fases mineralógicas y fragmentos de roca presentes en las muestras se reportan en porcentajes, utilizando los parámetros de cuarzo total (Qt), cuarzo monocristalino (Qm), feldespato (F), fragmento lítico (L) y fragmento lítico total (Lt, incluyendo el cuarzo policristalino) con el fin de determinar la clasificación y procedencia de las areniscas pertenecientes a la Formación Cintura. Para la clasificación de las areniscas en los diferentes miembros de esta Formación se utilizó el diagrama de Folk (1980) con base al porcentaje de volumen. Para la determinar la procedencia se utilizaron los diagramas ternarios Qt-F-L y Qm-F-Lt de Dickinson *et al.* (1983).

1.6.2.2 Análisis geoquímico

La preparación de muestras de las rocas siliciclásticas de la Formación Cintura recolectadas en el área de Cabullona, se llevó a cabo en el Laboratorio de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM, Hermosillo, Sonora. Las muestras de areniscas y lutitas fueron trituradas con el equipo BRAUN CHIPMUNK VD67 (Figura 3A) hasta que el tamaño de grano pasara por la malla No. 6, algunas de las muestras fueron pulverizadas con el equipo HERZOG (Figura 3B). Una vez que se redujo el tamaño del grano de la muestra, estas fueron tamizadas durante 15 minutos con las mallas no. 50, 100 y 170 (Figura 3C), con el fin de evitar contaminación estas mallas fueron lavadas con el equipo Cole-Parmer 8894 de limpieza ultrasónica (Figura 3D) durante una hora a 40°C. Una vez obtenido el contenido de las mallas tamizadas (no. 100 y 170) se tomaron para realizar el análisis geoquímico y posteriormente la preparación para el análisis geocronológico.

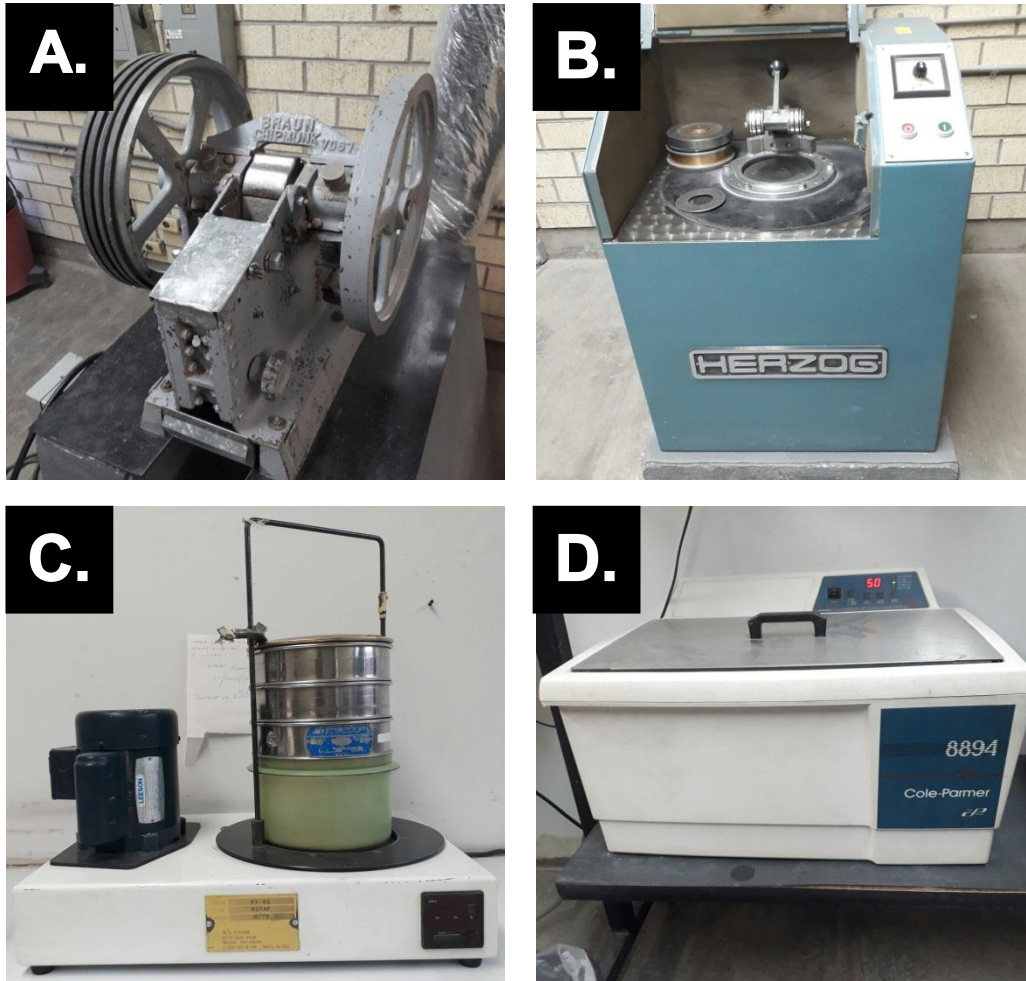


Figura 3. A. Trituradora BRAUN CHIPMUNK VD67, B. Pulverizadora HERZOG, C. Tamiz con las mallas no 50, 100 y 170, y D. Limpiador ultrasónico Cole-Parmer 8894 (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM, Hermosillo, Sonora).

Se analizaron un total de 21 muestras de areniscas y lutitas (n= 15 y n= 6; respectivamente) pertenecientes a la Formación Cintura, por medio de fluorescencia de rayos X (FRX), en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, UNAM, en la Ciudad de México. Con el fin de obtener las concentraciones de los elementos de óxidos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 y P_2O_5).

Por otra parte, se analizó un total de 20 muestras de areniscas y lutitas pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura, por medio de un espectrómetro de masas con plasma inducido acoplado con un multicolector (LA-MC-ICP-MS) en el Laboratorio de Estudios Isotópicos, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México en Juriquilla, Querétaro; con el fin de determinar los elementos de tierras raras (incluyendo las tierras raras).

Una vez que se obtuvieron las concentraciones de elementos de óxidos mayores y los elementos traza, se llevó a cabo el manejo estadístico para así con esto realizar los diagramas correspondientes. A partir de las concentraciones de los elementos de óxidos mayores, se calcularon los índices de intemperismo (CIA, PIA, ICV, CIW y WIP, por sus siglas en inglés) se aplicaron las fórmulas que se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Índices de intemperismo químico, utilizados en este estudio.

Índice de intemperismo	Fórmula
Nesbitt y Young (1982): Índice de alteración química (CIA).	$CIA = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right) \times 100$
Fedo <i>et al.</i> , (1995): Índice de alteración de plagioclasa (PIA).	$PIA = \left(\frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O} \right) \times 100$
Cox <i>et al.</i> , (1995): Índice de variabilidad composicional (ICV).	$ICV = \left(\frac{(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2)}{Al_2O_3} \right)$
Harnois (1988): Índice de intemperismo químico (CIW).	$CIW = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O} \right) \times 100$
Parker (1970): Índice de intemperismo de Parker (WIP).	$WIP = \left[\left(\frac{2Na_2O}{0.35} \right) + \left(\frac{MgO}{0.9} \right) + \left(\frac{2K_2O}{0.25} \right) + \left(\frac{CaO}{0.7} \right) \right] \times 100$
Índice de alteración química (CIA').	$CIA' = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + K_2O} \right) \times 100$

- CaO : representa el CaO asociado a fases silicatadas.

1.6.2.3 Análisis geocronológico

En el presente trabajo se reportan datos de U-Pb de circones detríticos para las muestras CFS-07, CFS-16 y CFS-21, pertenecientes a las areniscas de la parte superior de los miembros Marquechi y San Marcos y San Juan, respectivamente

(Tabla 4). Las muestras fueron preparadas en la Estación Regional de Noroeste, Instituto de Geología, UNAM en Hermosillo, Sonora para posteriormente ser analizadas en el laboratorio de estudios isotópicos, Centro de Geociencias, UNAM en Juriquilla, Querétaro; como se explica a continuación.

Tabla 4. Muestras seleccionadas para el análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de la Formación Cintura, en el área de Cabullona.

Formación Cintura			
Miembro	Muestra	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
Marquechi	CFS-07	31°08'04.43"	109°26'51.57"
San Marcos	CFS-16	31°08'54.88"	109°26'42.06"
San Juan	CFS-21	31°09'14.98"	109°26'52.46"

La preparación de estas muestras consistió en su trituración con el equipo BRAUN CHIPMUNK VD67 (Figura 4A) y pulverizadas con el pulverizador BICO ING. UA533 (Figura 4B), de igual manera las muestras tamizaron con las mallas No. 50, 100 y 170, durante 15 minutos. La primera separación de minerales se realizó en la mesa de concentración gravimétrica Wifley (Figura 5A), con el fin de separar los minerales pesados tales como el circón, para la separación de minerales magnéticos y diamagnéticos se realizó la segunda separación con el separador magnético isodinámico Frantz (Figuras 5B y C), utilizando las intensidades de 0.2, 0.6, 1.0 y 1.6 Amperes. Donde la muestra que resultó del proceso anterior fue lavada utilizando una batea en el Laboratorio de Estudios Isotópicos, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México en Juriquilla, Querétaro, depurando los componentes ligeros y concentrando los minerales pesados.

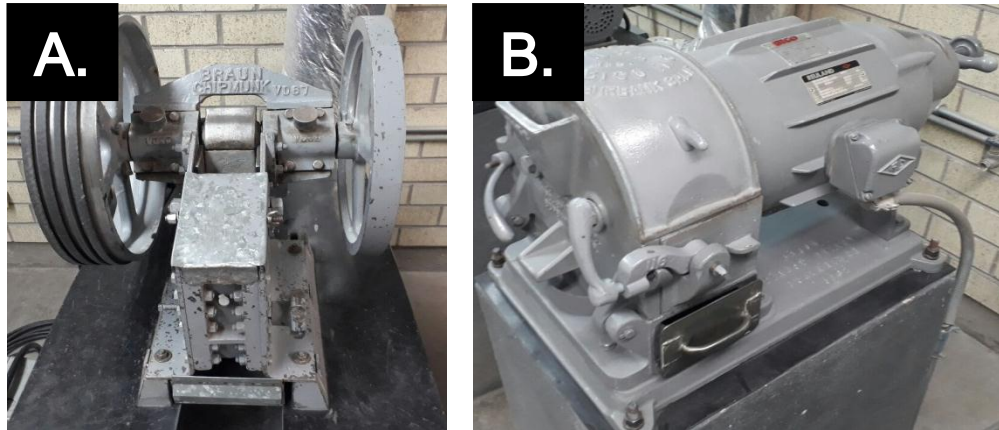


Figura 4. A. Trituradora BRAUN CHIPMUNK VD67, y B. Pulverizador BICO ING. UA53 (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM).

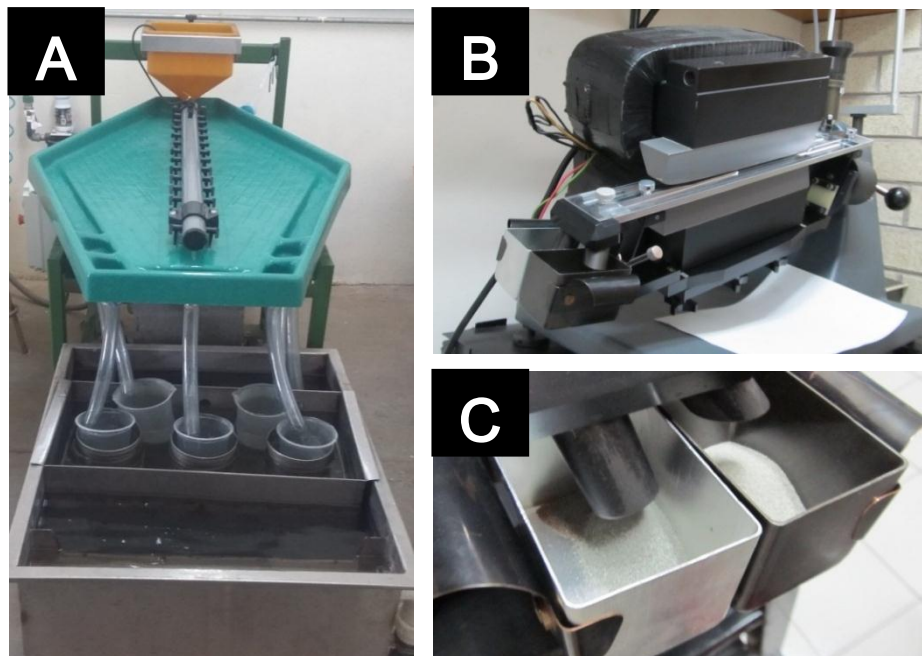


Figura 5. A. Mesa de concentración gravimétrica Wifley, B. Separador magnético isodinámico Frantz, y C. Descarga de material magnético del lado izquierdo y del lado derecho el material diamagnético (equipo de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM).

El montaje de las muestras y estándares se realizó manualmente en resina, procediendo a un desbaste y pulido de los granos de circón para exponer su parte

media. Los análisis fueron realizados por un espectrómetro de masas con plasma inducido acoplado con un multicolector (LA-MC-ICP-MS) en el Laboratorio de Estudios Isotópicos, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México en Juriquilla, Querétaro; siguiendo los procedimientos en Solari *et al.* (2010). La referencia del circón Plešovice (ca. 337 Ma; Sláma *et al.*, 2008) fue utilizado en combinación con el vidrio estándar NIST 610 para corregir la desviación instrumental y el fraccionamiento “*down-hole*” y para recalcular concentraciones elementales, usando edad U-Pb software (Solari y Tanner, 2011).

La técnica de LA-MC-ICP-MS es particularmente apropiada para el estudio de circones detríticos por la rápida generación de un gran número de análisis (Barboza-Gudiño *et al.*, 2011), lo cual ha permitido la obtención de un promedio de 100 análisis de circón por cada muestra. La relación $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, las edades y los errores se calcularon de acuerdo con Petrus y Kamber (2012).

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA

2.1 Cuenca Bisbee

La Cuenca Bisbee se desarrolló como resultado del rifting intracontinental en el Jurásico Medio (Bilodeau, 1979, 1982), que produjo el sistema de límite de rift con una orientación NW-SE y que se extendió hacia el sureste hasta el incipiente Golfo de México (Lawton y Dickinson, 1999). Dickinson y Lawton (2001) infirieron que esta deformación extensional fue iniciada por un levantamiento astenosférico provocado por la subducción que genera el arco continental Cordillerano (Lawton y McMillan, 1999; Dickinson y Lawton, 1999). Esta explicación geodinámica para el evento de rifting es especulativa, pero se puede observar la existencia de un cinturón de rift que incluye la cuenca Bisbee al noroeste del antiguo Golfo de México.

Las relaciones estratigráficas de las diferentes secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias que se tienen a lo largo de este sistema de límite de rift preservan el registro sedimentario de una invasión marina progresiva al continente desde el Golfo de México (Dickinson y Lawton, 2001).

Durante el Jurásico Tardío, en la región se tienen secuencias continentales y marinas que se consideran el relleno sedimentario de dos cuencas; la cuenca Bisbee en el sureste de Arizona y noreste de Sonora, y la cuenca Altar-Cucurpe en el centro de Sonora (Figura 6). Estas cuencas fueron separadas por el alto Cananea (McKee y Anderson, 1998) y su formación se ha atribuido a la deformación extensional relacionada con el rift (Bilodeau, 1982; Dickinson *et al.*, 1986; Dickinson *et al.*, 1989; Lawton y McMillan, 1999; Dickinson y Lawton, 2001).

La sedimentación marina durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano en esta región está vinculada a tres transgresiones marinas desde el Golfo de México a través de la Cuenca Chihuahua (Bilodeau, 1982; Dickinson *et al.*, 1989; Scott y González-León, 1991).

Secuencias carbonatadas del Albiano dentro de lo que fue la Cuenca Bisbee sugiere que se formó bajo el dominio de ambientes marinos someros que fueron continuos desde Arizona hasta Sonora, determinando el tiempo de máxima transgresión marina proveniente del sureste (Scott y González-León, 1991; González-León, 1994; Dickinson y Lawton, 2001). Esta característica paleogeográfica se ha denominado la plataforma de Sonora a lo largo del margen occidental de la Cuenca Chihuahua (Scott, 2003).

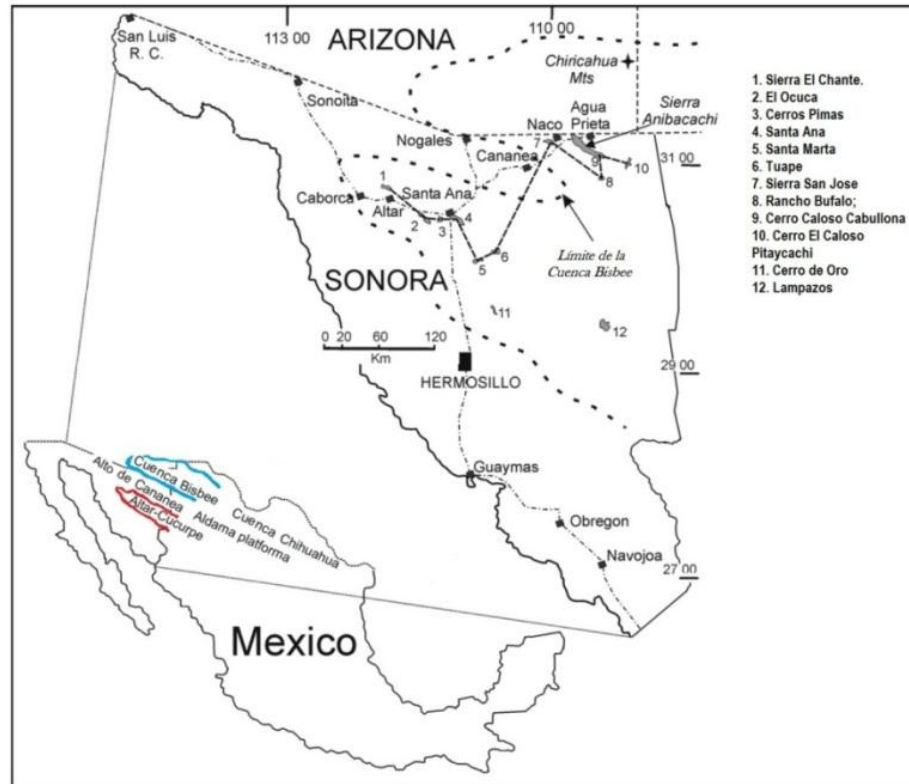


Figura 6. Distribución paleogeográfica de la Cuenca Bisbee durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano en el suroeste de Arizona y noroeste de Sonora. Modificado de González-León *et al.* (2008).

2.1.1 Grupo Bisbee

El Grupo Bisbee (Figura 6) se encuentra distribuido en el sur de Arizona y una buena parte de la mitad norte de Sonora, esta secuencia se desarrolló en una cuenca de tras-arco (Dickinson, 1981; Dickinson *et al.*, 1986, 1989; Bilodeau, 1982). El relleno de esta cuenca dio como origen la depositación del Grupo Bisbee durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano (González-León, 1994), el cual está caracterizado por sedimentos aluviales, fluviales, deltaicos y marinos.

La sección tipo (Figura 7) para el Cretácico Inferior se encuentra en las Montañas Mule cerca de la ciudad de Bisbee en Arizona. Ransome (1904) definió este grupo conformado por cuatro unidades: (1) Durante el Jurásico Tardío se depositó el Conglomerado Glance, dentro de ambientes predominantemente de abanicos aluviales y fluviales; (2) durante el Cretácico Temprano (Aptiano) el depósito de la Formación Morita se dio en planicies de mareas, deltas y corrientes meándricas; (3) la Caliza Mural se depositó en el Cretácico Temprano (Aptiano-Albiano) producto de una gran transgresión marina; y (4) en el Cretácico Temprano (Albiano) se tiene a la Formación Cintura cuyos ambientes determinan la última regresión marina en la cuenca (ambientes fluviodeltaicos).

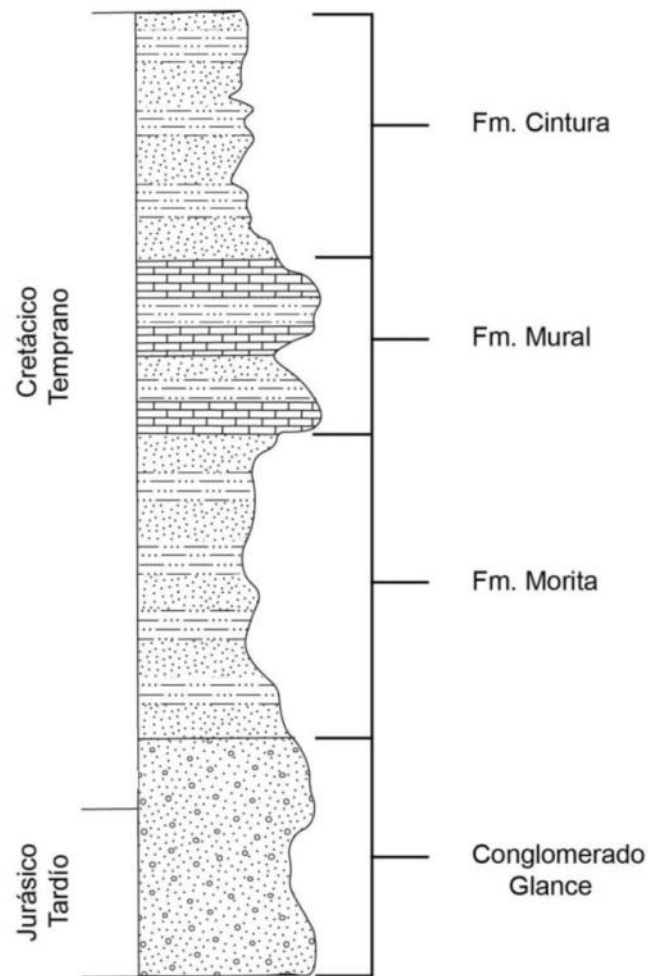


Figura 7. Columna estratigráfica de las 4 Formaciones representativas del Grupo Bisbee, de la base a la cima: Conglomerado Glance, Formación Morita, Caliza Mural, Formación Cintura. Modificado de Ramírez-Montoya (2014).

2.1.1.1 Conglomerado Glance

La localidad tipo del Conglomerado Glance se encuentra en las montañas Mule, cerca de Bisbee, Arizona. Los afloramientos principales se tienen al noroeste y noreste de Sonora y sureste de Arizona, con la presencia de clastos derivados del Esquisto Pinal del Proterozoico y del granito de 1.1 Ga de edad, así como también de

arenitas de cuarzo y calizas del Paleozoico y rocas volcánicas del Jurásico (García y Barragán y Jacques-Ayala, 2011).

El Conglomerado Glance está compuesto por orto-y paraconglomerados polimícticos de guijas a guijarros, intercalado con coladas volcánicas y tobas de composición ácida, representando el inicio de los depósitos de rift sintectónicos (Bilodeau *et al.*, 1987). Al noreste de Sonora en la sierra Anibácachi y cerro Cabullona, esta unidad se encuentra representada por guijas y guijarros angulares a sub-angulares (Figura 8), pobremente clasificados, y con una composición de clastos dominada por rocas volcánicas, esquistos, calizas y cuarcitas (González-León, 1994a; 1994b). El espesor medido que se tiene reportado para el Conglomerado Glance es de 1000 m por Taliaferro (1933).

Esta unidad se depositó en abanicos aluviales, así como en sistemas fluviales trenzados y meándricos. En el área de Cucurpe se encuentran depósitos marinos los cuales se correlacionan con el Conglomerado Glance. La escasez y distribución de estos depósitos sugieren incursiones marinas a lo largo de bloques fallados e invadidos por aguas marinas (García y Barragán y Jacques-Ayala, 2011).



Figura 8. Afloramiento del Conglomerado Glance en el área del Rancho El Sifón, al oeste de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

2.1.1.2 Formación Morita

La localidad tipo de la Formación Morita propuesta por Ransome (1904) y se localiza en el cerro La Morita, cerca de Agua Prieta. Esta unidad consiste de manera general de una alternancia de capas de lutita de color café rojizo y arenisca gris rojiza, con capas de arenisca conglomerática de granos angulosos y lentes de caliza impura (Figura 9).

Willard (1988) describió que la Formación Morita, en el área del puerto El Álamo, como una lodolita masiva, localmente con presencia de nódulos calcáreos, presenta intercalaciones menos importantes de una arenisca grano fino, gris a púrpura en estratos medianos a gruesos, y un conglomerado rojo con estratificación lenticular

de menos de 5 m de espesor. La parte superior consiste en limolita púrpura gris rojizo, arenisca parda de grano mediano a grueso, en estratos medianos con algunas intercalaciones de caliza, la cual constituye localmente una transición con la base de la Caliza Mural. En algunos sitios, se ha logrado identificar estratos de tobas interestratificados.



Figura 9. Afloramiento de la Formación Morita en el área del Rancho El Sifón, al oeste de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

El ambiente de depósito de la Formación Morita tuvo lugar en una planicie fluvial o de mareas. Los conglomerados con clastos de arranque (*rip-up clasts*) probablemente indiquen erosión en ríos o canales de marea. La ciclicidad de la reducción del tamaño del grano hacia arriba de la arenisca y la lutita con el predominio de la fracción de grano más fino, sugiere un sistema fluvial meándrico. La estratificación cruzada en la arenisca muestra una orientación SW-NE bimodal,

sugiriendo que la línea de costa tenía una orientación NW-SE, con la fuente de sedimentos hacia el noreste. La presencia de caliza con ostras sugiere una incursión marina en algún tiempo durante el Aptiano tardío (García y Barragán y Jacques-Ayala, 2011).

La Formación Morita tiene una gran similitud a la Formación Cintura, la característica distintiva es que la primera de ellas presenta capas de conglomerado las cuales no están presentes en la misma proporción en la segunda formación, esto sin considerar que la Caliza Mural las separa estratigráficamente (Rodríguez-Castañeda, 1997).

2.1.1.3 Caliza Mural

La Caliza Mural ha sido una de las formaciones más estudiada, debido a la gran importancia que se tiene en el análisis estratigráfico, paleontológico y paleogeográfico, ésta se depositó en el Cretácico Temprano (Aptiano-Albiano) representando el período de máxima transgresión. La localidad tipo de la Caliza Mural se encuentra en cerro Mural, al este de Bisbee, Arizona (Ransome, 1904).

La Caliza Mural superior en el área de la sierra Basómari presenta capas de calizas fosilíferas gruesas a masivas intercaladas con capas de areniscas y lodolita, con ostras, fragmentos de equinodermos y moluscos, miliólidos, así como de calizas ooidales y arenisca con estratificación cruzada. Con base en la presencia de calpionélidos y foraminíferos incluidos en las rocas de la Caliza Mural superior, se identifica una posición cronoestratigráfica del Aptiano superior al Albiano inferior para

esta parte de la Caliza Mural, y del Cretácico Inferior en general para el resto del Grupo Bisbee en la sierra Basómari (Monreal *et al.*, 2011)

El depósito de las unidades de la Caliza Mural tuvo origen en un ambiente de plataforma de aguas someras determinada por aportes terrígenos y marinos (zona de transición), delimitada por lagunas abiertas y restringidas hasta la zona de acumulación de corales y rudistas, amonitas, bivalvos, gasterópodos y foraminíferos planctónicos, principalmente orbitolinas (Figura 10) siendo ésta afectada por tres eventos transgresivos-regresivos produciendo una alternancia de arenisca, producto de márgenes fluviales y deltaicos (Reyes-Campero, 2008).



Figura 10. Afloramiento de la Formación Caliza Mural con orbitolinas en el cerro La Muela, al norte de la Sierra Anibacachi. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

2.1.1.4 Formación Cintura

La Formación Cintura fue definida por Ransome (1904) como la formación más joven de las que integran al Grupo Bisbee, cuya localidad tipo es el cerro Cintura en el sureste de Arizona. Si bien es cierto que el Grupo Bisbee ha sido ampliamente estudiado en Sonora (Rangin, 1977; González- León, 1989; Jacques-Ayala y Potter, 1987; Navarro, 1989; Jacques-Ayala, 1993; Lawton *et al.*, 2004; González-León *et al.*, 2008; Madhavaraju, *et al.*, 2010, 2013a, b, 2015; Madhavaraju y González-León, 2012), solo Jacques-Ayala (1992b) y Grijalva-Noriega (1994, 1996), han descrito en detalle secciones de la Formación Cintura. Grijalva- Noriega (1994) dividió a la Formación Cintura en tres miembros estratigráficos informales, que de la base a la cima son: Marquechi, San Marcos y San Juan, respectivamente. La Formación Cintura consiste de una interestratificación dominada por areniscas y lutitas, formando secuencias ascendentes que gradúan tanto hacia grano grueso como a grano fino (Figura 11).



Figura 11. Alternancia de areniscas y lutitas en secuencias granodecrecientes de la Formación Cintura en el área del rancho Las Avispas al sur de la Sierra La Ceniza. Viendo al SE. (Fotografía proporcionada por Dr. Francisco Grijalva).

2.2 Estratigrafía del área de estudio

2.2.1 Formación Cintura

Secuencia predominantemente detrítica Grijalva-Noriega (1994) de tres miembros informales: el miembro Marquechi en la base, el miembro San Marcos en la parte media y el miembro San Juan en la cima (Figura 12). En la Figura 13 se muestra el mapa geológico del área de estudio, donde se muestran tres secciones, pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura.

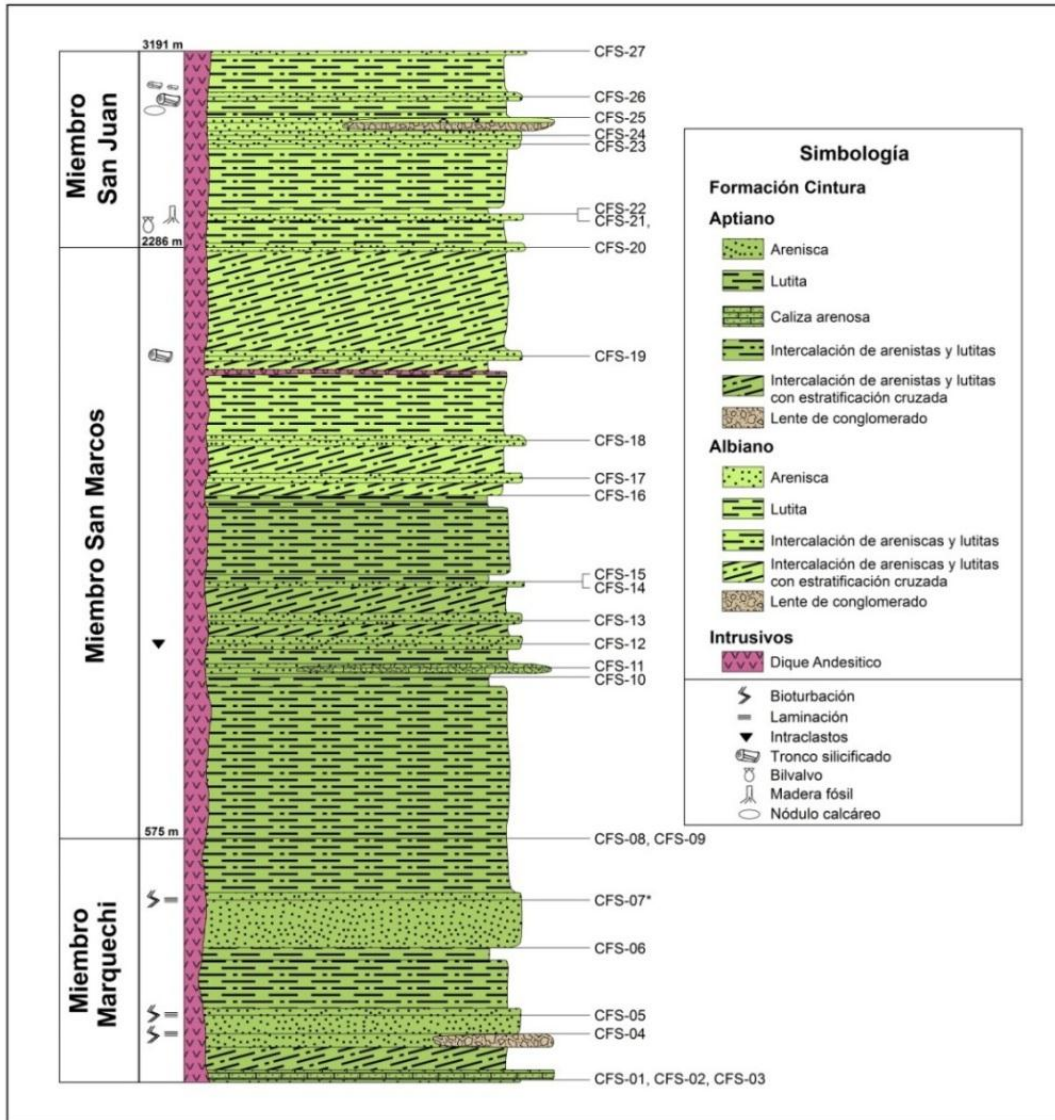


Figura 12. Columna estratigráfica de la Formación Cintura, teniendo en la base al Miembro Marquechi, seguido del Miembro San Marcos y en la cima al Miembro San Juan.

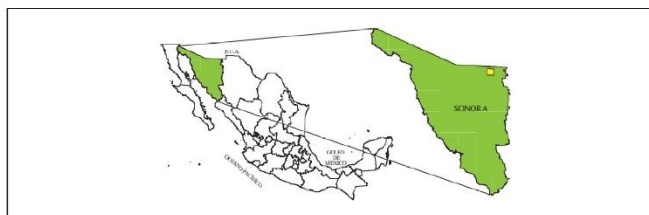
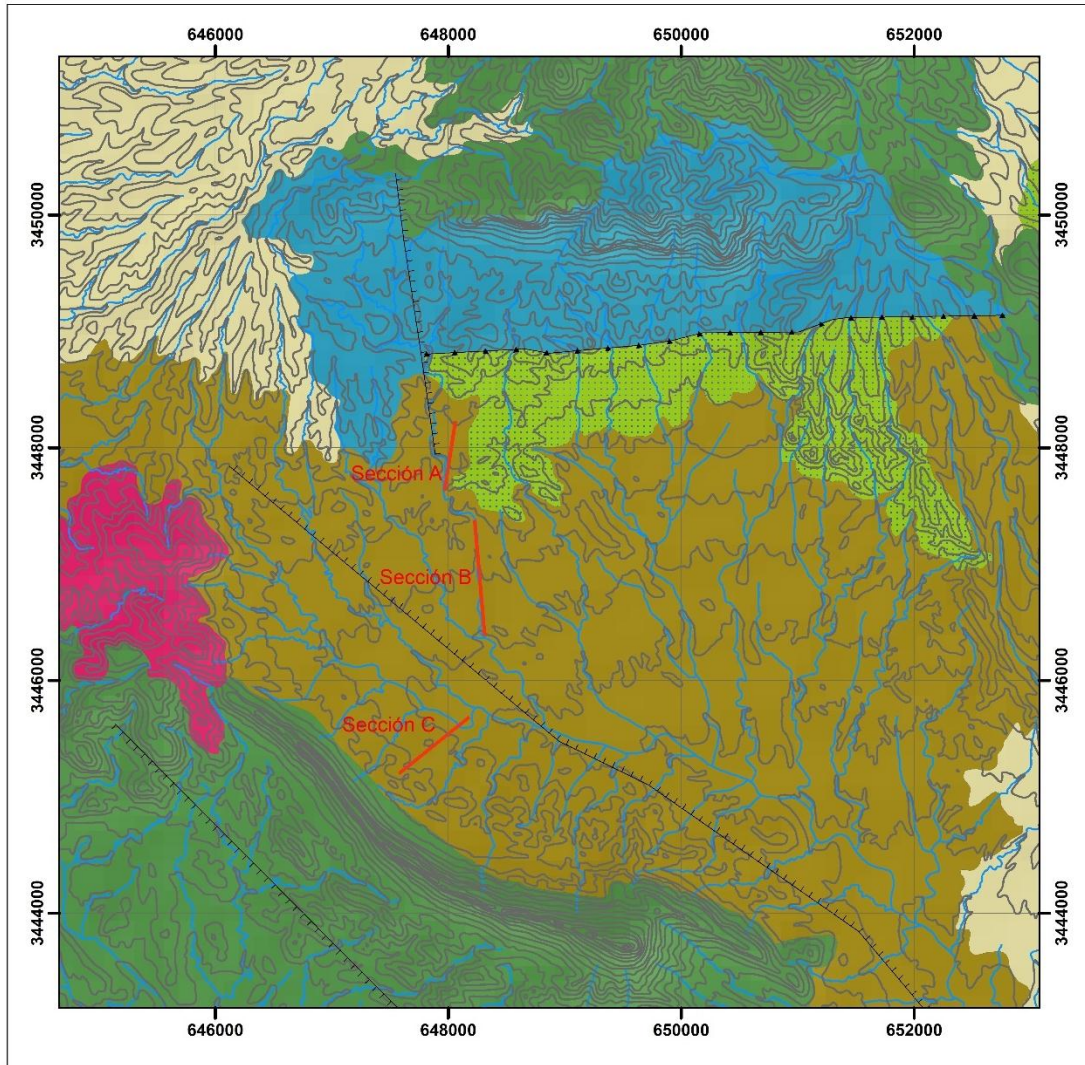


Figura 13. Mapa geológico del área de estudio.

2.2.1.1 Miembro Marquechi

Se tiene a este miembro como el más viejo de la Formación Cintura, el cual consiste de una secuencia de areniscas y lutitas intercaladas de color gris-marrón. En la base de esta secuencia se encuentra una parte intercalada con caliza arenosa. Este miembro tiene un espesor aproximado de 575 m (Figura 14A) y areniscas conglomeráticas (Figura 14B).

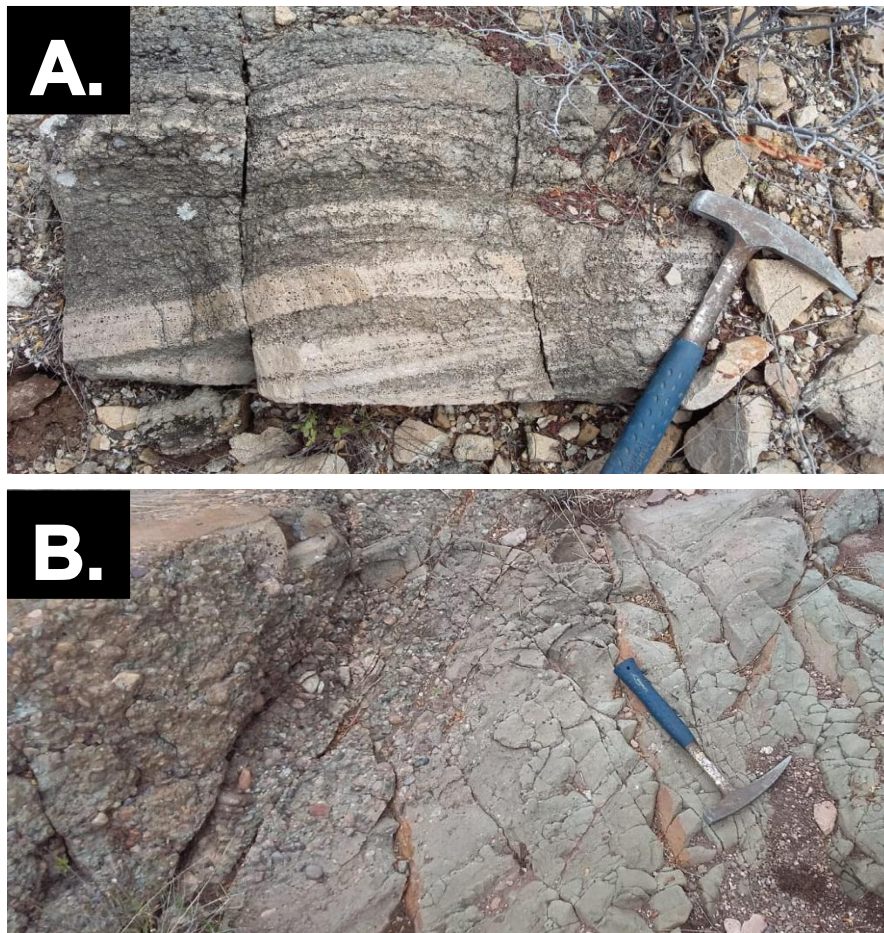


Figura 14. A. Afloramiento de la base del Miembro Marquechi, y B. Afloramiento de arenisca conglomerática en el área de Cabullona, Sonora.

La parte media y superior están representadas por una secuencia granodecreciente de areniscas y lutitas intercaladas con coloraciones gris verdoso y gris-marrón (Figura 15A); las areniscas presentan bioturbación, laminaciones de material orgánico (Figura 15B) y estratificación cruzada (Figura 15C). La parte superior de este miembro presenta coloraciones más marrones.

Grijalva-Noriega (1994) propone que este miembro fue depositado en ambientes de planicie de mareas y canales de marea.

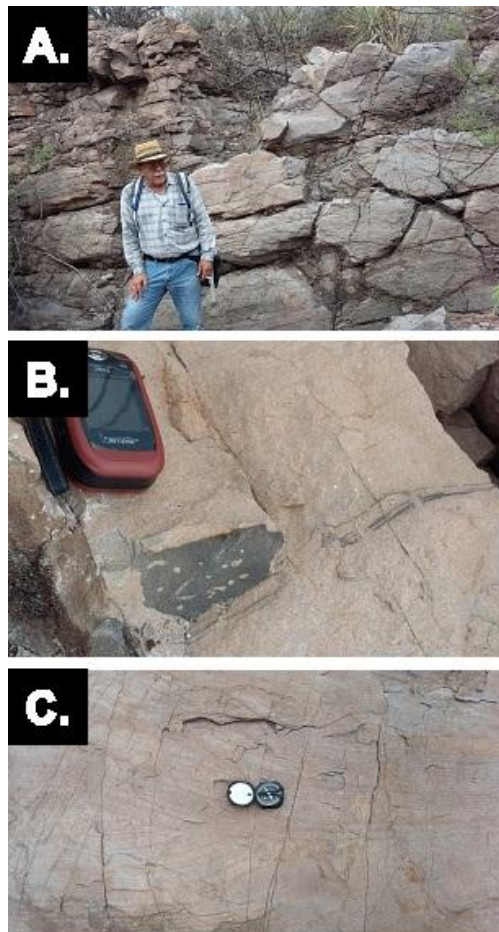


Figura 15. A. Afloramiento de areniscas del Miembro Marquechi del área de Cabullona, B. Arenisca con laminaciones de material orgánico y bioturbación, y C. Arenisca con estratificación cruzada, pertenecientes al Miembro Marquechi.

2.2.1.2 Miembro San Marcos

El miembro San Marcos tiene un espesor medido de 1711 m. La base se encuentra representada por una secuencia grano decreciente de areniscas con coloraciones gris verde-amarillento de grano medio a grueso, con estratificación cruzada, esta secuencia se encuentra intercalada por lutitas de coloración purpuras (Figura 16).



Figura 16. Afloramiento de la secuencia granodecreciente de areniscas y lutitas de la base del Miembro San Marcos, Cabullona, Sonora.

La parte media se caracteriza como una secuencia grano decreciente de areniscas con coloraciones gris verde-amarillento (Figura 17A), las cuales presentan intraclastos (*rip-up*) (Figura 17B), laminaciones y estratificación cruzada, intercaladas con lutitas de coloraciones rojizas-purpuras (Figura 18A). En la base de esta secuencia se tienen areniscas conglomeráticas (Figura 18B.) y caminando horizontalmente sobre la estratigrafía de esta secuencia se encuentran capas de

conglomerados (Figura 18C). Grijalva-Noriega (1996) describe estos conglomerados como depósitos de canales distributarios.

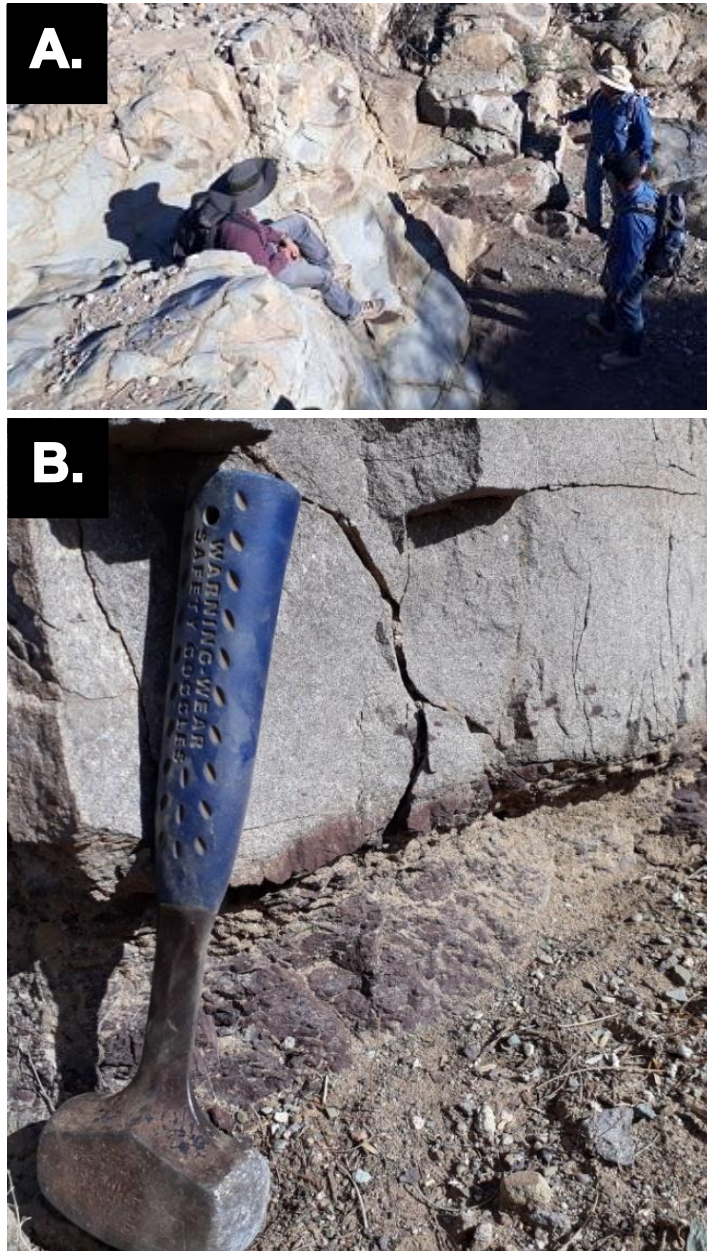


Figura 17. A. Afloramiento de la secuencia grano decreciente de areniscas con coloraciones gris verde-amarillento de la parte media del Miembro San Marcos, y B. Intraclastos (*rip-up*).

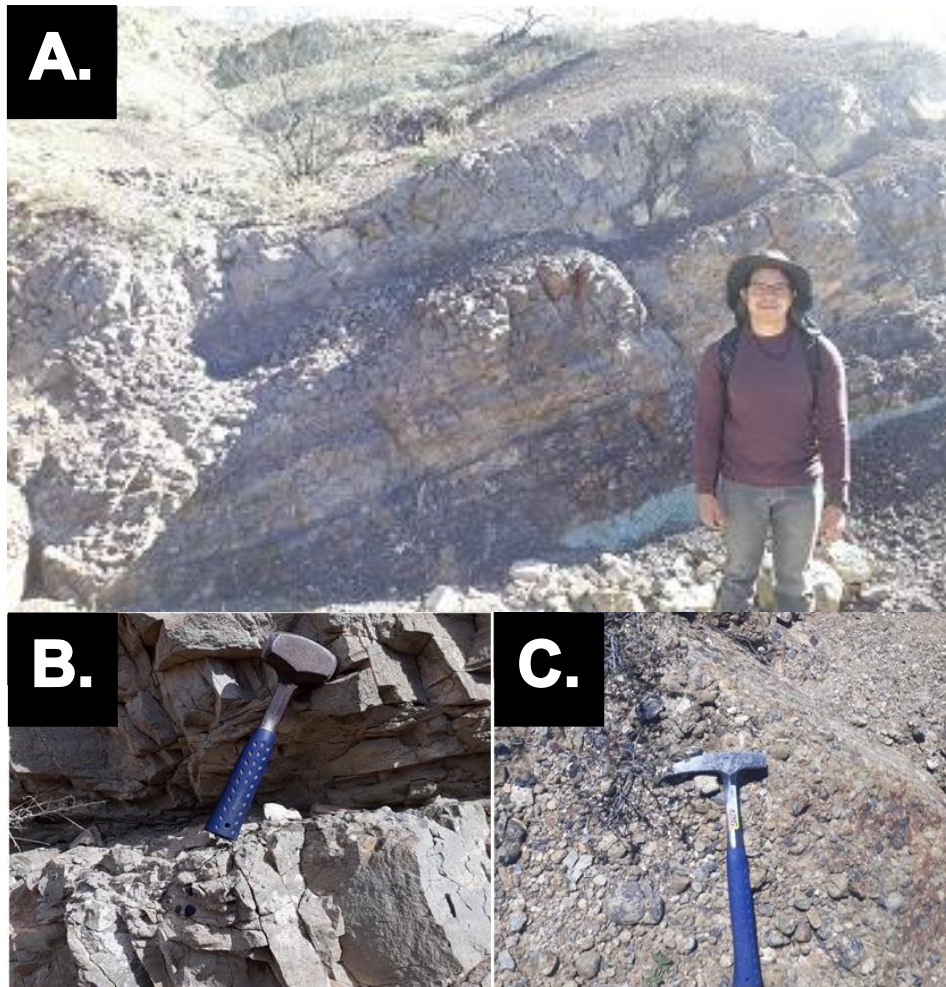


Figura 18. A. Intercalación de lutitas de coloraciones rojizas-purpuras, B. Afloramiento de arenisca conglomerática, y C. Lente de conglomerado, de la parte media del miembro San Marcos, en el área de Cabullona, Sonora.

Hacia la porción superior de este miembro se tiene una secuencia granodecreciente de areniscas con coloraciones más oscuras, que van de un gris verdoso amarillento a un gris-negro. Estas areniscas presentan troncos silicificados (Figura 19A.) y estratificación cruzada (Figura 19B.) y, sin embargo, ya no se observan las coloraciones típicas de este miembro en esta parte de la secuencia (intercalaciones de lutitas y areniscas púrpura-rojizo y verde-amarillento). Localmente la sección se encuentra altamente deformada (presencia de dique, fallas y diaclasas).

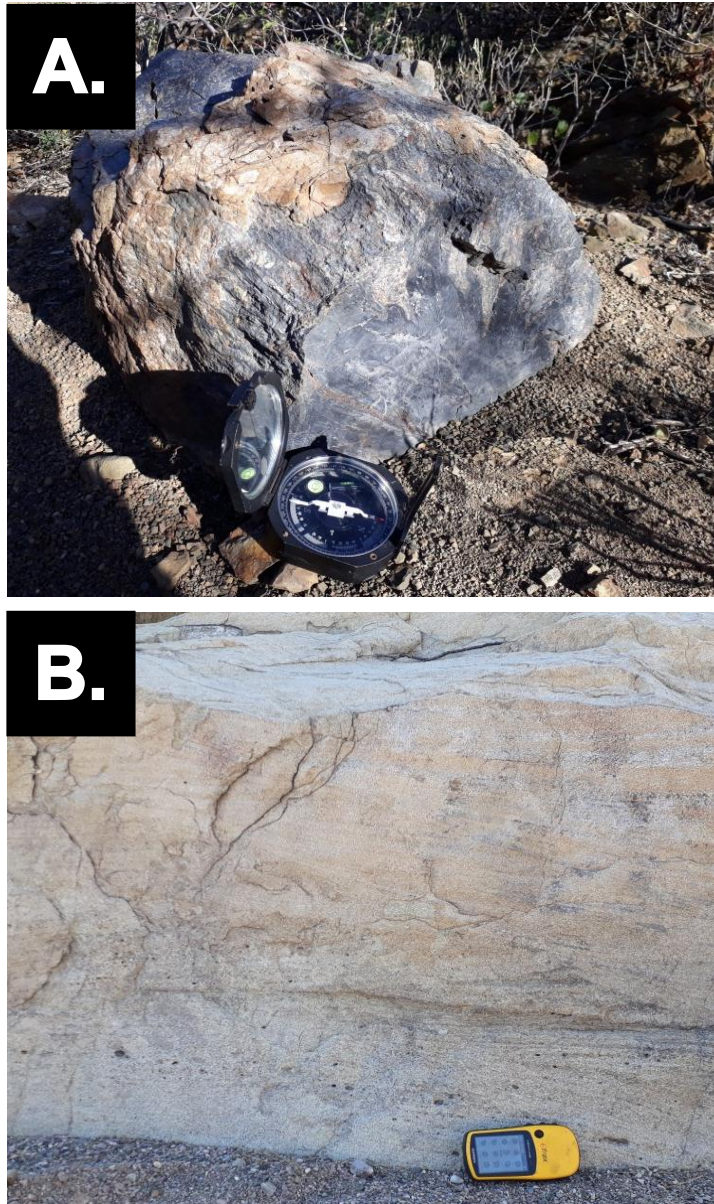


Figura 19. A. Tronco silicificado ubicado en el área de Cabullona, Sonora., y B. Arenisca con estratificación cruzada perteneciente al Miembro San Marcos.

2.2.1.3 Miembro San Juan

El miembro San Juan tiene un espesor medido de 905 m, donde, la base está representada por una secuencia grano decreciente de coloración grisácea, y un tamaño de grano que va de medio a grueso, la cual presenta estratificación cruzada, con pequeñas intercalaciones de lutitas oscuras (negras verdosas). La parte media de este miembro se encuentra representada por una secuencia grano decreciente de areniscas con coloraciones marrones a gris oscuro (Figura 20A), las cuales presentan estratificación cruzada, madera fósil y posibles bivalvos erosionados (Figuras 20B), con pequeñas intercalaciones de lutitas oscuras (negras verdosas), y localmente se encuentran bivalvos y pelecípodos en areniscas de grano grueso (Figura 20C).

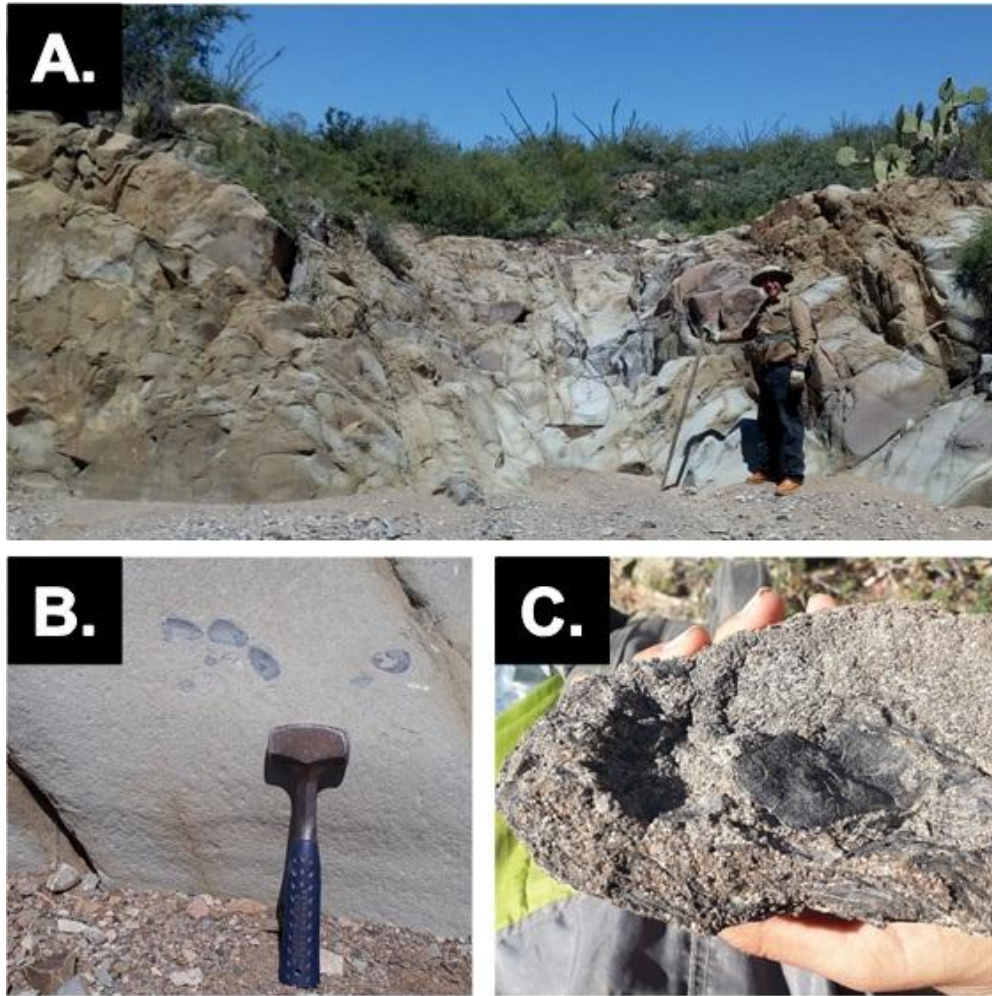


Figura 20. A. Afloramiento de areniscas pertenecientes la parte media inferior del Miembro San Juan, B. Afloramiento de areniscas con posibles bivalvos erosionados, y C. Muestra de arenisca de grano grueso con bivalvos y pelecípodos, en el área de Cabullona, Sonora.

La parte superior del miembro San Juan está caracterizada por una secuencia de areniscas con una coloración gris oscuro de grano medio intercalada con lutitas de color verdoso-negro (Figura 21A). Esta secuencia presenta nódulos carbonatados (Figura 21B), areniscas conglomeráticas y localmente troncos silificados (Figura 21C).

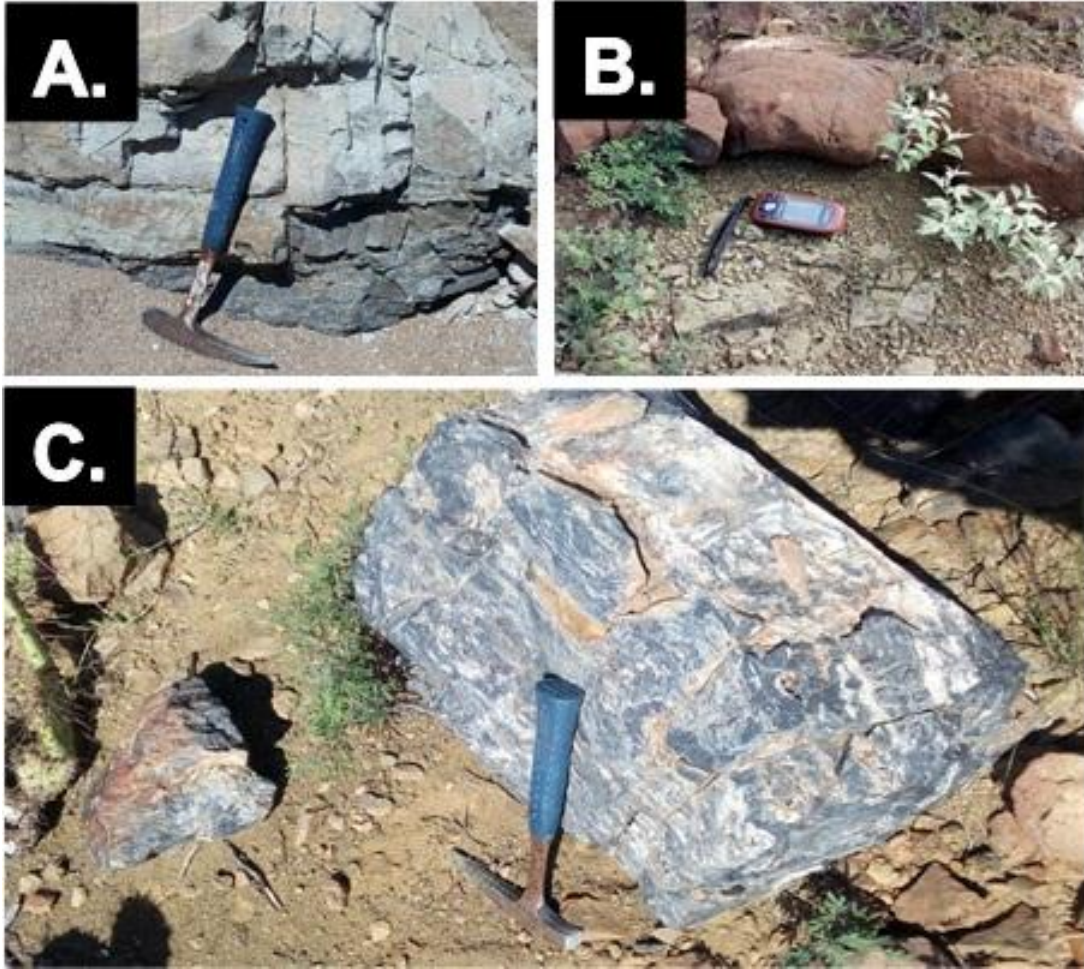


Figura 21. A. Afloramiento de areniscas y lutitas, B. Nódulos calcáreos y C. Troncos silicificados de la parte superior del miembro San Juan, en el área de Cabullona, Sonora.

CAPÍTULO 3

PETROGRAFÍA

3.1 Introducción

Las rocas detríticas, también llamadas rocas clásticas, siliciclásticas o terrígenas, representan una mezcla de granos minerales y fragmentos de roca derivados del intemperismo y erosión de rocas preexistentes (Monreal *et al.*, 2000).

El método petrográfico más utilizado para determinar cuantitativamente la composición de los granos de arena es el conteo de estos en el microscopio, utilizando una la platina graduada que permite el movimiento de la lámina delgada a un cierto intervalo de distancia, formando una red de puntos en un sistema de coordenadas (x-y). En esta técnica se registra por cada punto la composición del grano localizado en el centro de la retícula, este análisis cuantitativo incluye un cálculo estadístico del número de granos de una cierta composición, o bien del porcentaje de área que estos ocupan en comparación con el área total de la lámina delgada (Sánchez-Zavala y Centeno-García, 2016).

Gazzi (1966) y Dickinson (1970) sugieren clasificar a las partículas del tamaño de arena que se encuentran dentro de un fragmento de roca como partículas monocristalinas, este método es llamado Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al.*, 1984).

La clasificación más utilizada para los diferentes tipos de fragmentos es: cuarzo total (Q), cuarzo monocristalino (Qm) y policristalino (Qp) o calcedonia (C); feldespato (F), plagioclasa (Pg) y feldespato potásico (FK), y fragmentos líticos (L), líticos de rocas ígneas (Li), líticos de rocas sedimentarias (Ls) y líticos de rocas metamórficas

(Lm), así como también se tienen los líticos volcánicos con textura félsica (Lvf), líticos volcánicos con textura lathwork (Lvl) y líticos volcánicos con textura microlítica (Lvm).

Una vez que se obtienen los resultados de los parámetros anteriores, se puede obtener información importante por medio de diagramas ternarios. En este estudio se utilizó el diagrama de Folk (1980) para la clasificación de las areniscas.

Al igual que el diagrama de clasificación también se utilizó en este estudio dos diagramas ternarios para determinar la procedencia de las areniscas de la Formación Cintura. En este caso se utilizaron los diagramas Qt-F-L y Qm-F-Lt propuestos por Dickinson *et al.* (1983).

Existen varios diagramas ternarios para la clasificación de ambiente tectónico, basados en la relación entre la composición y el ambiente tectónico al que se asocian las cuencas sedimentarias, debido a que la composición mineralógica de las areniscas se encuentra estrechamente relacionada con el régimen tectónico donde éstas se originan (Dickinson, 1970; Dickinson y Suczek, 1979). Dentro de los diagramas más destacados se tienen los diagramas propuestos por Dickinson *et al.* (1983), ya que permiten reducir a un mínimo el efecto del tamaño de grano sobre la composición modal (Valloni y Mezzardi, 1984; Ingersoll *et al.*, 1984).

3.2 Resultados

3.2.1 Descripción petrográfica

Para la descripción de las muestras de los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan de la Formación Cintura en el área de Cabullona, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros texturales: 1) tamaño de grano, 2) grado de redondez, 3)

clasificación, 4) presencia de matriz/cemento; así como los componentes principales de la fracción mineral.

3.2.1.1 Miembro Marquechi

Las muestras pertenecientes a este miembro son areniscas de textura sostenida de grano fino a medio, con una mala a moderada clasificación y granos de subangulosos a subredondeados. Las principales fases mineralógicas en estas areniscas son: 1) cuarzo monocristalino (con extinción recta y ondulante), policristalino (principalmente de origen metamórfico con contactos internos suturados) y microcristalino (pedernal o “*chert*”); 2) feldespatos como plagioclasas, feldespatos potásicos (como la microclina), e inclusive en la muestra CFS-02 algunos de los feldespatos presentes en la roca muestran textura gráfica, además estos feldespatos se encuentran alterados a arcillas, sericita y en menor porción a calcita (Figura 22); y 3) líticos principalmente de origen volcánico con texturas felsíticas, microlíticas y de tipo “*lathwork*”.

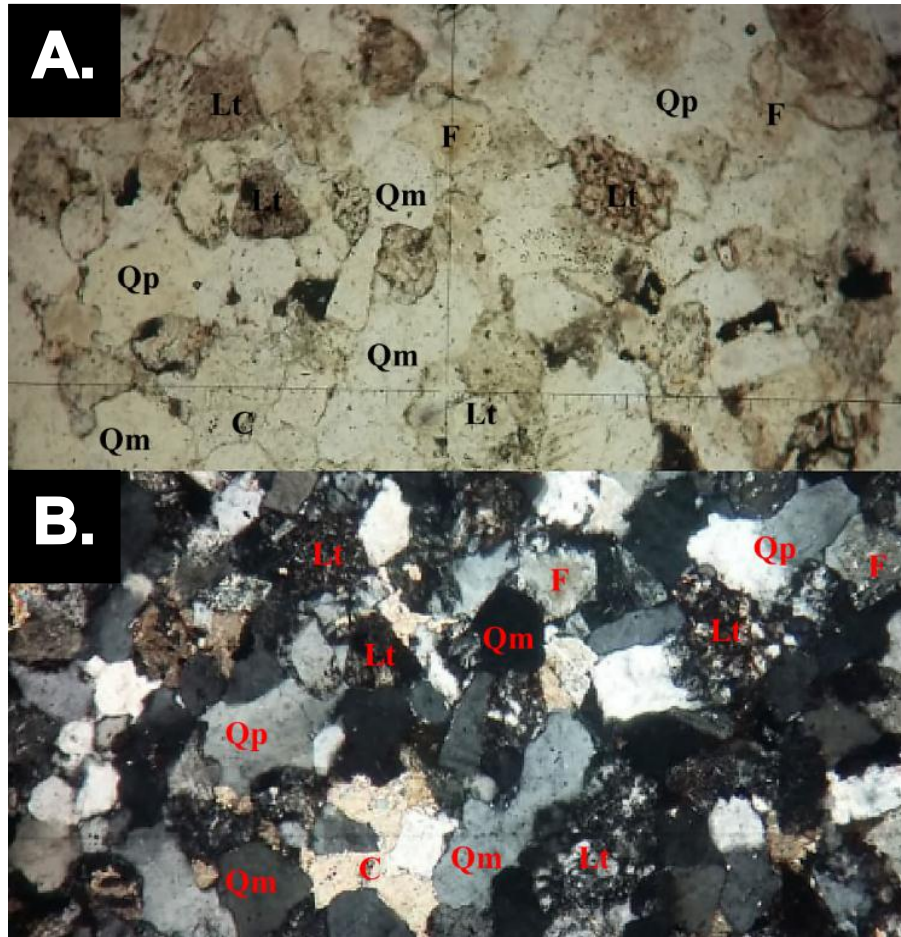


Figura 22. Fragmentos de roca (Lt), cuarzo mono y policristalino (Qm-Qp), y algunos feldespatos (F) alterados principalmente a arcillas y sericita. Como accesorios se tienen óxidos de Fe. La calcita (C) se presenta como cementante. A. Luz natural, y B. Luz polarizada.

Los minerales accesorios presentes en este miembro se clasifican en pesados y ligeros, en los minerales ligeros tenemos a las micas, tales como clorita, muscovita y glauconita (Figura 23); dentro de los pesados se tiene a los circones y diferentes óxidos de Fe (como la hematita). Los contactos que se observan entre los granos son cóncavo-convexos, suturados y rectos. Los granos se encuentran cementados por calcita y en menor porcentaje se encuentran dentro de una matriz arcillosa.

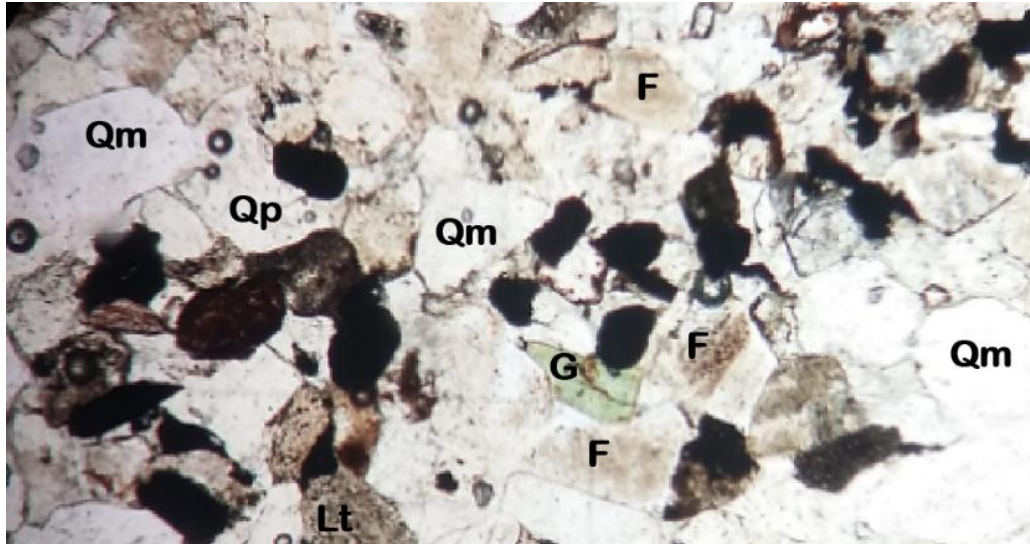


Figura 23. Presencia de glauconita (G) en areniscas del miembro Marquechi a lo largo de una lámina donde se tienen óxidos de Fe.

3.2.1.2 Miembro San Marcos

Las areniscas de este miembro son de textura sostenida y presentan un tamaño de grano que va de grueso a fino, son de moderadamente a mal clasificadas, y con granos de subangulosos a subredondeados. Como componentes principales se tiene: a) cuarzo monocristalino (con extinción ondulante, principalmente y extinción recta), policristalino (de origen metamórfico) y microcristalino (pedernal o “*chert*”); b) dentro de los feldespatos tenemos plagioclasas, feldespatos potásicos teniendo dentro de estos a la microclina, los cuales se presentan en mayor porcentaje que en el miembro basal, pero en menor porcentaje que el miembro San Juan, algunos de estos feldespatos se encuentran alterados a arcillas y sericita (en la muestra se observa a la clorita afectándolos); c) dentro de los líticos, al igual que en el miembro Marquechi, se tiene principalmente fragmentos volcánicos con texturas felsíticas, microlíticas y de

tipo “*lathwork*”; y d) los minerales accesorios presentes son micas como clorita y muscovita (solo en la muestra CFS-11 se observa glauconita); y minerales pesados como el circón y óxidos de Fe (como la hematita). Los contactos que se observan entre los granos son cóncavo-convexos, suturados y rectos (Figura 24). La calcita es el principal cementante de los granos, y en menor porción se encuentran en una matriz arcillosa.

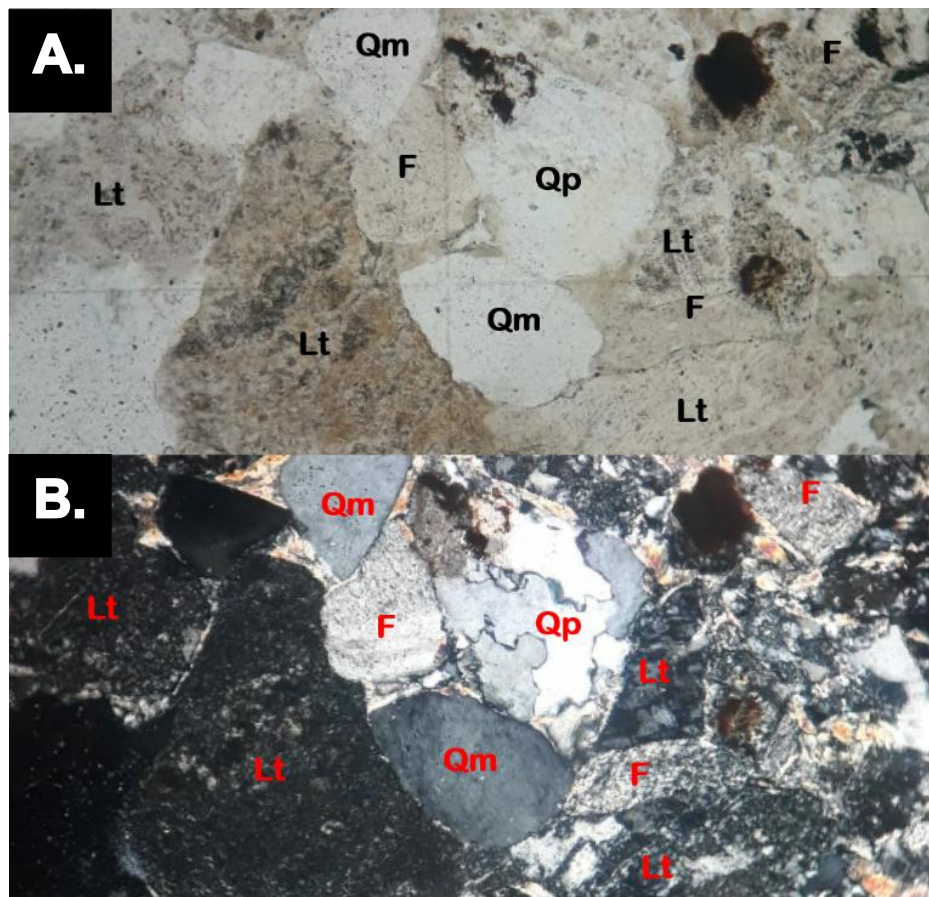


Figura 24. Arenisca de grano grueso del miembro San Marcos. Presenta fragmentos de roca (Lt), feldspatos alterados a arcilla y sericita (F), y cuarzo mono y policristalino (Qm-Qp), algunos de éstos últimos con texturas internas metamórficas. A. Luz natural, y B. Luz polarizada.

3.2.1.3 Miembro San Juan

Las areniscas de este miembro son de textura sostenida y de grano grueso a medio, solo la muestra CFS-26 tiene un tamaño de medio a fino. La clasificación de estas areniscas varía de moderada a mala, con granos de subangulosos a subredondeados. Al igual que los miembros anteriores estas areniscas tienen de componentes principales al cuarzo monocristalino (con extinción ondulante y extinción recta), policristalino (de origen metamórfico) y microcristalino (pedernal o “*chert*”); en los feldespatos se tienen plagioclasas, feldespatos potásicos y microclina (se observa en mayor cantidad que los miembros anteriores), algunos alterados a arcilla (sericita) (Figura 25); y los líticos son principalmente fragmentos volcánicos con texturas felsíticas, microlíticas y de tipo “*lathwork*”. Como minerales accesorios continua la presencia de micas como la clorita y la muscovita (en este miembro ya no se observa glauconita); y como minerales pesados están el circón y los óxidos de Fe (hematita). Los contactos que se observan entre los granos son cóncavo-convexos, suturados y rectos. Los granos se encuentran principalmente cementados por calcita y en menor proporción en una matriz arcillosa.

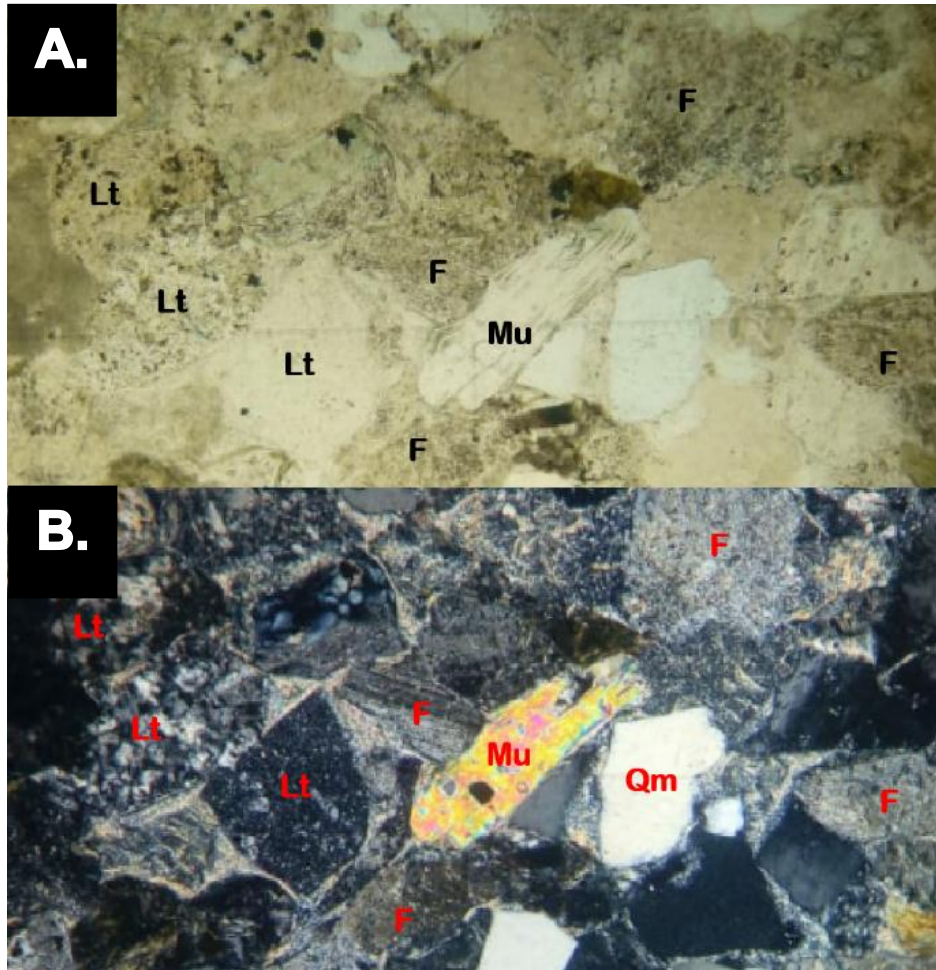


Figura 25. Arenisca de grano grueso del miembro San Juan. Presenta una gran cantidad de fragmentos de roca (Lt), así como feldespatos alterados a arcilla y sericita (F), y Cuarzo monocristalino (Qm). La muscovita aparece como accesorio (Mu). A. Luz natural, y B. Luz polarizada.

3.3 Clasificación de areniscas

Con base en los resultados del conteo de puntos (Tabla 5) se obtuvieron los porcentajes para cuarzo total (Qt), feldespatos (F) y fragmentos de roca (L) (Tabla 6) y fueron graficados en un diagrama ternario que incluye los campos de clasificación de Folk (1980), obteniendo que las areniscas estudiadas de la Formación Cintura están representadas principalmente por arcosas líticas y litarenitas feldespáticas (Figura 26).

Tabla 5. Conteo de los componentes principales de las areniscas de los miembros correspondientes a la Formación Cintura, colectadas en Cabullona, Sonora. Qm: cuarzo monocristalino, Qp: cuarzo policristalino, P: plagioclasa, Fk: feldespato potásico, Fm: microclina, F: feldespato Lvf: lítico volcánico felsítico, Lvl: lítico volcánico con textura tipo "lathwork", Lvm: Lítico volcánico con textura microlítica, Ls: lítico sedimentario, Lm: lítico metamórfico, Cem: cementante, Mtz: matriz, Ch: pedernal, MO: minerales opacos.

Formación Cintura																
Miembro Marquechi						Miembro San Marcos					Miembro San Juan					
Muestra	CFS 01	CFS 02	CFS 03	CFS 04	CFS 05	CFS 09	CFS 11	CFS 14	CFS 16	CFS 17	CFS 19	CFS 20	CFS 21	CFS 23	CFS 25	CFS 26
Qm	30	29	24	33	22	28	23	26	30	30	12	14	32	13	12	25
Qp	41	20	45	23	3	14	6	11	14	16	3	12	16	4	6	7
P	13	27	7	32	12	17	24	20	25	33	32	13	17	25	27	24
Fk	3	1	2	0	0	5	1	3	10	2	4	0	0	9	1	3
Fm	3	2	0	0	1	0	0	0	0	5	2	4	1	0	10	1
F	83	115	150	55	122	171	180	173	184	159	134	134	117	199	189	167
Lvf	72	85	33	76	57	39	25	62	63	58	77	54	50	36	42	51
Lvl	35	44	26	61	50	38	42	7	7	32	61	70	35	17	11	20
Lvm	38	22	36	66	48	77	44	20	22	39	59	71	57	41	74	70
Ls	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lm	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	0	0	0	0
Cem	50	24	64	9	48	0	39	39	12	4	2	21	49	25	22	20
Mtz	0	0	0	26	17	5	0	11	16	5	0	0	21	11	0	0
Ch	0	4	2	4	1	0	0	1	2	2	4	4	0	2	1	4
Micas	5	7	3	1	7	0	8	27	14	14	5	1	4	18	5	7
MO	18	13	4	12	10	3	4	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Otros	9	6	4	0	1	3	4	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Total	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Tabla 6. Datos recalculados en porcentaje de la roca total del análisis del conteo de puntos de las areniscas de la Formación Cintura, en el área de Cabullona. (Qt: cuarzo total, F: feldespato, L: lítico, Qm: cuarzo monocristalino, Lt: Lítico total).

Formación Cintura							
Miembro	Parámetro/ muestra	QtFL (%)			QFLt (%)		
		Qt	F	L	Qm	F	Lt
Marquechi	CFS-01	22	32	46	9	32	58
	CFS-02	14	42	44	8	42	50
	CFS-03	21	49	29	7	49	43
	CFS-04	16	25	59	9	25	66
	CFS-05	8	43	49	7	43	50
San Marcos	CFS-09	11	50	40	7	50	43
	CFS-11	8	59	32	7	59	34
	CFS-14	11	61	28	8	61	31
	CFS-16	12	62	26	8	62	30
	CFS-17	12	53	35	8	53	39
San Juan	CFS-19	4	44	52	3	44	53
	CFS-20	7	40	53	4	40	56
	CFS-21	15	42	44	10	42	49
	CFS-23	5	68	27	4	68	28
	CFS-25	5	61	34	3	61	36
	CFS-26	9	53	38	7	53	40

De manera general se puede observar en la Figura 26 que las areniscas del miembro Marquechi presentan la mayor proporción de fragmentos de roca, por lo que 4 de las muestras estudiadas corresponden a litarenitas feldespáticas, las cuales presentan un bajo contenido en cuarzo (7-9%), con valores altos principalmente en fragmentos líticos (43 – 66%) y feldespatos (25 – 49%), solo una muestra cae en el campo de arenisca lítica. Mientras que el miembro San Marcos las areniscas se clasifican principalmente como arcosas líticas, caracterizadas por clastos de cuarzo (7-8%), fragmentos líticos (30-43%) y con un valor mayor en feldespato (50-62%); por

su parte, las areniscas del miembro San Juan se clasifican como arcosas líticas y litarenitas feldespáticas, las cuales contiene la menor cantidad de cuarzo total (3-10%), mientras que el contenido de feldespato y fragmentos líticos se muestran mayores con respecto al cuarzo (40-68% y 28-56%; respectivamente).

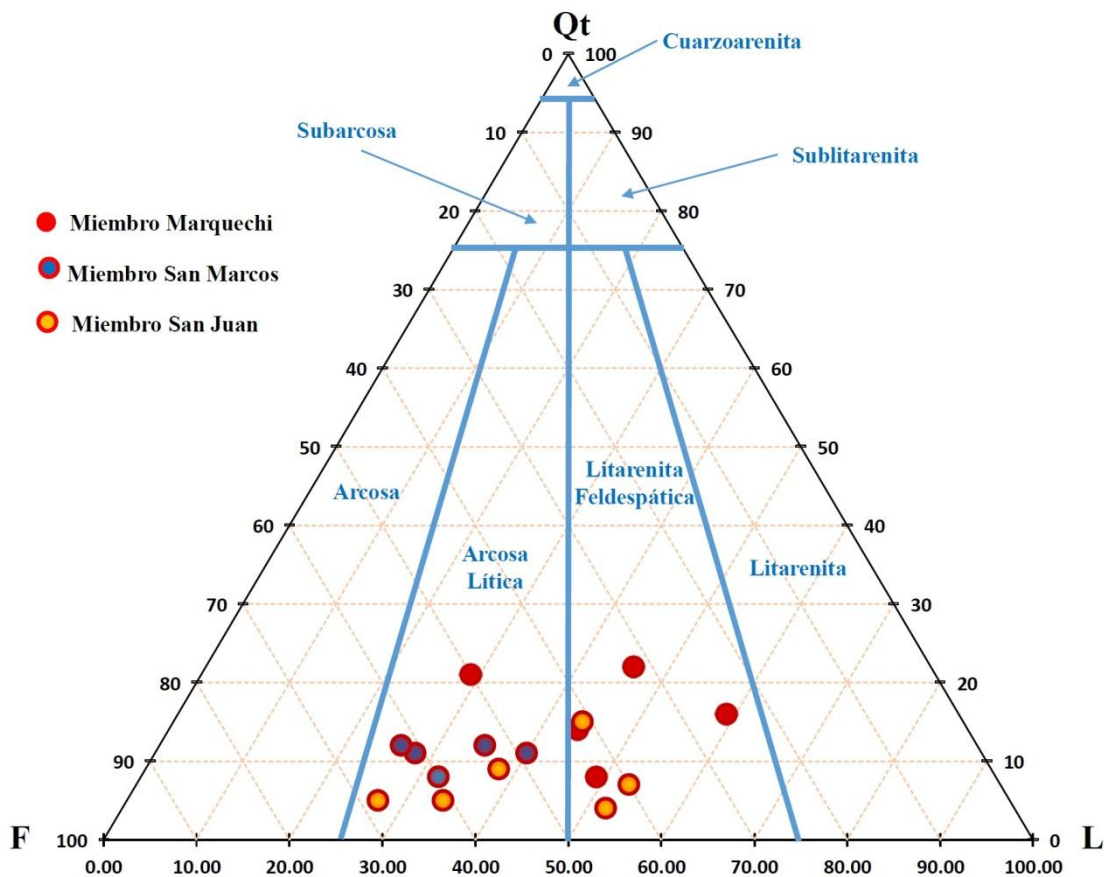


Figura 26. Diagrama de clasificación (Folk, 1980) de las areniscas de los miembros Marquechi (círculos rojos), San Marcos (círculos azules) y San Juan (círculos amarillos) de la Formación Cintura (donde Qt: cuarzo total, Lt: fragmento lítico total y Ft: feldespato total).

3.4 Procedencia de areniscas

En general, las areniscas estudiadas de la Formación Cintura presentan muy poco porcentaje de cuarzo (total y monocristalino), mientras que los feldespatos y fragmentos de roca se encuentran con porcentajes mayores (Tabla 6).

Al graficar los valores obtenidos de la composición granular de estas areniscas en los diagramas de procedencia de Dickinson *et al.* (1983), puede observarse que en el diagrama Qt-F-L (Figura 27A), las muestras se ubican dentro del campo de un arco transicional, con una cierta tendencia hacia el arco no-disectado para las areniscas de la base y la cima. Por otro lado, si se toma solo cuarzo monocristalino para el diagrama Qm-F-Lt (Figura 27B) y el cuarzo policristalino se considera como un fragmento de roca, la procedencia de estas areniscas se mantiene dentro del campo del arco transicional, sin embargo, algunas de las muestras del miembro Marquechi, que presentan la mayor cantidad de cuarzo monocristalino, tienen una tendencia hacia la procedencia de arco disectado.

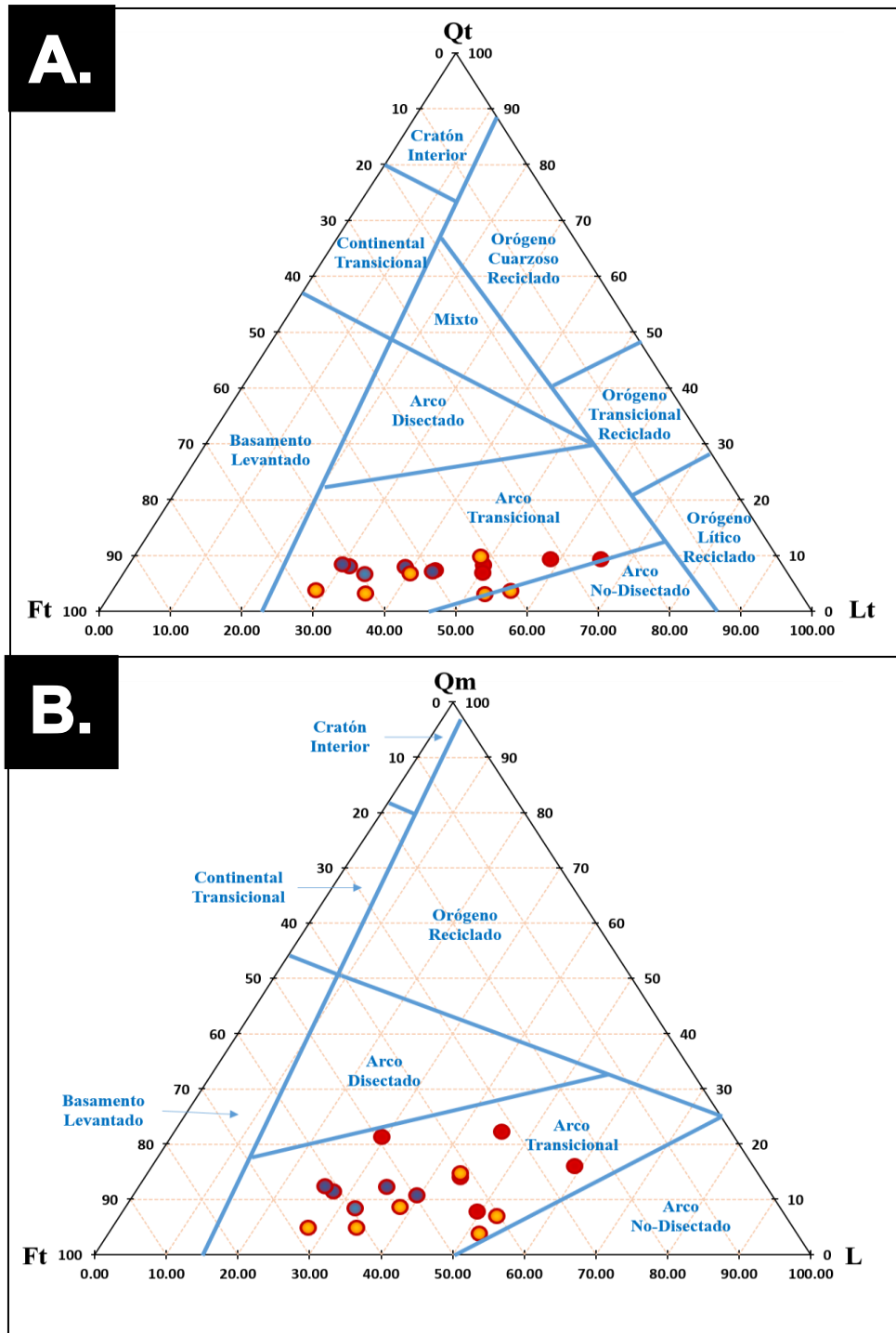


Figura 27. Diagramas de procedencia de Dickinson et al. (1983) A. Qt-F-L, y B. Qm-F-Lt para las areniscas de la Formación Cintura. Qm: cuarzo monocristalino, L: fragmento lítico total, Qt: cuarzo total, Lt: fragmento lítico total y Ft: feldespato total.

Los resultados de este análisis de procedencia de alguna manera no son consistentes con los reportados por Grijalva-Noriega (1996), ya que, en su trabajo, además de reconocer la procedencia de arco para las areniscas de los miembros San Marcos y San Juan, sugiere una procedencia de orógeno reciclado cuarzoso para el miembro Marquechi, lo que será retomado en el apartado de discusión.

Es importante establecer que mineralógicamente, algunos granos de cuarzo monocristalino presentan extinción ondulante, contactos internos suturados y estructuras de Bhöem, además, se tiene la presencia de granos con textura gráfica (considerados en este trabajo para el conteo de puntos como feldespatos). Lo anterior sugiere que probablemente estos granos fueron erosionados de areniscas de cuarzo paleozoicas y/o del basamento ígneo-metamórfico paleoproterozoico de la región. Por su parte, la mayor cantidad de granos líticos están representados por fragmentos de roca volcánica con diferentes texturas, correspondiendo a la erosión de un arco del Mesozoico temprano, cuyos afloramientos se tienen más hacia el norte, oeste y noroeste del área estudiada.

3.5 Discusión

Estudios anteriores, donde se sugiere una procedencia de arco para las areniscas de los miembros San Marcos y San Juan (Grijalva-Noriega, 1996), concuerdan con los obtenidos en este trabajo, mientras, que los resultados obtenidos para el miembro Marquechi no concuerdan con los de este estudio, ya que Grijalva-Noriega (1996) sugiere una procedencia de orógeno reciclado cuarzoso, mientras que los resultados de este estudio indica una procedencia de arco transicional.

Es importante establecer que mineralógicamente, algunos granos de cuarzo monocristalino presentan extinción ondulante, contactos internos suturados y estructuras de Bhöem, además, se tiene la presencia de granos con textura gráfica (considerados en este trabajo para el conteo de puntos como feldespatos). Lo anterior sugiere que probablemente estos granos fueron erosionados de areniscas de cuarzo paleozoicas y/o del basamento ígneo-metamórfico paleoproterozoico de la región. Por su parte, la mayor cantidad de granos líticos están representados por fragmentos de roca volcánica con diferentes texturas, correspondiendo seguramente a la erosión de un arco del Mesozoico temprano, cuyos afloramientos se tienen más hacia el norte, oeste y noroeste del área estudiada.

CAPÍTULO 4

GEOQUÍMICA

4.1 Introducción

La composición química de las areniscas suele considerar el contenido de elementos mayores, así como de elementos traza y tierras raras, los cuales se utilizan para determinar características del ambiente de depósito y en ocasiones de la procedencia de los sedimentos (Zavala-León, 2018).

Dentro de los elementos traza se encuentran los elementos litófilos de alto campo de fuerza (HFSE) permanecen usualmente inmóviles a diferencia de los elementos litófilos de radio iónico grande (LILE), resistiendo mejor a los procesos postgenéticos de metamorfismo y alteración hidrotermal. Los LILE, por otra parte, son en general móviles a los fluidos. La mayoría de las rocas analizadas han sufrido algún tipo de alteración, y con ello variaciones respecto a la signatura química de elementos mayores que presentaba originalmente. Los HFS, al ser incompatibles inmóviles, son los que representan de mejor manera la composición química original de la roca (Bhatia y Crook 1986).

4.2 Resultados

4.2.1 Elementos de óxidos mayores

En el Anexo 1 y la Tabla 7 se muestran las concentraciones de elementos mayores en las muestras de areniscas y lutitas obtenidas en el área de Cabullona, pertenecientes a la Formación Cintura del Grupo Bisbee. Dentro de las areniscas se muestra una variación moderada en SiO_2 , mientras que en las lutitas presenta una

variación pequeña (65.4-86.6%; 64.9-71.0%; respectivamente), al igual que las con concentraciones de Al_2O_3 (6.1-15.3%; 12.9-15.8%; respectivamente). Las areniscas presentan concentraciones mayores de CaO que en las lutitas (0.3-7.4%; 1.2-2.5%; respectivamente). Las areniscas tienen una variación mayor de Fe_2O_3 en comparación a las lutitas (1.1-5.2%; 3.9-5.0%; respectivamente). La mayoría de las areniscas se encuentran enriquecidas en Na_2O en comparación de K_2O (Anexo 1), mientras que las lutitas se encuentran con menor concentración en Na_2O . Ambas litologías presentan bajas concentraciones en TiO_2 , MnO y P_2O_5 (Anexo 1 y Tabla 7).

Tabla 7. Concentración de elementos mayores de las lutitas de la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (% en peso).

Muestra	CFS-06	CFS-08	CFS-10	CFS-12	CFS-18	CFS-22	Promedio
Miembro	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	
SiO₂	70.957	68.89	67.845	68.24	64.886	65.194	67.7 ± 2.3
TiO₂	0.556	0.566	0.681	0.665	0.642	0.745	0.6 ± 0.1
Al₂O₃	12.874	14.607	14.513	15.053	15.416	15.793	14.7 ± 1
Fe₂O₃^T	3.852	4.874	4.232	4.385	4.921	4.986	4.5 ± 0.5
MnO	0.055	0.049	0.064	0.048	0.071	0.03	0.1 ± 0
MgO	0.733	1.055	1.125	1.058	1.482	1.463	1.2 ± 0.3
CaO	2.382	1.203	2.301	1.56	2.468	1.419	1.9 ± 0.6
Na₂O	1.054	1.225	2.647	1.966	0.418	0.627	1.3 ± 0.8
K₂O	2.025	2.73	2.086	2.889	3.679	3.504	2.8 ± 0.7
P₂O₅	0.252	0.061	0.117	0.126	0.226	0.151	0.2 ± 0.1
PXC	5.26	4.74	4.39	4.01	5.79	6.09	5.1 ± 0.8
SUMA	100	100	100	100	100	100	100 ± 0
CIA	69	68	57	62	74	73	67.3 ± 50
PIA	75	73	59	66	89	85	74.8 ± 11.4
ICV	0.83	0.8	0.91	0.84	0.89	0.81	0.8 ± 0
SiO₂/Al₂O₃	5.51	4.72	4.67	4.53	4.21	4.13	4.6 ± 0.5
K₂O/Al₂O₃	0.16	0.19	0.14	0.19	0.24	0.22	0.2 ± 0
Al₂O₃/TiO₂	23.15	25.81	21.31	22.64	24.01	21.2	23 ± 1.7

4.2.1.1 Clasificación de la roca

Se utilizó el diagrama de clasificación de areniscas y lutitas de Herron (1988), donde se consideran tres parámetros: el logaritmo de SiO₂/Al₂O₃ contra el logaritmo de Fe₂O₃/K₂O y el contenido de CaO total el cual actúa como una variable independiente (este no se representa en el diagrama). La relación SiO₂/Al₂O₃ se utiliza como índice de madurez mineralógica en las areniscas, lo cual permite diferenciar entre tipos de arenisca. También, posee un significado textural, ya que se puede diferenciar entre areniscas y lutitas. Mientras que la relación Fe₂O₃/K₂O puede

utilizarse como un indicador de estabilidad mineralógica, ya que actúa como un factor discriminante entre el contenido de fragmentos líticos y feldespatos. Además, cuando esta relación presenta valores muy altos indica una alta concentración de minerales de hierro en las areniscas y lutitas. El contenido total de CaO diferencia entre sedimentos no calcáreos (CaO < 4%), calcáreos (CaO 4-15%) y carbonáticos (CaO > 15%).

Las muestras de areniscas y lutitas de los miembros de la Formación Cintura se graficaron en el diagrama de Herron (1988) (Figura 28). Para el miembro Marquechi se tiene un total de tres muestras de areniscas y una de lutita, las cuales se clasifican principalmente como areniscas ricas en Fe y wackas, solo una muestra tiende hacia la línea del campo de litarenita. Mientras que las muestras de areniscas y lutitas (n= 6 y n= 4, respectivamente) del miembro San Marcos son clasificadas como wackas. Por otra parte, las muestras de areniscas y lutitas del miembro San Juan (n= 5 y n= 1, respectivamente) se clasifican como arcosas, wackas y en menor porcentaje como litarenitas. La baja relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$, es una evidencia de la baja madurez mineralógica que tienen las areniscas de la Formación Cintura, debido a la presencia de matriz (enriquecimiento en Al_2O_3) en las mismas, desplazándolas hacia el campo de las lutitas. Además, relaciones $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ relativamente altas (~ 1 y >1), reflejan escasa estabilidad mineralógica en las areniscas debido a un elevado contenido de minerales inestables ricos en hierro y en magnesio, los cuales se encuentran dentro de los fragmentos líticos.

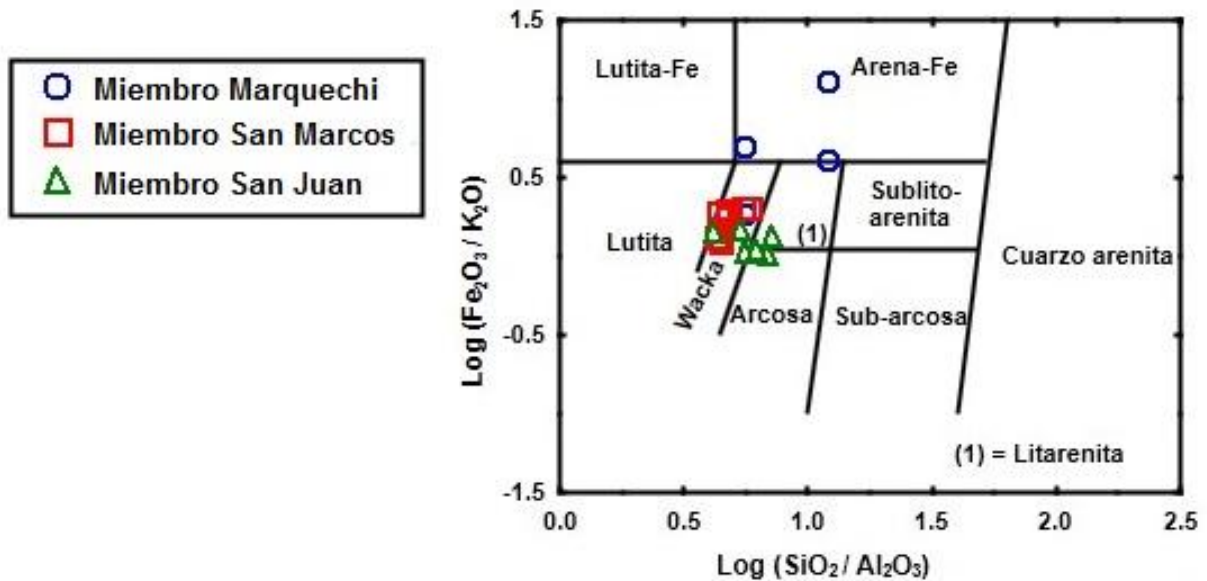


Figura 28. Diagrama de clasificación geoquímica de las muestras de los miembros de la Formación Cintura recolectadas en el área de Cabullona, Sonora (En base al diagrama de Herron, 1988).

4.2.2 Elementos traza

La concentración de los elementos trazas en los sedimentos resulta de la influencia del área de aporte, el intemperismo, la diagénesis y la selección de los sedimentos (Raigemborn, 2007). Del mismo modo, el contenido de tierras raras (REE) en los sedimentos depende principalmente de su procedencia (Rollinson, 1993).

En el Anexo 2 y la Tabla 8 se muestran las concentraciones de elementos traza (en ppm) para las areniscas y lutitas (respectivamente) pertenecientes a la Formación Cintura, estas concentraciones fueron normalizadas con los valores de Taylor y McLennan (1985) de Corteza Continental Superior (UCC, por sus siglas en inglés), estas concentraciones se muestran graficadas en la Figura 29.

Tabla 8. Concentraciones de elementos traza (ppm) de las lutitas de la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona.

Muestra	CFS 06	CFS 08	CFS 10	CFS 12	CFS 18	CFS 22	Promedio
Miembro	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	
Sc	0.626	0.859	0.674	0.803	1.096	1.152	0.87 ± 0.22
Co	0.623	0.857	0.836	0.816	0.806	0.630	0.76 ± 0.11
Ni	0.459	0.667	2.077	0.709	1.100	1.060	1.01 ± 0.58
Cr	0.723	0.860	0.673	0.773	1.065	1.075	0.86 ± 0.17
V	0.906	1.077	1.033	1.059	1.502	1.414	1.17 ± 0.24
Sr	0.334	0.311	0.501	0.442	0.152	0.174	0.32 ± 0.14
Rb	0.814	1.145	0.708	1.055	1.376	1.319	1.07 ± 0.27
Ba	1.236	1.058	1.193	0.623	1.233	0.864	1.03 ± 0.25
Pb	0.683	1.360	1.052	0.879	0.400	0.984	0.89 ± 0.33
Zr	1.116	1.230	1.544	1.367	0.953	1.110	1.22 ± 0.21
Y	1.557	0.900	1.373	0.932	1.005	1.091	1.14 ± 0.26
Nb	0.555	0.631	0.618	0.645	0.643	0.766	0.64 ± 0.07
Hf	0.969	1.071	1.256	1.166	0.858	0.975	1.05 ± 0.15
Th	0.912	1.123	1.064	1.151	1.305	1.365	1.15 ± 0.16
U	0.808	1.110	0.788	0.967	1.820	1.549	1.17 ± 0.42
Th/U	1.13	1.01	1.35	1.19	0.72	0.88	1.05 ± 0.23

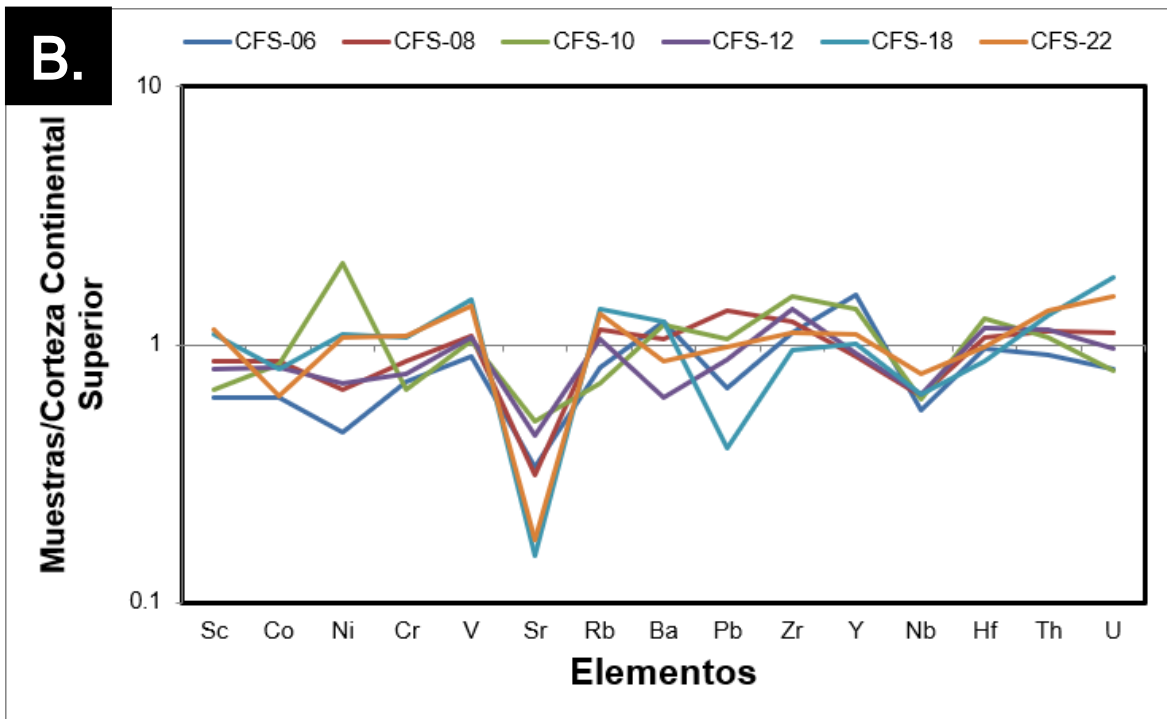
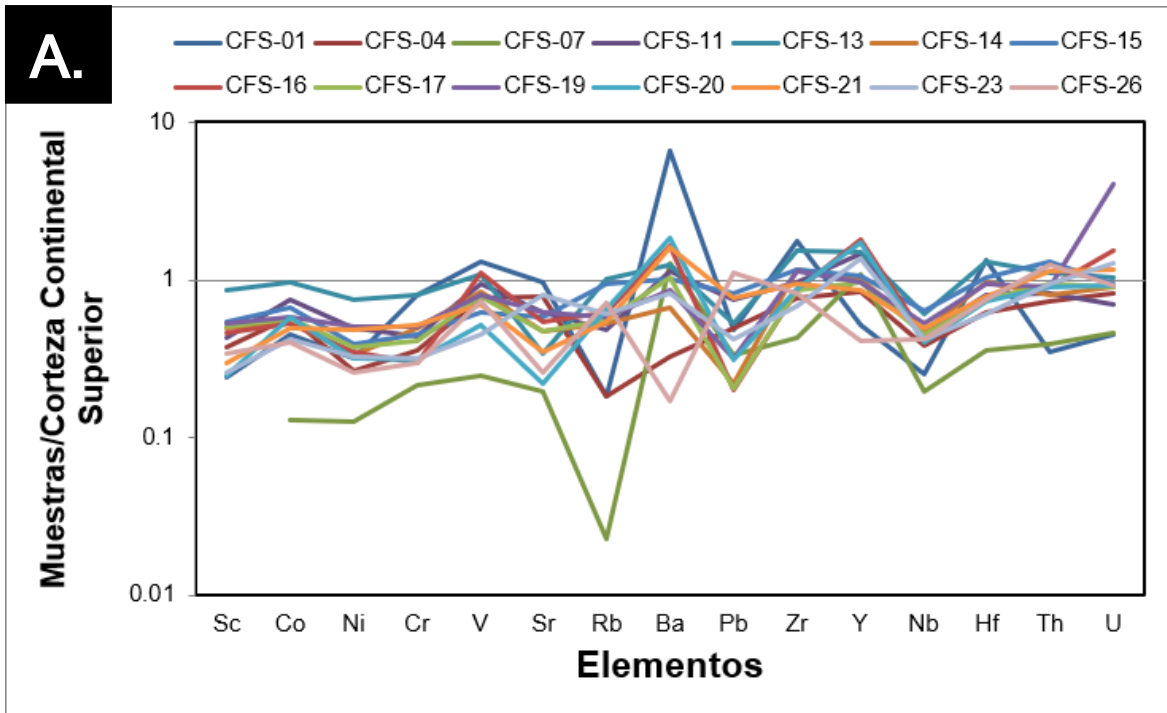


Figura 29. Diagrama de elementos traza A. Areniscas pertenecientes a la Formación Cintura normalizados con los valores de Corteza Continental Superior (UCC), tomados de Taylor y McLennan (1985) B. Lutitas.

En general, las concentraciones de los elementos trazas en las areniscas se muestran con valores cercanos a 1, a excepción del Rb en la muestra CFS-07, ya que presenta un valor muy por debajo del 1 (0.02 ppm), y con valores muy por encima de 1 se tienen al Ba en la muestra CFS-01 y al U en la muestra CFS-19 (6.65 ppm y 4.03 ppm, respectivamente). Los valores promedio normalizados a UCC (Taylor y McLennan, 1985) se muestran en el Anexo 2 y Tabla 8 para las areniscas y lutitas de la Formación Cintura (respectivamente). Al igual que las concentraciones de elementos traza en las lutitas, estos se muestran cercanos a 1, a excepción del Ni que muestra un valor mayor (2.08 ppm), las lutitas presentan un empobrecimiento de Sr en todas sus muestras (Figura 29).

Las areniscas y lutitas presentan concentraciones bajas de Sr, Rb y Ba, solo una de las muestras de areniscas presenta un ligero enriquecimiento de Ba (CFS-01), lo que esto indica según Nesbitt *et al.* (1980) un alto grado de intemperismo en el área fuente.

4.2.2.1 Elementos de tierras raras (REE)

Los resultados de los análisis de tierras raras de las areniscas y lutitas de la Formación Cintura se muestran en el Anexo 3 y la Tabla 9 (respectivamente), estos fueron normalizados con los valores de condrita de McDonough y Sun (1995). La sumatoria de los contenidos de tierras raras (Σ REE) muestra una gran variación en las areniscas, que va de 54.06 ppm a 164.74 ppm, mientras que para las lutitas se tiene una variación que va de 155.65 ppm a 231.30 ppm.

Tabla 9. Concentraciones de los elementos de tierras raras (ppm) de las lutitas pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (datos normalizados a condrita con los valores de McDonough y Sun (1995).

Muestra	CFS-06	CFS-08	CFS-10	CFS-12	CFS-18	CFS-22	Promedio
Miembro	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	
La	126.08	151.53	128.59	140.73	165.88	203.23	152.67 ± 28.85
Ce	99.14	112.24	97.19	108.55	133.89	155.08	117.68 ± 22.53
Pr	82.98	92.79	78.39	86.14	106.58	122.65	94.92 ± 16.75
Nd	65.48	70.03	58.43	64.30	82.15	91.76	72.02 ± 12.52
Sm	43.79	43.92	36.27	39.96	52.89	56.48	45.55 ± 7.70
Eu	23.56	21.31	21.26	21.28	27.53	28.72	23.94 ± 3.38
Gd	30.96	29.85	23.96	27.09	36.44	37.36	30.94 ± 5.22
Tb	25.44	25.24	20.05	23.37	30.79	31.49	26.06 ± 4.39
Dy	21.69	22.67	17.16	21.02	27.22	27.33	22.85 ± 3.91
Ho	18.98	21.18	15.52	19.51	24.37	24.53	20.68 ± 3.45
Er	17.99	21.32	15.22	18.97	23.64	23.80	20.16 ± 3.39
Yb	17.40	21.98	15.66	18.97	22.81	23.31	20.02 ± 3.15
Lu	17.23	21.83	15.71	18.72	22.13	22.65	19.71 ± 2.91
ΣREE	567.14	634.58	522.12	587.31	728.79	819.68	643.3 ± 111.5
LREE	417.46	470.51	398.86	439.67	541.40	629.20	482.8 ± 87.4
HREE	149.68	164.07	123.26	147.65	187.40	190.48	160.4 ± 25.7
Eu/Eu*	0.640	0.589	0.721	0.647	0.627	0.625	0.6 ± 0
La/Sc	4.336	3.801	4.112	3.775	3.261	3.802	3.8 ± 0.4
Th/Sc	1.415	1.272	1.536	1.394	1.158	1.153	1.3 ± 0.2
Th/Co	1.565	1.401	1.362	1.509	1.732	2.320	1.6 ± 0.4
Cr/Th	2.596	2.505	2.069	2.196	2.669	2.577	2.4 ± 0.2
(Gd/Yb)_n	1.779	1.358	1.530	1.428	1.598	1.603	1.5 ± 0.1
(La/Yb)_n	7.247	6.895	8.214	7.418	7.272	8.719	7.6 ± 0.7
(La/Sm)_n	2.879	3.450	3.546	3.521	3.136	3.598	3.4 ± 0.3

4.3 Discusiones

4.3.1 Intemperismo

El intemperismo químico tiene un gran efecto en la composición de las rocas siliciclásticas, donde los cationes grandes permanecen fijos en el residuo intemperizado, en lugar de los cationes más pequeños se lixivian selectivamente (Nesbitt *et al.*, 1980). Estas tendencias químicas son generalmente transferidas al registro sedimentario (Nesbitt y Young, 1982; Wronkiewicz y Condie, 1987) y por lo

tanto proporcionar una herramienta útil para monitorear las condiciones de intemperismo del área fuente.

La intensidad y duración de intemperismo en el área fuente se puede evaluar examinando la relación entre los elementos álcali y alcalino-terros (Nesbitt y Young, 1982). Ca, Na y K, son liberados por los feldespatos durante el intemperismo químico, por lo que la abundancia de estos elementos con respecto a los elementos resistentes se puede utilizar como una medida de la magnitud del intemperismo químico.

Como resultado surgen los índices de intemperismo tales como los mencionados en la Tabla 3, con el fin de obtener el grado de intemperismo del área fuente. El índice de alteración química (CIA, por sus siglas en inglés), es una herramienta importante para evaluar la alteración progresiva de las plagioclasas y del feldespato potásico a minerales de arcilla. Este índice fue propuesto por Nesbitt y Young (1982), el cual se calcula con la siguiente formula:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

Donde CaO* representa el CaO asociado a fases silicatadas.

Los valores de CIA para rocas frescas y minerales son consistentemente cercanos a 50. Las muestras con valores de CIA inferiores a 60 indican un bajo intemperismo químico, valores entre 60 y 80 indican intemperismo químico moderado y valores de más de 80 un intemperismo químico extremo (Fedo *et al.*, 1995; Aristizabal *et al.*, 2009).

El contenido de CaO varía ampliamente en las areniscas con valores que van de 0.3 a 7.4; mientras que para las lutitas los valores van de 1.2 a 2.5. Debido a que

algunos valores de CaO muestran valores mayores al 5%, estos no pueden ser considerados como CaO* por lo que se convierten en valores inadecuados para poder calcular los índices de intemperismo que requieren las concentraciones de CaO*, de acuerdo con lo anterior este estudio se llevó a cabo utilizando el método de McLennan (1993), el cual indica las siguientes condiciones:

Si $\text{CaO} \leq \text{Na}_2\text{O}$, entonces el valor de CaO no cambia.

Si $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$, entonces el valor de CaO es reemplazado por el valor de Na_2O .

Los valores obtenidos de CIA de los miembros de la Formación Cintura fueron graficados en el diagrama ternario A-CN-K (Figura 30), con el fin de comprender la tendencia del intemperismo químico y la posible fuente de la composición de las muestras.

Los valores de CIA oscilan entre 45 a 52 (con un promedio de 49 ± 8.2), cercanos a la línea de plagioclasas, indicando ausencia de intemperismo para las areniscas del miembro Marquechi, mientras que para la muestra de lutita (CFS-06) se tiene un valor de CIA de 69. Los valores para las muestras de areniscas del miembro San Marcos varían de 50 a 66 (con un promedio de 58 ± 5.8), mientras que las lutitas de este miembro presentan valores de CIA que van de 57 a 74 (con un promedio de 65 ± 7.3). El miembro San Juan tiene valores de CIA que varían de 51 a 64 (con un promedio 56 ± 5.2) para las muestras de areniscas, y para la muestra de lutita (CFS-22) se tiene un valor de 73.

El índice de alteración de la plagioclasa (PIA, por sus siglas en inglés) también es una herramienta útil para determinar la magnitud de intemperismo en el área fuente. Este índice fue propuesto por Fedo *et al.* (1995), el cual se calcula con la siguiente fórmula: $PIA = [(Al_2O_3 - K_2O)/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$. Los valores calculados para este índice en las areniscas del miembro Marquechi varían de 44 a 52, con un promedio de 49 ± 3.8 mientras que para la muestra de lutita (CFS-06) tiene un valor de 75. Para las areniscas del miembro San Marcos los valores de PIA oscilan entre 51 a 71, con un promedio de 60 ± 7.7 , mientras que para las lutitas se tienen valores que van de 59 a 89, con un promedio de 72 ± 13 . Los valores de PIA para las muestras de areniscas pertenecientes al miembro San Juan varían entre 51 a 68, con un promedio de 58 ± 6.9 , mientras que para la muestra de lutita (CFS-22) presenta un valor de 85. Los valores de PIA en los miembros de la Formación Cintura se mantienen consistentes a los valores de CIA.

En el diagrama A-CN-K, los planos de las muestras de los miembros de la Formación Cintura son paralelos a la línea A-CN y dispersados hacia el área entre la illita y moscovita mostrando una tendencia ideal de intemperismo de una roca fuente con composición granítica (Fedo *et al.*, 1995). Estas muestras tienen una gran variación en los valores de CIA, por lo que muestran una extensión en este diagrama.

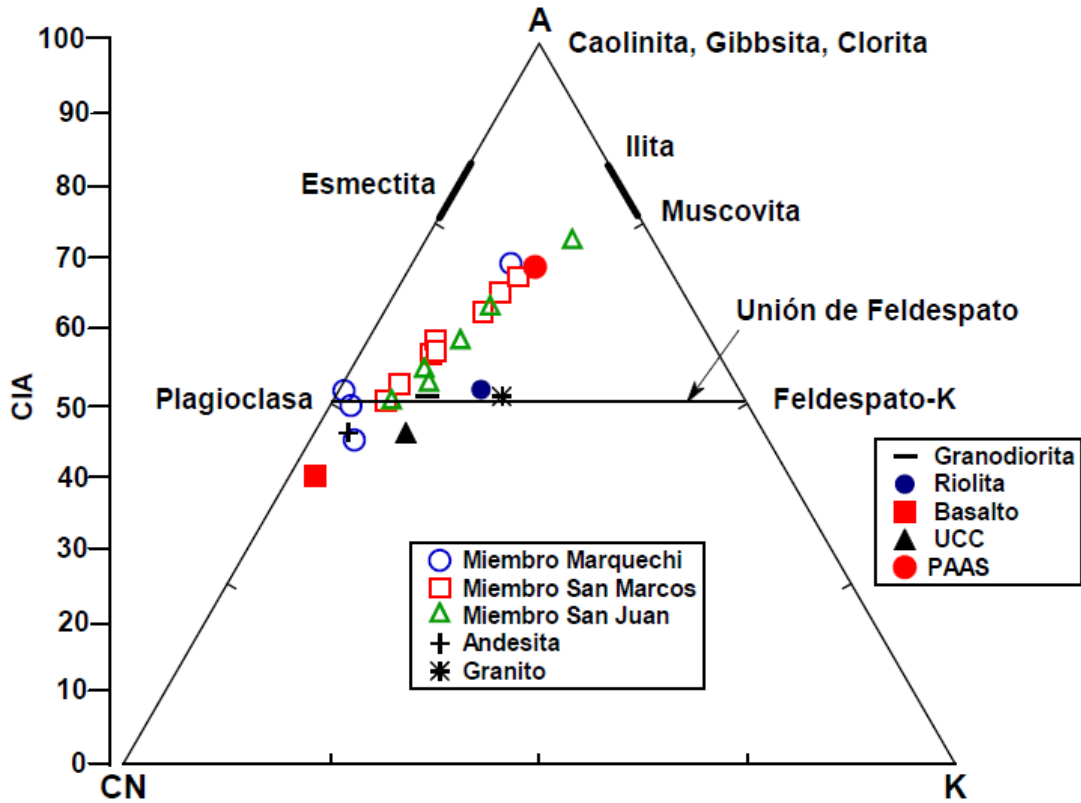


Figura 30. Diagrama A-CN-K, muestra la tendencia de intemperismo químico de las muestras de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura (Nesbitt y Young, 1982), A: Al_2O_3 , CN: CaO^*+Na_2O y K: K_2O .

4.3.2 Marco tectónico

La geoquímica se ha utilizado tradicionalmente para determinar la procedencia de las rocas clásticas para restringir el ambiente tectónico en el que se depositaron (McLennan *et al.*, 1983, 1990, 1993, 1995; Taylor y McLennan, 1985, 1995; Bhatia y Crook, 1986; Roser y Korsch, 1985, 1988; Gu, 1996a, 1996b).

Los elementos mayores y traza pueden restringir los efectos del intemperismo y la clasificación sedimentaria, mientras que las tierras raras y ciertos elementos traza

(Th, Zr, Hf, Nb, y Sc, entre otros) se consideran particularmente confiables en la discriminación de procedencia y ambiente tectónico. Esta confiabilidad se basa en su baja movilidad durante los procesos sedimentarios, la diagénesis y el metamorfismo, lo que refleja la firma de los materiales parentales y la composición, y el entorno tectónico de la fuente (Taylor y McLennan, 1985; McLennan, 1989; McLennan *et al.*, 1993; Roser *et al.*, 1996; Condie, 1991, 1993).

Las muestras de areniscas y lutitas del miembro Marquechi presentan valores de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ para las areniscas del miembro Marquechi van de 0.08 a 0.18, y de 1.24 a 4.10; respectivamente. Mientras que para la muestra de lutita (CFS-06) tiene valores de 0.18 y 4.59, respectivamente. Por otra parte, las muestras de areniscas pertenecientes al miembro San Marcos tienen valores, para estas concentraciones que oscilan entre 0.17 a 0.23, y de 3.83 a 6.30; respectivamente, y los valores de las lutitas presentan valores que van de 0.21 a 0.24, y de 5.36 a 6.40. Las muestras de areniscas y lutitas del miembro San Juan tienen valores de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ que varían de 0.14 a 0.19, y 0.24; respectivamente y valores de $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ que oscilan entre 2.57 y 3.22, y 6.45; respectivamente. En el diagrama discriminante $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ contra $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ para determinar ambiente tectónico de Bhatia (1983), se observa que dos de las muestras pertenecientes al miembro Marquechi pertenecen a margen pasivo, mientras que las otras dos muestras restantes pertenecen a margen continental activo. Mientras que las areniscas y lutitas de los miembros San Marcos y San Juan caen dentro de los campos de margen continental activo y campo de arco de islas continental. Las muestras de la Formación Cintura tienen contenidos de $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ que varían en un rango amplio (de 1.24 a

6.40, promedio: 4.21) y tienen valores menores con respecto a la relación Al_2O_3/SiO_2 (0.08-0.24, promedio: 0.18) (Figura 31).

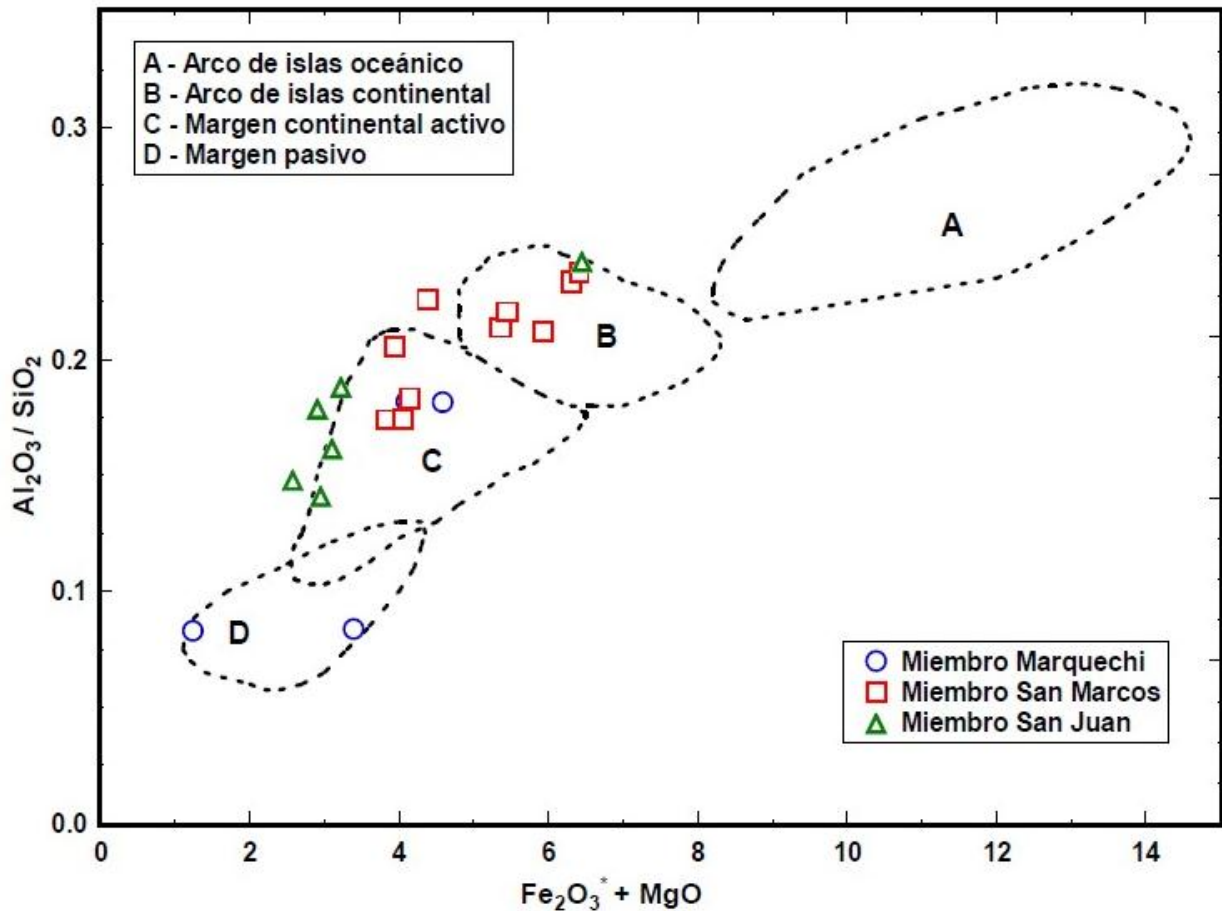


Figura 31. Diagrama Al_2O_3/SiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ de Bhatia (1983) de las muestras pertenecientes a la Formación Cintura para determinar el ambiente tectónico.

Bhatia (1983) propuso un diagrama de discriminación para ambientes tectónicos sobre la base de datos de los elementos mayores, también incluye un diagrama con campos de arco de isla oceánica, arco de isla continental, margen continental activo, y el margen de pasivo. En el diagrama discriminante TiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ (Figura 32) para determinar ambiente tectónico de Bhatia (1983), se

tiene que las muestras pertenecientes al miembro Marquechi caen dentro de los campos de margen continental pasivo y activo, mientras que las muestras del miembro San Marcos caen en los campos de arco de islas continental y margen continental activo. Por otra parte, las muestras del miembro San Juan están representadas por los campos arco de islas continental, margen continental activo y pasivo. En general, las muestras de la Formación Cintura tienen contenidos de $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ que varían en un rango amplio (de 1.24 a 6.40, promedio: 4.21) y tienen valores menores con respecto a los valores de TiO_2 (0.19 – 0.68, promedio: 0.51).

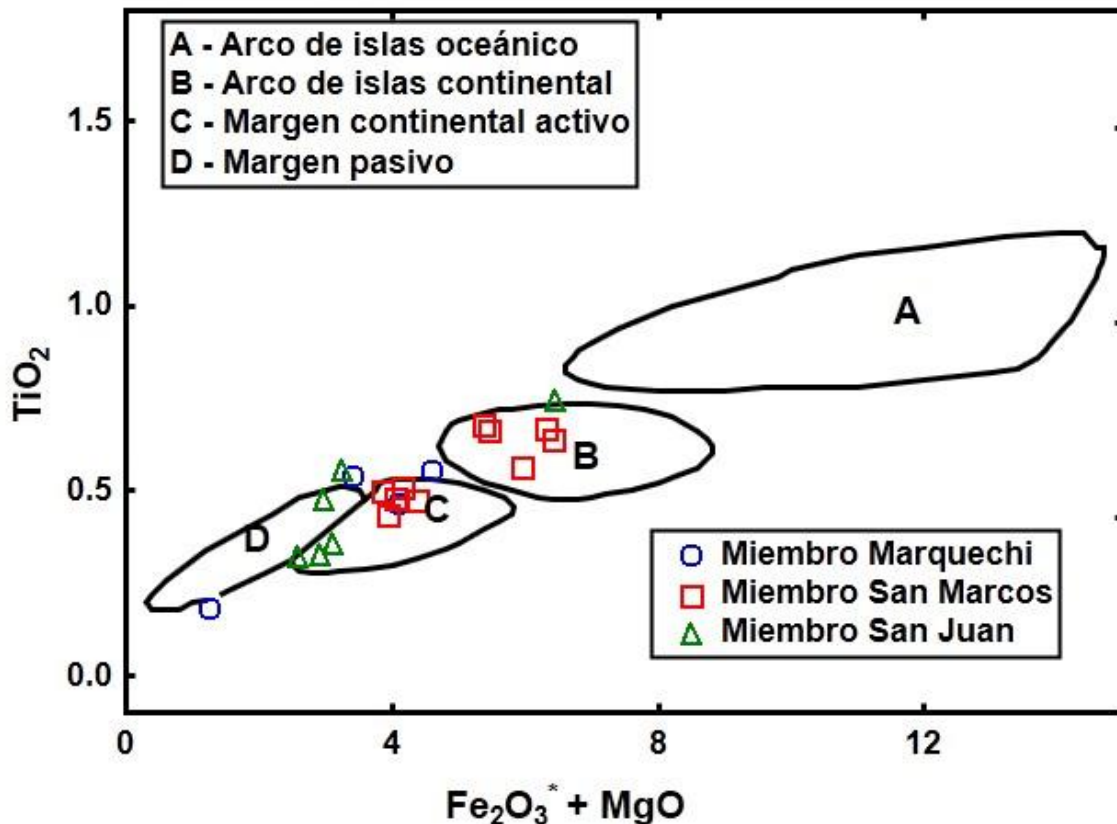


Figura 32. Diagrama TiO_2 contra $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ de Bhatia (1983) de las muestras pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura para determinar el ambiente tectónico.

Algunos elementos que se encuentran en lutitas y areniscas, tales como el Th, Sc, Zr, Hf y en menor proporción el Cr y Co, sus valores no se alteran significativamente a lo largo de los diferentes procesos sedimentarios debido a su baja concentración en agua, al corto tiempo de residencia, y a la insolubilidad que estos presentan es lo que los hacen poco móviles durante los procesos de diagénesis y metamorfismo de bajo grado, lo que permite su uso en la determinación de ambientes tectónicos y en análisis de procedencia (Bhatia y Crook, 1986; Taylor y McLennan, 1985; McLennan, 1989).

En general se ha observado que las concentraciones de La, Ce, Nd, Th y Zr y de las relaciones Ba/Sr, Rb/Sr, La/Y, y Ni/Co se incrementan al disminuir la concentración de Sc, V y las relaciones Ba/Rb, K/Th y K/U conforme se pasa de los ambientes tectónicos de arco de islas oceánico, arco de islas continental, margen continental activo al de margen continental pasivo (Bhatia y Crook, 1986). Sin embargo, debido a la alta movilidad del Ba, Sr y Rb las mejores relaciones en la determinación de ambientes tectónicos son Sc/Cr y La/Sc que, junto con las altas concentraciones de Zr en margen continental pasivo, son la base para diferenciarlo de un margen continental activo. La relación La/Th, permite diferenciar entre arco de islas oceánico y arco de islas continental. Por último, la relación La/Y es un buen indicador de para diferenciar entre el ambiente de arco de islas continental y el de margen continental activo. Es por esto que el diagrama de discriminación La/Y contra Sc/Cr propuesto por Bhatia y Crook (1986) se considera de los más importantes. Las areniscas caen en su mayoría en el campo de margen continental activo y en menor

porción caen en los campos de arco continental de islas y margen pasivo (Figura 33), las lutitas están representadas principalmente por arco de islas continental y solo dos muestras caen en el campo de margen continental activo.

En este diagrama se observa que dos de las muestras del miembro Marquechi caen dentro del campo margen continental activo, mientras que solo una muestra de este miembro cae dentro del campo de arco de islas continental. De igual manera se tiene que las muestras del miembro San Marcos caen dentro de los campos de margen continental activo y arco de islas continental, mientras que cuatro muestras del miembro San Juan caen dentro de los campos de margen continental activo y solo una muestra cae dentro del campo margen continental pasivo. Se tienen dos muestras pertenecientes a los miembros Marquechi y San Juan con altos valores en la relación La/Y (1.66 y 1.44; respectivamente), las cuales se muestran fuera del límite de detección (Figura 34), al igual que dos muestras del miembro San Marcos, las cuales presentan valores mayores en la relación Sc/Cr .

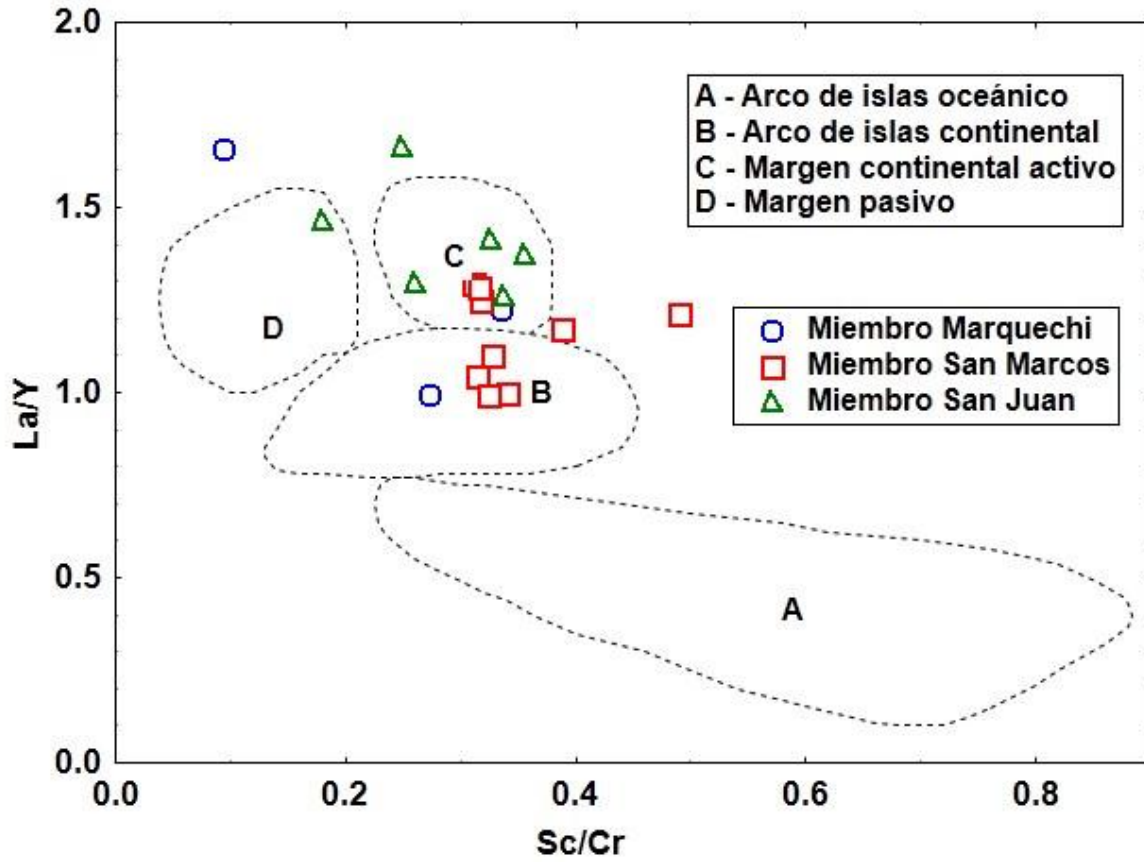


Figura 33. Diagrama Sc/Cr contra La/Y de Bhatia y Crook (1986) de las muestras pertenecientes a los miembros de la Formación Cintura.

Verma y Armstrong-Altrin (2013), proponen un diagrama discriminante basado en contenidos de óxidos mayores de sedimentos siliciclásticos para discriminar ambientes tectónicos de arcos de islas o continentales, rift continental, y en ambientes de colisión. Este diagrama es considerado como una gran mejora en relación a los diagramas mencionados anteriormente, ya que este diagrama emplea diferentes funciones discriminantes con el fin de diferenciar las muestras clásticas de alto y bajo contenido en Si, como se muestra a continuación:

Para valores altos en Si, de 63 a 95%:

$$\begin{aligned} \text{Función Discriminante 1} = & (-0.263 \times (\text{Ti/Si})) + (0.604 \times (\text{Al/Si})) + \\ & (-1.725 \times (\text{Fe/Si})) + (0.660 \times (\text{Mn/Si})) + (2.191 \times (\text{Mg/Si})) + (0.144 \times (\text{Ca/Si})) + \\ & (-1.304 \times (\text{Na/Si})) + (0.054 \times (\text{K/Si})) + (-0.330 \times (\text{P/Si})) + 1.588 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Función Discriminante 2} = & (-1.196 \times (\text{Ti/Si})) + (1.064 \times (\text{Al/Si})) + \\ & (0.030 \times (\text{Fe/Si})) + (0.436 \times (\text{Mn/Si})) + (0.838 \times (\text{Mg/Si})) + (-0.407 \times (\text{Ca/Si})) + \\ & (1.021 \times (\text{Na/Si})) + (-1.706 \times (\text{K/Si})) + (-0.126 \times (\text{P/Si})_{\text{adj}}) - 1.068 \end{aligned}$$

Para valores bajos en Si de 35 a 63%:

$$\begin{aligned} \text{Función Discriminante 1} = & (0.608 \times (\text{Ti/Si})) + (-1.854 \times (\text{Al/Si})) + \\ & (0.299 \times (\text{Fe/Si})) + (-0.550 \times (\text{Mn/Si})) + (0.120 \times (\text{Mg/Si})) + (0.194 \times (\text{Ca/Si})) + \\ & (-1.510 \times (\text{Na/Si})) + (1.941 \times (\text{K/Si})) + (0.003 \times (\text{P/Si})) + 1.588 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Función Discriminante 2} = & (-0.554 \times (\text{Ti/Si})) + (-0.995 \times (\text{Al/Si})) + \\ & (1.765 \times (\text{Fe/Si})) + (-1.391 \times (\text{Mn/Si})) + (-1.034 \times \text{Ln}(\text{Mg/Si})) + (0.225 \times (\text{Ca/} \\ & \text{Si})) + (0.713 \times (\text{Na/Si})) + (0.330 \times (\text{K/Si})) + (0.637 \times (\text{P/Si})) - 3.631 \end{aligned}$$

Las muestras de la Formación Cintura tienen valores de SiO₂ que varían de 64.89 a 86.65 (promedio: 71), por lo tanto, se utilizó el diagrama de función discriminante basado en alto sílice con el fin de identificar los ambientes tectónicos de la Formación Cintura. En este diagrama (Figura 34) la mayoría de las muestras de la Formación Cintura caen en el campo de arco, solo una de las muestras del miembro San Marcos cae en el campo de colisión y una muestra del miembro San Juan cae al límite de este campo, lo que esto sugiere que las rocas siliciclásticas de la Formación Cintura tuvieron aporte de sedimentos del marco tectónico de arco.

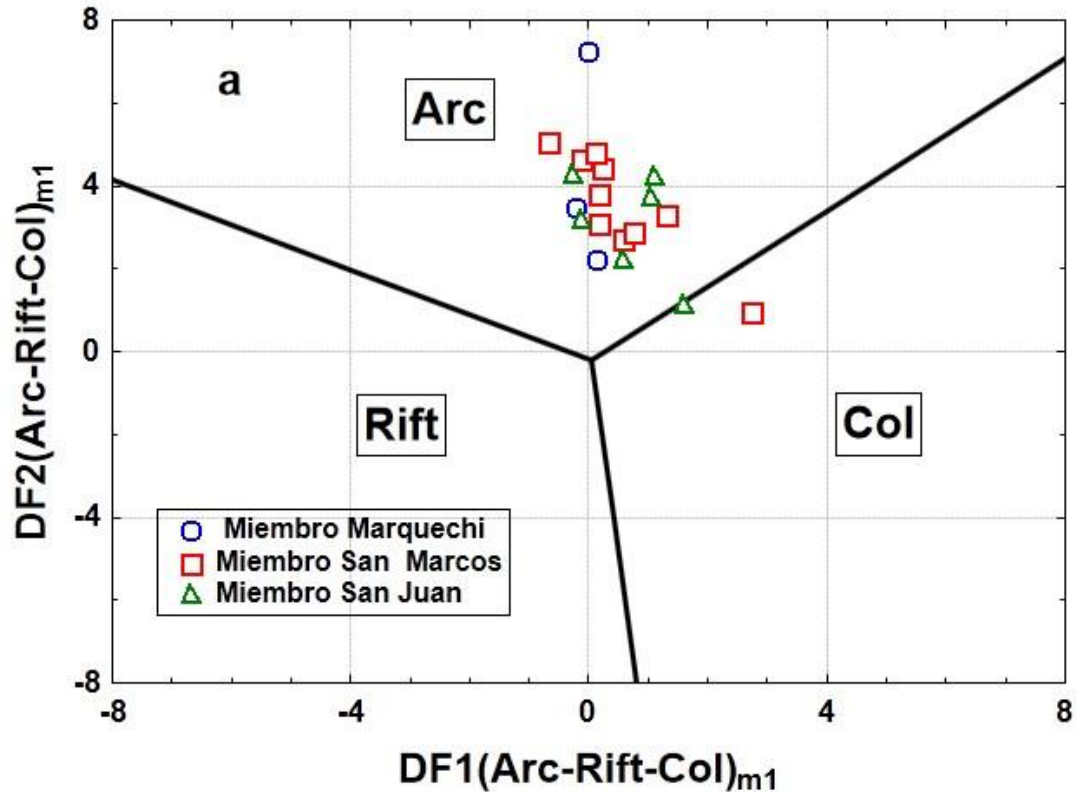


Figura 34. Diagrama de ambiente tectónico de Verma y Armstrong-Altrin (2013) de funciones discriminantes (Arc: Arco, Col: Colisión y Rift, de las muestras de los miembros de la Formación Cintura.

4.3.3 Procedencia

Existen elementos que discriminan mejor distintos ambientes tectónicos, entre los que se encuentran el La y el Th que junto con el Hf son utilizados por Floyd y Leveridge (1987) para la discriminación composicional y de fuente de areniscas (Figura 35). La mayoría de las muestras de los miembros de la Formación Cintura caen en la clasificación de fuente félsica, mientras que, en menor porción algunas de las muestras caen a lo largo de la línea de sedimentos maduros reciclados, las cuales presentan las mayores concentraciones de Hf que es una característica de

sedimentos reciclados. En general, las muestras de la Formación Cintura tienen contenidos de Hf que varían en un rango amplio (de 2.06 a 7.82) y tienen valores en general menores de la razón La/Th, solo una muestra del miembro Marquechi cae cerca del campo de fuente máfica/félsica.

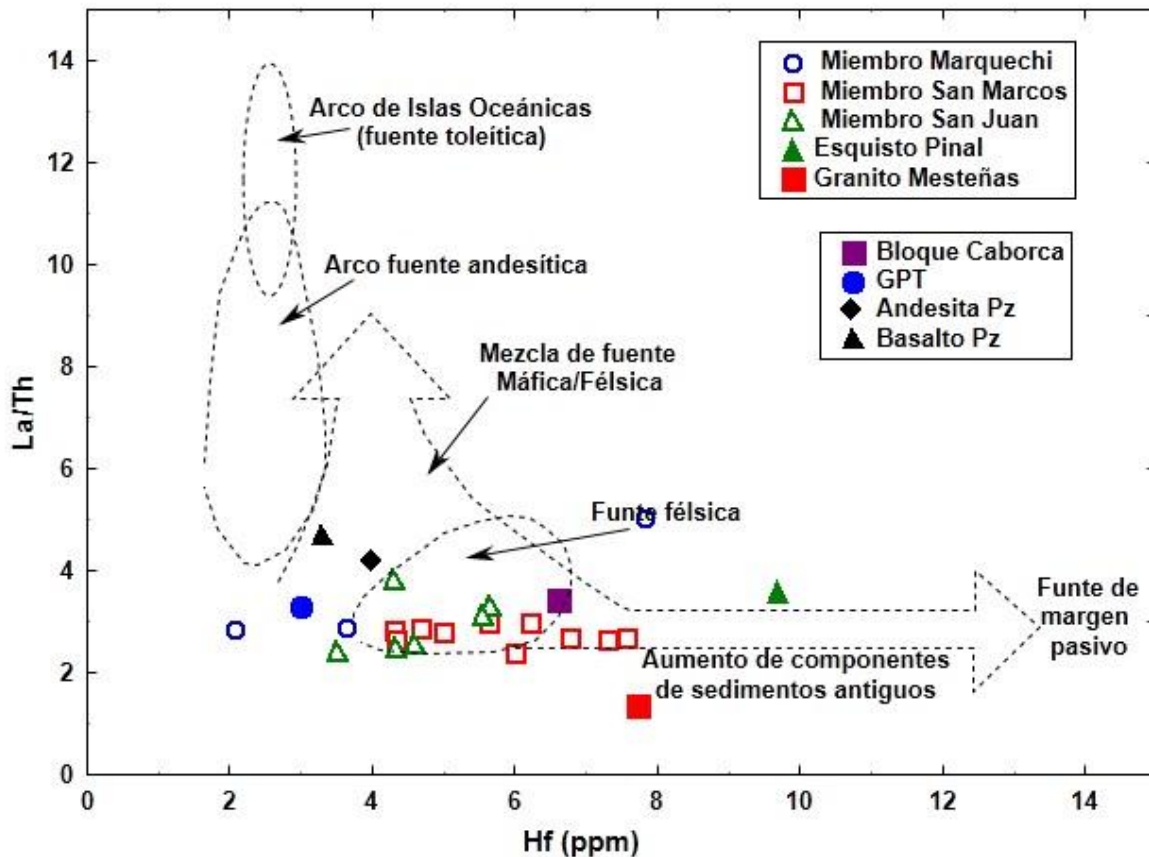


Figura 35. Diagrama de procedencia Hf contra La/Th de Floyd y Leveridge (1987). Donde GPT: granitoide permo-triásico, RVFMC: roca volcánica félsica mesozoica-cenozoica.

En el diagrama discriminante de roca fuente La/Sc contra Co/Th de Floyd y Leveridge (1987) (Figura 36), se aprecia que la mayoría de las muestras de este estudio tienen valores La/Sc menores a 7 (promedio 4.97), solo una muestra del miembro Marquechi y cuatro muestras del miembro San Juan presentan valores

mayores a 7, mientras que los valores de la razón Co/Th en general son bajas (valores mínimo y máximo 0.30 y 1.22 con un promedio 0.61). Todas las muestras de los miembros de la Formación Cintura se encuentran cercanas al campo de fuente félsica, además se muestran cercanas al granito permo-triásico y al Bloque Caborca.

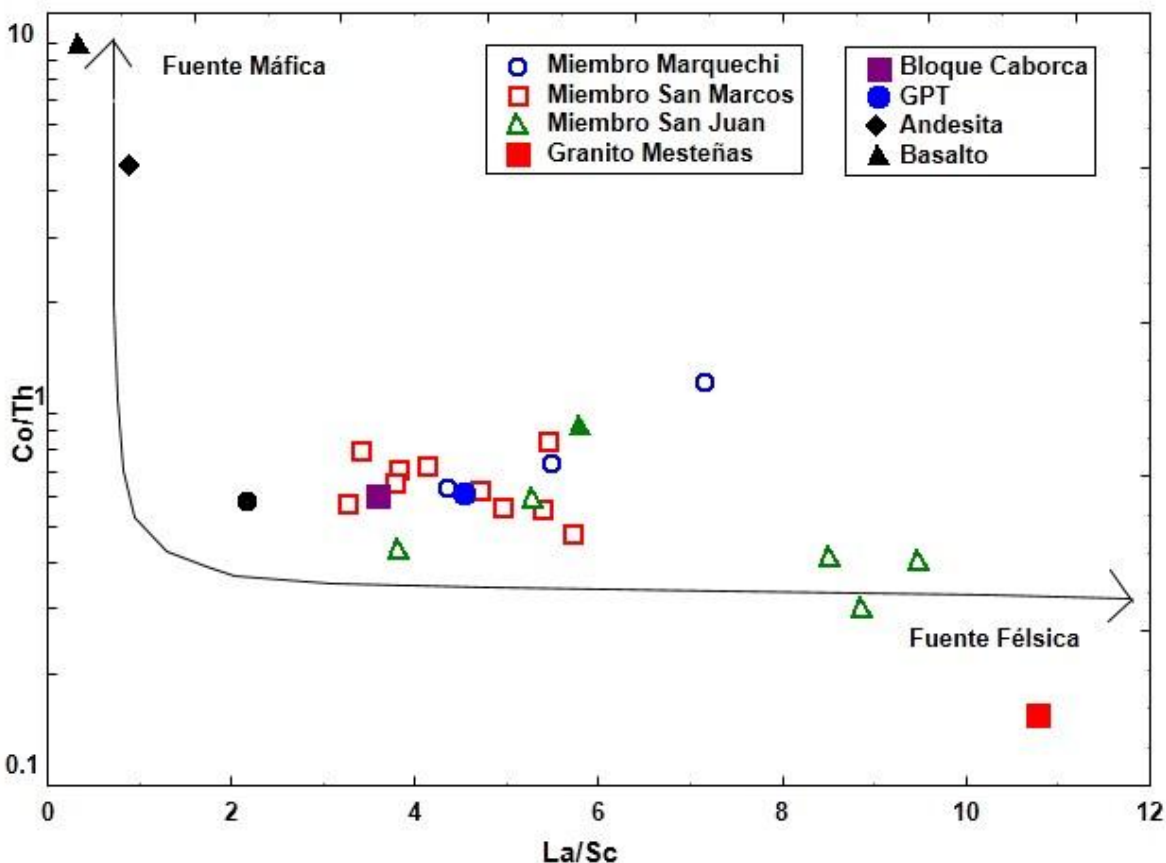


Figura 36. Diagrama La/Sc contra Co/Th Floyd y Leveridge (1987). Donde GPT: granitoide permo-triásico. Las areniscas se muestran representadas por círculos azules, mientras que las lutitas por triángulos verdes.

En el diagrama de Roser y Korsch (1988) (Figura 37) se observa algunas diferencias en las proyecciones de las muestras de los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan. La mayoría de las muestras pertenecientes a los miembros San Marcos y San Juan, y solo una muestra del miembro Marquechi presentan valores

más altos de la función discriminante 2. El 30% de las muestras de la Formación Cintura cayeron en el campo de procedencia sedimentaria enriquecida en cuarzo, mientras que el resto de las muestras cayeron dentro del campo de procedencia magmática félsica (excepto una muestra CFS-04 del miembro Marquechi cayo dentro del campo de procedencia intermedia).

En cuanto a las muestras del miembro Marquechi, hay dispersión en los campos de procedencia sedimentaria enriquecida en cuarzo y procedencia magmática félsica, mientras que las muestras de lutitas de la Formación Cintura tienen valores menores de la función discriminante 1 con respecto a las areniscas, principalmente, porque las lutitas presentan mayor contenido de MgO (0.73 – 1.48, 0.13 – 1.10; para las lutitas y areniscas, respectivamente).

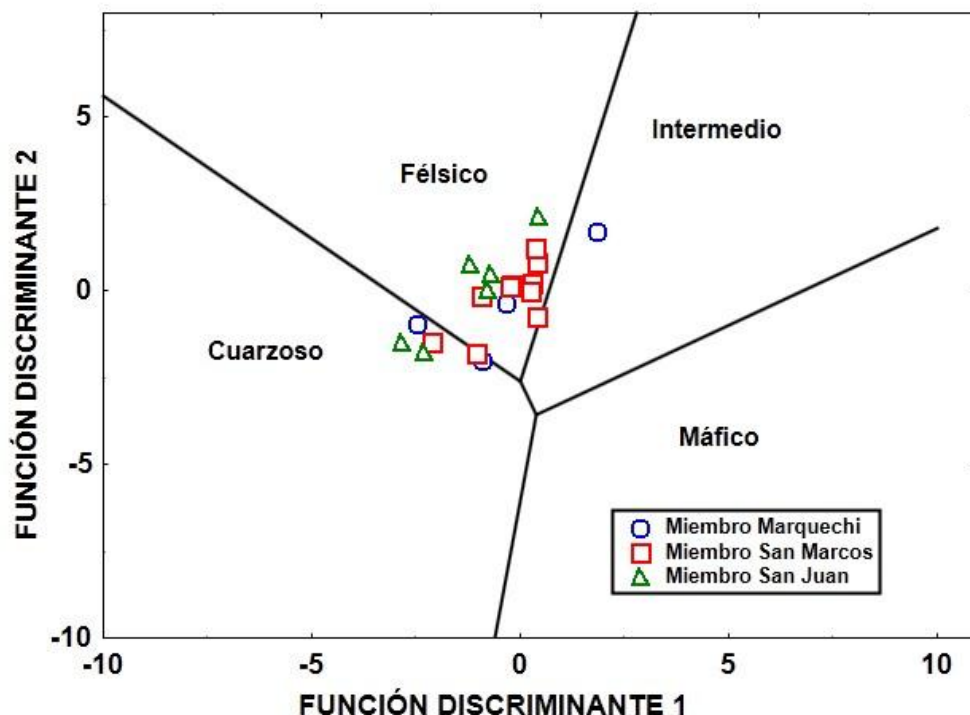


Figura 37. Diagrama de procedencia de Roser y Korsch (1988) de funciones discriminantes. Las muestras del miembro Marquechi se encuentran representadas por círculos, cuadrados para el miembro San Marcos y triángulos para el miembro San Juan.

Las muestras de los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan presentan concentraciones de Ni que van de 2.55 a 9.19, 6.63 a 41.54 y de 5.18 a 21.20; respectivamente; y concentraciones de TiO_2 que varían entre 0.19 – 0.56, 0.44 – 0.68, y 0.32 – 0.75; respectivamente. En el diagrama discriminante Ni contra TiO_2 de Floyd *et al.* (1989) (Figura 38), se pueden apreciar que las muestras de la Formación Cintura caen en su totalidad cercanas al campo de fuente félsica.

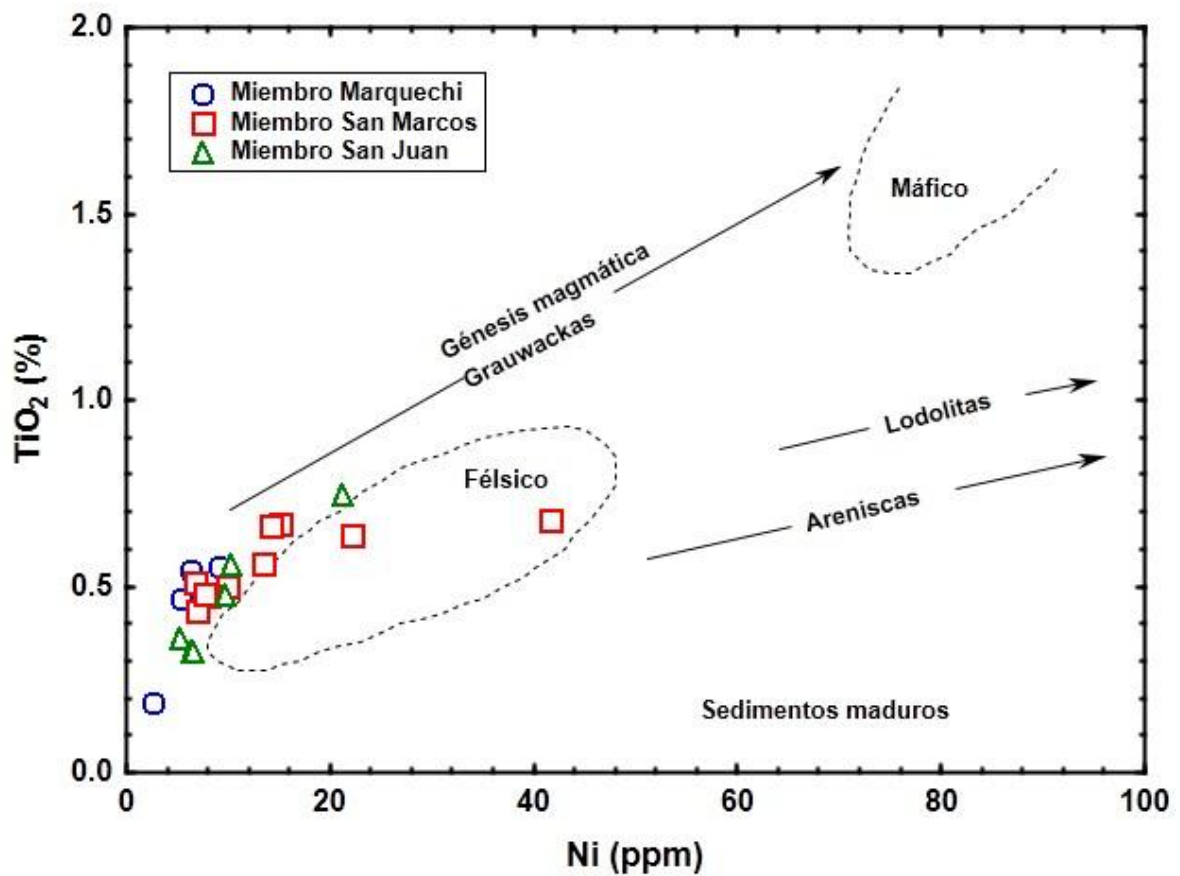


Figura 38. Diagrama discriminante Ni contra TiO_2 de Floyd *et al.* (1989) de las muestras de los miembros pertenecientes a la Formación Cintura.

Además, los cocientes también se trazan diagramas divariados de Th/Co contra La /Sc (Figura 38) y TiO_2 contra Ni (Figura 39). En ambos diagramas, los campos para las rocas madre están divididas, según Cullers (2002) en rocas máficas y félsicas. En el diagrama La/Sc contra Th/Co de Cullers (2002) se tiene que las muestras de los miembros de la Formación Cintura, indican que la fuente fue félsica. Los valores de las muestras de areniscas del miembro Marquechi, San Marcos y San Juan contienen valores van de 5.47 a 7.15 ($n= 3, 0.37 \pm 10.3$), de 3.39 a 5.70 ($n= 6, 4.93 \pm 0.8$), y de 5.26 a 13.53 ($n= 5, 9.12 \pm 3.0$); respectivamente, estas concentraciones son mayores en comparación a las concentraciones obtenidas para las lutitas (4.34, $n= 1$; 3.26 – 4.11, $n= 4, 3.74 \pm 0.4$; y 3.80; respectivamente).

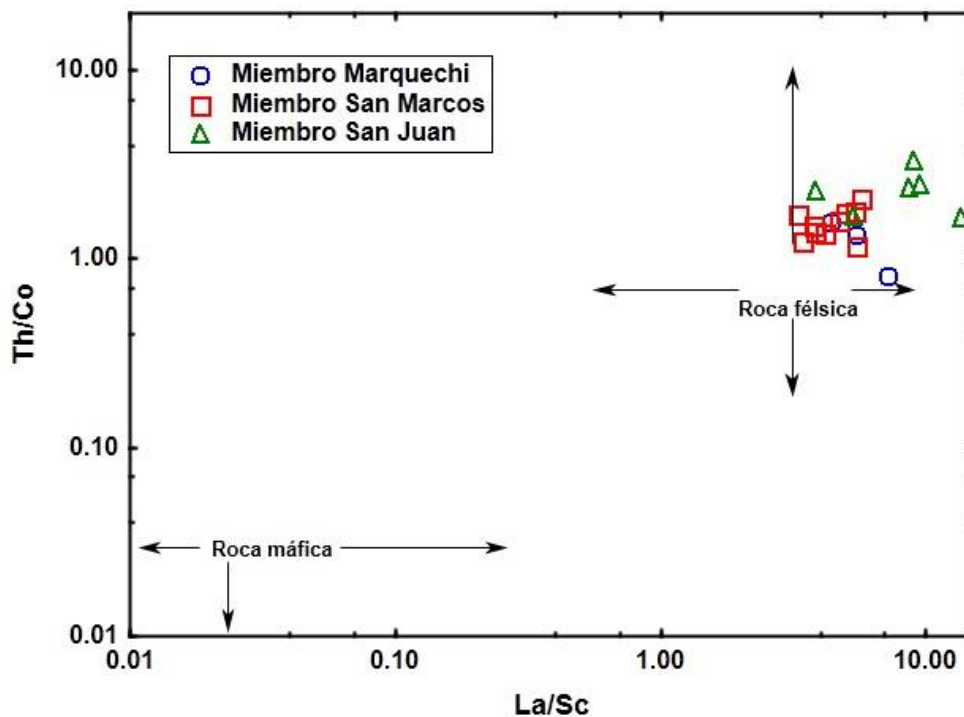


Figura 39. Diagrama La/Sc contra Th/Co de Cullers (2002) de las muestras pertenecientes a la Formación Cintura.

El valor de Eu/Eu^* en las lutitas presenta una dispersión más pequeña, en comparación a los resultados de las areniscas, donde se tiene un promedio de 0.64, 0.77 para las lutitas y areniscas, respectivamente (rango: 0.60-1.24, 0.59-0.72; respectivamente). Comparando con rocas de referencia, la mayoría de estas areniscas presentan valores similares a los de PAAS, o a los de la media de la Corteza Continental Superior, que se sitúan en torno a 0.65.

Los patrones de REE de las areniscas y lutitas de la Formación Cintura se muestran en Figura 40, normalizados a condritas (McDonough y Sun, 1995). En estos patrones las muestras de areniscas y lutitas muestran moderación fraccionada de LREE/HREE (La_n/Yb_n : 7.28 – 11.29, $n= 14$; 6.90 – 8.72, $n= 6$; respectivamente, donde n expresa la normalización con condrita), todas las muestras de lutita presentan una anomalía negativa en Eu (Eu/Eu^* : 0.59 – 0.72), de igual forma las areniscas presentan una anomalía negativa en Eu (Eu/Eu^* : 0.60 – 0.84), solo la muestra CFS-01 presenta una anomalía positiva (Eu/Eu^* : 1.24), lo que sugiere un alto contenido en plagioclasas. En los diagramas normalizados con condrita, las muestras de areniscas y lutitas muestran un enriquecimiento de LREE (La_n/Sm_n : 3.15 – 4.50, $n= 14$; 2.88 – 3.60, $n= 6$; respectivamente), también se observan patrones planos de HREE (Gd_n/Yb_n : 1.30 – 1.78, $n= 14$; 1.36 – 1.78) indicando que, mayor parte de los sedimentos son derivados de las rocas félsicas.

Algunas relaciones tales como Eu/Eu^* , $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}$, La/Sc , Th/Sc , Th/Co , Th/Cr y Cr/Th son perceptiblemente diferentes en rocas máficas y félsicas, lo que permite identificar la procedencia de las rocas sedimentarias (Wronkiewicz y Condie, 1987, 1989, 1990; Cullers *et al.*, 1988; Cullers, 1994a, 1995; Cox *et al.*, 1995; Armstrong-

Altrin *et al.*, 2004). Las relaciones como Eu/Eu^* , $(\text{La/Lu})_{\text{cn}}$, La/Sc , Th/Sc , Th/Co , Th/Cr y Cr/Th de las areniscas y lutitas de este estudio son comparados con valores de las rocas máficas, félsicas, UCC y PAAS sugiriendo que mayor parte de los sedimentos son derivados de rocas félsicas.

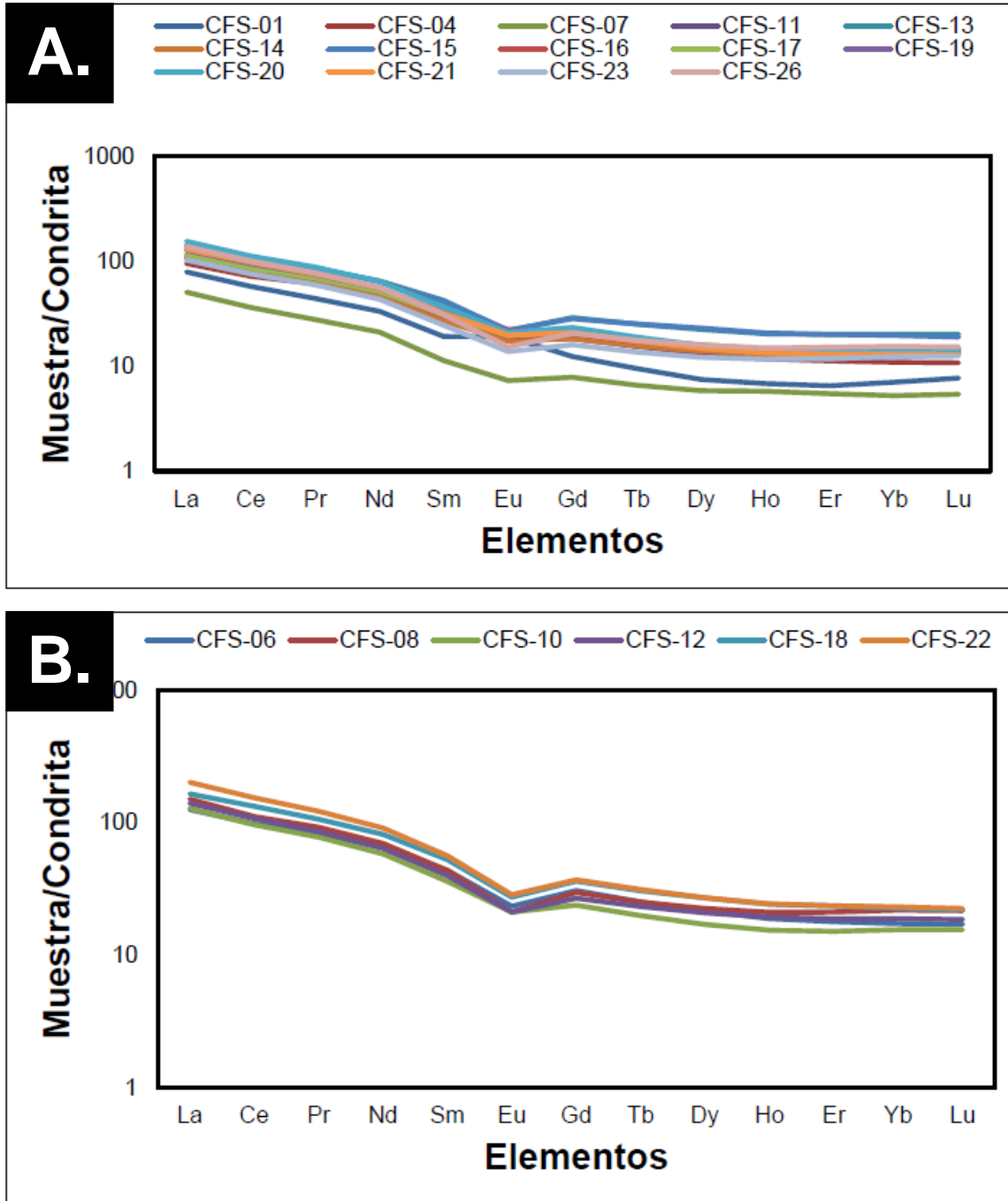


Figura 40. Patrones de REE normalizados a condrita A. Areniscas de la Formación Cintura (utilizando los valores de McDonough y Sun, 1995) y B. Lutitas.

Se compararon los patrones de tierras raras de los promedios de areniscas y lutitas de la Formación Cintura con los patrones de REE de los granitos proterozoicos correspondientes al Bloque Caborca, Bloque Norteamérica y al Granito Aibó (Iriondo *et al.*, 2004), así como del Esquisto Pinal y el Granito Mesteñas (Madhavaraju *et al.*, 2017), de igual manera estos promedios de areniscas y lutitas fueron comparados con los granitos permo-triásicos (Arvizu *et al.*, 2009), además se compararon con datos de rocas jurásicas (González-León, datos sin publicar), con el fin de determinar una probable fuente, en donde estos patrones muestran similitudes entre ellos (Figura 41).

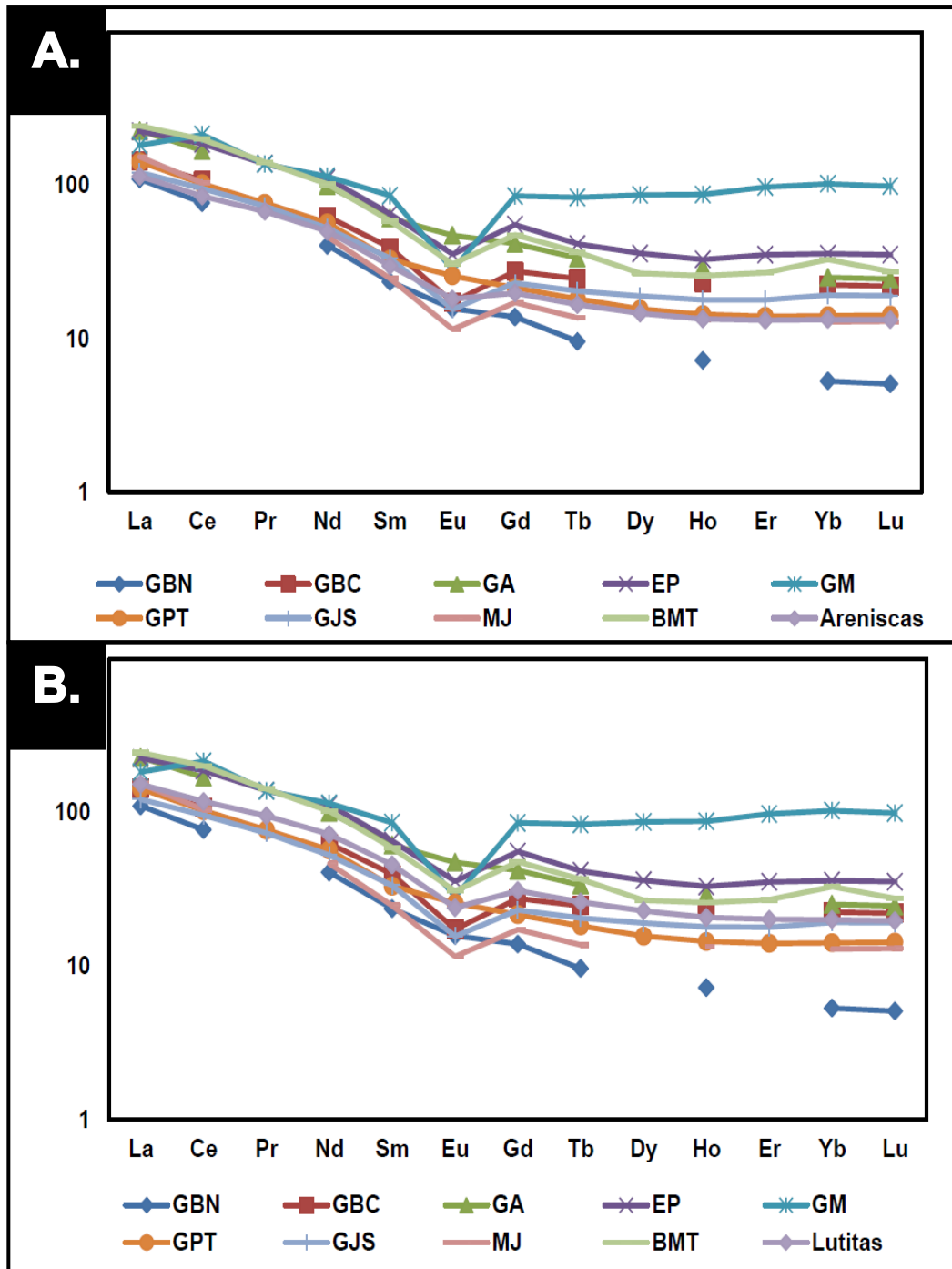


Figura 41. Comparación de REE normalizados con condrita; GBN: granitos Bloque Norteamérica, GBC: granitos Bloque Caborca, GA: granito Aibó, EP: Esquisto Pinal, GM: Granito Mesteñas, GPT: granito permo-triásico, GJS: granitos jurásicos de Sonora, MJ: Metariolita jurásica, BMT: Toba Black Mountain, A. areniscas y B. lutitas de la Formación Cintura.

CAPÍTULO 5

GEOCROLOGÍA

5.1 Introducción

En las últimas décadas la datación de rocas mediante la medición del decaimiento radiactivo U-Pb en minerales de circón se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas en geocronología. La determinación de edades mediante el método U-Pb en circones detríticos es una herramienta utilizada en la interpretación de procedencia del circón para desarrollar una historia geológica de una cuenca sedimentaria y sus regiones fuentes circundantes. Esta herramienta comprende de tres aspectos muy importantes que son: a) el método U-Pb el cual muy preciso, gracias a que posee una doble cadena de desintegración que permite evaluar el comportamiento del sistema U-Pb, b) el circón, es un mineral muy resistente a los procesos sedimentarios, y además tiene la característica química de que en el momento de su formación incorpora U, y tiende a rechazar el Pb no radiogénico; y presenta una tasa de difusión muy baja del Pb radiogénico; finalmente c) la técnica de datación por LA-ICP-MS, es capaz de analizar una gran cantidad de circones en un corto periodo de tiempo (Salas-Colca, 2018).

Actualmente la geocronología de Circones detríticos es utilizada principalmente para 4 aplicaciones (Gehrels, 2012; 2014): 1) Determinar procedencia, 2) Determinar edades de máxima depositación, 3) Correlaciones de unidades sedimentarias y 4) Caracterización de terrenos fuente. La geocronología la más poderosa herramienta para extraer información de los granos de circones detríticos (Salas-Colca, 2018).

Según Cánovas-Picón (2007) algunos elementos químicos cambian espontáneamente a otros por transmisión natural. Las partículas emitidas por estos elementos pueden causar la transmutación de los núcleos de otros elementos en sus cercanías. Además, por el bombardeo de átomos estables de casi cualquier elemento con partículas de alta energía, se pueden producir nuevos elementos radiactivos, cada uno de ellos con un árbol genealógico de núclidos radiactivos que finalizan en algún átomo estable (Tabla 10).

Tabla 10. Núclidos de largo periodo de vida media, modificado de Cánovas-Picón, 2007.

Padre	Hijo	Vida media (años)	Tipo de desintegración
Uranio (^{235}U)	Plomo (^{207}Pb)	$7.13 \cdot 10^8$	7Alfa + 4Beta
Uranio (^{238}U)	Plomo (^{206}Pb)	$4.51 \cdot 10^9$	8Alfa + 6 Beta

El circón concentra de manera natural al U al momento de ser formado, esto es debido a que su radio iónico (U^{+4}) es capaz de sustituir al Zr^{+4} (Ahrens *et al.*, 1967; Gorz, 1974), y tiende a rechazar al plomo no radiogénico (Pb^{+2}). Además, el sistema isotópico U-Pb en los circones también es resistente a perturbaciones y alteraciones al ser cristalizado (Harley y Kelly, 2007), gracias a ello es capaz de registrar múltiples eventos geológicos, y su estabilidad a los procesos sedimentarios. Asimismo, el circón se ha vuelto el principal mineral utilizado para datación U-Pb, ya que tiene una gran distribución, presente en todos los tipos de rocas, principalmente en la mayoría de rocas ígneas intermedias a ácidas.

5.2 Resultados

5.2.1 Geocronología U-Pb en circones

5.2.1.1 Miembro Marquechi

Se llevó a cabo el análisis geocronológico por medio del método U-Pb, en los circones detríticos de la arenisca de grano medio muestra CFS-07, perteneciente a la parte superior del miembro Marquechi. Donde se analizó un total de 95 granos de circones, de los cuales solo 85 indican edades concordantes (Anexo 4). La relación Th/U en los circones analizados se encuentra en el rango de 0.01 a 3.65; además el rango de edades de estos cristales de circones es muy amplio, donde el cristal más joven presenta una edad de 101.3 Ma correspondiente al Cretácico Temprano (Albiano) mientras que la edad del circones más antiguo es de 2666 Ma, del Arqueano (Neoarqueano). Los circones de este miembro se dividen en cuatro edades principales: Cretácico, Jurásico, Triásico y Proterozoico. Las principales fuentes de circones son del Mesoproterozoico, del Triásico y del Cretácico (Tabla 11). Además, la muestra CFS-07 presenta edades del Carbonífero, Devónico, Silúrico y Ordovícico.

Tabla 11. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-07, perteneciente al miembro Marquechi (n= 85).

Cretácico Temprano (n= 15)		Jurásico Tardío (n=8)		Jurásico Medio (n= 6)		Jurásico Temprano (n= 4)	
Albiano	12.9%	Titoniano	3.5%	Batoniano	3.5%	Toarciano	1.2%
Aptiano	2.4%	Kimeridgiano	3.5%	Bajociano	3.5%	Pliensbachiano	1.2%
Valanginiano	1.2%	Oxfordiano	2.4%	Aaleniano	2.4%	Sinemuriano	2.4%
Berriasiano	1.2%						
Triásico Tardío (n= 9)		Carbonífero (n= 3)		Devónico Temprano (n= 2)		Silúrico (n= 1)	
Noriano	5.9%	Misisípico	3.5%	Emsiense	1.2%	Pridoli	1.2%
Carniano	3.5%			Lochkoviense	1.2%		
Ladiniano	1.2%						
Ordovícico Tardío (n= 1)		Proterozoico (n= 35)		Arqueano (n= 1)			
Sandbiense	1.2%	Neoproterozoico	4.7%	Neoarqueano	1.2%		
		Mesoproterozoico	29.4%				
		Paleoproterozoico	7.1%				

*n: número de circones.

Los resultados obtenidos de las edades de la muestra CFS-07 se graficaron en el diagrama de concordia tipo Wetherill, en donde aparece el total de granos analizados (Figura 42A). En este diagrama se observa que la mayoría de los circones del miembro Marquechi corresponden a edades principalmente del Proterozoico (Paleoproterozoico: 1761 – 1647 Ma, Mesoproterozoico: 1538 – 1010 Ma, Neoproterozoico: 977 – 592 Ma; n= 36), Triásico (241.2 – 214.4 Ma, n= 9), Jurásico (145.8 – 197.1 Ma, n= 18), y Cretácico (101.3 Ma – 144.9 Ma, Albiano y Berriasiano, n= 15). También se tienen edades en menor porción del Carbonífero (337.0 – 318.2, n= 3), Devónico (415.5 – 395.7 Ma, n= 2), Silúrico (419.4 Ma) y Ordovícico (453.7 Ma), solo un circón presenta una edad del Arqueano (Neoarqueano: 2666 Ma) (Figura 42B).

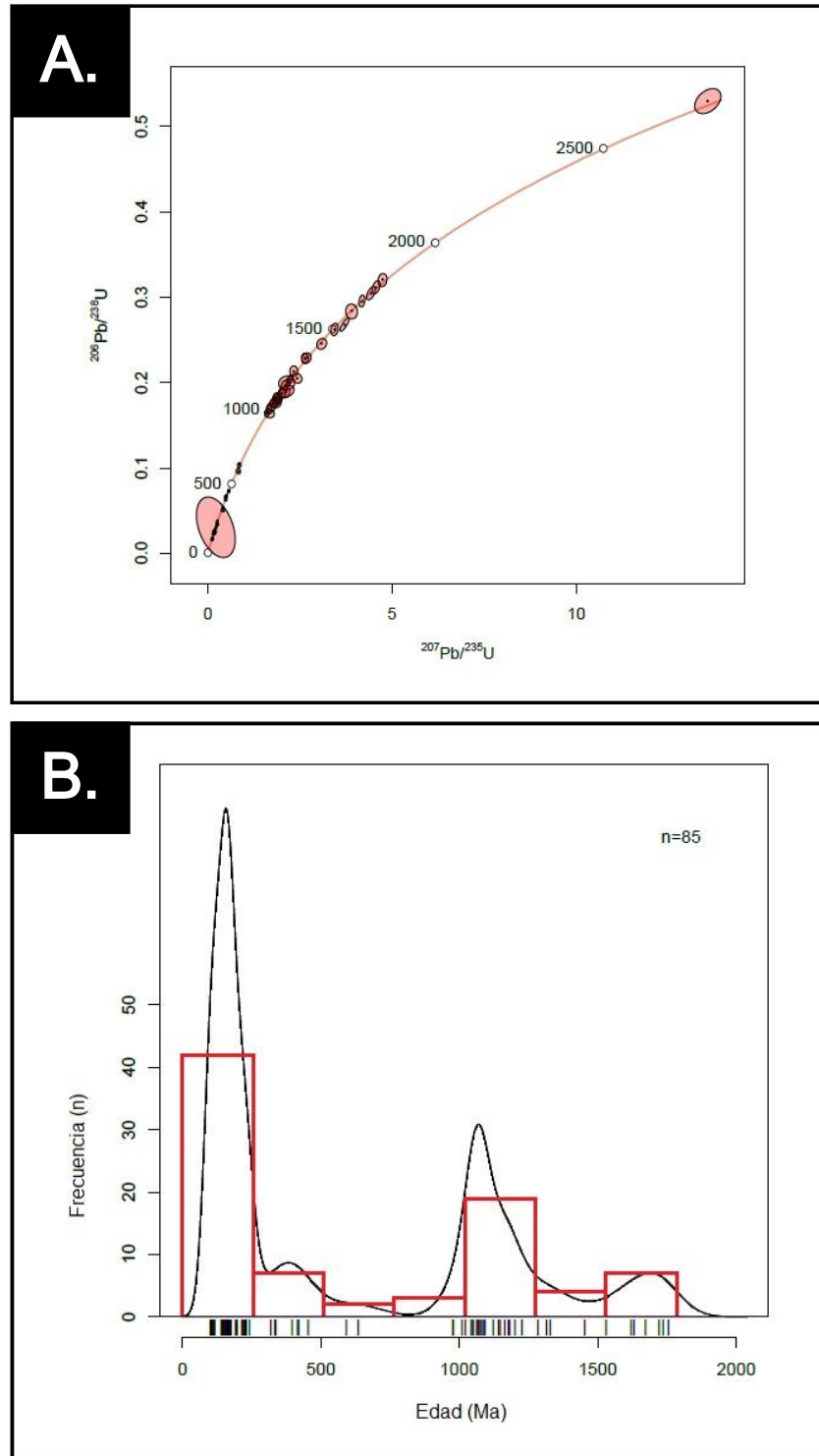


Figura 42. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y B. Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi.

5.2.1.2 Miembro San Marcos

La muestra CFS-16, corresponde a una arenisca de grano de medio la cual fue tomada de la parte superior del miembro San Marcos, de esta muestra se analizó un total de 87 circones, dentro de los cuales 63 indican edades concordantes (Anexo 5). Estos circones tienen valores para la relación Th/U que oscilan entre 0.09 a 2.15; las edades de estos granos de circones varían desde el Cretácico Tardío (95.3 Ma, Cenomaniano) hasta el Arqueano (2774 Ma, Neoarqueano). Los circones de este miembro se dividen en tres edades principales: Cretácico, Jurásico y Proterozoico. Las principales fuentes de circones son del Cretácico (Tabla 12).

Tabla 12. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-16, perteneciente al miembro San Marcos (n= 63).

Cretácico Tardío (n= 34)		Cretácico Temprano (n= 13)		Jurásico Tardío (n= 3)		Jurásico Medio (n= 5)	
Cenomaniano	54%	Albiano	20.6%	Kimeridgiano	1.6%	Batoniano	7.9%
				Oxfordiano	3.2%		
Jurásico Temprano (n= 1)		Proterozoico (n= 6)		Arqueano (n= 1)			
Sinemuriano	1.6%	Mesoproterozoico	6.3%	Neoarqueano	1.6%		
		Paleoproterozoico	3.2%				

*n: número de circones.

En la Figura 43, se tiene que la mayoría de los circones se ajustan a la curva de concordia con algunos granos discordantes cerca de los 1000 Ma. Los circones detríticos del miembro San Marcos presentan edades principalmente del Cretácico, en donde se tienen circones con edades de 100.4 – 95.3 Ma, correspondientes al Cenomaniano (n= 34) del Cretácico Tardío, y edades del Cretácico Temprano (Albiano) de 103.2 – 100.7 Ma (n= 13). Los circones con edades Jurásicas varían

entre 191.0 – 157.3 Ma (n= 9), mientras que los circones detríticos del Proterozoico corresponden al Paleoproterozoico (1679 – 1634 Ma, n= 2) y Mesoproterozoico (1363 – 1065 Ma); El circón más viejo presenta una edad de 2774 Ma del Neoarqueano, el cual se muestra acorde con la curva de concordia infiriendo claramente la presencia de este antiguo material en la depositación.

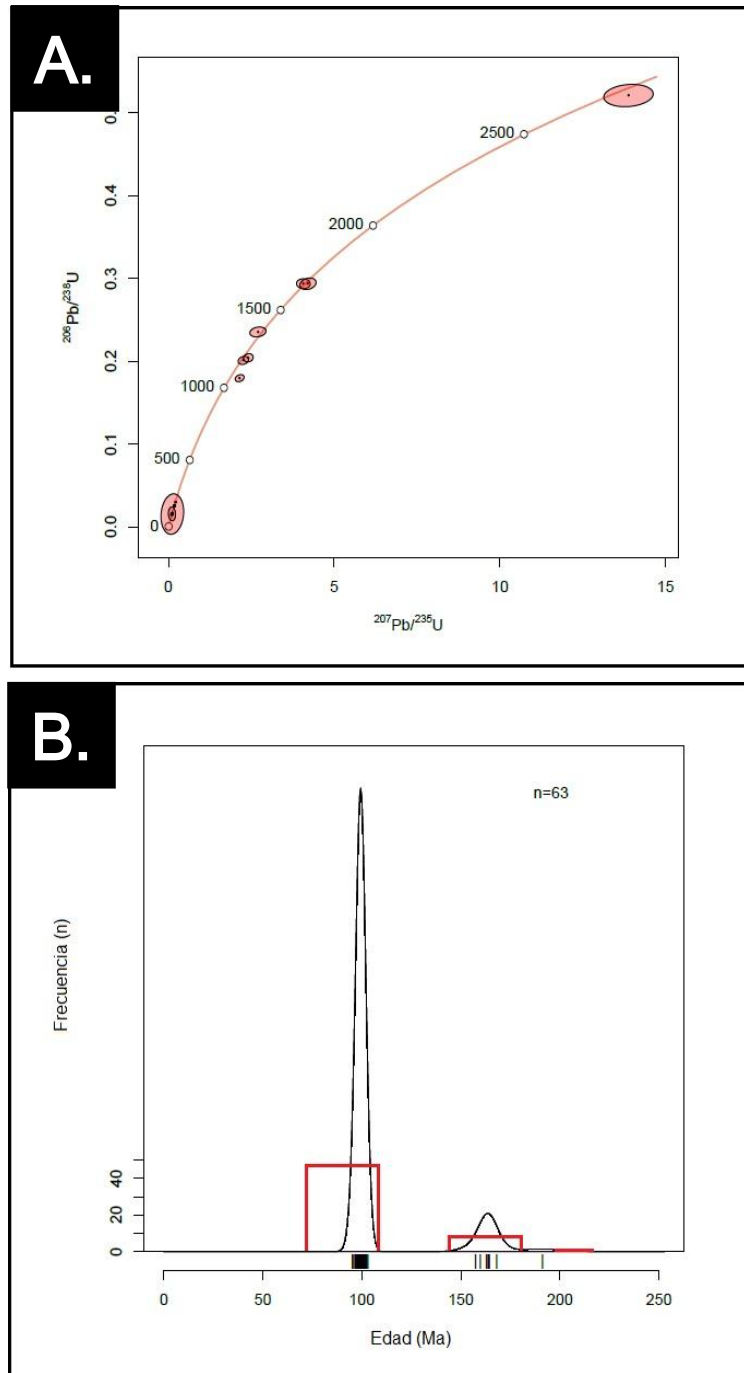


Figura 43. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y B. Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos.

5.2.1.3 Miembro San Juan

Para el análisis geocronológico del miembro San Juan, se tomó una arenisca de grano grueso (CFS-21), se analizó un total de 100 circones detríticos de los cuales, 53 presentan edades concordantes (Anexo 6). La relación Th/U oscila entre 0.03 y 2.06. En el diagrama de concordia U-Pb (Figura 44) se observa una población significativa para los circones detríticos del Jurásico (152.3 – 194.2 Ma, Kimeridgiano y Sinemuriano; respectivamente, n= 19), así como del Proterozoico (1002 – 1879 Ma, Mesoproterozoico y Paleoproterozoico; respectivamente, n=19), y del Cretácico (90.7 – 144.7 Ma, Turoniano y Berriasiano; respectivamente, n=11). En menor porción se tienen edades del Triásico (209.9 – 225.7, Noriano, n=2) y del Arqueano (2526 – 3218 Ma, Neoarqueano y Paleoarqueano; respectivamente, n= 2). Teniendo así que la edad del circón más joven es 90.7 Ma, correspondiente al Cretácico Tardío (Turoniano), y con una edad de 3218 Ma, para el circón más viejo del Arqueano (Paleoarqueano) (Tabla 13).

Tabla 13. Edades correspondientes a los circones de la muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan (n= 53).

Cretácico Tardío (n= 8)		Cretácico Temprano (n= 3)		Jurásico Tardío (n= 13)		Jurásico Medio (n= 1)	
Turoniano	13.2%	Valanginiano	1.9%	Kimeridgiano	13.2%	Calloviano	1.9%
Cenomaniano	1.9%	Berriasiano	3.8%	Oxfordiano	11.3%		
Jurásico Temprano (n= 5)		Triásico Tardío (n= 2)		Proterozoico (n= 19)		Arqueano (n= 2)	
Toarciano	7.5%	Noriano	3.8%	Neoproterozoico	5.7%	Neoarqueano	1.9%
Sinemuriano	1.9%			Mesoproterozoico	17.0%	Paleoarqueano	1.9%
				Paleoproterozoico	13.2%		

*n: número de circones.

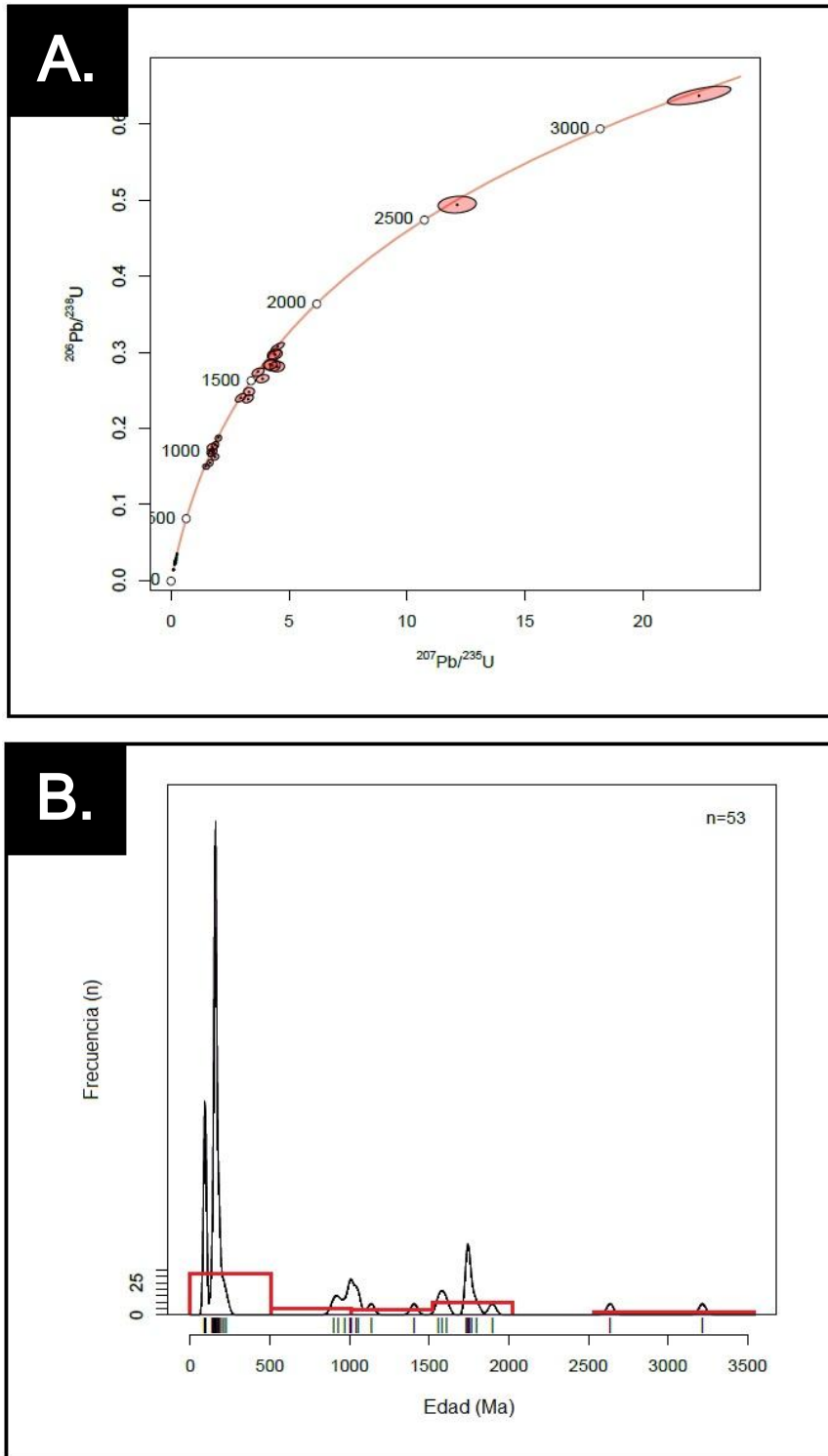


Figura 44. A. Diagrama de concordia tipo Wetherill, y B. Diagramas de probabilidad relativa e histogramas de las edades obtenidas por medio de U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-21 del miembro San Juan.

5.2.2 Geoquímica de circones

5.2.2.1 Elementos traza y tierras raras

Se llevó a cabo el análisis de elementos traza y tierras raras mediante la Ablación Láser por Espectrómetro de masas Inductivamente Acoplado (LA-ICP-MS, por sus siglas en inglés) en cien circones detríticos de las muestras pertenecientes a los miembros Marquechi, San Marcos y San Juan de la Formación Cintura (CFS-07, CFS-16 y CFS-21; respectivamente). Las concentraciones obtenidas se presentan en los Anexos 7, 8 y 9.

Para los circones detríticos de la Formación Cintura se determinaron los valores de las anomalías de Eu y Ce utilizando las concentraciones normalizadas a condrita con los valores de Sun y McDonough (1989), y con las ecuaciones propuestas por Taylor y McLennan (1985):

$$Eu/Eu^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{(Sm_N)(Gd_N)}}$$

$$Ce/Ce^* = \frac{Ce_N}{\sqrt{(La_N)(Pr_N)}}$$

N= Concentraciones normalizadas.

Los valores > 1 de Eu, representa una anomalía positiva, mientras que los valores de < 1 indican una anomalía negativa, de igual manera para los valores de las anomalías de Ce.

5.2.2.1.1 Miembro Marquechi

Las concentraciones de los elementos trazas, tales como el Th, U y Hf en los circones de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi oscilan entre 3.38 – 1260 ppm, 26.36 – 876 ppm, y de 4570 – 10190; respectivamente. Además, se tienen concentraciones de Th/U que oscilan entre 0.13 a 1.44 (promedio: 0.62), lo que esto indica una fuente ígnea (Rubatto, 2002).

El contenido de total de REE en los circones para las muestras CFS-07, varía de 62 a 3319 ppm. Esta muestra presenta concentraciones de tierras raras ligeras (LREE) que oscilan entre 2.12 a 320.53, mientras que el total de tierras raras pesadas (HREE) varía de 59.87 a 3165 ppm. En general, los circones de esta muestra presentan patrones característicos, donde exhiben una pendiente positiva con un empobrecimiento en los elementos de tierras raras ligeros (con valores menores o igual a 1 de la condrita de McDonough y Sun, 1995) y un enriquecimiento progresivo desde los elementos de tierras raras medias hasta los pesados (Figura 45), este enriquecimiento progresivo es característico de circones de origen ígneo (Hoskin e Ireland, 2000). Asimismo, en este diagrama se observan anomalías positivas de Ce ($Ce/Ce^* = 6.29 - 2675$, promedio= 350.46, n= 36) y anomalías negativas de Eu ($Eu/Eu^* = 0.29 - 0.48$, promedio= 0.41, n= 16).

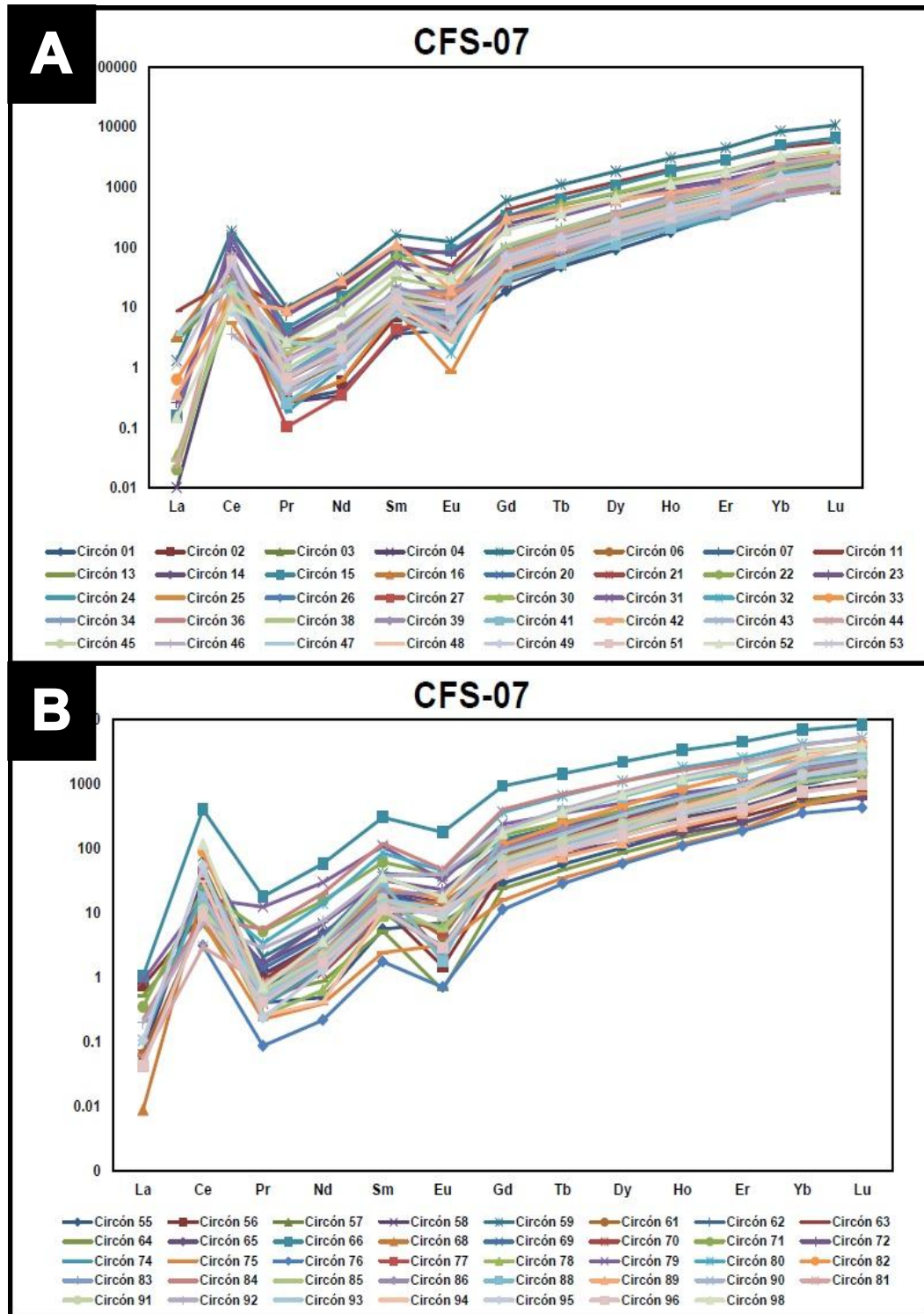


Figura 45. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro Marquechi (muestra CFS-07, n= 40), y B. Continuación de patrones de REE (n= 39).

Un total de seis circones detríticos de la muestra CFS-07 presentan patrones de elementos de tierras raras anómalos (Figura 46), en donde los circones 73 y 100 presentan anomalías negativas de Eu (11.78 y 15.1, respectivamente). El circón 10 presenta un bajo fraccionamiento desde las tierras raras medias hacia las pesadas. Además, los circones 54, 73 y 100 presentan patrones de tierras raras ligeras casi planas.

La mayoría de los patrones de elementos de tierras raras anómalos presentan una pendiente positiva asociada principalmente a los elementos de tierras raras pesadas (HREE), el cual es característico en circones por razones de la disminución de radio iónico derivada de la contracción lantánida, así como anomalías positivas de Ce y negativa de Eu debido al efecto redox (Hoskin y Schaltegger, 2003).

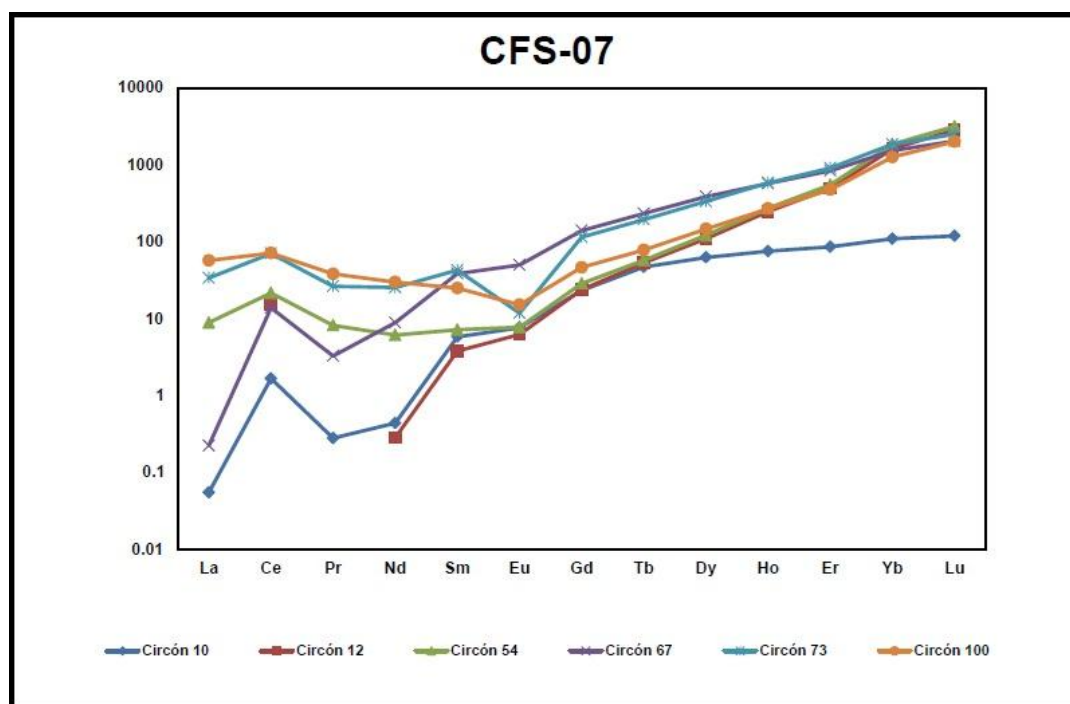


Figura 46. Patrones de elementos de tierras raras atípicos de los circones detríticos de la muestra CFS-07, perteneciente al miembro Marquechi (n= 6).

La muestra CFS-07 indica valores de U y Y que oscilan entre 18.69 – 876 ppm, y 131 – 5170 ppm; respectivamente, estas concentraciones fueron graficadas en el diagrama de Belousova *et al.* (2002), para distinguir las rocas fuentes de los circones detríticos (Figura 47). En general en este diagrama se observa que los circones detríticos pertenecientes al miembro Marquechi caen principalmente en el campo de granitoides, donde en su mayoría caen en los campos de granito, aplita/leucogranito, y sienita pegmatítica. Solo los circones correspondientes al Triásico, Neoproterozoico y Mesoproterozoico caen en el campo de granodiorita.

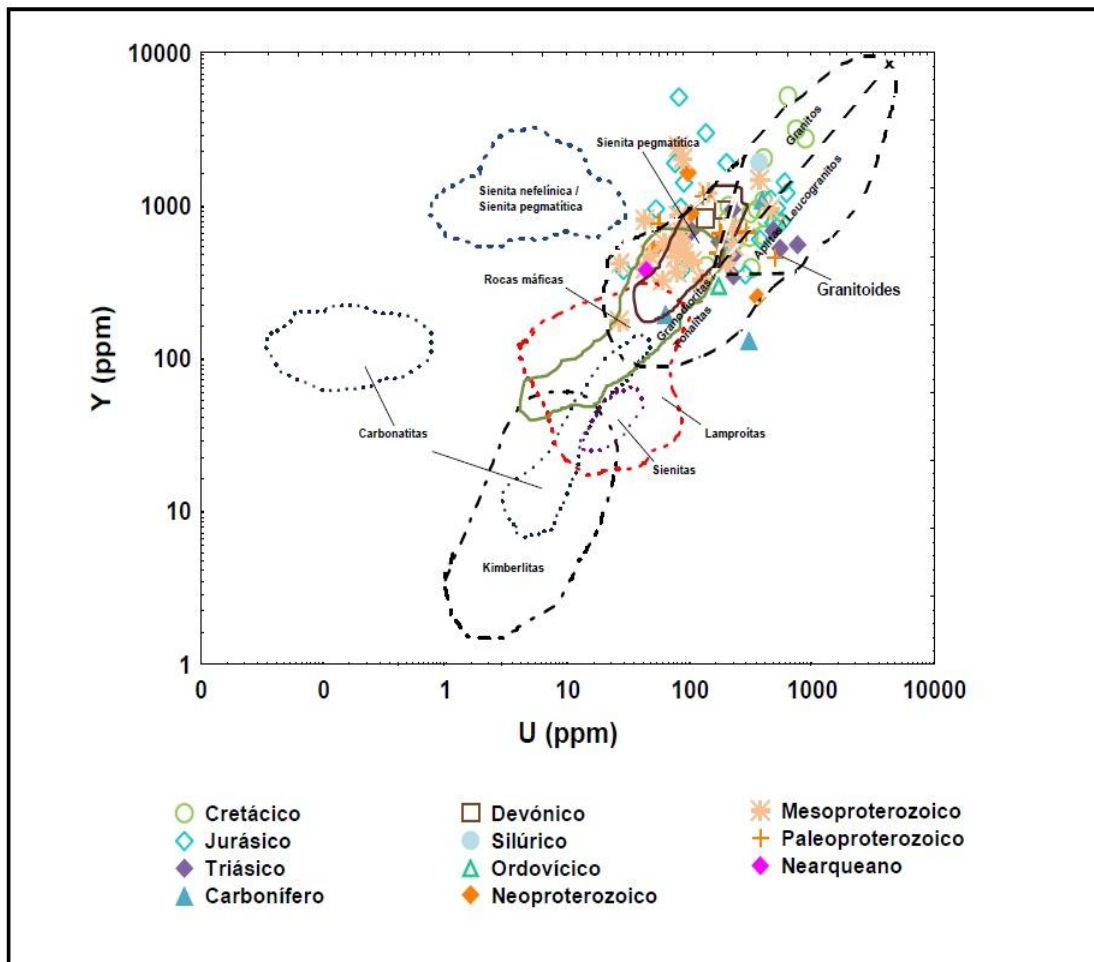


Figura 47. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi.

5.2.2.1.2 Miembro San Marcos

Para los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos, se tienen concentraciones de Th, U, Hf que oscilan entre 9.25 y 1652 ppm, con un promedio de 175.5; 19.52 a 6580 ppm, con un promedio de 404.9; 6640 a 11790 ppm, con un promedio de 8680; respectivamente. Asimismo, se tienen valores de Th/U que van de 0.09 a 2.15 con un promedio de 0.54; respectivamente, lo que esto indica una fuente ígnea (Rubatto, 2002).

El contenido total de elementos de tierras raras en los circones del miembro San Marcos oscila entre 229.10 y 2734.06 ppm, teniendo que los contenidos de LREE varían de 5.07 a 168.4 ppm, mientras que los valores de HREE varían de 219.31 a 2696.1 ppm. Los patrones de elementos de tierras raras normalizados a condrita (McDonough y Sun, 1995) de la muestra CFS-16 se muestran en la Figura 48, en donde se observa que los circones detríticos presentan patrones de empobrecimiento en LREE y un enriquecimiento mayor en HREE, además se tienen anomalías negativas de Eu (0.27 – 0.91, n= 25) y anomalías positivas de Ce (1.13 – 76964, n= 31).

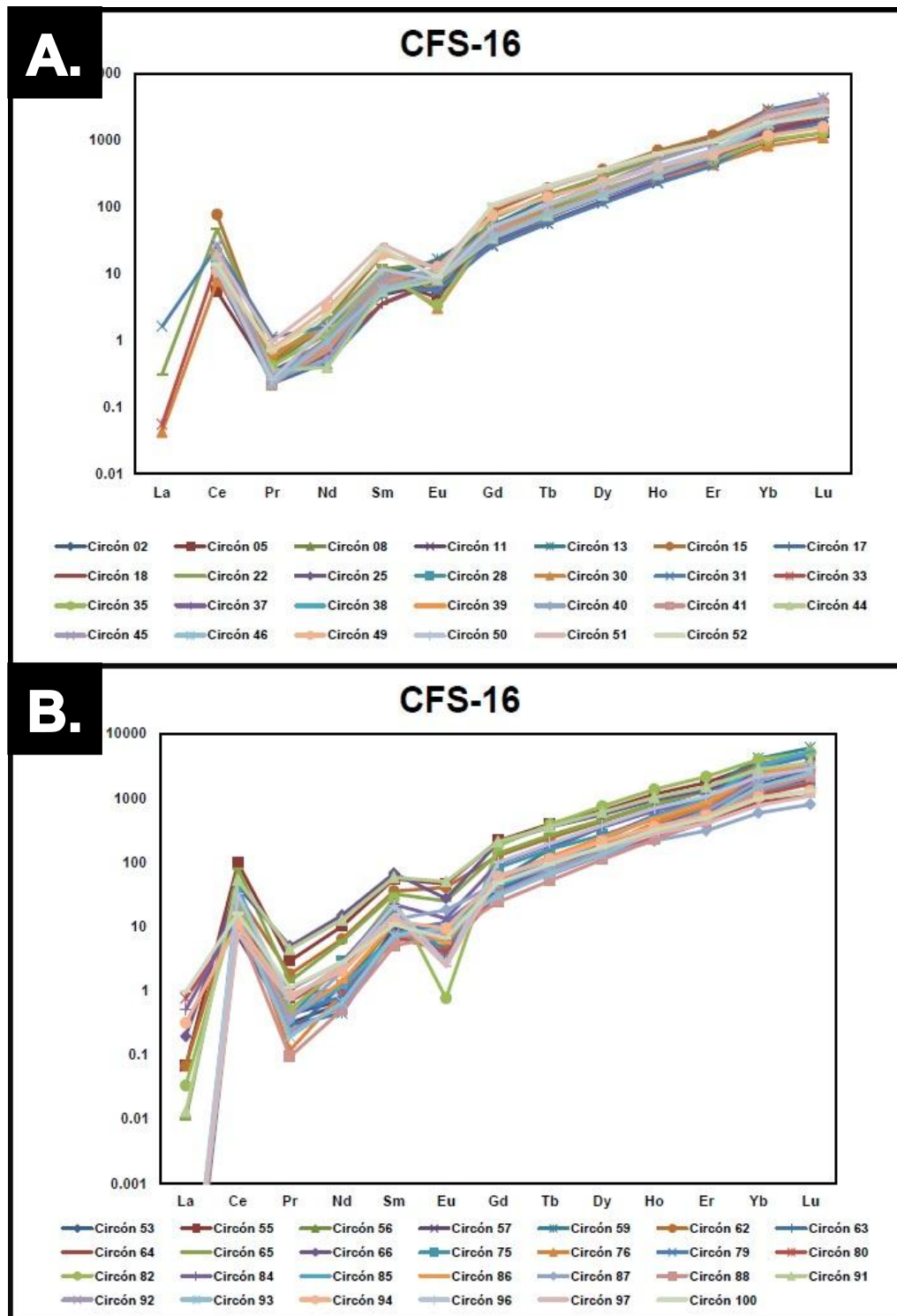


Figura 48. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro San Marcos (muestra CFS-16, n= 27). B. Continuación de patrones de REE (n= 27).

En general se tienen nueve circones detríticos con patrones de tierras raras anómalos, los circones 32 y 99 presentan un enriquecimiento progresivo desde el Sm al La, lo que indican la derivación de una fuente magmática enriquecida en elementos incompatibles, una evolución magmática dominada por la cristalización fraccionada con una separación limitada de plagioclasa (Wilson, 1989). Los circones anómalos de la muestra CFS-16 presentan anomalías positivas de Ce (1.13 – 23.66, n= 9), solo el circón 99 presenta valores mayores, con enriquecimiento de 164.73 ppm, esto debido probablemente a inclusiones de monacita y/o xenotima los cuales albergan altas concentraciones de Cerio (Rodríguez *et al.*, 2016). Además, se tienen anomalías negativas (0.35 – 0.49, n= 5) y positivas (1 – 1.61, n = 4) de Eu (Figura 49). Las anomalías positivas de Eu lo que sugiere un probable protolito a partir de gabros; la anomalía positiva de Eu (Winter, 2001).

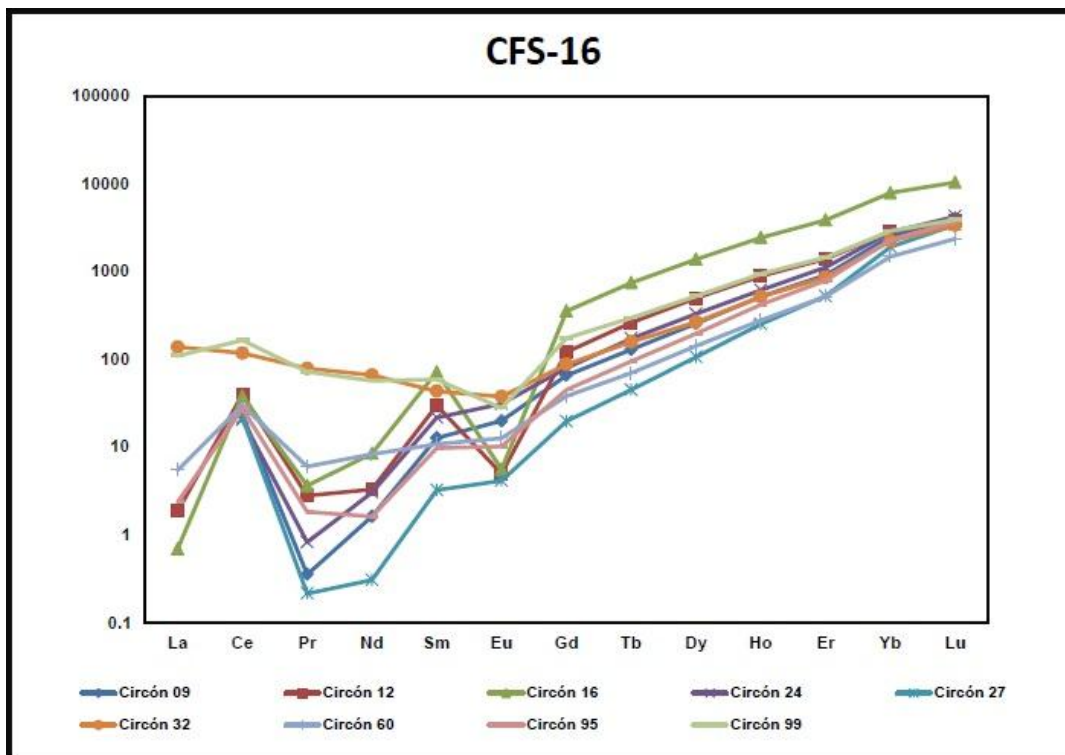


Figura 49. Patrones de elementos de tierras raras atípicos de los circones detríticos de la muestra CFS-16, perteneciente al miembro San Marcos (n= 9).

Para el miembro San Marcos las concentraciones de Y y U (ppm) varían de 368 a 4380 ppm, y de 19.51 a 6580 ppm; respectivamente. Estas concentraciones se muestran graficadas en el diagrama de Belousova *et al.* (2002), con el fin de determinar la de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-07 (Figura 50). En este diagrama se observa que la mayoría de los circones pertenecientes al Cretácico (10.05%, n=12 en granitos, 22.22%, n= 14 en aplitas/leucogranitos y 10.16%, n= 19 en sienitas pegmatíticas), Jurásico (3.17%, n= 2 en granitos, 1.59%, n= 1 en aplitas/leucogranitos, 1.59%, n= 1 en granodioritas/tonalitas y 4.76%, n= 3 en sienitas pegmatítica), Pérmico (1.59%, n=1 en granitos), Mesoproterozoico (3.17%, n= 2 en granodiorita y 3.17%, n= 2 en sienitas pegmatíticas), Paleoproterozoico (1.59%,

n= 1 en granodiorita y 1.59%, n= 1 en sienitas pegmatíticas), y Neoarqueano (1.59, n= 1 en granodiorita) caen en el campo de granitoides.

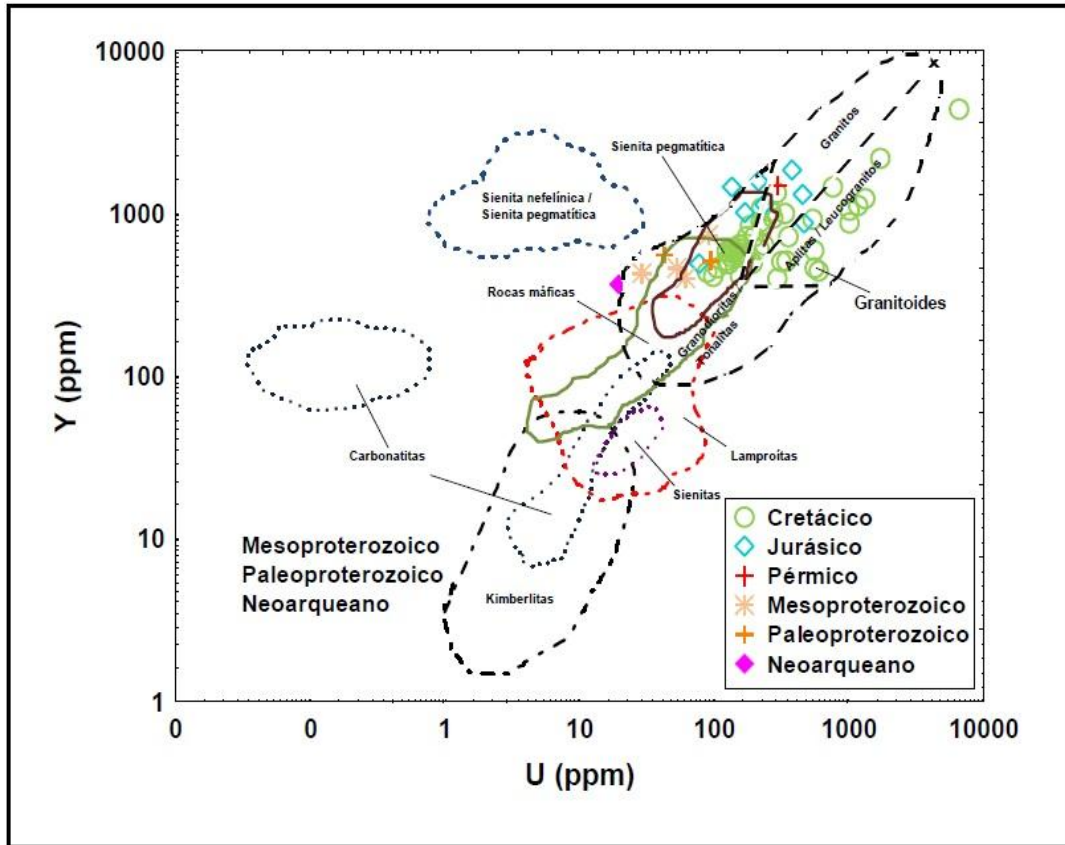


Figura 50. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos.

5.2.2.1.3 Miembro San Juan

La muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan presenta concentraciones de Th, U y Hf, que varían de 4.57 a 1520 ppm (promedio de 220), 21.14 a 1307 ppm (promedio de 307) y 7050 a 11960 ppm (promedio de 9063); respectivamente y valores de Th/U que oscilan entre 0.03 y 2.06 con un promedio de 0.80. Además, el contenido de elementos de tierras raras varía de 129.03 a 1661.8,

donde para los elementos de tierras raras ligeras se tienen valores que van de 2.66 a 357.7, mientras que los valores de elementos de tierras raras pesadas oscilan entre 121.67 y 1499.1. En el diagrama de elementos de tierras raras normalizados con condritas (valores de McDonough y Sun, 1995), en la Figura 51 se observa que los circones de la muestra CFS-21 presentan un enriquecimiento significativo en los elementos de tierras raras pesados, mientras que en los elementos de tierras raras ligeros se muestra un empobrecimiento. De igual manera en estos diagramas se observan anomalías negativas y positivas de Eu (0.18 – 0.50, n= 10) y Ce (1.06 – 485.68, n= 22), respectivamente.

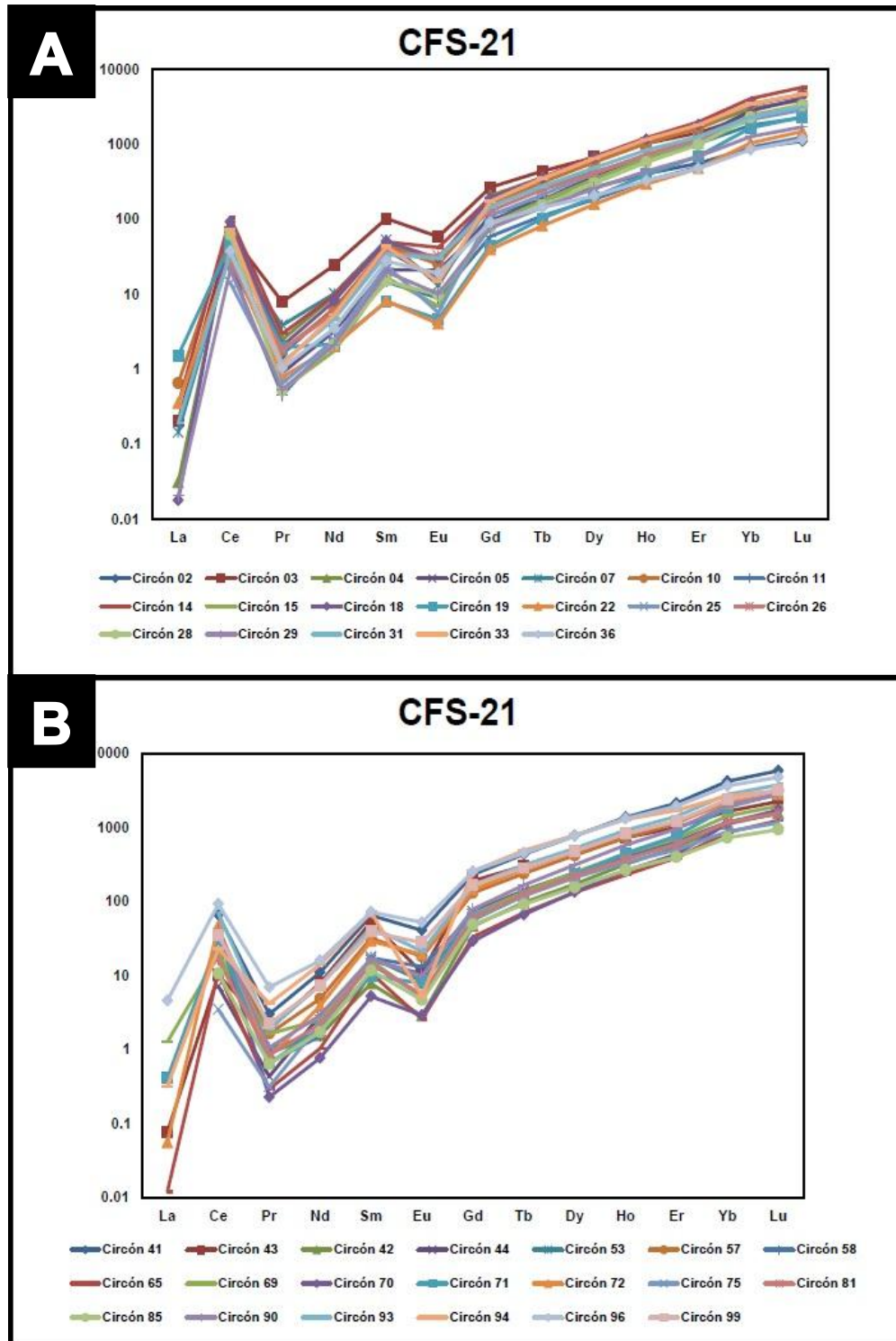


Figura 51. A. Patrones de elementos de tierras raras (REE) de los circones detríticos pertenecientes al miembro San Juan (muestra CFS-21, n= 42), y B. Continuación de patrones de REE (n= 42).

Se tiene un total de 14 circones detríticos representados en el diagrama de patrones de tierras raras normalizado (McDonough y Sun, 1995) (Figura 52), donde estos muestran patrones anómalos, los circones 13, 17, 46, 48, 73, 79 y 83 presentan anomalías en Pr y Nd que varían de (0.01 – 20.90 ppm, promedio: 0.89, y 0.13 – 203.28 ppm, promedio: 12.05), la anomalía negativa de Nb respecto a Th y Ce que caracteriza las rocas de arco, y agotamiento absoluto con relación a N-MORB de Nb, Zr, Ti e Y que caracteriza los arcos toleíticos. También se tiene que los circones 51, 62, 87 y 89 presentan un bajo fraccionamiento en las tierras raras ligeras, presentando patrones planos en LREE.

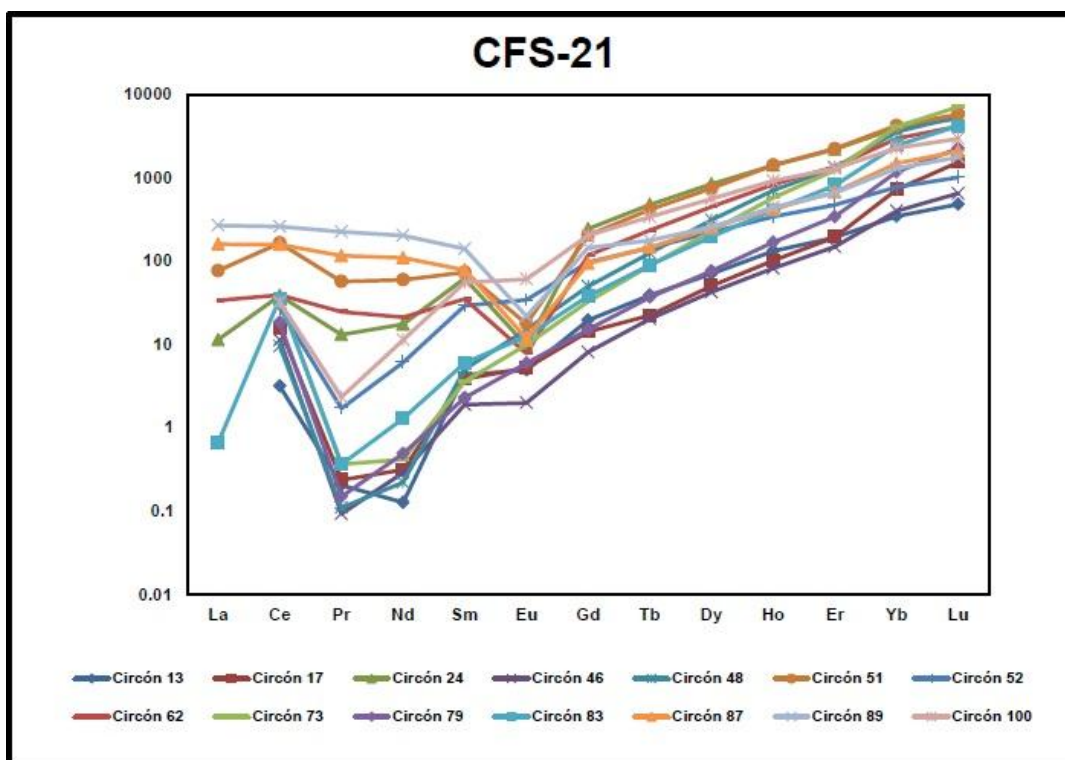


Figura 52. Patrones de elementos de tierras raras atípicas de los circones detríticos de la muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan (n= 16).

En el diagrama U contra Y de Belousova *et al.* (2002), para determinar la procedencia de los circones detríticos del Miembro San Juan (Figura 53), se observan

que los circones correspondientes al Cretácico, Jurásico y Paleoarqueano (3.77%, n= 2; 22.64%, n= 12; y 1.89%, n= 1; respectivamente) caen principalmente en el campo de granitos, los circones pertenecientes al Cretácico, Jurásico, Triásico y Paleoproterozoico (9.43%, n= 5; 5.66%, n= 3; 1.89%, n= 1; y 1.89%, n= 1; respectivamente) caen en el campo de aplitas/leucogranitos, además los circones del Cretácico, Jurásico, Neoproterozoico, Mesoproterozoico y Paleoproterozoico (3.77%, n= 2; 1.89%, n=1; 3.77%, n= 2; 5.66%, n= 3; 9.43%, n=5; respectivamente) caen en el campo de sienitas pegmatíticas, y en menor porción se tienen circones del Jurásico, Triásico, Mesoproterozoico y Paleoproterozoico (1.89%, n= 1; 1.89%, n= 1; 5.66%, n= 3; y 1.89%, n= 1; respectivamente) caen en el campo de granodiorita.

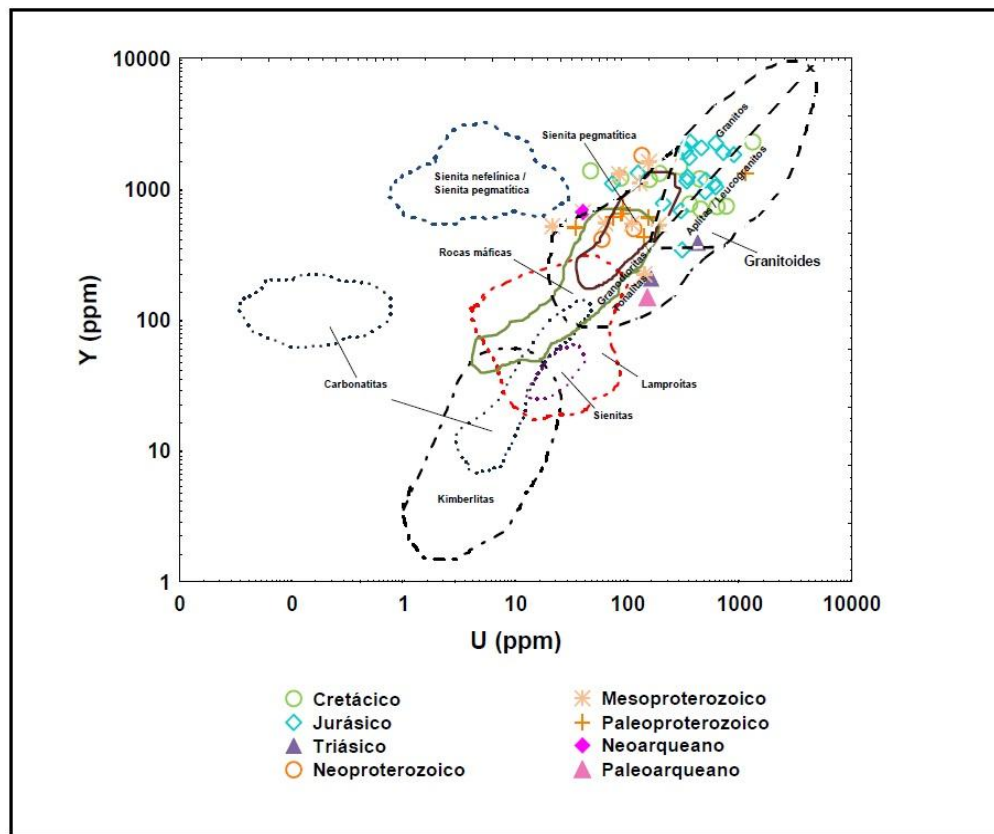


Figura 53. Diagrama U contra Y (Belousova *et al.*, 2002) de procedencia de los circones detríticos de la muestra CFS-21 del miembro San Juan.

En general las muestras de la Formación Cintura sugieren que los circones detríticos para este estudio son derivados de fuentes félsicas (Belousova *et al.*, 2002).

5.3 Edad máxima de la Formación Cintura

Un total de siete granos de circones detríticos de la muestra CFS-07, perteneciente a la parte superior del miembro Marquechi indican una edad máxima de depositación de 102.35 ± 0.49 Ma correspondiente al Albiano del Cretácico Temprano. Por otra parte, se tiene que los circones detríticos de la muestra CFS-16 (n= 15), pertenecientes a la parte superior del miembro San Marcos presentan una edad de 97.30 ± 0.32 Ma del Cretácico Tardío que corresponde al Cenomaniano, indicando la depositación máxima de este miembro. De igual forma se tiene que los circones detríticos de la muestra CFS-21 (n= 6) pertenecientes a la parte superior del miembro San Juan, corresponden al Turoniano con una edad de 90.07 ± 0.50 Ma, lo que esto indica que la edad máxima de depositación de la Formación Cintura en el área estudiada corresponde al Cretácico Tardío (Turoniano).

5.4 Procedencia de los circones detríticos

Se obtuvieron tres edades principales para los circones detríticos de la muestra CFS-07 perteneciente al miembro Marquechi: i) Proterozoico, ii) Jurásico y iii) Cretácico, mientras que en menor porción se tienen edades del Triásico y Paleozoico.

Los circones detríticos con edades proterozoicas de este miembro se dividen en tres poblaciones. La primer población corresponde a los circones detríticos

paleoproterozoico, los cuales presentan edades que varían entre 1761 – 1647 Ma, sugiriendo que estos provienen de las rocas metamórficas del Esquisto Pinal, mientras que, la segunda población de circones muestran edades del Mesoproterozoico que van de 1538 a 1010 Ma, las edades que van de 1.0 a 1.2 Ga sugieren que los circones detríticos del miembro Marquechi provienen de la erosión de granitoides del cinturón Grenvilliano, los cuales se encuentran expuestos en el bloque Caborca, los circones con edades ~1.4 Ga indican que estos circones fueron derivados de los granitoides que se encuentran intrusionando al Bloque Caborca y al Bloque Norteamérica (Anderson y Silver, 1977, 1981). Por último, se tiene la tercera población de circones correspondientes al Neoproterozoico, los cuales presentan edades que oscilan entre 977 a 592 Ma. Lo anterior sugiere que la procedencia de los circones detríticos del miembro Marquechi está relacionada a la erosión del basamento proterozoico ígneo-metamórfico de las provincias Yavapai, Mazatzal y Greenville.

Los circones indican edades que van de 197.1 a 145.8 Ma del Jurásico, la procedencia de estos circones está relacionada a las rocas graníticas del arco magmático continental cordillerano Permo-Triásico, con edades de 180 – 170 Ma, para las rocas volcánicas y edades entre 175 – 150 Ma para las rocas intrusivas de este arco (Anderson y Silver, 1979; Stewart *et al.*, 1986). Por otra parte, se tiene que los circones detríticos más jóvenes del miembro Marquechi pertenecen al Albiano del Cretácico temprano (112.6 – 101.3 Ma), además se tienen circones con edades que van desde el Aptiano al Berriasiano (114.9 – 143.9 Ma), donde estos circones provienen del arco volcánico Alisitos del Cretácico Temprano el cual se extendía de

Oeste a Suroeste antes de la apertura transtensional del Golfo de California (Dickinson y Lawton, 2001; Jacobson *et al.*, 2011, Peryam *et al.*, 2012).

La edad de los circones detríticos pertenecientes al miembro San Marcos corresponde principalmente al Cretácico, sin embargo, algunos circones de este miembro presentan edades del Jurásico y Proterozoico. Los circones con edades del Cretácico corresponden principalmente al Cenomaniano del Cretácico Tardío (95.3 – 100.4 Ma, n= 34), y al Albiano del Cretácico Temprano (100.7 – 103.2 Ma, n= 13), lo que indica que estos circones están asociados al inicio del magmatismo del Cretácico Tardío. Los circones detríticos con edades del Jurásico presentan edades que varían entre 157.3 – 191 Ma, sugieren que estos circones fueron derivados de las rocas ígneas relacionadas al magmatismo de arco continental (~191 – 147 Ma), donde las rocas graníticas del arco magmático continental cordillerano Permo-Triásico, tienen edades de 180 – 170 Ma, para las rocas volcánicas y edades entre 175 – 150 Ma para las rocas intrusivas de este arco (Anderson y Silver, 1979; Stewart *et al.*, 1986). Mientras que los circones detríticos correspondientes al Proterozoico presentan edades del Mesoproterozoico (1065 – 1363 Ma, n= 4), los circones con edades de 1.1 y 1.2 Ga indica que estos circones detríticos son derivados de los granitoides del cinturón Grenvilliano, mientras que un solo circón presenta una edad de 1.4 Ga, lo que sugiere que este proviene de los granitoides que se encuentran intrusionando al Bloque Caborca y al Bloque Norteamérica (Anderson y Silver, 1977, 1981). Por otra parte, los circones del Paleoproterozoico (1634 – 1679 Ma, n= 2), sugiere que estos circones provienen de la erosión del basamento proterozoico ígneo-metamórfico de

las provincias Yavapai, Mazatzal, además pueden provenir de las rocas metamórficas del Esquisto Pinal proveniente del Bloque de Norteamérica (Anderson *et al.*, 1980).

Los circones detríticos pertenecientes al miembro San Juan presentan que las edades principales corresponden al Proterozoico, Jurásico y Cretácico, en donde los circones con edades del Proterozoico se dividen en tres grupos de edades: Paleoproterozoico (1736 – 1879 Ma, n= 7), indicando que los circones detríticos con edades de 1.7 – 1.6 Ga provienen de las rocas metamórficas del Esquisto Pinal del bloque Norteamérica, además estos circones pueden provenir de las rocas graníticas del Bloque Caborca, relacionados a las provincias Mazatzal y Yavapai, respectivamente; los circones del Mesoproterozoico presentan edades que varían entre 1594 – 1002 Ma (n= 9), donde los circones con edades de 1.0 y 1.1 Ga corresponden a los granitoides del cinturón Grenvilliano, asociados al Bloque Caborca los cuales se encuentran cercanos a la región de Quitovac (Iriondo *et al.*, 2004; Gross *et al.*, 2000), mientras que los circones con edades de 1.4 Ga, sugieren una procedencia de los granitoides intrusionados en los Bloques Caborca y Norteamérica (Anderson y Silver, 1977, 1981); además se tienen circones con edades del Neoproterozoico que varían entre 900 – 970 Ma (n= 3).

Los circones con edades jurásicas de este miembro presentan edades que varían entre 152.3 – 194.2 Ma, donde las edades que van de 180 – 150 Ma, corresponden a las rocas ígneas del arco magmático continental cordillerano Permo-Triásico (Anderson y Silver, 1979; Stewart *et al.*, 1986). Por último, se tienen que los circones con edades del Cretácico Tardío corresponden principalmente al Turoniano (90.7 – 92.8 Ma, n= 6), y al Cenomaniano (93.9 – 96 Ma, n= 2), mientras que los

circones del Cretácico Temprano presentan edades que varían entre 135.9 – 144.7 Ma (n= 3), sugiriendo que estos circones están asociados al magmatismo inicial del Cretácico Tardío y/o a la migración del arco.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

La columna estudiada de la Formación Cintura incluye los tres miembros conformados de esta unidad (Grijalva-Noriega, 1996). El miembro Marquechi en la base, consiste de 575 m de espesor de una intercalación de estratificación media a gruesa de areniscas de grano medio de color pardo claro y lutitas de color marrón, presentando las primeras bioturbación, laminaciones y estratificación cruzada. En la parte media se tiene al miembro San Marcos, caracterizado por 1711 m de espesor de secuencias granodecrescentes de areniscas de color gris verde-amarillento con intraclastos (rip-up), laminaciones y estratificación cruzada, y lutitas de color gris rojizo y verdoso con locales lentes conglomeráticos. La cima de la unidad la constituye el miembro San Juan, que consiste de secuencias granodecrescentes de coloración pardo grisáceo a verde pardusco, con pequeñas intercalaciones de lutitas oscuras (negras verdosas) y areniscas conglomeráticas, este miembro presenta madera fósil, capas con bivalvos, nódulos calcáreos, troncos silicificados y estratificación cruzada, con un espesor medido de 905 m.

De acuerdo con la clasificación de Folk (1968), las areniscas del miembro Marquechi son en su mayoría litarenitas feldespáticas y en menor porción arcosas líticas; las del miembro San Marcos se clasifican principalmente como arcosas líticas; mientras que las areniscas del miembro San Juan se clasifican como arcosas líticas y litarenitas feldespáticas. El diagrama Qt-F-L indica una procedencia de arco transicional, con tendencia hacia el arco no-disectado para las areniscas de la base y la cima; mientras que en el diagrama Qm-F-Lt, la procedencia se mantiene dentro del

campo del arco transicional, con algunas areniscas del miembro Marquechi que presentan una procedencia de arco disectado por la mayor cantidad de cuarzo monocristalino presente.

La presencia de granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulante, contactos internos suturados y estructuras de Bhöem, así como de granos con textura gráfica, indica que estos granos fueron erosionados de areniscas de cuarzo paleozoicas y/o del basamento ígneo-metamórfico paleoproterozoico de la región. Por su parte, la mayor cantidad de granos líticos están representados por fragmentos de roca volcánica con diferentes texturas, correspondiendo a la erosión del arco del Mesozoico, cuyos afloramientos se tienen cercanos al área estudiada.

Con los resultados obtenidos en el diagrama de $\text{Log} (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ contra $\text{Log} (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ de Herron (1988), las rocas estudiadas del miembro Marquechi se clasifican como areniscas ricas en Fe, y solo una de éstas corresponde a una wacka; para el miembro San Marcos se clasifican como wackas; mientras que las areniscas del miembro San Juan se clasifican como arcosas, wackas y en menor porción como litarenitas. Lo anterior tiene correspondencia con los resultados obtenidos en el análisis petrográfico.

Las muestras de areniscas pertenecientes a los diferentes miembros de la Formación Cintura presentan valores de CIA que varían entre 45 a 52, lo que indica una baja meteorización de la roca fuente. Por su parte, las muestras de lutita (CFS-06) del miembro San Marcos presentan valores de CIA que oscilan entre 57 a 74, con un promedio de 65 ± 7.3 ; mientras que las del miembro San Juan tienen valores de 73, y

en una muestra de lutita del miembro Marquechi fue de 69; lo anterior sugiere que la meteorización en la roca fuente de la cual estas lutitas fue moderada. Los resultados de CIA para las areniscas y lutitas (45 – 66, con un promedio de 55 ± 6.0 ; 57 – 74, con un promedio de 67 ± 6.5 ; respectivamente) de la Formación Cintura concuerdan con los valores obtenidos de PIA para las muestras de areniscas y lutitas (44 – 71, con un promedio de 57 ± 7.8 ; 59-89, con un promedio de 75 ± 11.4 ; respectivamente).

En los diagramas de ambiente tectónico Al_2O_3/SiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ de Bhatia (1983), TiO_2 contra $Fe_2O_3^* + MgO$ de Bhatia (1983), y Sc/Cr contra La/Y de Bhatia y Crook (1986), las muestras pertenecientes al miembro Marquechi indican una procedencia de ambiente tectónico principalmente de margen continental activo y pasivo; las del miembro San Marcos son representadas por ambientes de arco de islas continental y margen continental activo; mientras que las del miembro San Juan presentan principalmente de arco de islas continental, margen continental activo y pasivo.

Por otra parte, los diagramas de procedencia, Hf contra La/Th , La/Sc contra Co/Th , La/Sc contra Th/Co , y TiO_2 contra Ni , muestran un aporte félsico para las areniscas y lutitas de la Formación Cintura. Además, el diagrama de funciones discriminantes de Roser y Korsch (1988) presenta en menor porción una procedencia sedimentaria enriquecida en cuarzo ($n= 6$) y con una procedencia de origen intermedio ($n=1$).

En los diagramas de funciones discriminantes de Verma y Armstrong-Altrin (2013), la mayoría de las muestras pertenecientes a esta unidad se ubican dentro del

campo de arco, mientras que en menor porción se tienen dentro del campo de colisión. Estos resultados son consistentes con la tectónica regional, ya que las rocas del arco mesozoico y los remanentes del basamento ígneo-metamórfico proterozoico de la región (Esquisto Pinal/Granito Mesteñas), pudieron haber aportado detritos a la Cuenca Bisbee.

En los diagramas normalizados con condrita, para las muestras de areniscas y lutitas de la Formación Cintura, en general muestran un enriquecimiento de LREE, mientras que los patrones de HREE, presentan un patrón suave. Además, estas muestras presentan anomalías negativas de Eu (Eu/Eu^* : 0.64 – 0.77 miembro Marquechi, 0.59 – 0.78 miembro San Marcos, y 0.60 – 0.84 del miembro San Juan), estas características son representativas de una fuente félsica.

Los circones detríticos fechados por el método U-Pb para los miembros de la Formación Cintura arrojan edades desde el Paleoarqueano (3218 Ma) hasta el Turoniano (90.7 Ma). Se obtuvieron cuatro edades principales para el miembro Marquechi: Cretácico (n= 23), Jurásico (n= 10), Triásico (n= 9) y Proterozoico (n=35); mientras que para los miembros San Marcos y San Juan, fueron tres grupos: Cretácico, Jurásico y Proterozoico (n= 47 y n= 13, n= 9 y n= 19, n= 6 y 19; respectivamente).

Las edades obtenidas de 1.0 a 1.2 Ga sugiere que los sedimentos de las rocas siliciclásticas de la Formación Cintura provienen de la erosión de granitoides del cinturón Grenvilliano (n= 32), los cuales se encuentran expuestos en el bloque Caborca. Las edades que van de 1.6 a 1.7 corresponden a las rocas metamórficas del

Esquisto Pinal (n= 4); mientras que aquellas entre 1.7 y 1.8 pueden ser derivados de los granitoides presentes en el bloque Caborca (n= 11). Lo anterior indica que la procedencia de estos circones está relacionada a la erosión del basamento proterozoico ígneo-metamórfico de las provincias Yavapai, Mazatzal y Grenville. Los circones más antiguos, seguramente son retrabajados de la provincia Mohave y de rocas más antiguas.

La edad más joven de circones detríticos obtenidas de muestras del miembro Marquechi fue de 101.3 Ma, para las del miembro San Marcos fue de 95.3 Ma, y para las del miembro San Juan fue de 90.7 Ma. Esto, lo que indica que la edad de la Formación Cintura en el área estudiada es del Albiano al Turoniano.

REFERENCIAS

- Anderson, T.H., Silver, L.T., Salas, G.A., 1980. Distribution and U-Pb isotopic ages of some lineated plutons, northeastern Mexico, in Crittenden, M., Jr.; Coney, P.J.; y Davis, G., eds., Cordilleran metamorphic core complexes: Geological Society of America Memoir, 153, 269–283.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1977. U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, (72), 827–836.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1979. The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, in Anderson, T.H., y Roldán-Quintana, Jaime, eds., *Geology of Northern Sonora: Geological Society of America. Annual Meeting Guidebook (27)*, 59–68.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1981. An overview of Precambrian rocks in Sonora: *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 5, 131–139.
- Anderson, T.H., 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation: *Chemical Geology*, 216, 249–270.
- Arellano, A.R.V., 1956. Relaciones del Cámbrico de Caborca, especialmente con la base del Paleozoico: el Sistema Cámbrico, su paleogeografía y el problema de su base symposium, 2, 509-527. Congreso Geológico Internacional, 20th, Mexico, 1956.

- Aristizabal E., Roser, B., Yokota S., 2009. Patrones e índices de meteorización química de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el Valle de Aburrá. *Boletín de ciencias de la tierra*, 25, 27-42.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Lee, Y.I., Balaram, V., Cruz-Martinez, A., Avila-Ramirez, G., 2013. Geochemistry of the Jurassic and upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: implications of source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Comp. Rend. Geo. Sci.* 345, 185-202.
- Armstrong-Altrin J.S., Lee Y.I., Verma S.P., Ramasamy S., 2004. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting: *Journal of Sedimentary Research*, 74, 285-297.
- Arribas, J., Arribas, M.E., 1991. Petrographic evidence of different provenance in two alluvial fan systems (Palaeogene of the N Tajo Basin, Spain), *in* Morton, A.C, Tood, S.P., Haughton P.D.W. (eds.), *Developments in Sedimentary Provenance Studies: Geological Society of London, Special Publication*, 57, 263-271.
- Arvizu, H.E., Iriando, A., Izaguirre, A., Chávez-Cabello, G., Kamenov, G.D., Solís-Pichardo, G., Cruz, L.S., 2009. Rocas graníticas pérmicas en la Sierra Pinta, NW de Sonora, México: Magmatismo de subducción asociado al inicio del margen continental activo del SW de Norteamérica: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 709-728.

- Barboza-Gudiño, J.R., Ramírez-Fernández, J.A., Torres-Sánchez, S.A., Valencia, V.A., 2011. Geocronología de circones detríticos de diferentes localidades del Esquisto Granjero en el noroeste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63(2), 201-216.
- Basu, A., 1985. Reading Provenance from Detrital Quartz, in Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of Arenites: Dordrecht, NATO ASI Series, C 148*, D. Reidel Publishing Company, 231-247.
- Belusova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Fisher, N.I., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143, 602–622.
- Bernet, M., Spiegel, C., 2004. Introduction: detrital thermochronology. In: Bernet, M., Spiegel, C. (Eds.). *Detrital Thermochronology – Provenance Analysis, Exhumation, and Landscape Evolution of Mountain Belts*. Geol. Soc. of Ame. Special Paper, 378, pp. 1–5.
- Bhatia, M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92, 181-193.
- Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones: *Geology*, 91, 611-627.
- Bilodeau, W.L., Kluth, C.F., Vedder, L.K., 1987. Regional stratigraphic, sedimentologic and tectonic relationships of the Glance Conglomerate in southeastern Arizona

in Dickinson, W. R., and Kluth, M. A. (Eds.). Mesozoic rocks of southern Arizona and adjacent areas: Arizona Geol. Soc. Dig., v. 18, pp. 229-256.

Bilodeau, W.L., 1979. Early Cretaceous tectonics and deposition of the Glance conglomerate, southeastern Arizona: Stanford, California, Stanford University, tesis Doctoral, 145 pp.

Bilodeau, W. L., 1982. Tectonic models for Early Cretaceous rifting in southeastern Arizona. *Geology* 10, 466-470.

Blatt H, Middleton G., Murray R., 1972. Origin of sedimentary rocks: Eaglewood cliffs New Jersey, Prentice-Hall, 634pp.

Campo, M.D., Guevara, S.R., 2005. Provenance analysis and tectonic setting of late Neoproterozoic metasedimentary successions in NW Argentina: *Journal of South American Earth Sciences*, 19(2), 143-153.

Cánovas-Picón, F., 2007. Datación Radiactiva. Física Nuclear y Partículas, 50 pp.

Condie, K.C., Belousova, E., Griffin, W.L., Sircombe, K.N., 2009. Granitoid events in space and time: constraints from igneous and detrital zircon age spectra: *Gondwana Research*, 15, 228-242.

Condie, K.C., 1991. Another look at rare earth elements in shales: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 2527-2531.

- Condie, K.C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales: *Chemical geology*, 104, 1-37.
- Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 2919-2940.
- Cullers, R.L., Basu, A., Suttner, L., 1988. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA: *Chemical Geology*, 70, 335-348.
- Cullers, R.L., 1994a. The chemical signature of source rocks in size fraction of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, USA: *Chemical Geology*, 113, 327-343.
- Cullers, R.L., 1995. The controls on the major and trace element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountain region, Colorado, USA: *Chemical Geology*, 123, 107-131.
- Cullers, R.L., 2002. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA: *Chemical Geology*, 191, 305-327.
- Deru, X., Xuexang, G., Pengehun, L., Guanghao, C., Bin, X., Bachinski, R., Zhuanli, H., Gonggu, F., 2007. Mesoproterozoic-Neoproterozoic transition: geochemistry,

provenance and tectonic setting of clastic sedimentary rocks on the SE margin of the Yangtze Block, South China. *J. Asian Earth Sci.* 29, 637–650.

Dickinson, W.R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K.P., 1983. Provenance of North America Phanerozoic sandstones in relation tectonic settings. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 94, 222-235.

Dickinson, W.R., Klute, M.A., Swift, P.A., 1986. The Bisbee basin and its bearing on late Mesozoic paleogeographic and paleotectonic relations between the Cordilleran and Caribbean regions, in Abbott, P.L., ed., *Cretaceous stratigraphy, Western North America: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section.* 46, 51–62.

Dickinson, W.R.; Fiorillo, A.R.; Hall, D.L.; Monreal, R.; Potochnik, A.R.; y Swift, P.N., 1989. Cretaceous stratigraphy of southeastern Arizona, in Jenney, J.P., y Reynolds, S.J., eds., *Geologic evolution of Arizona: Az. Geol. Soc. Digest.* 17, 447–461.

Dickinson, W.R., Gehrels, G.E., 2003. U–Pb ages of detrital zircons from Permian and Jurassic eolian sandstones of the Colorado Plateau, USA: paleogeographic implications: *Sedimentary Geology*, 163, 29–66.

Dickinson, W.R., Lawton, T.F., 1999. Post-mid-Paleozoic tectonic assembly of Mexico. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 31(7), A-293.

- Dickinson, W.R., Lawton, T.F., 2001. Tectonic setting and sandstone petrofacies of the Bisbee Basin (USA-Mexico): *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 475–504.
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979. Plate tectonics and sandstone compositions: *Aapg Bulletin*, 63, 2164-2182.
- Dickinson, W.R., 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose: *Journal of Sedimentary Research*, 40, 695-707.
- Dickinson, W.R., 1981. Plate tectonic evolution of the Southern Cordillera. In: Dickinson, W.R., Payne, W.D. (Eds.), *Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera*. *Ariz. Geol. Soc. Digest* 14, 113–135.
- Dickinson, W.R., 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa, G.G (Ed.). *Provenance of Arenites*. Reidel, Dordrecht, 333-361.
- Dumble, E.T., 1902. Notes of geology of southeastern Arizona: *American Institute of Mining Engineer Transaction*, 31, 696-715.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and Paleosols, with implications for Paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921-924.
- Fedo, C.M., Eriksson, K.A., Krogstad, E.G., 1996. Stratigraphic framework of the ~3.0 GaBuhwa greenstone belt: a unique stable shelf succession in the Zimbabwe Archeancraton. *Precamb. Res*, 77, 161-178.

- Fedo, C.M., Young, G.M., Nesbitt, G.M., 1997. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition: *Precam. Res.* 86, 201–223.
- Floyd, P.A., Winchester, J.A., Park, R.G., 1989. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, N.W. Scotland: *Precambrian Research*, 45, 203-214.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones: *Journal of the Geological Society*, 144, 531-542.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Press, Austin, 182 pp.
- García y Barragán, J.C., Jacques-Ayala, C., 2011. Estratigrafía del Cretácico 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. 5, 113–199.*
- García y Barragán, J.C., 2003. Stratigraphy, sedimentology and tectonic interpretation for the origin of the Late Cretaceous El Tuli Formation in northern Sonora, Mexico: El Paso, Texas, University of Texas at El Paso, disertación doctoral, 194 p. (inérita).
- Gazzi, P., 1966. Le arenarie del flysch sopracretaceo dell' Appenino modenese; correlazioni con il flysch di Monghidoro. *Mineralogica Petrografica*, 12, 69-97.

- Gehrels, G., 2012. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: Busby, C., Azor, A. (Eds.), *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell publishing Ltd, 47-62.
- Gehrels, G.E., 2014. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, (42), 127-149.
- González- León, C., 1989. Evolución de terrenos Mesozoicos en el Noroeste de México. *Bol. Depto. Geol. Uni-Son*, 6, 39-54.
- González-León, C.M., 1994a. Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona Basin, northeastern Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, disertación doctoral, 144 p. (inérita).
- González-León, C. M., Scott, R. W., Löser, H., Lawton, T. F., Robert, E., Valencia, V. A., 2008. Upper Aptian- Lower Albian Mural Formation: Stratigraphy, biostratigraphy and depositional cycles on the Sonoran shelf, northern México. *Cre. Res.*, 29, 249-266.
- González-León, C.M., Jacques-Ayala, C., 1990. Paleogeografía del Cretácico Temprano en Sonora: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, *Actas*, V. 4, 33-60.
- González-León, C.M., 1994b. Early Cretaceous tectono-sedimentary evolution of the southwestern margin of the Sonora basin: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 11, p. 139–146.

- Griffin, W.L., Belousova, E.A., Shee, S.R., Pearson, N.J., O'Reilly, S.Y., 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgam Craton. U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons, *Precam. Res.* 131, 231-282.
- Grijalva-Noriega, F.J., 1994. Estratigrafía y Sedimentología de la Formación Cintura (Cretácico Temprano) en el área de San Marcos, noreste de Sonora, México.
- Grijalva-Noriega, J., 1996. Cintura Formation – an Early Cretaceous deltaic system in Northeastern Sonora, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 129–139.
- Gu X.X., 1996a. Geochemical characteristics of sediments and tectonic setting analysis of sedimentary basins, in *Developments in Geosciences and Technology*, 1995. Press of the University of Geosciences of China, Beijing, 205-212.
- Gu, X.X., 1996b. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys sediments in NW-Sichuan and its implications to the weathering conditions in source regions: *Mineral Petrology and Geochemistry Bulletin*, 15, 23-27.
- Hayashi, K.-I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 16, 4115-4137.
- Hayes, P.T., 1970. Cretaceous paleogeography of southeastern Arizona and adjacent areas: Washington D.C., U.S. Geological Survey Professional Paper, 658–B, 42 p.

- Herron, M.M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data: *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 820-829.
- Hoskin, P.W.O., Ireland, T.R., 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator: *Geology*, 28, 527–630.
- Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis, in Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon: reviews in mineralogy and geochemistry*, 53, 27–62.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.L., Grimm, J.P., Pickle, J.D., Sares, S.W., 1984. The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54. No. 1, 103-116.
- Iriondo, A., Premo, W.R., Martínez-Torres, L.M., Budahn, J.R., Atkinson, W.W., Jr., Siems, D.F., Guarás-González, B., 2004. Isotopic, geochemical and temporal characterization of Precambrian basement rocks in the Quitovac region, northwestern Sonora, Mexico—its implications for the tectonic reconstruction of southwestern North America: *Geological Society of America Bulletin*, 116, 154–170.
- Jacobson, C.E., Grove, M., Pedrick, J.N., Barth, A.P., Marsaglia, K.M., Gehrels, G.E., Nourse, J.A., 2011. Late Cretaceous-early Cenozoic tectonic evolution of the southern California margin inferred from provenance of trench and forearc sediments: *Geological Society of America Bulletin*, 123, 485-506.

- Jacques-Ayala, C., Potter, P.E., 1987. Stratigraphy and paleogeography of Lower Cretaceous rocks, Sierra El Chanate, northwest Sonora, Mexico, in Dickinson, W.R., y Klute, M. (Eds.). Mesozoic rocks of southern Arizona and adjacent areas: Arizona Geological Society Digest, 18, 203-214.
- Jacques-Ayala, C., 1992b. The Lower Cretaceous Glance Conglomerate and Morita Formation of the Sierra El Chanate, northwestern Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 10, p. 37–46.
- Jacques-Ayala, C., 1992c. Stratigraphy of the Lower Cretaceous Cintura Formation, Sierra El Chante, northwestern Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Rev. 10, 129-136.
- Jacques-Ayala, C., 1993. The Cretaceous in the Caborca-Santa Ana region, northern Sonora, Mexico: Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, disertación doctoral, 146 p. (inérita).
- Jacques-Ayala, C., 1995. Paleogeography and provenance of the Lower Cretaceous Bisbee Group in the Caborca-Santa Ana area, northwestern Sonora, *in* Jacques-Ayala, C., González-León, M.C., Róldan-Quintana, J. (eds.), Studies on the Mesozoic of Sonora and Adjacent Areas: Geological Society of America, Special Paper, 301, 79-98.
- Klute, M.A., 1991. Sedimentology, sandstone petrofacies, and tectonic setting of the late Mesozoic Bisbee basin, southeastern Arizona: Tucson, Arizona, University of Arizona, disertación doctoral, 272 p. (inérita).

- Kusnetsov, N.B., Natapov, L.M., Belousova, E.A., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., 2010. Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: implications for plate tectonic models. *Gond. Res.* 17, 583-601.
- Lawton, T.F., González-León, C.M., Lucas, S.G., Scott, R.W., 2004. Stratigraphy and sedimentology of the upper Aptianupper Albian Mural Limestone (Bisbee Group) in northern Sonora, Mexico: *Cretaceous Research*, v. 25, p. 43–60.
- Lawton, T.F., Dickinson, W.R., 1999. Late Paleozoic to Paleogene evolution of the southwest border region (USA-Mexico): implications for regional tectonics. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 31(7), A-294.
- Lawton, T.F., McMillan, N.J., 1999. Arc abandonment as a cause for passive continental rifting: comparison of the Jurassic Mexican Borderland rift and the Cenozoic Rio Grande rift. *Geology* 27, 779–782.
- Madhavaraju, J., Pacheco-Olivas, S.A., Gonzalez-León, C.M., Espinoza-Maldonado, I.G., Sánchez-Medrano, P.A., Villanueva-Amadoz, U., Monreal, R., Pi-Puig, T., Ramírez-Montoya, E., Grijalva-Noriega, F.J., 2017. Mineralogy and geochemistry of the Lower Cretaceous siliciclastic rocks of the Morita Formation, Sierra San José section, Sonora, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 397-411.
- Madhavaraju, J., Löser, H., Lee, Y.I., Lozano-Santacruz, R., Pi-Puig, T., 2016a. Geochemistry of lower Cretaceous limestones of the Alisitos Formation, Baja

- California, Mexico: implications for REE source and paleo-redox conditions. *J. South Amer. Earth Sci.* 66, 149-165.
- Madhavaraju, J., González-León, C.M., 2012. Depositional conditions and source of rare earth elements in carbonate strata of the Aptian-Albian Mural Formation, Pitaycachi section, northeastern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, 478-491.
- Madhavaraju, J., Lee, Y.I., 2010. Influence of Deccan volcanism in the sedimentary rocks of Late Maastrichtian–Danian age of Cauvery basin Southeastern India: constraints from geochemistry: *Current Sciences*, 98, 528–537.
- Madhavaraju, J., 2015. Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance and end Cretaceous environments. In: Ramkumar, M. (Ed.), *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques and Applications*, first ed. Elsevier, Netherlands, 185-214.
- Madhavaraju, J., González-León, C.M., Yong, I.L., Armstrong-Altrin, J.S., Reyes-Campero, L.M., 2010. Geochemistry of the Mural Formation (Aptian-Albian) of the Bisbee Group, Northern Sonora, Mexico. *Cretaceous Research*, 31, 400-414.
- Madhavaraju, J., Sial, A.N., González-León, C.M., Nagarajan, R., 2013a. Carbon and oxygen isotopic variations in early Albian limestone facies of the Mural Formation, Pitaycachi section, northeastern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30, 526-539.

- Madhavaraju, J., Lee, Y.I., González-León, C.M., 2013b, Diagenetic significance of carbon, oxygen and strontium isotopic compositions in the Aptian-Albian Mural Formation in Cerro Pimas area, northern Sonora, Mexico: *Journal of Iberian Geology*, 39, 73-88.
- Madhavaraju, J., 2015. Geochemistry of late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance, and end Cretaceous environments: *Chemostratigraphy*, 185-214.
- McBride, E.F., 1985. Diagenetic processes that effect provenance determinations in sandstones: *in* Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of arenites*: Dordrecht, Reidel, 95-114.
- McDonough, W. F., Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth: *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- McKee, M.B., Anderson, T.H., 1998. Mass-gravity deposits and structures in the Lower Cretaceous of Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 110, 1516-1529.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., Eriksson, K.A., 1983. Geochemistry of Archaean shales from the Pilbara Supergroup, Western Australia; *Geochim. Cosmochim. Acta* 47(7) 1211–1222.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T., Maynard, J.B., 1990. Geochimica and Nd-Sr isotopic composition of Deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations, *Geochimica et Cosmochimica*, (54), 2015-2050.

- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics: Geological Society of America, Special Paper, 284, 21-40.
- McLennan, S.M., Hemming, S.R., Taylor, S.R., Eriksson, K.A., 1995. Early Proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd–Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1153–1177.
- McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In *Geochemistry and Mineralogy of Rare earth elements*, in Lipinand, B.R., McKay, G.A. (eds.), Mineralogical Society of America: *Reviews in Mineralogy*, 2, 169-200.
- McLennan, S.M., 1993, *Weathering and global denudation: The Journal of Geology*, 101, 295–303.
- Monreal-Saavedra, R., Montijo-, A., Grijalva-Noriega, F.J., 2000. Guía para el estudio petrográfico de rocas detríticas. Universidad de Sonora.
- Monreal, R., Cano-Corona, I., Grijalva-Noriega, F.J., Montijo-González, A., Almazán-Vázquez, E., 2011. Caracterización del Grupo Bisbee (Cretácico Inferior) en el área al sur de la sierra Basómari, Noreste de Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63(2), 365-378.
- Monreal, R., 1994. Facies changes, unconformities, stratigraphic juxtapositions and their tectonic implications of the Cretaceous of Cerro de Oro Central Sonora,

- Mexico: Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 11, 1–30.
- Monreal, R., Valenzuela, M., González-León, C.M., 1994. A revision of the stratigraphic nomenclature for the Cretaceous of northern Sonora, and some paleogeographic implications: Boletín del Departamento de Geología, UNISON, 11, 171-190.
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrong-Altrin, J.S., Moutte, J., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic shales of Rabanpalli formation, Bhima Basin, northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 24, 150-160.
- Navarro-Fuentes, J.C., 1989. Estratigrafía del Cretácico Inferior en el área de Santa Ana, Sonora: Ensenada, Baja California, Universidad Autónoma de Baja California, B.S, tesis, 90pp. (Sin publicar).
- Nesbitt, H.W., Markovics, G., Price, R.C., 1980. Chemical processes affecting alkalies and alkaline earths during continental weathering: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 1659-1666.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites: *Nature*, 299, 715-717.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.* 97, 129-147.

- Nourse, J.A., 1995. Jurassic-Cretaceous Paleogeography of Magdalena Region, Northern Sonora, and its influence on the positioning of Tertiary Metamorphic Core Complex: Geological Society of America, Special Paper, 301.
- Paikaray, S., Banerjee, S., Mukherjee, S., 2008. Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: implications on provenance, tectonics and paleoweathering. *J. Asian Earth Sci.* 32, 34-48.
- Pérez-Ramos, O., 1986. Calcomana Ramosa (Boehm), rudista (molusca- bivalva) del Albiano temprano de la región de Santa Ana, Sonora. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 3, 11-17.
- Peryam, T.C., Lawton, T.F., Amato, J.M., González-León, C.M., Mauer, D.J., 2012. Lower Cretaceous strata of the Sonora Bisbee Basin: A record of the tectonomagmatic evolution of northwestern Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 124, 532-548.
- Petrus, J.A., Kamber, B.S., 2012, *VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction: Geostandards and Geoanalytical Research*, 36, 247-270.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987. *Sand and Sandstone*: New York, 2nd ed. Springer, 553 pp.
- Raigemborn, M.S., 2007. Estudio Estratigráfico, Sedimentológico y Composicional de las Sedimentitas del Terciario Inferior (Grupo Río Chico) en el Sector

Sudoriental del Chubut Extraandino. Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina, tesis doctoral, 351 pp.

Ramírez-Montoya, E.G., 2014. Análisis geoquímico en la lutita de la Caliza Mural, Sección Tuape; para determinar procedencia, condiciones de oxigenación y paleointemperismo. Hermosillo, Son, Universidad de Sonora, tesis de Lic.en geología, 85 p.

Rangin, C., 1977. Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Rev. 1, 44-47.

Ransome, F.L., 1904. The geology and ore deposits of the Bisbee Quadrangle, Arizona: United States Geological Survey Professional Paper, 21, 168. Reyes-Campero, 2008

Reyes-Campero, L.M., 2008. Petrografía y geoquímica de las rocas carbonatadas de la Caliza Mural, en la sección Cerro Pimas de Grupo Bisbee, al norte de Sonora, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, tesis de licenciatura, 104 pp.

Rino, S., Kon, Y, Sato, W., Maruyama, S., Santosh, M., Zhao, D., 2008. The Grenvillian and Pan-African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume. Gond. Res., 14, 51–72.

Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., Bermúdez, J.G. 2016. Estratigrafía, petrografía y análisis multi-método de procedencia de la Formación Guineales,

norte de la Cordillera Occidental de Colombia. Boletín de Geología, 38 (1): 101-124.

Rodríguez-Castañeda, J.L., 1991. Mesozoic Stratigraphy in North-Central Sonora, México: Boletín del Departamento de Geología, UNISON, 8, 13-27.

Rodríguez- Castañeda, J.L., 1997. Gravity-sliding structures in Early and Late Cretaceous rocks in north-central Sonora, Mexico -Regional significance. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 14,1: 1-12.

Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation, Longman, UK. 352 p.

Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand: Journal of Geology and Geophysics, 39, 1-16.

Roser, B.P., Korsch, R.J., 1985. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones: a discussion: The Journal of Geology, 93, 81-84.

Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstonemudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. J. Geol. 94, 635-650.

Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data: Chemical geology, 67, 119-139.

- Rubatto, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism: *Chemical Geology*, 184, 123–138.
- Salas-Colca, A.C., 2018. Geocronología U-Pb de Zirrones Detríticos del Grupo Yura en Tacna. Cerro de Pasco, Perú, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, tesis de licenciatura, 147 pp.
- Sánchez-Zavala, J.L., Centeno-García, E., 2016. Técnicas y aplicaciones del estudio de los sedimentos terrígenos de grano fino: procedencia y tectónica. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología. Disponible en: <http://www.geologia.unam.mx/contenido/tecnicas-y-aplicaciones-del-estudio-de-los-sedimentos-terrigenos-de-grano-fino-procedencia-y-tectonica>
- Schieber, J., 1992. A combined petrographical geochemical provenance study of the Newland formation, Mid-Proterozoic of Montana. *Geol. Mag.* 129, 223–237.
- Scott, R.W., Gonzalez-Leon, C.M., 1991. Paleontology and biostratigraphy of Cretaceous rocks, Lampazos area, Sonora. In: Pérez-Segura, E. and Jacques-Ayala, C., eds., *Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America Special Paper 254*, 51- 67.
- Scott, R.W., 2003. Introduction. In: Scott, R.W. (Ed.), *Cretaceous stratigraphy and paleoecology, Texas and Mexico: Perkins Memorial Volume*. Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation, *Special Publications in Geology* 1, 7-14.

- Sevastjanova, I., Clements, B., Hall, R., Belousova, E.A., Griffin, W.L., Pearson, N., 2011. Granitic magmatism, basement ages, and provenance indicators in the Malay Peninsula: insights from detrital zircon U-Pb and Hf-isotope data. *Gond. Res.* 19, 1024-1039.
- Sláma, J., Kosler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008. Plesovice zircon – A new natural reference material for U–Pb and Hf isotope microanalysis: *Chemical Geology* 249, 1–35.
- Solari, L.A., Gomez-Tuena, A., Bernal, J.P., Perez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010. U–Pb zircon geochronology by an integrated LA-ICPMS microanalytical work-station: Achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34, 5–18.
- Solari, L.A., Tanner, M., 2011. U–Pb age, a fast data reduction script for LA-ICP-MS U–Pb geochronology: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 83–91.
- Stewart, J.H., Anderson, T.H., Haxel, G.B., Silver, L.T., Wrigth, J.E., 1986. Late Triassic paleogeography of the southern Cordillera: The problem of a source for voluminous volcanic detritus in the Chinle Formation of the Colorado Plateau region: *Geology*, 14, 567-570.
- Sugitani, K., Yamashita, F., Nagoaka, T., Yamamoto, K., Minami, M., Mimura, K., Suzuki, K., 2006. Geochemistry and sedimentary petrology of Archean clastic sedimentary rocks at Mt. Goldsworthy, Pilbara Craton, Western Australia:

- Evidence for the early evolution of continental crust and hydrothermal alteration. *Precambrian Research* 147 (1): 124-147.
- Sun S.S., McDonough W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in the Ocean Basins* (eds. A. D. Saunders and M. J. Norry, vol. 42.). The Geological Society, 313–345.
- Taliaferro, N.L., 1933. An occurrence of Upper Cretaceous sediments in northern Sonora, Mexico: *Journal of Geology*, 41, 12–37.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*: Blackwell, Oxford, 349pp.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust: *Reviews of Geophysics*, 33, 241-265.
- Valloni, R., Mezzardi, G., 1984. Compositional suites of terrigenous deep-sea sands of the present continental margins. *Sedimentology*, 31, 353-364.
- Veevers, J.J., Saeed, A., 2008. Gamburtsev Subglacial Mountains provenance of Permian-Triassic sandstones in the Prince Charles Mountains and offshore Prydz Bay: integrated U-Pb and TDM ages and host-rock affinity from detrital zircons. *Gond. Res.* 14, 316-342.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2013. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins: *Chemical Geology*, 355, 117–133.

- Willard, J.D., 1988. Geology, sandstone petrography, and provenance of the Jurassic (?) - Cretaceous rocks of the Puerto El Álamo area, northwestern Sonora, Mexico: Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, tesis de maestría, 250 pp.
- Wilson, M. 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. Unwin Hyman (editor), London, 466 pp.
- Winter, J.D., 2001. Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall, New Jersey 697 p.
- from the Pongola Supergroup, South Africa: evidence for a 3.0 Ga old continental cratón: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 537-549.
- Wronkiewicz, D.J., Condie, K.C., 1990. Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal Supergroups, South Africa. Cratonic evolution during the early Proterozoic: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 343-354.
- Yao, J., Shu, L., Santosh, M., 2011. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotope and geochemistry – New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China. *Gond. Res.* 20, 553-56
- Zavala-León, A.C., 2018. Geoquímica y datación de zircones detríticos de playa “Atasta” del suroeste del Golfo de México, México: implicaciones de procedencia”. Mineral de la Reforma, Hgo., Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, tesis Ing. geología ambiental, 99 pp.

Zhang, L., Chan, L.H., Gieskes, J. M., 1998. Lithium isotope geochemistry of pore waters, Ocean Drilling Program Sites 918 and 919, Irminger Basin: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 62, p. 2437–2450.

ANEXOS

Anexo 1. Concentración de elementos mayores de las areniscas recolectadas en el área de Cabullona de los miembros de la Formación Cintura (% en peso).

Muestra	CFS-01	CFS-04	CFS-07	CFS-11	CFS-13	CFS-14	CFS-15	CFS-16*	CFS-17	CFS-19	CFS-20	CFS-21*	CFS-23	CFS-26	Promedio
Miembro	Marquechi	Marquechi	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan	
SiO₂	72.933	71.229	86.646	71.654	65.355	70.446	67.533	70.57	74.005	70.536	77.858	71.134	72.215	72.003	72.44 ± 4.99
TiO₂	0.542	0.466	0.186	0.501	0.673	0.512	0.479	0.436	0.483	0.557	0.324	0.479	0.326	0.359	0.45 ± 0.12
Al₂O₃	6.118	12.949	7.186	12.479	15.273	12.9	15.265	14.496	12.896	13.285	11.532	10.04	12.916	11.642	12.07 ± 2.70
Fe₂O₃^T	2.773	3.012	1.103	3.028	5.197	3.248	3.326	3.09	3.36	2.537	2.105	2.321	2.041	2.247	2.81 ± 0.93
MnO	0.096	0.065	0.023	0.063	0.076	0.096	0.068	0.067	0.053	0.083	0.022	0.071	0.057	0.077	0.07 ± 0.02
MgO	0.621	1.088	0.133	0.806	1.101	0.886	1.052	0.842	0.68	0.685	0.466	0.628	0.865	0.853	0.76 ± 0.26
CaO	7.42	2.116	0.254	2.804	2.639	2.718	2.917	1.786	1.109	2.638	1.112	5.74	2.979	3.719	2.85 ± 1.85
Na₂O	2.056	5.218	3.733	3.394	1.551	2.993	1.878	3.367	3.181	3.844	1.416	1.545	2.582	2.444	2.80 ± 1.08
K₂O	0.661	0.6	0.085	1.446	2.712	1.551	2.648	2.019	1.625	1.681	2.044	1.727	1.879	2.061	1.62 ± 0.75
P₂O₅	0.07	0.097	0.061	0.083	0.111	0.11	0.053	0.085	0.098	0.105	0.062	0.095	0.09	0.095	0.09 ± 0.02
PXC	6.71	3.16	0.59	3.74	5.31	4.54	4.78	3.24	2.51	4.05	3.06	6.22	4.05	4.5	4.03 ± 1.55
SUMA	100	100	100	99.998	99.998	100	99.999	99.998	100	100.001	100.001	100	100	100	100.0 ± 0
CIA	45	50	52	50	66	53	63	57	59	51	64	59	55	53	55.40 ± 5.99
PIA	44	50	52	51	71	53	67	58	61	51	68	62	56	54	56.91 ± 7.79
ICV	2.32	0.97	0.77	0.96	0.91	0.93	0.81	0.8	0.81	0.91	0.65	1.25	0.83	1.01	0.99 ± 0.40
SiO₂/Al₂O₃	11.92	5.5	12.06	5.74	4.28	5.46	4.42	4.87	5.74	5.31	6.75	7.09	5.59	6.18	6.49 ± 2.45
K₂O/Al₂O₃	0.11	0.05	0.01	0.12	0.18	0.12	0.17	0.14	0.13	0.13	0.18	0.17	0.15	0.18	0.13 ± 0.05
Al₂O₃/TiO₂	11.29	27.79	38.63	24.91	22.69	25.2	31.87	33.25	26.7	23.85	35.59	20.96	39.62	32.43	28.20 ± 7.65

Anexo 2. Concentraciones de elementos traza (ppm) de las areniscas pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (datos normalizados a UCC con los valores de Taylor y McLennan (1985)).

Muestra	CFS-01	CFS-04	CFS-07	CFS-11	CFS-13	CFS-14	CFS-15	CFS-16	CFS-17	CFS-19	CFS-20	CFS-21	CFS-23	CFS-26	Promedio
Miembro	Marquechi	Marquechi	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan	
Sc	0.239	0.378	-0.095	0.43	0.867	0.497	0.541	0.462	0.502	0.524	0.247	0.298	0.261	0.338	0.39 ± 0.22
Co	0.455	0.585	0.13	0.752	0.959	0.536	0.674	0.534	0.572	0.575	0.582	0.492	0.418	0.397	0.55 ± 0.19
Ni	0.319	0.267	0.127	0.495	0.749	0.331	0.396	0.348	0.379	0.506	0.316	0.485	0.324	0.259	0.38 ± 0.15
Cr	0.797	0.354	0.217	0.435	0.802	0.494	0.455	0.296	0.407	0.507	0.314	0.521	0.316	0.3	0.44 ± 0.18
V	1.301	0.775	0.248	0.936	1.077	0.835	0.629	1.114	0.792	0.811	0.512	0.706	0.453	0.732	0.78 ± 0.28
Sr	0.977	0.785	0.197	0.626	0.342	0.467	0.575	0.547	0.471	0.616	0.218	0.346	0.812	0.261	0.52 ± 0.24
Rb	0.181	0.183	0.023	0.484	1.01	0.526	0.939	0.621	0.549	0.577	0.655	0.537	0.614	0.713	0.54 ± 0.27
Ba	6.646	0.326	1.278	1.133	1.256	0.666	1.023	1.645	1.026	0.866	1.851	1.589	0.819	0.169	1.45 ± 1.57
Pb	0.488	0.489	0.337	0.758	0.532	0.22	0.813	0.201	0.203	0.318	0.309	0.764	0.416	1.098	0.50 ± 0.27
Zr	1.747	0.764	0.429	0.97	1.543	1.176	1.169	0.857	0.865	1.135	0.871	0.949	0.676	0.829	1.00 ± 0.34
Y	0.516	0.842	1.076	1.467	1.496	1.023	1.055	1.795	0.976	0.964	1.735	0.858	1.363	0.41	1.11 ± 0.41
Nb	0.251	0.385	0.195	0.453	0.604	0.474	0.633	0.436	0.445	0.531	0.398	0.494	0.424	0.422	0.44 ± 0.12
Hf	1.348	0.627	0.354	0.805	1.301	0.968	1.033	0.741	0.747	0.955	0.74	0.792	0.602	0.744	0.84 ± 0.27
Th	0.349	0.737	0.396	0.828	1.116	0.798	1.314	0.897	0.949	0.908	0.904	1.137	0.945	1.233	0.89 ± 0.28
U	0.452	0.823	0.461	0.706	1.039	0.91	0.939	1.529	0.895	4.032	0.928	1.175	1.272	0.925	1.15 ± 0.88
Th/U	0.77	0.9	0.86	1.17	1.07	0.88	1.4	0.59	1.06	0.23	0.97	0.97	0.74	1.33	0.92 ± 0.30

Anexo 3. Concentraciones de los elementos de tierras raras (ppm) de las areniscas pertenecientes a la Formación Cintura, recolectadas en el área de Cabullona (datos normalizados a condrita con los valores de McDonough y Sun (1995)).

Muestra	CFS 01	CFS 04	CFS 07	CFS 11	CFS 13	CFS 14	CFS 15	CFS 16	CFS 17	CFS 19	CFS 20	CFS 21	CFS 23	CFS 26
Miembro	Marquechi	Marquechi	Marquechi	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Marcos	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan	San Juan
La	79.45	95.89	50.77	108.34	136.52	108.35	143.13	115.19	115.17	127.88	155.25	131.03	103.24	138.99
Ce	57.70	72.21	36.30	81.73	105.53	79.03	106.13	85.82	86.56	95.08	112.58	98.27	76.07	100.70
Pr	44.42	61.18	27.91	64.80	86.24	62.04	85.99	68.84	69.22	75.25	88.31	76.19	60.03	78.20
Nd	33.46	47.46	21.20	48.10	65.26	45.63	64.43	51.48	51.59	55.23	64.06	55.55	43.47	56.42
Sm	19.20	30.45	11.29	28.16	42.59	27.03	41.19	30.86	31.26	32.90	36.83	31.94	24.63	31.17
Eu	19.12	18.63	7.29	17.43	21.83	17.42	22.06	19.07	19.59	22.34	21.03	19.86	13.85	15.30
Gd	12.41	19.43	7.86	18.48	29.12	18.30	28.34	20.48	21.53	21.38	23.49	20.95	16.09	20.67
Tb	9.54	15.60	6.61	15.52	25.12	15.67	25.27	17.11	18.12	18.10	19.02	17.35	13.61	17.72
Dy	7.50	13.15	5.84	13.79	22.42	14.01	23.13	15.11	16.07	15.64	15.79	14.86	12.20	15.91
Ho	6.82	11.75	5.79	12.86	20.47	12.94	20.80	14.20	14.71	14.19	14.12	13.42	11.65	14.97
Er	6.51	11.28	5.47	12.76	20.17	12.66	20.06	14.23	14.36	13.89	13.83	13.04	11.80	15.18
Yb	7.04	10.91	5.25	13.03	20.27	13.13	19.65	14.65	14.35	13.99	13.94	13.02	12.34	15.48
Lu	7.70	10.81	5.40	13.06	20.15	13.27	19.02	14.53	14.41	13.95	13.78	12.93	12.51	15.32
ΣREE	291.73	400.10	189.70	430.65	593.86	422.04	597.14	462.50	467.36	497.47	571.01	498.55	397.66	520.74
LREE	234.22	307.18	147.48	331.14	436.14	322.07	440.87	352.19	353.80	386.34	457.03	392.97	307.44	405.48
HREE	57.51	92.92	42.23	99.51	157.72	99.97	156.27	110.31	113.56	111.13	113.97	105.58	90.22	115.26
Eu/Eu*	1.239	0.766	0.774	0.764	0.620	0.783	0.646	0.759	0.755	0.843	0.715	0.768	0.696	0.603
La/Sc	7.148	5.468	-11.511	5.434	3.393	4.699	5.702	5.375	4.947	5.261	13.525	9.474	8.506	8.849
Th/Sc	1.418	1.897	-4.057	1.874	1.253	1.562	2.364	1.889	1.841	1.687	3.557	3.711	3.516	3.544
Th/Co	0.820	1.348	3.255	1.177	1.245	1.593	2.087	1.796	1.776	1.689	1.663	2.472	2.421	3.325
Cr/Th	7.471	1.570	1.793	1.720	2.351	2.023	1.133	1.081	1.401	1.826	1.137	1.499	1.095	0.796
(Gd/Yb)_n	1.763	1.781	1.498	1.418	1.437	1.394	1.442	1.398	1.500	1.528	1.685	1.609	1.304	1.335
(La/Yb)_n	11.287	8.791	9.670	8.312	6.737	8.253	7.284	7.864	8.023	9.140	11.135	10.060	8.365	8.978
(La/Sm)_n	4.139	3.149	4.495	3.847	3.206	4.009	3.475	3.733	3.684	3.887	4.215	4.103	4.192	4.460

Anexo 4. Edades y relaciones obtenidas del análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-07 del miembro Marquechi (n= 85).

n= 85	Relaciones corregidas										Edades corregidas							
	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	Mejor edad (Ma)	±2s
Circón 01	283	177	0.63	0.05	0.0	0.27	0.016	0.04	0.00	0.13	241	5.5	239	13.0	230	140	241.2	5.5
Circón 02	316	134.4	0.43	0.05	0.0	0.12	0.0098	0.02	0.00	-0.20	112	3.0	113	9.2	50	180	111.8	3.0
Circón 03	135.9	97.9	0.72	0.05	0.0	0.12	0.015	0.02	0.00	0.02	107	3.9	111	14.0	190	290	106.6	3.9
Circón 04	756	239	0.32	0.05	0.0	0.23	0.0096	0.03	0.00	0.03	215	4.6	213	7.9	137	120	215.3	4.6
Circón 05	631	1260	2.00	0.05	0.0	0.16	0.014	0.02	0.00	0.17	144	3.7	146	12.0	170	170	143.9	3.7
Circón 06	43.8	42.9	0.98	0.18	0.0	13.57	0.29	0.53	0.01	0.39	2740	49.0	2722	21.0	2666	64	2666.0	64.0
Circón 07	42.76	27.11	0.63	0.08	0.0	1.89	0.098	0.18	0.01	0.01	1076	27.0	1083	37.0	1080	130	1076.0	27.0
Circón 10	301.9	3.38	0.01	0.05	0.0	0.41	0.02	0.05	0.00	-0.31	337	7.4	344	14.0	360	130	337.0	7.4
Circón 11	737	480.2	0.65	0.05	0.0	0.12	0.006	0.02	0.00	0.01	101	2.5	112	5.4	390	130	101.3	2.5
Circón 12	186	69.5	0.37	0.05	0.0	0.22	0.43	0.03	0.03	-0.40	194	160.0	197	170.0	280	200	193.8	160.0
Circón 13	133.5	87.3	0.65	0.06	0.0	0.49	0.029	0.06	0.00	-0.03	396	10.0	405	19.0	440	130	395.7	10.0
Circón 14	369.1	277.3	0.75	0.08	0.0	2.18	0.042	0.2	0.00	0.05	1181	21.0	1176	14.0	1133	76	1181.4	21.0
Circón 15	135.2	216.8	1.60	0.05	0.0	0.18	0.036	0.02	0.00	-0.01	155	4.6	164	29.0	180	300	154.5	4.6
Circón 16	481	341.4	0.71	0.05	0.0	0.19	0.011	0.03	0.00	0.11	169	3.9	174	9.6	220	150	169.0	3.9
Circón 20	499.2	229.8	0.46	0.05	0.0	0.11	0.0082	0.02	0.00	0.07	102	2.7	105	7.5	110	170	102.4	2.7
Circón 21	50.6	32.8	0.65	0.07	0.0	1.67	0.11	0.16	0.00	-0.10	977	22.0	989	41.0	990	160	977.0	22.0
Circón 22	481	206	0.43	0.05	0.0	0.26	0.011	0.04	0.00	0.27	230	5.1	231	9.1	238	120	230.3	5.1
Circón 23	75.6	207.9	2.75	0.05	0.0	0.18	0.024	0.03	0.00	-0.01	166	5.7	165	22.0	250	270	166.1	5.7
Circón 24	124.9	41.2	0.33	0.07	0.0	1.87	0.06	0.18	0.00	0.13	1086	20.0	1069	22.0	1026	93	1085.9	20.0
Circón 25	200.6	45.7	0.23	0.08	0.0	2.23	0.049	0.2	0.00	0.23	1194	22.0	1191	15.0	1173	78	1194.0	22.0
Circón 26	89.1	46.8	0.53	0.07	0.0	1.85	0.067	0.18	0.00	0.21	1080	22.0	1065	23.0	1050	92	1080.0	22.0
Circón 27	225.8	66.4	0.29	0.05	0.0	0.22	0.016	0.03	0.00	-0.08	191	4.5	202	14.0	360	170	190.7	4.5

Circón 30	399	216.1	0.54	0.05	0.0	0.11	0.0068	0.02	0.00	0.25	103	2.7	104	6.2	200	150	103.2	2.7
Circón 31	88.6	323	3.65	0.06	0.0	0.20	0.024	0.03	0.00	-0.05	160	6.2	180	21.0	420	280	160.4	6.2
Circón 32	457	143	0.31	0.08	0.0	1.94	0.029	0.18	0.00	0.30	1093	20.0	1093	10.0	1129	75	1092.9	20.0
Circón 33	454	287	0.63	0.05	0.0	0.18	0.01	0.03	0.00	0.24	172	4.3	164	8.6	130	140	171.9	4.3
Circón 34	614	586	0.95	0.05	0.0	0.17	0.0095	0.03	0.00	-0.03	163	3.4	162	8.2	160	140	162.9	3.4
Circón 36	75.2	63.7	0.85	0.07	0.0	1.73	0.086	0.17	0.00	-0.04	1021	22.0	1022	32.0	1040	130	1021.0	22.0
Circón 38	207.8	127	0.61	0.06	0.0	0.13	0.012	0.02	0.00	0.06	113	3.1	126	11.0	390	210	112.6	3.1
Circón 39	28.4	59.4	2.09	0.05	0.0	0.19	0.043	0.03	0.00	0.13	164	7.8	165	36.0	270	410	164.0	7.8
Circón 41	85.9	58.1	0.68	0.05	0.0	0.19	0.029	0.02	0.00	0.33	155	5.6	168	24.0	370	270	155.4	5.6
Circón 42	139.2	80.6	0.58	0.07	0.0	1.66	0.055	0.17	0.00	-0.03	1010	20.0	995	22.0	1020	97	1010.0	20.0
Circón 43	167.5	82.2	0.49	0.11	0.0	4.43	0.098	0.3	0.01	0.58	1715	31.0	1716	18.0	1760	69	1760.0	69.0
Circón 44	389	307	0.79	0.06	0.0	0.40	0.016	0.05	0.00	-0.02	333	6.9	340	11.0	426	120	332.9	6.9
Circón 45	61.8	31.3	0.51	0.08	0.0	2.09	0.11	0.19	0.01	0.09	1116	27.0	1142	33.0	1190	110	1116.0	27.0
Circón 46	26.6	11.1	0.42	0.08	0.0	2.14	0.18	0.2	0.01	0.10	1172	37.0	1141	57.0	1110	190	1172.0	37.0
Circón 47	498	162	0.33	0.1	0.0	3.71	0.1	0.27	0.01	0.81	1530	32.0	1575	22.0	1659	61	1659.0	61.0
Circón 48	175.6	84.9	0.48	0.11	0.0	4.57	0.091	0.31	0.01	0.44	1749	31.0	1744	16.0	1761	67	1761.0	67.0
Circón 49	202	77.5	0.38	0.05	0.0	0.12	0.011	0.02	0.00	-0.22	116	4.1	115	10.0	160	220	116.0	4.1
Circón 51	228.6	112.6	0.49	0.08	0.0	1.88	0.054	0.18	0.00	0.05	1064	21.0	1073	19.0	1096	89	1064.0	21.0
Circón 52	366	315	0.86	0.06	0.0	0.51	0.021	0.07	0.00	0.11	419	8.5	415	14.0	433	110	419.4	8.5
Circón 53	80.2	127.2	1.59	0.1	0.0	3.44	0.083	0.26	0.01	0.23	1502	30.0	1511	19.0	1538	79	1538.0	79.0
Circón 54	547	123.6	0.23	0.05	0.0	0.25	0.0099	0.04	0.00	0.02	229	4.8	225	8.0	228	120	228.5	4.8
Circón 55	227	90.8	0.40	0.05	0.0	0.26	0.018	0.03	0.00	0.15	222	4.8	232	14.0	320	150	221.5	4.8
Circón 56	59.3	78.3	1.32	0.09	0.0	2.68	0.1	0.23	0.01	0.18	1328	25.0	1328	30.0	1343	100	1328.0	25.0
Circón 57	409	366.6	0.90	0.05	0.0	0.14	0.0094	0.02	0.00	0.06	139	3.3	133	8.4	50	150	139.1	3.3
Circón 58	46.42	51.8	1.12	0.07	0.0	1.81	0.083	0.18	0.00	-0.08	1050	22.0	1058	31.0	1050	120	1050.0	22.0
Circón 59	42.6	36.3	0.85	0.08	0.0	1.88	0.097	0.18	0.01	0.17	1049	28.0	1072	33.0	1099	120	1049.0	28.0
Circón 61	313.6	112.9	0.36	0.05	0.0	0.11	0.0094	0.02	0.00	0.03	104	3.0	108	8.5	160	190	103.6	3.0
Circón 62	354	155	0.44	0.05	0.0	0.11	0.0097	0.02	0.00	-0.02	105	3.0	109	8.8	170	190	105.2	3.0
Circón 63	83.3	37.29	0.45	0.08	0.0	2.63	0.077	0.23	0.01	-0.01	1326	26.0	1312	22.0	1286	94	1326.0	26.0
Circón 64	358	94.1	0.26	0.07	0.0	1.60	0.036	0.16	0.00	-0.14	977	18.0	969	14.0	950	83	976.5	18.0
Circón 65	171.7	147.6	0.86	0.06	0.0	0.57	0.03	0.07	0.00	0.17	454	10.0	453	19.0	410	130	453.7	10.0

Circón 66	80.9	240	2.97	0.05	0.0	0.19	0.027	0.02	0.00	0.13	157	5.5	175	23.0	370	300	156.5	5.5
Circón 67	186.2	179.2	0.96	0.05	0.0	0.49	0.03	0.07	0.00	0.19	416	8.9	403	20.0	300	150	415.5	8.9
Circón 68	101.3	77.1	0.76	0.06	0.0	0.85	0.039	0.1	0.00	0.10	634	14.0	626	21.0	592	110	634.2	14.0
Circón 69	399	283	0.71	0.05	0.0	0.11	0.01	0.02	0.00	0.15	104	2.8	108	9.3	190	200	103.6	2.8
Circón 70	307	128	0.42	0.05	0.0	0.13	0.011	0.02	0.00	0.47	115	3.1	121	10.0	200	190	114.9	3.1
Circón 71	80	58.1	0.73	0.07	0.0	1.77	0.073	0.18	0.00	-0.02	1042	20.0	1030	26.0	989	110	1042.0	20.0
Circón 72	223	221	0.99	0.05	0.0	0.25	0.018	0.04	0.00	-0.18	224	5.8	231	15.0	280	180	224.3	5.8
Circón 73	515	398.3	0.77	0.05	0.0	0.17	0.0096	0.03	0.00	0.08	166	3.8	163	8.3	160	130	165.9	3.8
Circón 74	80.5	35.63	0.44	0.08	0.0	2.33	0.087	0.21	0.01	-0.02	1247	27.0	1227	28.0	1225	100	1247.0	27.0
Circón 75	62.8	18.51	0.29	0.06	0.0	0.41	0.041	0.05	0.00	0.18	318	11.0	341	29.0	580	190	318.2	11.0
Circón 76	26.36	7.3	0.28	0.08	0.0	2.12	0.18	0.19	0.01	0.34	1122	33.0	1143	61.0	1190	180	1122.0	33.0
Circón 77	287.2	182.9	0.64	0.1	0.0	4.18	0.066	0.3	0.01	0.23	1669	28.0	1672	13.0	1690	68	1690.0	68.0
Circón 78	173	107.4	0.62	0.05	0.0	0.25	0.022	0.04	0.00	0.10	227	5.9	222	18.0	210	190	227.4	5.9
Circón 79	127.4	153.9	1.21	0.11	0.0	4.74	0.098	0.32	0.01	0.13	1791	31.0	1772	19.0	1749	78	1749.0	78.0
Circón 80	876	467.2	0.53	0.05	0.0	0.11	0.0068	0.02	0.00	0.10	106	2.5	109	6.4	200	150	105.7	2.5
Circón 81	56	31.1	0.56	0.1	0.0	3.90	0.13	0.28	0.01	-0.05	1612	35.0	1609	27.0	1647	99	1647.0	99.0
Circón 82	597	461	0.77	0.05	0.0	0.20	0.0087	0.03	0.00	0.07	173	4.0	180	7.4	330	120	172.7	4.0
Circón 83	220	63.8	0.29	0.08	0.0	1.90	0.044	0.18	0.00	0.13	1065	19.0	1080	15.0	1130	78	1064.6	19.0
Circón 84	80.3	56.3	0.70	0.08	0.0	2.09	0.084	0.2	0.00	0.25	1159	25.0	1157	27.0	1160	110	1159.0	25.0
Circón 85	84.2	37.2	0.44	0.08	0.0	2.02	0.085	0.19	0.00	0.23	1110	24.0	1124	29.0	1171	100	1110.0	24.0
Circón 86	52.69	73.6	1.40	0.05	0.0	0.16	0.035	0.02	0.00	0.09	146	7.0	152	31.0	60	410	146.2	7.0
Circón 88	96.2	72.05	0.75	0.06	0.0	0.83	0.049	0.1	0.00	-0.12	592	15.0	607	26.0	630	160	592.0	15.0
Circón 89	78.2	33.95	0.43	0.09	0.0	3.09	0.11	0.25	0.01	0.18	1415	27.0	1437	27.0	1477	89	1477.0	89.0
Circón 90	395	200.7	0.51	0.05	0.0	0.11	0.0083	0.02	0.00	-0.11	102	2.7	107	7.6	240	190	101.8	2.7
Circón 91	103	43.8	0.43	0.06	0.0	0.26	0.033	0.03	0.00	-0.07	214	6.9	227	26.0	340	270	214.4	6.9
Circón 92	86.8	44.7	0.51	0.09	0.0	2.42	0.11	0.21	0.00	-0.18	1203	25.0	1252	32.0	1290	100	1203.0	25.0
Circón 93	83.9	106.2	1.27	0.06	0.0	0.18	0.027	0.02	0.00	-0.13	151	6.0	165	24.0	370	320	150.6	6.0
Circón 94	562.5	208.6	0.37	0.06	0.0	0.23	0.0094	0.03	0.00	-0.11	197	4.6	213	7.7	390	120	197.1	4.6
Circón 95	374	278	0.74	0.05	0.0	0.19	0.012	0.03	0.00	0.00	174	4.4	179	10.0	220	150	174.4	4.4
Circón 96	103.9	38	0.37	0.08	0.0	1.93	0.063	0.18	0.00	0.01	1070	23.0	1092	22.0	1161	94	1070.0	23.0
Circón 98	199.1	244.6	1.23	0.05	0.0	0.16	0.016	0.02	0.00	0.07	146	4.4	150	13.0	190	210	145.8	4.4

Circón 100 223.4 103.9 0.47 0.05 0.0 0.26 0.017 0.03 0.00 -0.21 219 6.4 230 14.0 410 170 218.6 6.4

Anexo 5. Edades y relaciones obtenidas del análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-16 del miembro San Marcos (n= 63).

n= 63	Relaciones corregidas										Edades corregidas							
	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	Mejor edad (Ma)	±2s
Circón 02	123.8	65	0.53	0.048	0.0079	0.108	0.0170	0.016	0.001	-0.03	100	3.4	103	15.0	120	300.0	100.1	3.4
Circón 05	76.9	30.6	0.40	0.048	0.0072	0.170	0.0260	0.025	0.001	0.38	157	5.7	156	23.0	80	290.0	157.3	5.7
Circón 08	132.7	66.3	0.50	0.051	0.0079	0.111	0.0160	0.015	0.000	-0.13	98	3.1	105	14.0	270	290.0	98.2	3.1
Circón 09	221.1	105.8	0.48	0.053	0.0063	0.111	0.0130	0.015	0.000	-0.11	98	2.2	106	12.0	300	220.0	98.4	2.2
Circón 11	154.1	65.1	0.42	0.053	0.0076	0.106	0.0150	0.015	0.000	-0.17	96	2.4	101	13.0	330	270.0	95.5	2.4
Circón 12	760	342	0.45	0.052	0.0037	0.106	0.0068	0.015	0.000	-0.13	98	1.8	102	6.2	240	150.0	97.7	1.8
Circón 13	169.4	15.08	0.09	0.054	0.0056	0.218	0.0210	0.030	0.001	-0.24	191	5.0	199	17.0	320	220.0	191.0	5.0
Circón 15	235	200.3	0.85	0.050	0.0043	0.172	0.0130	0.025	0.001	-0.04	160	3.6	162	12.0	200	170.0	159.7	3.6
Circón 16	6580	1652	0.25	0.049	0.0034	0.098	0.0058	0.015	0.000	0.05	95	1.8	95	5.2	123	140.0	95.3	1.8
Circón 17	104.6	38.9	0.37	0.054	0.0074	0.109	0.0150	0.015	0.000	0.18	97	2.8	104	13.0	290	250.0	96.6	2.8
Circón 18	88.2	34.8	0.39	0.050	0.0077	0.105	0.0170	0.016	0.001	0.18	101	4.1	100	16.0	70	310.0	101.0	4.1
Circón 22	463	330	0.71	0.048	0.0047	0.177	0.0170	0.026	0.001	0.19	168	3.2	165	14.0	120	180.0	168.2	3.2
Circón 24	222	103	0.46	0.047	0.0055	0.105	0.0110	0.016	0.001	0.06	103	4.1	101	10.0	100	220.0	102.5	4.1
Circón 25	556	180	0.32	0.048	0.0037	0.105	0.0072	0.016	0.000	0.12	103	2.7	101	6.4	100	160.0	103.2	2.7
Circón 27	315	151.7	0.48	0.052	0.0052	0.116	0.0110	0.016	0.000	0.16	101	2.9	110	11.0	250	200.0	100.7	2.9
Circón 28	172	57.8	0.34	0.050	0.0064	0.104	0.0130	0.016	0.000	-0.16	100	2.9	100	12.0	160	270.0	99.7	2.9
Circón 30	29	19.76	0.68	0.084	0.0060	2.700	0.2000	0.235	0.005	0.20	1363	26.0	1340	55.0	1290	150.0	1363.0	26.0
Circón 31	292.8	172.5	0.59	0.049	0.0049	0.105	0.0099	0.016	0.000	-0.02	100	2.5	101	9.0	130	200.0	100.2	2.5
Circón 32	183.8	109.6	0.60	0.051	0.0073	0.117	0.2800	0.016	0.020	0.12	100	120.0	111	140.0	260	200.0	100.0	120.0
Circón 33	149	70	0.47	0.051	0.0067	0.114	0.0140	0.016	0.001	0.21	102	3.9	109	13.0	330	270.0	102.1	3.9
Circón 35	93.4	53	0.57	0.101	0.0050	4.070	0.1700	0.294	0.005	-0.04	1659	24.0	1650	34.0	1634	92.0	1634.0	92.0
Circón 37	122.2	51.7	0.42	0.053	0.0081	0.113	0.0170	0.016	0.001	-0.13	102	3.8	108	15.0	300	290.0	101.7	3.8

Circón 88	97.6	34.9	0.36	0.050	0.0100	0.110	0.0220	0.015	0.001	-0.12	96	3.4	103	20.0	200	360.0	95.6	3.4
Circón 91	212	296	1.40	0.051	0.0036	0.183	0.0120	0.026	0.001	0.06	164	3.7	170	11.0	220	150.0	164.0	3.7
Circón 92	153.4	51.9	0.34	0.048	0.0071	0.100	0.0140	0.015	0.000	-0.21	97	2.8	96	13.0	90	290.0	96.8	2.8
Circón 93	128.4	47	0.37	0.048	0.0063	0.100	0.0130	0.016	0.001	0.01	100	3.7	96	11.0	10	260.0	100.0	3.7
Circón 94	42.6	28.3	0.66	0.103	0.0055	4.210	0.2000	0.294	0.006	0.23	1658	28.0	1672	39.0	1679	100.0	1679.0	100.0
Circón 95	196.4	80.4	0.41	0.052	0.0069	0.112	0.0140	0.015	0.000	-0.04	98	3.0	107	13.0	300	260.0	97.7	3.0
Circón 96	1165	431.6	0.37	0.048	0.0029	0.104	0.0053	0.016	0.000	-0.06	99	1.7	101	4.9	107	130.0	99.3	1.7
Circón 97	60.8	30.94	0.51	0.086	0.0049	2.410	0.1200	0.204	0.004	0.13	1198	22.0	1247	37.0	1322	120.0	1198.0	22.0
Circón 99	295.2	409	1.39	0.051	0.0040	0.179	0.0130	0.026	0.001	0.08	163	3.6	167	11.0	220	150.0	162.7	3.6
Circón 100	342.7	184.9	0.54	0.052	0.0056	0.111	0.0110	0.016	0.000	-0.18	100	2.7	107	9.8	240	200.0	100.0	2.7

Anexo 6. Edades y relaciones obtenidas del análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de la muestra CFS-21 del miembro San Juan (n= 53).

n= 53	Relaciones corregidas										Edades corregidas							
	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	Mejor edad (Ma)	±2s
Circón 02	39.95	71.7	1.79	0.18	0.009	12.1	0.6600	0.494	0.009	0.14	2587	39.0	2613	52.0	2656	80.0	2656.0	80
Circón 03	155.4	229.4	1.48	0.09	0.005	3.0	0.1800	0.240	0.005	0.52	1387	24.0	1394	46.0	1399	97.0	1387.0	24
Circón 04	882	1520	1.72	0.05	0.003	0.2	0.0120	0.028	0.000	0.16	177	2.7	182	9.7	213	110.0	176.9	3
Circón 05	86.47	58.73	0.68	0.05	0.008	0.2	0.0280	0.023	0.001	0.12	145	4.6	149	24.0	180	340.0	144.7	5
Circón 07	73.3	106.8	1.46	0.05	0.010	0.2	0.0330	0.025	0.001	-0.03	162	6.0	168	28.0	230	370.0	162.2	6
Circón 10	353	364	1.03	0.05	0.004	0.2	0.0140	0.025	0.001	0.08	157	4.6	159	12.0	200	170.0	156.7	5
Circón 11	33.8	33.3	0.99	0.11	0.007	4.3	0.2800	0.283	0.006	-0.03	1607	32.0	1691	57.0	1814	120.0	1814.0	120
Circón 13	140.4	4.57	0.03	0.07	0.004	1.7	0.1000	0.170	0.003	0.31	1011	16.0	1018	39.0	1016	100.0	1011.0	16
Circón 14	456.6	562.3	1.23	0.05	0.004	0.2	0.0120	0.024	0.000	0.09	152	2.4	154	11.0	200	160.0	152.4	2
Circón 15	591	404.6	0.68	0.05	0.003	0.2	0.0110	0.025	0.000	0.04	162	3.0	162	10.0	130	130.0	161.8	3
Circón 17	161.7	95	0.59	0.05	0.005	0.2	0.0240	0.036	0.001	-0.02	226	5.2	224	19.0	250	200.0	225.7	5

Circón 18	327	363	1.11	0.05	0.004	0.2	0.0160	0.026	0.001	0.26	166	3.5	171	14.0	230	180.0	165.7	4
Circón 19	299	186	0.62	0.05	0.004	0.2	0.0130	0.025	0.001	0.05	159	3.3	169	12.0	280	150.0	158.5	3
Circón 22	113.4	56.1	0.49	0.07	0.005	1.5	0.1100	0.150	0.003	-0.09	900	16.0	931	44.0	1000	140.0	900.0	16
Circón 24	1307	494	0.38	0.05	0.003	0.1	0.0068	0.015	0.000	-0.11	94	1.6	98	6.3	210	140.0	93.9	2
Circón 25	441	167	0.38	0.05	0.005	0.1	0.0100	0.015	0.000	0.21	96	2.1	102	9.3	240	190.0	96.0	2
Circón 26	156	138	0.88	0.05	0.007	0.1	0.0210	0.021	0.001	-0.11	136	5.1	138	19.0	300	350.0	135.9	5
Circón 28	609.2	465	0.76	0.05	0.004	0.2	0.0130	0.024	0.000	0.09	156	2.7	159	11.0	250	160.0	155.8	3
Circón 29	90.8	67.8	0.75	0.11	0.005	4.4	0.2300	0.298	0.006	0.40	1681	28.0	1710	47.0	1736	80.0	1736.0	80
Circón 31	123.9	98.6	0.80	0.06	0.007	0.2	0.0230	0.024	0.001	0.07	152	4.1	166	20.0	400	280.0	152.3	4
Circón 33	712	743	1.04	0.05	0.003	0.2	0.0110	0.024	0.000	0.05	156	3.0	162	9.9	281	130.0	156.3	3
Circón 36	108.8	79.1	0.73	0.10	0.005	3.3	0.1900	0.248	0.004	0.03	1429	22.0	1481	44.0	1573	90.0	1573.0	90
Circón 41	611	601	0.98	0.06	0.005	0.2	0.0160	0.025	0.001	0.23	158	3.8	176	13.0	460	180.0	157.5	4
Circón 42	189	81.5	0.43	0.10	0.004	3.7	0.2100	0.274	0.005	0.41	1560	23.0	1568	44.0	1594	78.0	1594.0	78
Circón 43	128.3	67.4	0.53	0.08	0.004	2.0	0.1100	0.187	0.003	0.11	1105	18.0	1114	38.0	1150	100.0	1105.0	18
Circón 44	39.9	19.17	0.48	0.08	0.005	1.9	0.1200	0.178	0.004	0.18	1055	21.0	1071	47.0	1170	130.0	1055.0	21
Circón 46	148.8	59.1	0.40	0.26	0.010	22.4	1.1000	0.637	0.010	0.68	3177	40.0	3200	49.0	3218	64.0	3218.0	64
Circón 48	335	38.3	0.11	0.05	0.004	0.2	0.0170	0.028	0.001	0.11	176	3.2	179	15.0	240	170.0	176.2	3
Circón 51	361	366	1.01	0.05	0.004	0.2	0.0170	0.024	0.001	0.20	153	5.2	165	15.0	320	220.0	153.4	5
Circón 52	21.14	28.36	1.34	0.08	0.007	1.7	0.1700	0.175	0.004	0.20	1040	23.0	1036	64.0	1000	190.0	1040.0	23
Circón 53	74.1	59.2	0.80	0.12	0.006	4.5	0.2500	0.281	0.006	0.05	1597	28.0	1730	47.0	1879	91.0	1879.0	91
Circón 57	342	348	1.02	0.06	0.005	0.2	0.0180	0.025	0.001	0.42	160	4.1	174	15.0	400	190.0	160.1	4
Circón 58	87.4	53.2	0.61	0.11	0.005	4.2	0.2400	0.283	0.005	0.15	1608	25.0	1671	46.0	1759	90.0	1759.0	90
Circón 62	1120	187	0.17	0.11	0.004	4.5	0.2300	0.307	0.005	0.71	1725	24.0	1737	47.0	1746	73.0	1746.0	73
Circón 65	422	195.8	0.46	0.05	0.004	0.2	0.0180	0.033	0.001	0.21	210	3.9	216	15.0	270	150.0	209.9	4
Circón 69	759	273	0.36	0.05	0.005	0.1	0.0087	0.014	0.000	-0.18	93	2.3	99	8.0	340	180.0	92.6	2
Circón 70	138	78.9	0.57	0.11	0.005	4.4	0.2400	0.297	0.005	0.32	1674	26.0	1718	47.0	1767	81.0	1767.0	81
Circón 71	357	213	0.60	0.05	0.005	0.1	0.0100	0.014	0.000	0.44	92	2.2	100	9.8	290	180.0	91.8	2
Circón 72	84	144	1.71	0.10	0.005	3.3	0.1800	0.239	0.004	0.39	1383	24.0	1470	44.0	1622	88.0	1383.0	24
Circón 73	494	64.7	0.13	0.05	0.003	0.2	0.0140	0.028	0.001	0.14	179	3.1	184	12.0	240	150.0	179.0	3
Circón 75	63.2	38.2	0.60	0.07	0.006	1.8	0.1500	0.168	0.004	0.50	1002	22.0	1022	55.0	1100	140.0	1002.0	22
Circón 79	306.6	117.2	0.38	0.05	0.004	0.2	0.0160	0.031	0.001	-0.05	194	4.3	202	13.0	260	150.0	194.2	4

Circón 81	153	70.7	0.46	0.11	0.005	3.9	0.2200	0.265	0.004	0.29	1516	22.0	1608	47.0	1741	91.0	1741.0	91
Circón 83	206.9	98.5	0.48	0.05	0.005	0.2	0.0210	0.028	0.001	0.11	177	3.9	188	18.0	330	220.0	177.3	4
Circón 85	59	20.8	0.35	0.09	0.005	1.9	0.1300	0.163	0.003	0.16	970	19.0	1062	45.0	1324	110.0	970.0	19
Circón 87	624	178.8	0.29	0.05	0.004	0.1	0.0075	0.014	0.000	-0.17	91	1.7	89	6.9	90	170.0	90.7	2
Circón 89	448	181	0.40	0.05	0.006	0.1	0.0110	0.014	0.000	-0.21	91	2.3	100	12.0	250	230.0	91.0	2
Circón 90	491	413	0.84	0.05	0.005	0.2	0.0150	0.025	0.001	0.15	157	3.7	163	13.0	290	200.0	156.6	4
Circón 93	291	418	1.44	0.05	0.007	0.1	0.0120	0.014	0.000	0.13	92	2.9	99	12.0	240	250.0	92.0	3
Circón 94	133	115.2	0.87	0.08	0.004	1.7	0.0990	0.155	0.004	0.11	927	20.0	989	38.0	1152	100.0	927.0	20
Circón 96	319	448	1.40	0.05	0.003	0.2	0.0130	0.025	0.001	0.13	160	3.4	159	11.0	150	150.0	159.9	3
Circón 99	192	279	1.45	0.05	0.006	0.1	0.0130	0.015	0.000	0.20	93	2.6	99	11.0	310	250.0	92.8	3
Circón 100	46.7	96.1	2.06	0.04	0.010	0.2	0.0330	0.023	0.001	0.11	144	6.5	138	29.0	-70	390.0	143.6	7

Anexo 7. Concentraciones de elementos traza y tierras raras (ppm) de los circones detríticos de la muestra CFS-07, perteneciente al miembro Marquechi.

Circón	Elementos traza									Elementos de tierras raras (REE)																
	P	Ti	Y	Nb	Hf	Pb	Th	U	Th/U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	LREE	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	HREE	Eu	Eu/ Eu*	ΣREE
01	240	2.2	354	1.6	9910	8.5	177	283	0.63	0	16.1	0	0.2	0.5	17	3.8	1.7	22.6	9.8	58.5	185	45.3	326	0.2	0.40	343
02	500	4.1	391	1.0	8280	4.3	134	316	0.43	0	6.68	0	0.3	1.1	8	5.4	2.0	27.6	11.9	62.3	170	38.8	318	0.3	0.65	326
03	500	11	401	0.7	8170	1.8	97.9	136	0.72	0	9.35	0	0.6	1.7	12	8.9	3.0	36.2	13.3	59.2	115	23.5	259	0.3	0.77	271
04	420	4	553	1.3	9090	20.3	239	756	0.32	0	12.2	0	0.2	0.6	13	5.2	1.9	28.7	14.7	88.1	329	91.8	559	0.4	0.29	572
05	1430	8.4	5170	9.3	7760	11	1260	631	2.00	0.3	115	0.9	14.1	23.8	154	119	40.0	458	169	731	1380	268	3165	7.0	0.59	3319
06	540	5.1	377	1.1	8750	18.4	42.9	43.8	0.98	0	15.9	0.0	0.7	1.6	18	7.8	2.7	31.4	12.3	56.6	119	24.5	255	0.3	0.75	273
07	540	11	387	1.7	7690	6.3	27.1	42.8	0.63	0	31.6	0.1	0.8	1.7	34	9.3	3.1	35.6	13.3	57.7	117	23.5	259	0.5	0.56	293
10	610	12	131	1	10190	12.5	3.38	302	0.01	0	1.02	0	0.2	0.9	2	4.6	1.7	15.3	4.1	13.7	17.6	2.92	60	0.4	0.44	62
11	870	4.7	3150	3.3	7070	8.9	480	737	0.65	2.1	17.8	0.9	9.7	15.5	46	85	27.3	306	110	456	752	142	1877	2.8	0.72	1923
12	550	1.9	465	1.2	8080	4.1	69.5	186	0.37	0	9.41	0	0.1	0.6	10	4.7	1.9	26.8	13.4	78.7	258	69.8	453	0.4	0.31	463
13	1660	5.9	824	2.2	8300	7.1	87.3	134	0.65	0.7	15.3	0.2	1.4	2.1	20	15	5.7	71.9	28.3	125	246	50.5	542	0.7	0.46	562
14	1160	9.4	1472	26	7560	58.6	277	369	0.75	0	26.1	0.4	5.6	9.2	41	48	14.8	157	54.5	221	348	62.9	906	0.7	1.13	947

15	1500	12	2970	3.6	4570	2.8	217	135	1.60	0	85.4	0.4	7.0	10.9	104	66	22.4	268	102	456	820	165	1899	5.0	0.43	2003
16	1120	5.3	768	3.6	8750	10.5	341	481	0.71	0.8	34.3	0.3	1.5	1.9	39	12	4.4	57.3	24.3	121	286	59.6	564	0.4	0.60	603
20	1120	4.5	794	2.1	7940	6.2	230	499	0.46	0	13	0	0.7	2	16	12	4.8	60.3	25.3	126	280	61.4	570	0.4	0.63	586
21	1270	22	519	2.1	8580	6.5	32.8	50.6	0.65	0	19.8	0.1	0.9	2	23	12	4.0	48.3	17.9	80.3	161	32.8	356	0.6	0.54	379
22	950	4.6	680	1.6	8260	13.9	206	481	0.43	0	15.9	0.1	1.0	2.2	19	11	4.0	51.5	20.6	108	286	67	548	1.0	0.47	567
23	1510	15	1888	1.5	7060	1.6	208	75.6	2.75	0.1	62.4	0.7	11.3	15.3	90	64	18.4	197	67.9	279	444	85.6	1155	4.5	0.65	1245
24	950	9	328	2.6	8490	17.5	41.2	125	0.33	0	23.2	0	0.5	1.3	25	6.4	2.5	29.6	11.0	51.2	110	23.6	234	0.3	0.70	259
25	250	9.3	417	2.6	9450	33.4	45.7	201	0.23	0	3.45	0	0.3	1.4	5	7.4	3.0	36.7	14.6	66.6	138	27.6	294	0.0	1.62	299
26	1210	13	480	1.7	7200	13.3	46.8	89.1	0.53	0	12.2	0.1	0.9	2.1	15	10	3.7	42.9	16.3	73.2	145	29.5	321	0.4	0.75	336
27	1130	4	545	2.5	8980	5.1	66.4	226	0.29	0	8.67	0	0.2	0.7	9	5.4	2.4	35.5	16.6	93	287	70.5	510	0.4	0.32	520
30	1420	5.4	2037	1.8	6270	5.1	216	399	0.54	0	7.53	0.3	5.7	11.1	25	58	18.7	202	72.7	303	529	103	1286	1.9	0.76	1311
31	2520	18	1412	2.9	6470	1.7	323	88.6	3.65	0	96.5	0.3	5.1	8.3	110	42	12.1	143	50.4	209	359	70.6	886	2.4	0.60	996
32	1050	7.3	949	8.5	8230	64.0	143	457	0.31	0	12.5	0.1	1.3	3.0	17	19	6.8	83.9	32.8	152	278	54	627	0.1	1.56	644
33	2390	5.6	1105	1.6	6290	10.0	287	454	0.63	0.2	12	0.1	1.5	2.9	17	17	6.4	84.4	34.4	175	396	89.2	802	0.9	0.53	818
34	2180	6.5	1205	5.2	9250	12.5	586	614	0.95	0	48.7	0.1	1.1	3.3	53	20	7.5	95.9	39.2	186	385	77.7	811	0.7	0.63	864
36	1210	24	458	1.3	7210	10.3	63.7	75.2	0.85	0	22.5	0.1	1.8	2.8	27	13	4.2	46.2	16.3	70.4	134	26.7	310	0.7	0.64	338
38	1300	8.4	994	0.9	6810	3.0	127	208	0.61	0	9.62	0.2	2.2	4.6	17	22	7.5	87.3	33.7	159	325	71.5	705	1.2	0.65	722
39	1160	13	377	0.5	6090	0.6	59.4	28.4	2.09	0	25.7	0.1	2.1	2.8	31	11	3.3	35.9	13.3	58.2	113	24.2	259	1.1	0.57	290
41	410	6.4	379	0.9	8340	1.6	58.1	85.9	0.68	0	9.73	0	0.5	1.3	12	5.7	2.0	27.4	11.6	61.7	173	42.1	324	0.5	0.59	335
42	900	20	1216	1	6930	18.3	80.6	139	0.58	0.1	8.32	0.8	13.1	16.6	39	61	15.8	153	45.1	167	240	41.9	723	1.1	1.44	762
43	600	8.8	491	1	7510	42.3	82.2	168	0.49	0	7.23	0	0.5	1.8	9	9.8	3.4	40.8	15.8	76.5	153	32.7	332	0.4	0.67	342
44	1070	5.1	1088	12	9460	16.8	307	389	0.79	0	41.8	0	0.8	2.2	45	15	6.2	84.2	34.7	175	413	83.6	812	0.3	0.75	857
45	520	16	570	1.4	9080	8.5	31.3	61.8	0.51	0	12	0.1	1.5	2.5	16	12	4.3	49.7	19.3	87	163	31.5	367	0.2	1.17	383
46	580	21	416	0.7	6170	3.9	11.1	26.6	0.42	0	2.23	0.1	0.8	1.9	5	11	3.5	38.5	13.8	61.6	114	23	265	0.2	0.96	270
47	520	8.5	455	4.5	10020	112	162	498	0.33	0.9	15.9	0.3	1.0	1.1	19	6.8	2.4	35	14.6	76.9	195	43.8	375	0.2	0.80	394
48	530	6.7	658	2.5	9070	43.6	84.9	176	0.48	0	5.76	0	0.6	1.5	8	11	4.3	56.6	22.5	103	197	39.6	434	0.2	0.82	442
49	490	9.3	796	0.9	8070	2.8	77.5	202	0.38	0	5.38	0	0.6	1.7	8	14	5.2	65	25.7	122	243	50.7	526	0.3	0.60	534
51	410	12	551	3.7	9670	32.5	113	229	0.49	0	36.4	0.1	1.0	2.1	39	11	3.9	47.2	18.0	85.6	194	41.6	401	0.6	0.60	441
52	570	15	1914	0.8	6820	19.3	315	366	0.86	0	6.54	0.3	4.0	6.1	17	38	13.6	166	63.1	290	538	112	1220	1.7	0.53	1237
53	290	11	549	2.3	8330	16.0	127	80.2	1.59	0.3	33.8	0.1	1.6	2.7	39	12	4.3	50.3	18.9	86.3	181	36.7	389	0.7	0.68	428
54	940	2.3	525	1.4	8450	15.0	124	547	0.23	2.1	13.2	0.8	2.8	1.1	20	5.7	2.1	29.8	14.9	87.7	297	77.1	514	0.4	0.48	534

55	340	5.9	347	1.1	7620	6.8	90.8	227	0.40	0	9.05	0	0.2	0.8	10	5.8	2.1	25.2	10.3	54.6	155	38.6	291	0.4	0.39	302
56	203	5.7	326	1.9	8090	11.2	78.3	59.3	1.32	0.2	5.97	0.1	1.1	1.8	9	8.4	2.8	30.9	11.5	49.5	88.8	17.2	209	0.1	1.51	218
57	360	6.8	839	3	7510	7.3	367	409	0.90	0	34.4	0.1	1.1	2.7	38	15	5.3	67.7	27.3	130	282	58.3	585	0.6	0.65	624
58	250	17	474	2.5	7640	6.5	51.8	46.4	1.12	0	21.4	0.1	1.7	3.2	26	13	4.7	49.3	16.5	70.4	134	27	315	0.6	0.79	342
59	426	22	804	3.9	7540	6.0	36.3	42.6	0.85	0	46.7	0.2	3.1	6.0	56	28	8.3	88	28.7	114	180	34.2	481	2.1	0.57	537
61	277	6.8	894	1.6	8290	3.9	113	314	0.36	0	5.09	0	0.8	2.5	8	16	6.0	77.1	30.9	144	264	53.1	591	0.2	0.89	599
62	369	4.5	944	0.5	9110	4.4	155	354	0.44	0	5.3	0.1	1.5	3.0	10	18	6.4	76.9	31.4	145	302	67.9	647	0.6	0.65	657
63	262	13	687	3.5	7310	14.7	37.3	83.3	0.45	0	5.86	0.1	1.7	3.5	11	17	6.0	69.2	24.9	105	183	34.9	440	0.1	1.69	451
64	46	8.4	251	2.4	9890	45.4	94.1	358	0.26	0.1	3.99	0.1	0.4	0.8	5	4.7	1.7	21	8.2	38.6	83.2	17.4	175	0.0	1.35	180
65	239	27	299	0.8	7490	10.2	148	172	0.86	0	7.17	0.2	2.2	3.4	13	12	3.3	30.1	9.5	40.8	75.7	15.4	187	0.8	0.76	200
66	591	12	5090	3.1	4610	1.6	240	80.9	2.97	0.2	247	1.7	26.5	45.1	321	185	52.2	544	182	716	1100	202	2982	10.1	0.75	3302
67	223	16	936	0.6	6680	9.9	179	186	0.96	0.1	8.48	0.3	4.1	5.7	19	28	8.4	94.7	31.1	133	244	49.9	589	2.8	0.46	608
68	294	10	885	1.3	5750	8.3	77.1	101	0.76	0	12.4	0.1	1.2	2.0	16	11	4.2	58.1	26.6	145	337	75.8	657	0.8	0.48	673
69	339	5.5	1076	0.9	8540	5.1	283	399	0.71	0	12.5	0.1	2.0	5.4	20	25	8.2	94.3	35.3	159	317	65.3	703	1.0	0.78	723
70	143	4.8	622	2.3	8240	4.5	128	307	0.42	0	13.6	0	0.5	1.3	15	8.2	3.4	42.3	19.3	101	263	67.6	505	0.7	0.40	520
71	334	3.2	855	1.1	6820	11.0	58.1	80	0.73	0.1	13.9	0.5	7.1	9.1	31	32	9.3	93.1	30.2	123	195	36.1	519	2.2	0.78	549
72	108	11	940	1.0	6950	6.5	221	223	0.99	0	11.6	0.2	3.2	4.8	20	21	7.2	83.7	31.9	145	299	64.4	653	1.3	0.65	673
73	850	9.4	966	3.6	7600	10.5	398	515	0.77	8	43	2.5	11.6	6.3	71	23	7.0	81.8	31.7	145	297	61.1	646	0.7	1.16	718
74	302	5.5	540	2.2	7780	13.6	35.6	80.5	0.44	0	7.17	0	0.7	1.5	9	10	3.5	44.8	18.7	87.3	182	38.2	385	0.2	0.78	394
75	100	4.4	194	0.6	6570	2.7	18.5	62.8	0.29	0	4.49	0	0.2	0.4	5	3.1	1.3	15.6	6.5	31.4	75.3	17.6	151	0.2	0.34	156
76	77	3.9	176	1.3	6150	4.1	7.3	26.4	0.28	0	1.91	0	0.1	0.3	2	2.2	1.0	14.2	6	29.8	56.8	10.6	121	0.0	0.62	123
77	326	9	671	4.8	9350	65.5	183	287	0.64	0	26.2	0	0.9	1.4	29	11	4.2	53	21.8	107	238	49.4	484	0.3	0.54	512
78	299	6.5	579	2.6	10110	4.8	107	173	0.62	0	11.8	0	0.3	1.3	13	8.5	3.4	42.7	18.5	93.9	227	50.1	444	0.3	0.56	457
79	360	31	1149	0.7	7300	32.7	154	127	1.21	0.2	10.4	1.2	13.6	16.1	41	47	12.8	126	39.6	154	232	42	653	1.8	1.25	694
80	413	5.4	2747	3.1	6560	11.2	467	876	0.53	0	13.2	0.3	6.4	12.5	32	73	23.7	271	98	405	666	126	1662	2.6	0.66	1695
81	216	5.9	767	0.3	7440	12.6	31.1	56	0.56	0	1.83	0.1	1.1	2.1	5	14	5.0	63.6	24.9	118	218	44.8	487	0.5	0.58	492
82	331	5.5	1426	7.4	8610	12.1	461	597	0.77	0	54.9	0.1	1.5	3.7	60	23	8.6	113	46.5	229	474	101	994	0.9	0.57	1054
83	179	7.8	716	4.8	8940	29.6	63.8	220	0.29	0	6.95	0	0.8	2.3	10	12	4.8	59.4	23.9	113	218	43.6	474	0.1	1.35	485
84	131	14	2440	2.7	5610	12.1	56.3	80.3	0.70	0.1	5.3	0.5	9.3	17.7	33	80	25.3	270	89.5	362	530	93.6	1451	2.7	0.87	1483
85	256	13	573	1.0	7770	12.6	37.2	84.2	0.44	0	7.48	0.1	0.9	2.1	11	12	4.2	51.5	19.5	89.4	170	35.8	383	0.3	0.78	394
86	304	7	948	1.3	7480	1	73.6	52.7	1.40	0	28.4	0.1	1.1	3.1	33	19	7.1	83.4	32.8	150	277	55.1	625	1.1	0.47	657

88	243	5.2	1634	6.8	9100	8.0	72.1	96.2	0.75	0	10.5	0	1.5	4.5	16	36	13.2	158	60.7	252	386	69	974	0.1	1.73	990
89	250	11	366	1.1	7270	14.2	34	78.2	0.43	0	27.2	0.1	0.9	1.8	30	8.3	2.7	30.2	12.1	57.1	120	25.4	256	0.5	0.62	286
90	276	5.2	637	1.3	7520	5	201	395	0.51	0	11.4	0	0.9	2.4	15	11	4.2	50.8	20.7	98	214	44.6	444	0.5	0.74	459
91	292	10	682	1.4	6890	2.7	43.8	103	0.43	0	6.91	0.1	1.0	2.4	10	13	4.7	57.6	22.9	109	224	48.4	480	0.5	0.67	490
92	480	67	2012	1.5	7420	12.6	44.7	86.8	0.51	0	4.38	0.3	3.4	5.6	14	39	14.6	184	70.4	326	642	130	1406	2.3	0.43	1420
93	327	6.8	973	1.4	8600	1.5	106	83.9	1.27	0	27.5	0	0.8	2.4	31	18	6.0	81.5	33.1	155	322	66.4	681	0.7	0.50	712
94	180	5.7	782	2.8	8040	14.1	209	563	0.37	0	18.9	0	0.2	1.6	21	7.3	3.2	45.4	23.5	128	386	102	695	0.7	0.52	716
95	197	5.1	599	2.5	8180	8.0	278	374	0.74	0	33	0	0.6	1.8	35	11	3.6	46.6	19.4	94.1	214	47.6	436	0.5	0.53	471
96	130	15	431	1.5	7370	15.3	38	104	0.37	0	5.65	0	0.8	1.7	8	9.6	3.3	38.6	14.5	64.6	123	24	278	0.2	0.95	286
98	720	7.5	1909	8.6	7800	3.7	245	199	1.23	0	71.9	0.1	1.7	5.3	79	34	13.4	169	65.8	296	509	94.7	1182	1.0	0.65	1261
100	2180	6.9	471	1.5	7830	5.7	104	223	0.47	13.5	43.5	3.5	13.6	3.7	78	9.2	2.8	35.9	14.6	75.7	202	49	389	0.9	0.94	467

Anexo 8. Concentraciones de elementos traza y tierras raras (ppm) de los circones detríticos de la muestra CFS-16, perteneciente al miembro San Marcos.

Circón	Elementos traza									Elementos de tierras raras (REE)																
	P	Ti	Y	Nb	Hf	Pb	Th	U	Th/U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	LREE	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	HREE	Eu	Eu/Eu*	ΣREE
02	370	6	589	1.2	9380	1.6	65	124	0.5	0	8.4	0	0.8	1.46	10.7	10	3.4	44	18	96	256	64	492	0.8	0.36	503
05	380	7	491	1.3	7520	1.5	31	77	0.4	0	3.3	0	0.5	1.26	5.1	9.1	3.3	42	17	76	154.1	32	333	0.2	0.60	338
08	397	4	609	1.4	8900	1.6	66	133	0.5	0	9.1	0	0.8	1.7	11.6	9.3	3.3	43	19	101	279.2	68	523	0.8	0.44	535
09	422	5	884	2.2	9490	2.7	106	221	0.5	0	14	0	0.7	1.88	16.8	13	4.7	63	28	146	404	99	757	1.1	0.35	774
11	314	4	415	1.6	9290	2.1	65	154	0.4	0	10	0	0.3	0.71	11.3	5.1	2.1	28	13	69	199.6	49	365	0.4	0.35	377
12	450	3	1455	2.1	9530	10.8	342	760	0.5	0.44	24	0.3	1.5	4.4	30.8	24	9.4	122	48	222	454	92	971	0.3	1.21	1002
13	213	5	1015	4.4	7230	4.3	15	169	0.1	0	5.5	0	0.2	1.19	6.9	11	4.7	70	32	173	458	104	853	0.9	0.27	859
15	336	6	1139	5.3	8470	5.3	200	235	0.9	0	47	0	0.9	2.9	50.5	17	6.8	88	38	187	423	90	850	0.7	0.60	900
16	719	2	4380	11	10000	90.8	1652	6580	0.3	0	23	0.3	3.9	10.6	38.0	70	27	338	132	615	1260	254	2696	0.3	1.61	2734
17	257	6	461	1.2	7430	1.4	39	105	0.4	0	6.5	0	0.2	0.52	7.2	5.5	2.1	30	14	75	231	60	417	0.4	0.25	424
18	149	5	437	1.3	8400	1.2	35	88	0.4	0	7.1	0	0.3	0.53	8.0	5.4	2.1	30	13	75	218	55	398	0.4	0.25	406
22	329	7	876	3.4	10870	9.4	330	463	0.7	0.07	28	0.1	0.9	1.95	31.3	13	5.4	70	29	143	314	65	639	0.3	0.68	671
24	264	5	1080	2.5	9150	2.8	103	222	0.5	0	13	0.1	1.4	3.2	17.3	16	6.2	81	33	178	449	104	867	1.8	0.44	884

25	144	3	461	1.3	8850	6.7	180	556	0.3	0	6.9	0	0.4	0.93	8.3	5.8	2.2	30	13	72	195	46	364	0.3	0.49	372
27	5	3	507	2.4	9980	3.5	152	315	0.5	0	13	0	0.1	0.48	14.0	3.9	1.6	26	14	84	305	83	517	0.2	0.36	531
28	350	4	563	2.3	9150	2.0	58	172	0.3	0	10	0	0.3	0.76	11.2	6.2	2.5	37	17	96	293	74	525	0.5	0.31	536
30	298	25	429	1.9	8580	5.2	20	29	0.7	0.01	4.7	0.1	0.7	1.67	7.2	9.1	3.1	38	15	68	130.5	27	291	0.2	0.96	298
31	216	5	399	2.1	8450	3.5	173	293	0.6	0.38	15	0.1	0.7	0.97	17.6	5.3	2	28	12	66	188.7	44	346	0.3	0.54	364
32	4600	6	842	1.1	10260	1.9	110	184	0.6	33	72	7.3	30	6.4	148.4	17	5.7	65	28	137	357	83	692	2.1	0.76	841
33	361	5	610	1.5	8330	1.8	70	149	0.5	0.01	9.1	0	0.5	0.97	10.6	7.9	3	42	19	101	289	75	536	0.6	0.32	546
35	331	14	514	2.5	8770	22.2	53	93	0.6	0	7.7	0	0.6	1.43	9.7	9.4	3.7	46	18	81	160.7	32	350	0.2	0.76	360
37	350	5	515	1.1	8550	1.6	52	122	0.4	0	7.4	0	0.3	0.91	8.6	6.1	2.6	35	15	84	251	62	456	0.4	0.39	464
38	233	4	579	2	8970	1.6	62	138	0.4	0	10	0	0.5	1.26	11.9	7.9	2.8	40	18	97	284.2	71	520	0.6	0.42	532
39	239	4	611	2.2	9000	1.8	65	137	0.5	0	11	0	0.3	1.11	12.9	8.3	3	42	19	102	297.1	73	545	0.7	0.34	557
40	351	5	568	1.5	9240	1.9	60	148	0.4	0	8.7	0	0.2	1.03	10.0	7.4	2.8	38	17	95	282.9	69	513	0.5	0.38	523
41	258	5	642	2.5	8830	1.9	59	154	0.4	0	12	0	0.4	0.93	12.8	7.5	3	40	19	108	327	82	586	0.5	0.33	599
44	213	4	559	2.5	8680	2.0	59	160	0.4	0	12	0	0.2	0.81	12.9	6.8	2.7	37	17	96	288	72	519	0.5	0.33	532
45	207	7	845	4.2	8120	2.7	102	229	0.4	0	17	0	0.5	1.31	18.9	9.3	3.9	55	27	145	417	103	760	0.6	0.39	779
46	330	4	567	1.3	8010	1.8	62	138	0.4	0	8.3	0	0.4	0.86	9.7	7	2.8	37	17	92	275	71	502	0.5	0.31	511
49	340	9	639	0.6	7900	2.8	141	235	0.6	0	6.7	0.1	1.4	2.86	11.0	15	5	57	22	99	186	38	422	0.7	0.64	433
50	291	5	720	1.4	7840	4.3	115	353	0.3	0	7	0	0.8	1.71	9.4	10	3.9	52	22	115	288	66	557	0.5	0.57	567
51	319	4	1045	1.1	9810	12.6	509	1012	0.5	0	12	0.1	1.9	4.07	17.9	20	6.8	82	33	157	369	82	750	0.6	0.80	768
52	162	4	998	1	7780	4.0	136	334	0.4	0	8.3	0.1	1.1	3.49	12.9	22	7.6	90	35	152	289.6	57	653	0.5	0.76	665
53	276	4	547	1.4	10040	1.5	59	132	0.4	0	8.4	0	0.3	1.3	10.1	8.3	2.9	38	17	90	262	65	482	0.6	0.40	492
55	306	9	1850	3.3	8360	7.5	480	376	1.3	0.02	59	0.3	4.6	8.2	72.2	43	14	157	63	279	549	110	1214	2.6	0.56	1286
56	358	5	593	1.7	9700	6.5	265	551	0.5	0	12	0	0.6	1.55	14.2	9.4	3.8	48	20	93	203.1	43	420	0.3	0.65	434
57	454	6	601	0.7	6700	2.7	80	217	0.4	0	4.3	0	0.3	1.38	6.0	9.4	3.5	47	19	93	220	49	440	0.5	0.45	446
59	640	3	1238	11	11790	14.7	148	1320	0.1	0	10	0	0.2	1.1	11.5	10	5.8	88	39	214	665	149	1171	0.3	0.47	1182
60	560	5	494	2.1	8840	2.2	84	192	0.4	1.30	18	0.6	3.8	1.6	25.5	7.6	2.5	35	15	83	237	58	438	0.7	0.49	463
62	222	6	1340	2.1	8650	3.4	200	291	0.7	0.02	19	0.2	2.9	5.26	27.5	25	8.7	106	44	214	530	125	1053	2.3	0.50	1080
63	173	5	637	2.7	8280	1.9	66	154	0.4	0	11	0	0.6	1.07	12.9	7.2	3	41	20	107	315	78	571	0.6	0.38	584
64	151	14	462	2.6	6640	8.0	30	52	0.6	0	4.5	0.1	0.9	2.66	8.1	12	4.2	47	17	74	139.6	27	320	0.2	1.30	328
65	313	11	1313	3.9	8010	9.1	498	452	1.1	0	48	0.1	2.7	4.77	56.0	28	9.6	113	45	203	404	82	883	1.4	0.55	939
66	294	24	1453	1.2	7870	2.7	289	134	2.1	0.05	26	0.5	6.8	9.94	43.0	40	13	136	51	212	364	69	885	1.5	0.90	928

75	293	4	734	2.1	7690	13.8	95	91	1.0	0	6.6	0	1.3	2.49	10.4	16	5.8	65	26	113	213	42	480	0.2	0.91	491
76	50	4	719	3.5	7580	2.4	73	175	0.4	0	14	0	0.4	0.84	15.0	8.9	3.2	45	22	122	361	91	653	0.6	0.27	668
79	250	4	932	6.1	8960	3.3	90	274	0.3	0	16	0	0.4	1.11	17.9	9.7	4	60	29	159	468	112	842	0.7	0.31	860
80	302	5	441	0.8	9600	7.3	228	593	0.4	0.18	7.1	0.1	0.5	1.04	8.9	6.6	2.3	32	13	69	178.4	41	342	0.2	0.60	351
82	329	3	2177	12	11440	20.6	591	1702	0.3	0.01	15	0	1.1	3.99	20.3	36	14	184	74	344	643	125	1420	0	2.29	1440
84	296	8	1020	2.4	7210	3.1	126	265	0.5	0.12	9.1	0.1	1.3	3.25	13.9	19	6.7	86	35	161	321	66	694	0.8	0.62	708
85	281	4	923	4.7	9290	6.4	335	536	0.6	0	26	0	0.5	1.02	27.6	8.5	3.5	54	28	154	508	130	886	0.5	0.34	914
86	225	2	874	0.9	9450	11.8	430	1009	0.4	0	8.2	0	0.6	1.66	10.5	11	4.4	60	26	137	372	84	694	0.3	0.64	705
87	209	6	368	1.3	7600	8.2	9	20	0.5	0	7	0	0.9	1.91	9.8	9.5	3	32	12	50	94	20	219	1	0.44	229
88	353	4	411	1.2	8250	1.2	35	98	0.4	0	6.2	0	0.2	0.74	7.1	4.8	1.9	27	12	69	214	53	382	0.4	0.38	389
91	288	8	1575	1.3	6650	4.7	296	212	1.4	0	32	0.4	5.8	8.62	47.1	42	13	148	56	240	451	89	1038	2.8	0.57	1085
92	159	4	572	2.6	8380	1.9	52	153	0.3	0	11	0	0.3	1.04	11.9	6.5	2.7	37	18	100	300.5	77	542	0.5	0.42	554
93	389	4	492	1.4	8350	1.6	47	128	0.4	0	8.1	0	0.3	1.09	9.5	6	2.4	33	16	82	242	61	442	0.5	0.44	451
94	356	25	560	1.7	7780	10.4	28	43	0.7	0.08	6.5	0.1	0.9	1.81	9.4	12	4.1	52	20	85	165.8	32	371	0.5	0.52	380
95	480	4	721	3.4	9210	2.4	80	196	0.4	0.56	17	0.2	0.7	1.44	19.7	9	3.4	48	23	126	367	90	666	0.6	0.45	686
96	270	3	1116	5.9	9630	14.3	432	1165	0.4	0	20	0.1	1.2	3.15	24.0	20	7.1	92	38	170	347	70	745	0.2	1.30	769
97	164	10	402	2.6	6700	9.4	31	61	0.5	0	4.8	0.1	1.2	2.27	8.2	12	3.8	41	15	64	123.1	26	286	0.1	1.25	294
99	1680	6	1484	2.1	9190	6.3	409	295	1.4	26	101	6.7	26	8.7	168.4	35	11	129	51	230	465	95	1015	1.6	0.85	1184
100	363	11	510	0.9	8240	4.0	185	343	0.5	0.23	9.7	0.1	1.3	1.58	12.8	9.6	3.4	43	17	78	157.6	32	340	0.4	0.60	353

Anexo 9. Concentraciones de elementos traza y tierras raras (ppm) de los circones detríticos de la muestra CFS-21, perteneciente al miembro San Juan.

Circón	Elementos traza									Elementos de tierras raras (REE)																
	P	Ti	Y	Nb	Hf	Pb	Th	U	Th/U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	LREE	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	HREE	Eu	Eu/Eu*	ΣREE
02	50	7	667	0.9	9670	22	72	40	1.8	0	14.2	0.1	3.0	5.8	23.1	23	7	65	22	89	143	27	376	0.9	0.9	399
03	260	7	1610	2	9050	33	229	155	1.5	0.05	40	0.7	11.2	15.1	67.1	53	16	165	56	228	388	72.3	978	3.3	0.8	1045
04	413	17	1830	4	8340	24	1520	882	1.7	0.01	41.3	0.2	4.3	7.4	53.3	41	13	157	58	261	486	94.9	1111	1.4	0.7	1164
05	217	11	1213	2.8	7730	2	59	86	0.7	0	25.9	0.1	1.5	3.2	30.6	19	7	93	39	201	449	101	908	1.2	0.5	939
07	190	28	1099	1.8	8780	2	107	73	1.5	0.03	23	0.4	4.6	7.8	35.8	33	10	105	38	164	288	55.7	693	0.7	1.1	729

10	330	5	1740	2.1	10600	11	364	353	1.0	0.2	42	0.2	2.8	6.6	51.7	32	11	142	56	264	552	115	1172	1.4	0.7	1223
11	261	23	509	2.3	10100	11	33	34	1.0	0	14.6	0.0	1.2	2.2	18.0	12	4	45	18	79	147	30.3	335	0.5	0.6	353
13	150	2	224	1.8	10270	25	5	140	0.0	0	1.94	0.0	0.1	0.6	2.7	3.9	1	17	7	31	56	11.9	128	0.3	0.4	131
14	90	6	2070	2.7	10110	12	562	457	1.2	0.1	64.4	0.3	4.4	7.4	76.6	39	13	169	67	317	654	141	1399	2.4	0.6	1476
15	235	3	1111	5.9	11300	16	405	591	0.7	0	43.2	0.1	0.8	2.5	46.5	17	6	84	35	177	391	82.5	793	0.4	0.7	840
17	140	9	208	1	9240	6	95	162	0.6	0	9.67	0.0	0.1	0.6	10.4	2.8	1	12	6	31	117	37.9	207	0.3	0.4	217
18	300	9	1940	5.3	9600	9	363	327	1.1	0	56.5	0.2	3.7	7.5	67.9	38	13	161	63	291	552	110	1228	1.7	0.7	1296
19	240	6	680	3.5	10890	7	186	299	0.6	0.4	28.8	0.2	1.0	1.2	31.5	8.8	4	49	22	111	266	56.9	516	0.3	0.6	548
22	380	3	499	1.8	10360	19	56	113	0.5	0.1	19.7	0.1	0.9	1.2	22.0	7.9	3	39	16	76	167	36.4	346	0.2	0.6	368
24	650	2	2300	9.3	9250	18	494	1307	0.4	2.7	23.7	1.2	8.0	9.2	44.8	49	17	207	77	353	643	127	1473	0.5	1.3	1517
25	-6	2	1193	2.8	9790	6	167	441	0.4	0	8.72	0.1	1.1	3.6	13.5	22	8	101	39	183	343	71	767	0.3	1.0	780
26	190	8	1190	1.7	8590	3	138	156	0.9	0	16.1	0.2	2.5	5.3	24.1	26	9	102	40	190	377	80	823	1.8	0.6	847
28	136	4	1040	3.7	10490	13	465	609	0.8	0	38.2	0.0	1.0	2.2	41.4	15	6	74	31	158	367	81	733	0.6	0.5	774
29	190	30	717	1.6	8730	23	68	91	0.7	0	13	0.0	1.0	3.0	17.0	15	5	63	24	110	203	41.8	462	0.6	0.7	479
31	407	9	1324	3.6	8480	3	99	124	0.8	0.0	21.3	0.1	2.1	5.0	28.6	29	10	119	46	202	372	77	855	1.7	0.5	884
33	335	4	1900	4	9630	15	743	712	1.0	0	45.1	0.1	2.4	6.4	54.1	34	13	159	63	290	553	114	1226	0.8	0.9	1280
36	160	7	544	1.1	7630	26	79	109	0.7	0	23	0.1	1.6	4.1	28.8	18	5	51	18	76	136	28.5	332	1.1	0.7	361
41	280	3	2240	2.9	9340	13	601	611	1.0	0	40.2	0.3	5.0	9.6	55.1	46	16	190	75	341	679	144	1491	2.3	0.7	1546
42	240	5	535	3.5	9900	44	82	189	0.4	0	12.4	0.1	0.7	1.2	14.4	9.3	3	42	17	86	180	38.3	377	0.2	0.7	391
43	240	17	1114	1.9	7820	22	67	128	0.5	0.02	6.18	0.2	3.6	7.8	17.8	38	11	113	40	160	265	55.1	682	0.6	1.2	700
44	358	20	666	1	8580	7	19	40	0.5	0	4.37	0.0	1.3	2.4	8.1	14	5	60	23	103	188	38.3	433	0.6	0.6	441
46	240	3	150	0.5	8940	79	59	149	0.4	0	6.94	0.0	0.1	0.3	7.4	1.6	1	10	4	24	65	16	122	0.1	0.5	129
48	268	3	1153	4.5	9440	8	38	335	0.1	0	5.83	0.0	0.1	0.8	6.7	9.9	5	77	39	212	573	133	1048	0.8	0.2	1054
51	980	3	2290	7.9	11940	8	366	361	1.0	18.2	101	5.3	27.3	10.9	163	41	15	184	78	358	682	142	1499	1.0	1.2	1662
52	350	40	520	0.9	7050	3	28	21	1.3	0	16.8	0.2	2.8	4.3	24.1	19	5	55	19	76	125	24.9	323	1.9	0.5	347
53	370	19	611	2.8	9230	22	59	74	0.8	0	20.3	0.1	0.8	2.6	23.8	12	5	57	21	98	187	39.1	418	0.5	0.8	442
57	570	13	1237	1.9	8330	9	348	342	1.0	0	23.9	0.2	2.2	4.7	31.0	26	9	103	40	182	377	77.8	815	1.0	0.7	846
58	430	8	654	3	7740	24	53	87	0.6	0	21.4	0.1	0.7	2.6	24.7	13	5	56	22	102	190	41.4	428	0.7	0.6	453
62	770	3	1320	15	11960	286	187	1120	0.2	8	24	2.3	9.7	5.2	49.2	23	8	111	46	218	476	102	984	0.4	1.2	1033
65	470	10	390	1.6	9010	13	196	422	0.5	0	6.86	0.0	0.5	1.6	8.9	6.6	3	33	13	62	138	30.5	285	0.1	1.2	294
69	500	1	741	2.4	9730	10	273	759	0.4	0.3	11.4	0.2	1.2	2.4	15.4	13	5	61	24	113	230	48	494	0.3	0.9	509

70	620	8	431	3.1	10290	33	79	138	0.6	0	25.2	0.0	0.4	0.8	26.3	5.8	2	33	14	70	182	42.6	350	0.2	0.6	376
71	1120	6	770	2.9	7990	5	213	357	0.6	0.1	18.9	0.1	0.9	1.5	21.4	11	4	56	25	123	302	69.7	591	0.4	0.5	613
72	1660	18	1294	1.7	8610	17	144	84	1.7	0.01	28.7	0.1	1.8	4.3	34.8	29	10	115	45	193	341	68.9	801	1.1	0.6	836
73	350	3	1165	7.7	7550	12	65	494	0.1	0	21.8	0.0	0.2	0.5	22.6	6.5	3	56	32	198	662	175	1132	0.6	0.2	1154
75	660	14	548	1.2	7220	10	38	63	0.6	0	2.12	0.0	1.0	2.1	5.2	13	4	52	18	80	142	28.4	337	0.3	0.8	343
79	210	2	343	1.1	7660	8	117	307	0.4	0	11.3	0.0	0.2	0.3	11.8	3	1	19	9	55	189	55.5	332	0.3	0.2	344
81	2240	15	604	2	9160	38	71	153	0.5	0	9.81	0.1	1.0	2.1	13	12	5	54	20	94	190	38.2	413	0.3	0.8	426
83	790	5	779	2.8	8470	6	99	207	0.5	0.2	21.9	0.0	0.6	0.9	23.6	7.6	3	48	22	130	393	103	708	0.7	0.3	731
85	1430	14	412	1.4	8380	9	21	59	0.4	0	6.5	0.1	0.8	1.7	9.1	9.7	3	38	15	64	117	23.1	269	0.3	0.8	279
87	19200	3	733	2.3	9420	8	179	624	0.3	38	96.9	11	50.0	11.6	207	19	5	62	23	108	240	51.3	508	0.7	2.3	716
89	22600	3	704	2.2	8520	6	181	448	0.4	64	160	21	92.9	20.8	358	29	6	63	24	106	210	43.6	482	1.2	2.5	840
90	1130	4	959	3.6	8230	11	413	491	0.8	0	25.1	0.1	1.3	2.5	29.0	16	6	76	32	153	319	69.1	670	0.6	0.6	699
93	910	4	1490	2.2	9000	4	418	291	1.4	0	42.9	0.2	3.4	6.7	53.2	33	11	129	50	225	450	92.7	991	1.2	0.8	1044
94	540	8	1800	5.2	7440	20	115	133	0.9	0.1	14.1	0.4	6.4	10.6	31.6	51	18	194	70	274	431	78	1116	0.3	2.0	1147
96	930	8	2081	2.6	8600	8	448	319	1.4	1.1	56.6	0.6	7.3	10.7	76.2	51	16	189	72	310	588	117	1343	2.9	0.6	1419
99	810	9	1322	1.2	9030	3	279	192	1.5	0	21.3	0.2	3.3	5.8	30.6	33	10	118	45	194	385	78.3	863	1.6	0.6	894
100	240	17	1381	0.9	7140	1	96	47	2.1	0	19.7	0.2	5.2	8.2	33.3	41	12	138	50	207	367	72.6	888	3.4	0.5	921