



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

EL VOLCANISMO FÉLSICO DEL RIFT DEL RÍO GRANDE EN CHIHUAHUA, MÉXICO: UNA PROVINCIA MAGMÁTICA DIFERENTE A LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGO

POR:

CASANDRA MAYLEE MORENO GARCÍA

Hermosillo, Sonora a 27 de enero del 2023

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 Open Access



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

EL VOLCANISMO FÉLSICO DEL RIFT DEL RÍO GRANDE EN CHIHUAHUA, MÉXICO: UNA PROVINCIA MAGMÁTICA DIFERENTE A LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGO

POR:

CASANDRA MAYLEE MORENO GARCÍA

SINODALES:

PRESIDENTE:	Dr. Arturo Joaquín Barrón Díaz
SECRETARIO:	c. Dra. Alejandra Marisela Gómez Valencia
VOCAL:	Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
VOCAL INVITADO:	Geol. Luis Arturo Terán Ortega

Hermosillo, Sonora a 27 de enero del 2023



EL SABER DE MIS HIJOS
PARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10
FAX 259 21 11

Hermsillo, Sonora, 6 de diciembre de 2022

DR. FRANCISCO GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
P r e s e n t e.-

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de Tesis, intitulado:

**“El volcanismo félsico del Rift del Río Grande en Chihuahua, México: una provincia
magmática diferente a la Sierra Madre Occidental.”**

Esto es con el fin de que la alumna **CASANDRA MAYLEE MORENO GARCÍA** con Expediente No. **217210663**, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

Dr. Jesús Roberto VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
Departamento de Geología
Universidad de Sonora

C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, México a 7 de diciembre de 2022

DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de Tesis propuesto por usted intitulado:

**"EL VOLCANISMO FÉLSICO DEL RIFT DEL RÍO GRANDE EN CHIHUAHUA:
UNA PROVINCIA MAGMÁTICA DIFERENTE A LA SIERRA MADRE
OCCIDENTAL"**

Lo anterior con el fin de que la alumna **Casandra Maylee Moreno García**, con No. de Expediente 217210663, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Presidente	Dr. Arturo Joaquín Barrón Díaz
Secretario	c.Dra. Alejandra Marisela Gómez Valencia
Vocal	Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Vocal Invitado Externo	Geol. Luis Arturo Terán Ortega

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su atención a la presente, quedo de ustedes

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



El saber de mis hijos
hará mi Grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGÍA**

c.c.p. archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

NOMBRE DE LA TESIS

**"EL VOLCANISMO FÉLSICO DEL RIFT DEL RÍO GRANDE EN CHIHUAHUA:
UNA PROVINCIA MAGMÁTICA DIFERENTE A LA SIERRA MADRE
OCCIDENTAL"**

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE

CASANDRA MAYLEE MORENO GARCÍA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR. ARTURO JOAQUÍN BARRÓN DÍAZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


C.DRA. ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

GEOL. LUIS ARTURO TERÁN ORTEGA

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



El saber de mis hijos
hará mi Grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGÍA**

c.c.p. archivo

Dedicatoria

A mis padres Alejandra y Sergio:

Quienes en todo momento me han brindado su apoyo, confianza y amor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres; Alejandra y Sergio, por ser mi apoyo incondicional en todo momento, por siempre creer en mí, por ser un ejemplo de trabajo y perseverancia, que me hace sentir orgullosa. A mi abuela Josefina Ramos, por sus sabios consejos. A mis hermanos; Miguel y Sebastian, a Lulú y Héctor, y al resto de mi familia.

Agradezco especialmente a mi director, el Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, por todo lo que me ha enseñado a lo largo del desarrollo de esta tesis y durante las clases, por la paciencia y la confianza que me ha brindado, por sus correcciones y consejos, sobre todo, por siempre mostrar disposición a compartir su conocimiento.

Agradezco a mis sinodales, el Dr. Arturo Barrón y al Ing. Luis Terán, por el tiempo invertido, por sus importantes observaciones y consejos que enriquecieron en gran medida a este manuscrito. A mi sinodal, la c. Dra. Alejandra Gómez, quien, además de sus correcciones e importantes aportes a este trabajo, sembró en mí el gusto por la petrogénesis ígnea.

Agradezco la Universidad de Sonora, al Departamento de Geología y a todos los maestros del que contribuyeron al desarrollo de mis conocimientos como geóloga.

Al Servicio Geológico Mexicano (SGM), por la contribución con análisis geoquímicos de muestras y por el apoyo con láminas delgadas de rocas hiperalcalinas. A Margarita Aldana del SGM, por su colaboración con la recopilación de datos de rocas utilizados para este trabajo. Y a todos los que contribuyeron de alguna forma en el desarrollo de esta investigación.

A Tania, por empezar y terminar conmigo este proyecto, la paciencia que me has tenido y los momentos que vivimos juntas, sobre todo, gracias por tu amistad. A Perlita, por sus importantes aportes al desarrollo de esta investigación y por ser la chispa que todos necesitan en su vida. A Paola, Michell, Javi y Pedro, Omar, Silvio y al resto de mis amigos, por el apoyo incondicional, las experiencias compartidas, el cariño y la amistad que me han brindado a lo largo de toda la carrera.

Agradezco a CONACYT, por el apoyo económico a través de la Beca proporcionada para el desarrollo de esta tesis, que forma parte del proyecto titulado “El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE?” (clave: 320694), a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano.

RESUMEN

En el estado de Chihuahua ocurrió, durante el Paleógeno, una migración de volcanismo desde lo que se conoce como la Provincia magmática del Trans-Pecos en el Estado de Texas, hacia la porción central del estado, este suceso es relacionado al desarrollo de la extensión cortical que dio origen al Rift del Río Grande (RRG). Mientras que, en la franja Occidental del Estado de Chihuahua aconteció otro evento magmático de forma simultánea, conocido como la Provincia magmática de la Sierra Madre Occidental (SMO). Ambos eventos generaron rocas volcánicas de composición félsica que pueden distinguirse química y mineralógicamente debido a los diferentes contextos tectónicos en los que se desarrollaron.

Las rocas de Chihuahua atribuidas al RRG están representadas por grupos de rocas clasificadas como hipercalinas, hiperaluminosas y metaluminosas que proceden de magmas con mayores proporciones de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) y menores contenidos de CaO que las rocas producto de la SMO. Estas últimas, están representadas solo por hiperaluminosas y metaluminosas, que, en comparación, las rocas del RRG, además, se caracterizan por sus altos contenidos en FeO con respecto al MgO , por mayores concentraciones de HFS, Nb, Ce, Rb y Th, contienen anomalías negativas de Sr, Ba y P más significativas, un enriquecimiento más importante en LREE y una anomalía en Eu.

Mineralógicamente, las rocas producto de la SMO se caracterizan por ser ricas en plagioclasas, clinopiroxeno > ortopiroxeno ambos ricos en Mg y los minerales hidratados biotita y hornblenda. Por otro lado, las rocas anorogénicas del RRG, se diferencian por presentar una asociación mineralógica anhidra de feldespato rico en Na de la variedad sanidina, clinopiroxeno del tipo aegirina y olivino rico en Fe conocido como fayalita.

Finalmente, las relaciones mineralógicas y geoquímicas obtenidas para las rocas de cada provincia exhiben las series magmáticas de las que deriva cada una. Donde las unidades del RRG reflejan un carácter transicional a alcalino, y las unidades de la SMO son de origen calcoalcalino.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Objetivo general.....	3
I.2 Objetivos específicos	3
I.3 Zona de estudio.....	4
II. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
II.1 Provincia magmática de la Sierra Madre Occidental	5
II.2 Provincia magmática del Rift del Río Grande	6
II.3 Registro del volcanismo del Rift del Río Grande en Chihuahua.....	7
III.- METODOLOGÍA	9
III.1 Recopilación de datos.....	9
III.2 Procesamiento de datos	14
III.2.1 Clasificación petrológica de las muestras	15
III.2.2 Identificación y selección de rocas félsicas.....	16
III.2.3 Identificación de rocas hiperalcalinas	17
III.2.4 Caracterización mediante diagramas petrogenéticos.....	17
III.2.5 Elaboración de mapas de distribución de datos.....	18
III.2.6 Problemas analíticos involucrados en la base de datos	18
IV. RESULTADOS	20
IV.1. Clasificación petrológica de las rocas félsicas	20
IV.2 Determinación geoquímica y mineralógica de las rocas hiperalcalinas.....	22
IV.3 Caracterización geoquímica de las rocas félsicas	24
IV.4 Distribución espacial de las muestras	26
IV.5 Ubicación y descripción de los grupos de muestras identificados	28
V.- DISCUSIÓN	31
V.1. Rocas volcánicas félsicas “ <i>tipo</i> ” para la Sierra Madre Occidental.....	31
V.2. Comparación de acuerdo con la geoquímica de elementos mayores	32
V.2.1. Evolución del contenido de álcalis con respecto a la diferenciación magmática.	32
V.2.2 Evolución del contenido de CaO y Al ₂ O ₃ en la diferenciación magmática.....	34
V.2.3 Rasgos petrológicos de acuerdo con todos los elementos mayores.....	35
V.2.3 Rasgos petrológicos de los minerales normativos.....	38
V.2.4 Contexto tectónico.....	41
V.3. Rasgos geoquímicos de identidad en elementos traza.....	45

V.3.1. Elementos traza de las rocas asociadas a cada provincia	45
V.3.2 Comportamiento geoquímico de REE.....	47
V.5.- Datos geocronológicos.....	48
V.6. Rocas anorogénicas hiperaluminosas y metaluminosas	52
V.8. Delimitación espacial de las unidades del RRG.....	56
VI. CONCLUSIÓN	58
VII. REFERENCIAS	60

I. INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de rocas volcánicas de composición félsica de edades Eoceno-Oligoceno en el Estado de Chihuahua, representa al mayor porcentaje del magmatismo registrado en su superficie (Figura 1). Este es atribuido en gran medida a los procesos tectono-magmáticos involucrados en la subducción de la Placa de Farallón debajo de la Placa Norteamericana, que dieron origen a la Sierra Madre Occidental (SMO), la cual es considerada la más Grande Provincia Ígnea Silícica (SLIP, por sus siglas en inglés) del Terciario (Ferrari et al., 2005). Sin embargo, se ha reportado la presencia de rocas volcánicas félsicas que fueron formadas antes o contemporáneamente, pero con características petrológicas (geoquímicas y mineralógicas) asociadas a otro evento tectono-magmático (Cameron et al. 1980), en este caso, uno de adelgazamiento cortical conocido ampliamente en Los Estados Unidos como El Rift del Río Grande (RRG; Riecker, 1979 y referencias dentro). Un Rift que comenzó a los 32 - 27 Ma cuando la extensión regional reactivó el sur de *Rocky Mountains* en Colorado, formando una importante zona de debilidad norte-sur deformando el registro de las orogenias del Paleozoico tardío y del Cretácico tardío-Terciario temprano (Chapin, 1979). Las rocas volcánicas félsicas formadas en ese contexto se han relacionado genéticamente con el Campo Volcánico del Trans-Pecos en el oeste de Texas en USA (Barker 1979), y con ello, se ha mostrado continuidad del volcanismo de rift en la frontera con en el estado de Chihuahua (Baker 1977). Es de suponer que los magmas generados en los diferentes contextos tectónicos pueden presentar características geoquímicas y mineralógicas contrastantes entre sí, lo cual se busca poner en evidencia en el presente trabajo de investigación.

A partir de una recopilación de datos de rocas volcánicas de composición félsica del Eoceno tardío-Oligoceno, que incluye información geográfica, geoquímica y mineralógica, se realizaron comparaciones entre las rocas reportadas en diversos trabajos geológicos, y las asociadas con cada una de las provincias magmáticas (SMO y RRG). De esta manera, mediante este trabajo de investigación, se identificaron en el estado de **Chihuahua**, a las unidades volcánicas félsicas del Paleógeno que exhiben características petrológicas distintas a las que presentan las rocas típicas de la SMO, y que fueron asociadas en este estudio al magmatismo del Rift del Río Grande.

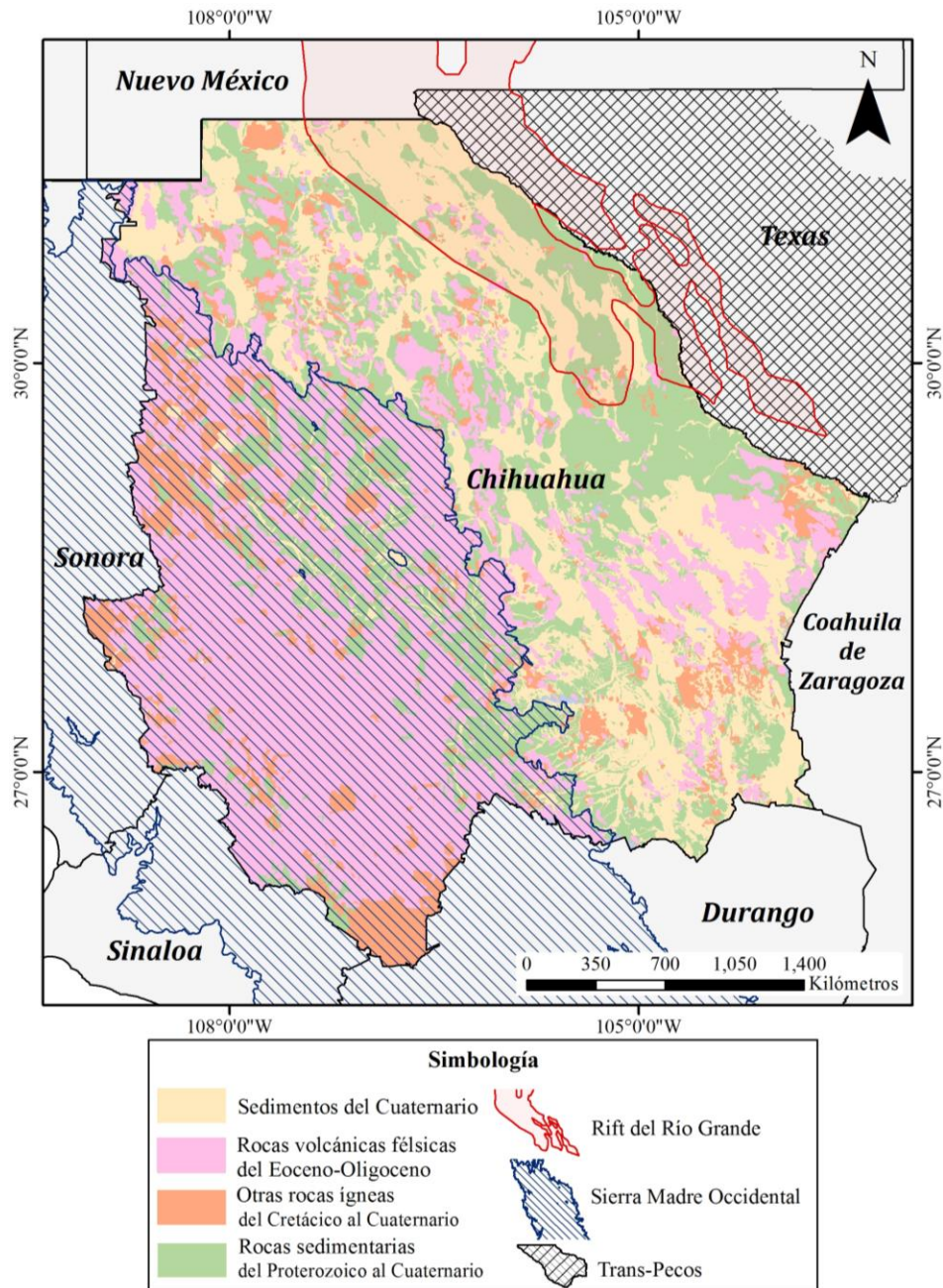


Figura 1. Mapa representativo de las rocas volcánicas de composición félsica de edad Eoceno-Oligoceno, en contraste con en el resto de las rocas ígneas presentes en el Estado de Chihuahua (de cualquier otra edad y composición). También se muestran las rocas sedimentarias desde el Proterozoico al Cuaternario y los sedimentos Cuaternarios, con el fin de ilustrar que el volcanismo félsico del Eoceno-Oligoceno representa gran proporción de la superficie del Estado. La cartografía de las litologías fue obtenida de las cartas geológicas en formato *shapefile*, a escala 1:250 000 recopiladas del GeoInfoMex ([Servicio Geológico Mexicano, 2022](#)), y modificadas para esta investigación. La provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental se obtuvo del Sitio del INEGI ([2022](#)). La delimitación del Rift del Río Grande es una modificación de [Villarreal-Fuentes et al. \(2016\)](#), donde se representa el límite espacial de los sedimentos Plio-Cuaternarios asociados a este Rift, digitalizado por [Arredondo-Contreras \(2022\)](#) para representar la extensión que de los productos asociados a esta provincia en Chihuahua o la morfología de cuencas asociadas a esta provincia magmática en Chihuahua. La delimitación de la Provincia del Trans-Pecos fue obtenida de [Cook \(2022\)](#).

I.1 Objetivo general

Evidenciar la Provincia Magmática del Rift del Río Grande en el estado de Chihuahua y sus diferencias petrológicas con el volcanismo félsico relacionado a la Sierra Madre Occidental.

I.2 Objetivos específicos

- Recopilar los datos geoquímicos, mineralógicos, geocronológicos y geográficos de las rocas volcánicas félsicas Eoceno tardío-Oligoceno del estado de Chihuahua, mediante la consulta de repositorios de acceso abierto (*open access*).
- Generar una base de datos con las muestras de rocas volcánicas félsicas del Eoceno tardío-Oligoceno obtenidos de las diferentes fuentes.
- Obtener artículos geológicos con muestras representativas de la Sierra Madre Occidental que cuenten con análisis mineralógicos y geoquímicos.
- Realizar diagramas que permitan conocer el comportamiento de los datos de rocas obtenidos, y comparar con el comportamiento de las muestras ejemplares de la Sierra Madre Occidental.
- Identificar en la base de datos, a las unidades que presenten características geoquímicas y mineralógicas relacionadas al Rift del Río Grande y diferenciarlas de las unidades asociadas a la Sierra Madre Occidental.
- Generar mapas que permitan evidenciar la distribución espacial de las dos provincias magmáticas y sus volcanismos asociados.

I.3 Zona de estudio

El área de estudio de la presente investigación se ubica en el noroeste de México y comprende a todo el estado de Chihuahua, el cual cuenta con un área aproximada de 247,455 km² (mayor ocupación territorial en el país) y colinda al norte con los Estados de la Unión Americana, específicamente con Nuevo México y Texas; al oeste con Sonora; al este con Coahuila y; finalmente, con los estados de Durango y Sinaloa al sur (Figura 2). Fisiográficamente se conforma por la Provincia de la Sierra Madre Occidental y por las Sierras y Llanuras del Norte.

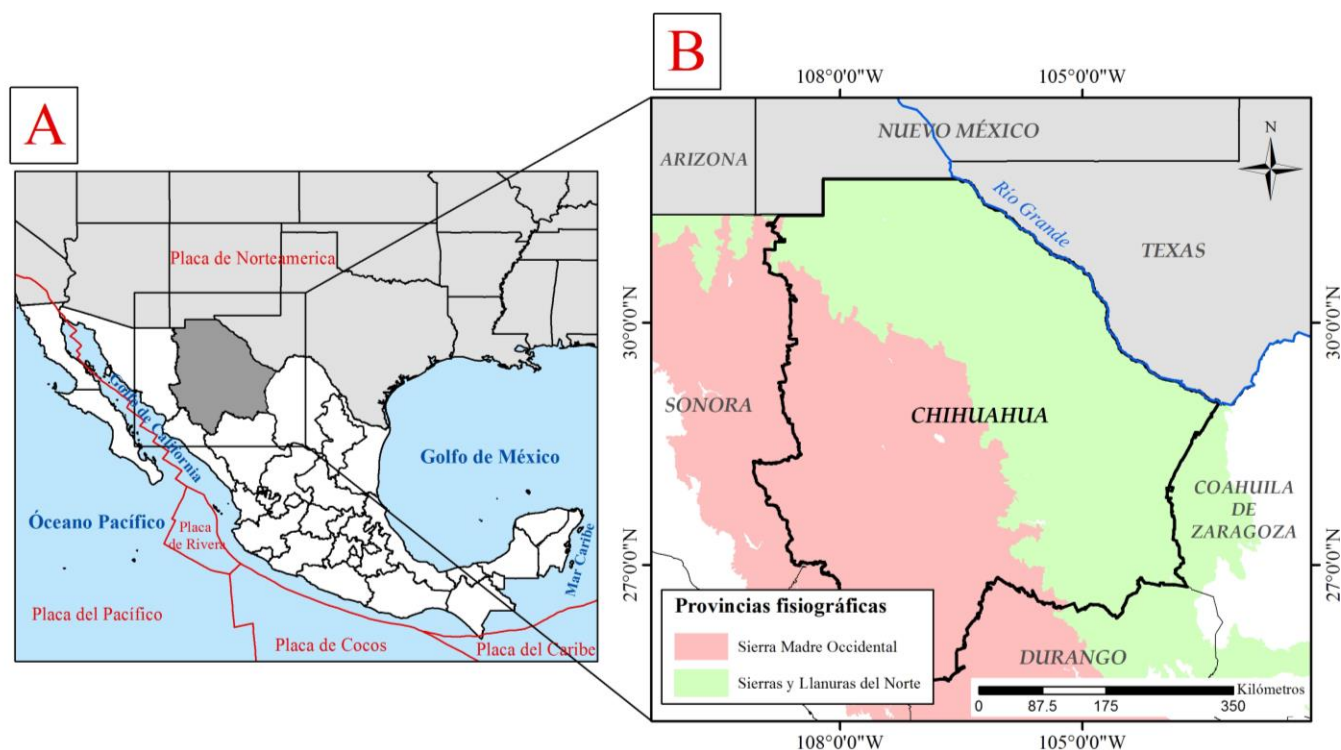


Figura 2. Mapa de localización del área de estudio. (A) Vista general de la ubicación del estado de Chihuahua en México; (B) Acercamiento al estado de Chihuahua, representando las provincias fisiográficas que lo componen, delimitadas por el INEGI (2022). Asimismo, se incluyen los nombres de los estados colindantes. Los Shapefiles de la división estatal de México y de los Estados Unidos de América se obtuvieron del Sitio EfrainMaps de Porto (2022).

II. CONTEXTO GEOLÓGICO

II.1 Provincia magmática de la Sierra Madre Occidental

El desarrollo del volcanismo de la Sierra Madre Occidental es en mayor parte, consecuencia de la actividad magmática del Cenozoico provocada por un evento tectónico de magnitud global, donde ocurrió la subducción de la placa de Farallón debajo de la placa Norte Americana. Este fenómeno afectó a gran parte del continente americano, en especial al oeste de México. Como consecuencia de lo anteriormente mencionado, se manifestaron varios episodios magmáticos que a través del tiempo produjeron diferentes unidades litológicas que forman actualmente a la Sierra Madre Occidental, que se considera como la provincia volcánica silícica más grande de Norteamérica (Bryan et al., 2002).

Ferrari et. al (2005), proponen que, considerando la actividad magmática asociada a la Sierra Madre Occidental, las unidades litológicas se pueden dividir a en tres grupos principales. Los primeros dos grupos son propuestos por McDowell y Keitzer (1977) citado en Ferrari et al. (2005) como El Complejo Volcánico Inferior (CVI) formado por rocas plutónicas y volcánicas de edad Cretácico Superior-Paleoceno y posteriormente en el Eoceno por rocas volcánicas andesíticas y dacítico-riolíticas en menor proporción; y el segundo grupo llamado el Supergrupo Volcánico Superior (SVS) compuesto por ignimbritas silícicas que corresponden al mayor volumen de rocas emplazados a lo largo de la SMO, durante dos pulsos principales, uno en el Oligoceno temprano y el otro en el Mioceno temprano. Por último, el tercer grupo se trata de las Andesitas tipo SCORBA (definidas por Cameron et al. (1989) en Ferrari, et al. (2005)), y caracterizadas por ser coladas que fueron extrusionadas después de cada pulso ignimbrítico.

En el estado de Chihuahua, el volcanismo félsico del Eoceno tardío-Oligoceno de la SMO es representado por rocas del CVI y del SVS. Donde en el primero, se formaron rocas de composición riolítica a partir de una actividad volcánica ignimbrítica que empezó a los 46 Ma y continuó hasta los 27 Ma con una intercalación de coladas masivas de composición intermedia a félsica McDowell y Mauger (1994) en Ferrari, et al. (2005). El SVS en Chihuahua, está representada por ignimbritas con edades K-Ar de ~33 a ~30 Ma reportadas por McDowell y Mauger (1994) citado en Ferrari, et al. (2005) donde al noroeste de Chihuahua en San Buenaventura se reporta que estas ignimbritas silícicas son intercaladas

con derrames dacítico y riolíticos, y en menor proporción basálticos (Albrecht y Goldstein, 2000, en Ferrari et al., 2005).

Estas unidades geológicas, en especial las del SVS, son consideradas de afinidad calcoalcalina por Cameron et al. (1980), debido a los bajos valores de Fe en relación con el Mg. Además, Cameron et al. (1980), mencionan que las unidades riolíticas calcoalcalinas de la SMO se dividen en dos tipos, las de K moderado, que mineralógicamente se caracterizan por la asociación de fenocristales de clinopiroxeno > ortopiroxeno ambos ricos en Mg y fenocristales de plagioclasas, donde sólo los individuos con contenidos de sílice mayores a 75% contienen biotita y hornblenda. Mientras que el segundo tipo se trata de rocas de K alto, que presentan como mineralogía, tanto en riolitas, como en dacitas, fenocristales de feldespatos potásico, anfíbol, biotita y dos piroxenos.

II.2 Provincia magmática del Rift del Río Grande

El Rift del Río Grande (RRG) está localizado en el suroeste de los Estados Unidos de América, y morfológicamente está reportado en una extensión ~1000 km, ensanchándose desde Leadville, Colorado (Cipar et al., 2020), pasando por Nuevo México, hasta el estado de Texas en la localidad El Presidio, que se encuentra en el límite con Chihuahua, México (Gibson et al., 1992).

El volcanismo félsico del Rift del Río Grande, para la porción sur del norte de Colorado y al norte de Nuevo México, es descrito por Elston y Bornhorst (1979), como una etapa extensiva manifestada por la presencia de riolitas ricas en sílice con edades que varían de los 32 Ma a los 17 Ma, donde la geoquímica indica proporciones bajas de CaO, Al₂O₃ y MgO y mayor concentración de Na₂O y SiO₂ en comparación con otras riolitas calcoalcalinas más antiguas (40 Ma) descritas en el mismo estudio. El contenido de Sr y Pb para estas riolitas ricas en sílice es bajo.

En Texas, la evidencia de la ocurrencia del volcanismo del RRG es asociado genéticamente a la Provincia Magmática Trans-Pecos (PMTP; Barker et al., 1979), la cual es definida como una provincia magmática alcalina donde coexisten rocas desde subsaturadas a sobresaturadas en sílice. La PMTP es dividida en dos regiones, una Occidental donde se tienen dominio de rocas metaluminosas y una segunda llamada Oriental con volcanismo alcalino dominante (Barker et al., 1977). Ambos tipos de magmatismo son descritos, por

Parker y Hederson (2021) a través de un estudio de las unidades de la Caldera Paradise Mountain, como una evidencia de la transición del magmatismo alcalino a metaluminoso-hiperaluminoso. La fase de volcanismo félsico asociada a esta provincia es representada por rocas que van desde fonolitas, traquitas hasta riolitas y, comenzó en la región de *Davis Mountains* a los 37 Ma continuando hasta los límites con México alrededor de los 30 Ma (Parker y Hederson, 2021). Los elementos traza normalizados presentan anomalías negativas en Ba, Sr, P, y Ti. En cuanto a la concentración de tierras raras, estas rocas normalizadas con condrita presentan un enriquecimiento de LREE, patrones planos en los valores de HREE y anomalías fuertemente negativas en Eu (Parker y Hederson, 2021).

II.3 Registro del volcanismo del Rift del Río Grande en Chihuahua

Cameron et al. (1980) habla sobre la existencia de otro grupo de riolitas que genéticamente se diferencian de las típicas riolitas calcoalcalinas de la SMO, y que son contemporáneas entre sí. Estas rocas se distribuyen sobre la provincia del *Basin and Range*, al este del altiplano ignimbrítico de la SMO y las describe como un conjunto riolítico de ferroaugita, caracterizada por la presencia de clinopiroxeno rico en Fe (augita), fayalita y como feldespato característico la variedad sanidina. Este grupo riolítico, presenta proporciones molares de $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ que varían en un rango de 0.89 a 1.03, lo que es significativamente diferente a la proporción en las riolitas calcoalcalinas, que suelen tener valores < 0.9 . Mientras que el contenido de Y, Zr y Pb es mayor que en las riolitas calcoalcalinas, en cambio, estas últimas poseen mayores valores de Sr. Bajo esas características (Tabla 1), Cameron et al. (1980) establece una relación entre las riolitas de ferroaugita con las rocas alcalinas silícicas del Terciario medio desarrolladas en el oeste de Texas, que anteriormente fueron descritas como parte de la provincia volcánica del Trans-Pecos (Parker y Hederson, 2021).

	Riolitas de ferroaugita	Riolitas calcoalcalinas
$(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.89 a 1.03	< 0.9
Zr y Pb	Mayor contenido	Menor contenido
Sr (ppm)	< 20	20-400
Y (ppm)	> 50	10-50

Tabla 1. Comparación entre riolitas de ferroaugita y riolitas calcoalcalinas realizada según lo reportado por Cameron et al. (1980). Los valores de Y y Sr corresponden a rocas con rango de 65-75% de Si_2O_3 .

Por último, [Arredondo-Contreras \(2023\)](#) describe a una serie de rocas de afinidad hiperalcalina de edades restringidas entre 38-23 Ma, localizadas al este del estado de Chihuahua y las relaciona petrogenéticamente a una migración al oeste del Volcanismo del Rift del Río Grande.

III.- METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se basó en la recopilación de datos de las muestras de rocas volcánicas de composición félsica con edades de 38-23 Ma del estado de Chihuahua, que pueden contener tanto información de su composición mineralógica, como información geoquímica de elementos mayores, traza y REE, con su respectivo dato de ubicación (coordenadas).

Para almacenar, ordenar, depurar, procesar y visualizar los datos obtenidos se utilizaron distintos paquetes informáticos:

a) En el programa Microsoft Excel ([Microsoft 365, 2021](#)), donde también se agregaron columnas de información complementaria de las muestras, se hicieron modificaciones para homogenizar los datos, ya que al ser de distintas fuentes se tenía una importante variación en la información proporcionada, por lo que mediante el uso de filtros y otras opciones que ofrece el programa, se facilitó el manejo de los datos. Además, esta aplicación permitió realizar una gran cantidad de cálculos de una forma rápida y segura.

b) Se utilizó el programa ArcGIS 10.5 ([ESRI, 2016](#)) para la elaboración de los mapas representativos de este estudio, y para trabajar sobre la distribución geográfica asociada al comportamiento petrológico de los datos.

c) Para el desarrollo de los diagramas petrológicos y petrogenéticos se utilizó el software IGPET ([Carr y Gazel, 2017](#)), que permite introducir mediante una base de datos la información geoquímica de elementos mayores y traza de rocas ígneas, así como sus coordenadas, cálculos y otros índices, para graficar y observar el comportamiento de los datos en distintos diagramas. Esos resultados fueron necesarios para realizar las interpretaciones que permitieron llegar al objetivo de la temática.

III.1 Recopilación de datos

Los datos recopilados se obtuvieron de diferentes fuentes bajo sitios de acceso abierto (*open access*) mencionados a continuación:

1. Servicio Geológico Mexicano (SGM).
 - Se consultó la plataforma GeoInfoMex ([Servicio Geológico Mexicano, 2022](#)), de donde fue posible recuperar y descargar los datos geocronológicos en formato

shapefile, que componen al estado de Chihuahua. Posteriormente, se realizó una discriminación de estos datos en base al tipo de roca y a la edad, con el fin de conservar solamente las muestras de volcánicas del Eoceno-Oligoceno.

- Se obtuvo una base de datos recopilada a partir de la literatura con análisis geoquímicos e información petrológica de rocas ígneas del estado de Chihuahua. De esta recopilación, se seleccionaron las rocas de edades del Eoceno tardío-Oligoceno.
- Se recopilaron datos geoquímicos y petrográficos de una serie de muestras recolectadas en campo por el Dr. Jesús R Vidal-Solano en colaboración con el SGM, en el marco del proyecto. “El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE?”, bajo el cual, se desarrolla la presente investigación.
- Por último, se consultaron los informes técnicos de las cartas geológico-mineras del [Servicio Geológico Mexicano \(2022\)](#), escala 1:50,000, seleccionando las zonas de interés para recopilar los datos de muestras de rocas volcánicas félsicas que cumplieron con la edad establecida. Los informes de donde se obtuvieron datos fueron de las cartas “Trancas H13-C58” ([Luévano et al., 2019](#)), “Chorreras H13-C59” ([Herrera y Hernández, 2002](#)), “La Coyota H13-D71” ([Hernández et al., 2003](#)) y “Álamos de San Antonio H13-D54” ([Arredondo y Guzmán, 2008](#)).

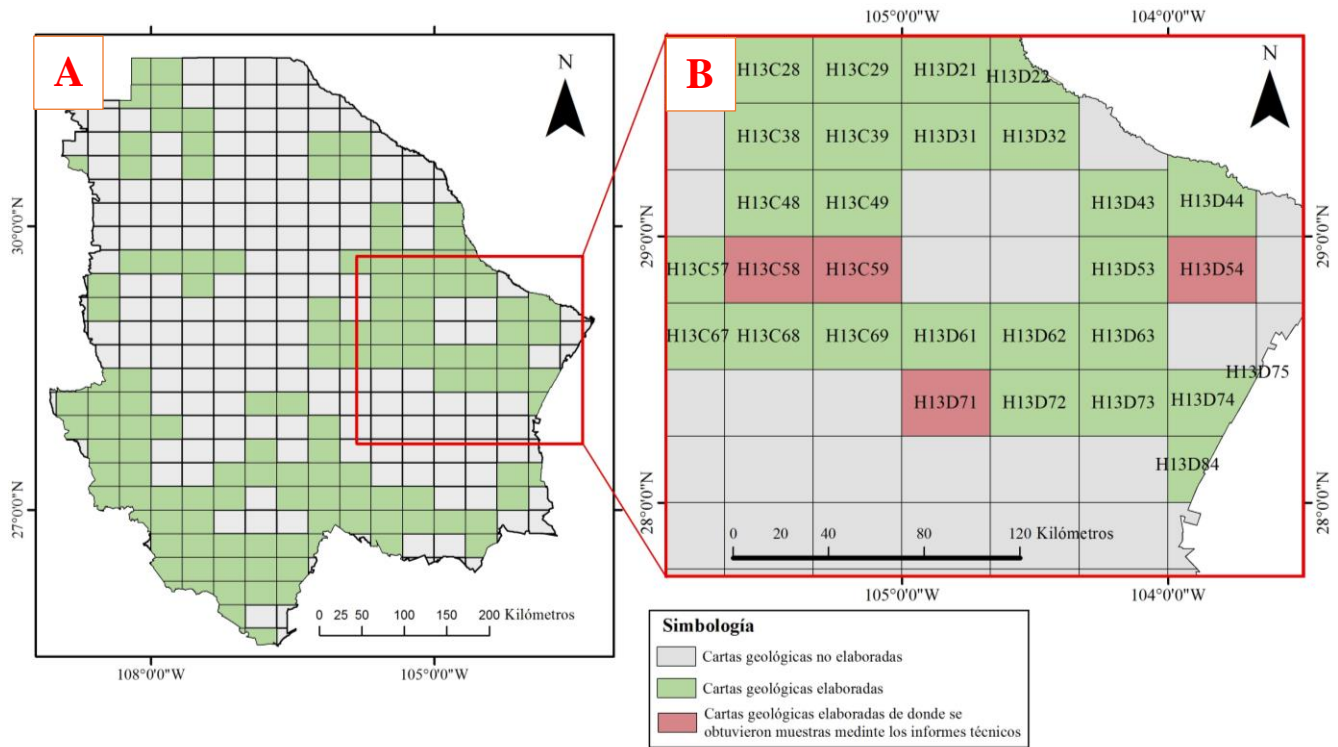


Figura 3. Mapa de avance de las cartas geológico-mineras realizadas por el *Servicio Geológico Mexicano* (2022). (A) Estado de Chihuahua indicado el total de cartas geológico-mineras escala 1:50,000 elaboradas (color verde) hasta la actualidad; (B) Acercamiento a las cartas geológico-mineras 1:50,000 de las cuales se consultaron los informes técnicos para obtener muestras de rocas félsicas del Eoceno tardío-Oligoceno (color rosa).

2. The North American Volcanic and Intrusive Rock Database (NAVDAT)

La plataforma [NAVDAT \(2014\)](#) es una base de datos de Norte América, que cuenta con alrededor de 64,985 muestras de rocas volcánicas e intrusivas. Esta fue utilizada para la búsqueda y descarga de los datos de las muestras de rocas ígneas que tuvieran la edad de interés y que estuvieran restringidas al estado de Chihuahua ([Figura 4](#)).

The screenshot shows the NAVDAT website interface. At the top, there is a header with the NAVDAT logo and the text "THE WESTERN NORTH AMERICAN VOLCANIC AND INTRUSIVE ROCK DATABASE". Below the header is a navigation menu with links: Home, Search Database, Data Files, Animations, Educational Resources, Glossary, and FAQ. On the left side, there are buttons for "Login" and "Get Account", and a text box explaining the benefits of logging in. The main content area is a search filter table with columns for filter name, filter value, and filter status. The filters are: Geographic Bounding Box (no constraints set), State, Territory, Province (CHIHUAHUA), Volcanic Field (no constraints set), Age (23 to 38 Ma - tight search), Chemistry (no constraints set), Rock Type (no constraints set), Reference, Keyword (no constraints set), Modal Data (no constraints set), and Renormalize Major Elements (Navdat Subset: Major_Elements_as_Reported). Below the table, it shows "319 samples" and two buttons: "GO TO DATA" and "MORE OPTIONS".

SET	Geographic Bounding Box	no constraints set
SET CLEAR	State, Territory, Province	CHIHUAHUA
SET	Volcanic Field	no constraints set
SET CLEAR	Age	23 to 38 Ma - tight search
SET	Chemistry	no constraints set
SET	Rock Type	no constraints set
SET	Reference, Keyword	no constraints set
SET	Modal Data	no constraints set
SET	Renormalize Major Elements	Navdat Subset: Major_Elements_as_Reported

319 samples

GO TO DATA MORE OPTIONS

Figura 4. Sitio web de NAVDAT (2014), mostrando las opciones de descarga que ofrece para los datos, en este caso se seleccionó el estado de Chihuahua y muestras del rango de edad de 38 a 23 millones de años.

3. *Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents (GEOROC)*

Por otro lado, se utilizó la base de datos del “[GEOROC](#)” (Lehnertes et al., 2000), donde también se cuenta con una recopilación de muestras, pero en este caso, de origen ígneo y metamórfico reportadas en todo el planeta (Figura 5). De esta base, se descargaron las rocas de origen volcánico y se conservaron las que se localizan dentro del territorio de Chihuahua y que tienen edades de 38-23 Ma.



Figura 5. Sitio web GEOROC (Lehnertes et al., 2000), mostrando las opciones para la descarga de los datos. (A) Se muestra el área que se seleccionó para descargar los datos; (B) Lista de los criterios que se pueden tomar en cuenta para buscar datos; y (C) Opciones dentro del criterio de tipo de roca, donde en este caso se eligieron las rocas volcánicas.

4. Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources

Otra fuente de consulta fue una base de datos del sitio “[Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian](#)” (Shackley, 2021), donde se cuenta con una recopilación de muestras asociadas a yacimientos de obsidiana arqueológica. En este caso, se conservaron los datos de los yacimientos que geográficamente se reportan dentro del estado de Chihuahua y que pertenecen a los periodos de edad establecidos para estudio en este trabajo. Las localidades resultantes de las cuales se obtuvieron las muestras son nombradas “Sierra Fresnal”, “Lago Barreal” y “Los Jagueyes” (Figura 6).

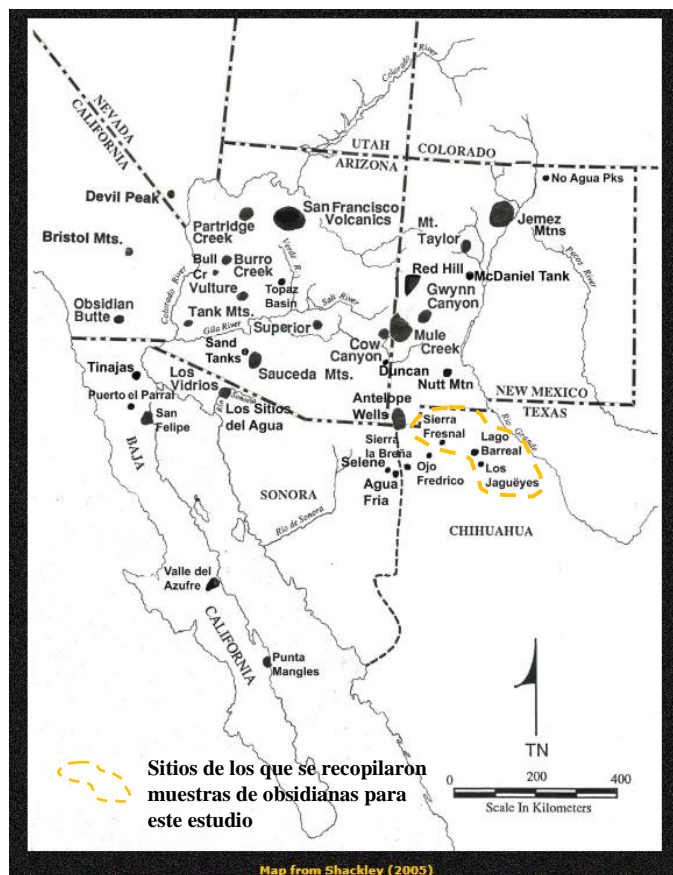


Figura 6. Mapa interactivo del sitio web “Catalog of the Greater American Southwest archaeological obsidian sources” (Shackley, 2021), donde se muestran las distintas localidades donde se reporta presencia de obsidianas en el suroeste de los Estados Unidos Americano y noroeste de México. En este caso se recolectaron las muestras del estado de Chihuahua, que delimitan con línea amarilla discontinua.

III.2 Procesamiento de datos

Una vez recopiladas las bases de datos obtenidas de cada sitio, se elaboró un archivo Excel donde se incluyeron los encabezados de mayor importancia que contienen las bases de datos, como lo son el nombre de la muestra, nombre de la roca, coordenadas, tipo de roca, las columnas de elementos mayores, traza y REE, y así junto con toda la información general que es de importancia para la caracterización de las muestras. En esa base de Excel se introdujo la información de cada una de las fuentes consultadas, acomodando los datos según el orden de las columnas de la nueva base generada.

Todos los datos de ubicación de las muestras se introdujeron en ArcGIS para observar su distribución espacial y excluir a aquellos datos de muestras que salen del límite estatal de Chihuahua.

Lo siguiente que se realizó fue la normalización en base anhidra de los elementos mayores, para todas las muestras que cuentan con estos datos. Entonces, los valores originales de elementos mayores se sustituyeron por los recalculados, esto es necesario para tener mayor representatividad de la composición primaria de las rocas. Una vez normalizados los elementos mayores, se utilizó el software IGPET (Carr y Gazel, 2017), para calcular la norma CIPW de las muestras.

Es así como se obtuvo una sola base general del estado de Chihuahua con rocas ígneas del rango de edad Eoceno tardío-Oligoceno, con la cual se trabajó para llegar al objetivo de esta investigación.

III.2.1 Clasificación petrológica de las muestras

Con la finalidad de establecer de forma homogénea una clasificación petrológica y una nomenclatura formal para todas las muestras recopiladas, se elaboró un protocolo de trabajo donde se consideró lo siguiente:

- Para las rocas volcánicas que contienen información de elementos mayores, se estableció la clasificación petrológica formal utilizando el diagrama *Total Alkali-Silica (TAS)* propuesto por Le Bas et al. (1986), según la *Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (IUGS)*.
- Para las muestras volcánicas que no contienen datos de elementos mayores, pero sí contienen de los elementos traza de Zr, Ti, Nb, Y, se utilizó el diagrama *Rock Types “Zr/Ti vs Nb/Y”* de Pearce (1996) asignándoles una clasificación.
- En el caso de las rocas plutónicas, no se estableció una clasificación petrológica formal, pero sí se definió la afinidad composicional de acuerdo con el campo en el que resultaron al caer en el diagrama TAS, asignando una nomenclatura volcánica análoga (e.g. roca de composición traquítica).

Por último, para todas las muestras que no cuentan con información geoquímica, no fue posible establecer una clasificación petrológica formal.

III.2.2 Identificación y selección de rocas félsicas

Las rocas de importancia para el desarrollo de esta investigación son las rocas de composición félsica. Por lo tanto, se realizó una selección para conservar solo muestras que tuvieran esta característica y para esto se siguieron varios procedimientos dado que, no todas las muestras cuentan con la misma información geoquímica y por esta razón, no se pudo utilizar el mismo criterio para definir la composición. A continuación, se describen las formas en que se clasificaron las rocas para determinar su composición félsica.

- Para aquellas muestras que contienen elementos mayores se determinó la composición en base al contenido en sílice, bajo los siguientes rangos propuestos por [Williams, Turner y Gilbert \(1954\)](#):
 1. Muestras con SiO₂ en un rango de 42-52% son clasificadas como máficas.
 2. Muestras con SiO₂ de 52-63% son clasificadas como intermedias.
 3. Muestras con valores mayores a 63% de SiO₂, se clasificaron como félsicas.
- Las rocas clasificadas mediante el diagrama *Rock Types* “Zr/Ti vs Nb/Y” de [Pearce \(1996\)](#), fueron distinguidas entre félsicas, intermedias y máficas, según lo que propone dicho diagrama.
- Para las muestras restantes, que no contienen datos geoquímicos, se estableció la composición en base a la nomenclatura o composición aportada por la fuente original. Sin embargo, en algunos casos se contó con información acerca de su composición mineralógica que permitió asignarles de forma general una clasificación en el análisis de la información.

Después de definir una composición para todas las muestras, se seleccionaron solamente las félsicas de origen volcánico, ya que son el objetivo/clave para el desarrollo de este tema. Fue con esta nueva base de datos de rocas volcánicas de edad Eoceno tardío-Oligoceno de composición félsica con la que se trabajó para el desarrollo de esta investigación.

III.2.3 Identificación de rocas hiperalcalinas

A continuación, se describen los rasgos petrológicos utilizados para identificar la afinidad hiperalcalina en las rocas félsicas de la base de datos, las cuales fueron por medio de:

- **Cálculo del índice de hiperalcalinidad:** Para las muestras que contienen elementos mayores, se utilizó el índice de hiperalcalinidad de [Shand \(1927\)](#), que, con base en la proporción molar entre alúmina y álcalis, clasifica a las rocas como hiperalcalinas cuando $Al_2O_3/Na_2O+K_2O < 1$, metaluminosas cuando $Al_2O_3/Na_2O+K_2O > 1$ y $Al/Na_2O+K_2O+CaO < 1$ y como hiperaluminosas cuando $Al/Na_2O/Na_2O+K_2O+CaO > 1$. Se verificó que los cálculos estuvieran correctos al introducir las muestras en el diagrama *Shand'S index* de [Maniar and Piccoli \(1989\)](#).
- **Uso del diagrama de Rock Types:** Otra forma identificar a las muestras con carácter hiperalcalino, fue mediante los diagramas *Rock Type* de [Pearce \(1996\)](#) y el de [Winchester and Floyd \(1977\)](#). Donde en cada uno se muestra un campo asociado a este tipo de rocas.
- **Identificación en base a la asociación mineralógica:** Ciertas muestras que cuentan con información petrográfica se clasificaron como hiperalcalinas considerando una asociación mineralógica típica para este tipo de rocas.

III.2.4 Caracterización mediante diagramas petrogenéticos

Se utilizaron diagramas petrogenéticos para clasificar a las muestras, considerando los datos que contenían la información geoquímica necesaria para cada diagrama. Los cuales, permitieron hacer interpretaciones sobre el comportamiento de los datos para el objetivo de esta investigación. Los diagramas utilizados fueron:

- **Diagrama discriminador de granitos Fe* vs SiO₂ de [Frost et al. \(2008\)](#):** Que propone que se pueden distinguir a las rocas de una serie toleítica de las de una serie calcoalcalina, en base a la relación de Fe* ($FeOt/(FeOt+MgO)$) contra el porcentaje de SiO₂ en las muestras.
- **Diagrama discriminador de granitos Rb vs Y+Nb de [Pearce et al. \(1984\)](#):** Permite la clasificación de las rocas félsicas en función de su contexto tectónico, distinguiendo

entre Granitos Intraplaca (*WPG*), Granitos de Arco Volcánico (*VAG*), Granitos de Dorsal Oceánica (*ORG*) y Granitos de Contexto Orogénico de Colisión (*syn-COLG*). Estas clasificaciones son establecidas en base a la comparación del contenido en Rb contra la suma de Nb+Y

- **R1R2 De la Roche et al (1980):** Este diagrama permite observar las tendencias que pueden seguir las diferentes series de rocas. Donde cada tendencia representa a una serie magmática distinta, de las cuales se distinguen las series calcoalcalinas, transicional, alcalina y, además, a las rocas hiperalcalinas.

A la base de datos se le agregaron columnas que especifican en qué campo de cada diagrama petrogenético mencionado se asocian las rocas.

III.2.5 Elaboración de mapas de distribución de datos

Finalmente, con los resultados obtenidos en los diferentes diagramas, se elaboraron mapas de distribución geográfica, que permitieron establecer la relación entre las características de las rocas y su distribución espacial. Así como delimitar grupos de muestras que presentaran características petrológicas similares y que estuvieran relacionadas espacialmente.

III.2.6 Problemas analíticos involucrados en la base de datos

El trabajo de investigación realizado mediante la recopilación de la base de datos permite realizar correlaciones entre el volcanismo reportado en diferentes regiones. Sin embargo, este método debe de realizarse con cuidado, debido al grado de desconocimiento que se tiene sobre las muestras, ya que son importantes las observaciones tanto en campo como las texturas que le dan identidad a las rocas. En el desarrollo de esta investigación se presentaron varias limitantes asociadas a la información que contienen las muestras.

Información geoquímica: No todas las muestras obtenidas de rocas volcánicas félsicas contenían información geoquímica, por lo que no se pudieron utilizar para la caracterización de las provincias. Algunas muestras que contienen elementos mayores no

presentan elementos traza. Otras muestras presentaban elementos traza, pero no elementos mayores.

Información geocronológica: Hubo datos de rocas que están reportadas en las épocas del Eoceno-Oligoceno, pero que no cuentan con una datación exacta, para este tipo de muestras no se pudo realizar análisis en cuanto a la edad, considerando que esto podría afectar a la interpretación de la evolución del volcanismo.

Distribución de los datos: La distribución de las muestras está restringida al registro geológico que se tiene para el estado de Chihuahua, mostrando zonas donde se tiene una mayor acumulación de datos y otras que tienen pocas o ninguna muestra reportada. Esto afecta a la representatividad espacial del volcanismo asociado a ambos contextos tectónico, ya que hay mucho territorio del estado que aún no ha sido explorado. Una mejor distribución de muestras ayudaría a definir de manera más precisa la delimitación del volcanismo del Rift del Río Grande en Chihuahua.

Desconocimiento del estado de las muestras: Es posible que algunas muestras se encuentren alteradas y no sean representativas de la composición primaria. En muchos casos no se especifica sobre el tipo de erupción que originó a la roca, dificultando la distinción entre rocas lávicas y piroclásticas. En este estudio, las rocas que no especifican ser piroclásticas se consideraron como lávicas. Además, en la mayoría de los casos no se cuenta con descripción petrográfica. La ausencia de esta información causa incertidumbre entre los análisis y dificulta las interpretaciones.

IV. RESULTADOS

IV.1. Clasificación petrológica de las rocas félsicas

Como resultado del procedimiento descrito para la depuración de los datos, se obtuvo una base con 756 muestras de rocas volcánicas del estado de Chihuahua con edades Eoceno tardío-Oligoceno. De la cantidad antes mencionada, 304 cuentan con información de elementos mayores. Según el porcentaje de contenido en sílice se clasificaron como máficas, intermedias y félsicas (Figura 7). Según esta base de datos, el volcanismo félsico es el dominante en Chihuahua, representando a 66.7% de las rocas de esta edad (Eoceno tardío-Oligoceno). Seguido de las rocas intermedias que representa a un 27.2 % y el porcentaje de rocas de composición máfica contempla sólo al 6.1 % de las muestras (Figura 8)

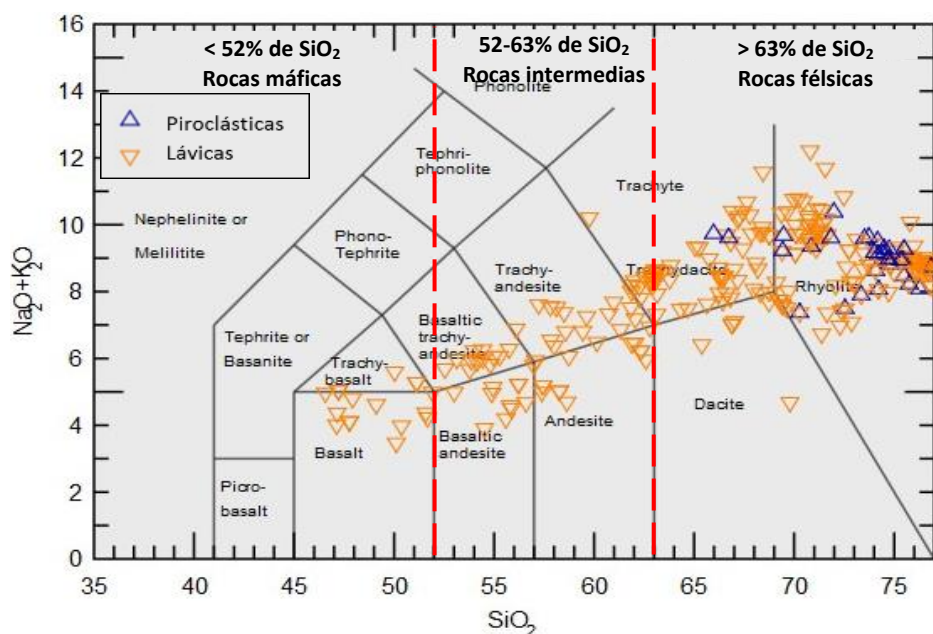


Figura 7. Diagrama de clasificación química TAS propuesto por Le Bas et al. (1986), donde se graficaron las muestras de todas las composiciones diferenciando entre lávicas y piroclásticas para distinguir en función del contenido en sílice a las rocas félsicas de los datos recopilados.

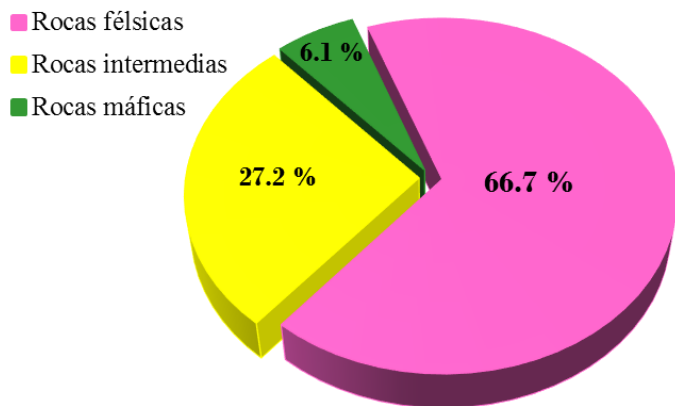


Figura 8. Gráfico del tipo "pastel" representando el porcentaje de rocas máficas, intermedias y félsicas de origen volcánico y de edad Eoceno tardío-Oligoceno recopiladas en este estudio para el estado de Chihuahua.

En cuanto al tipo de volcanismo dominante, las rocas lávicas son las que predominan por encima de las piroclásticas (Figura 7). Según lo establecido en el diagrama TAS por la Subcomisión para la Sistemática de Rocas Ígneas de la IUGS, al clasificar a las rocas félsicas que contienen información de elementos mayores, se obtuvieron como resultado cuatro tipos de rocas diferentes (Figura 9), donde la presencia de riolitas es la dominante, teniendo en total 158 ejemplares de las cuales 128 son lávicas y, seguido de las 37 muestras que resultaron ser traquitas donde 35 son lávicas y sólo 2 de ellas son piroclásticas. También se cuenta con 13 dacitas que son lávicas, y, por último, con menos abundancia, las traquidacitas, lávicas todas, que constituyen a 8 de las muestras, según esta clasificación (Figura 10).

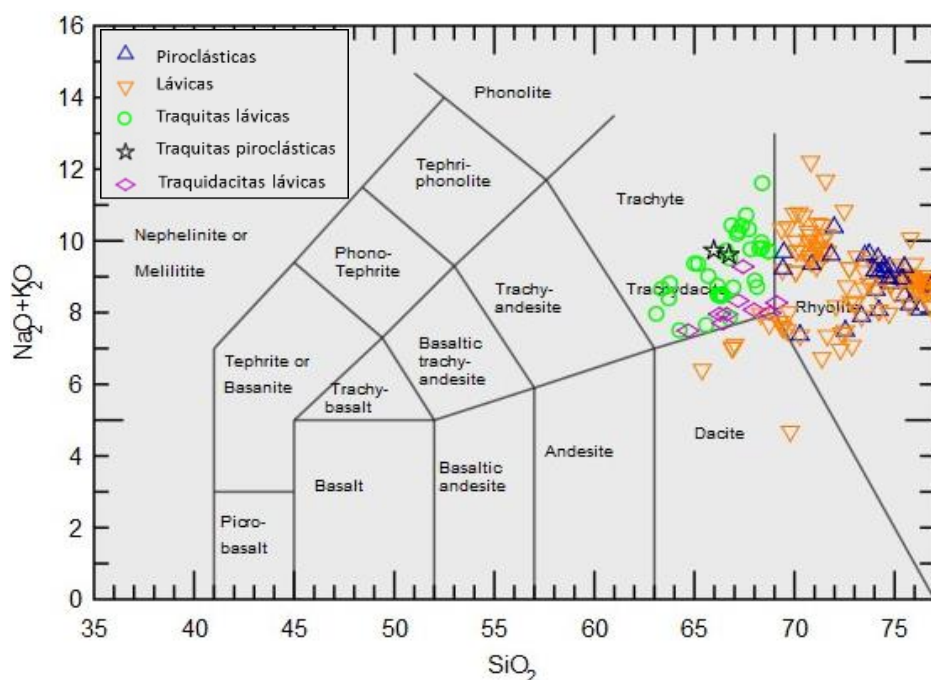


Figura 9. Diagrama de clasificación química TAS propuesto por Le Bas et al. (1986), donde se graficaron las muestras de composición félsica, distinguiendo a las rocas lávicas de las piroclásticas. Las traquidacitas y traquitas se diferenciaron entre sí utilizando la siguiente regla; si $q > 20$ se trata de traquidacitas, si $q < 20$ la roca se clasifica como traquita, donde $q = 100 * (Q / (Q + an + ab + or))$.

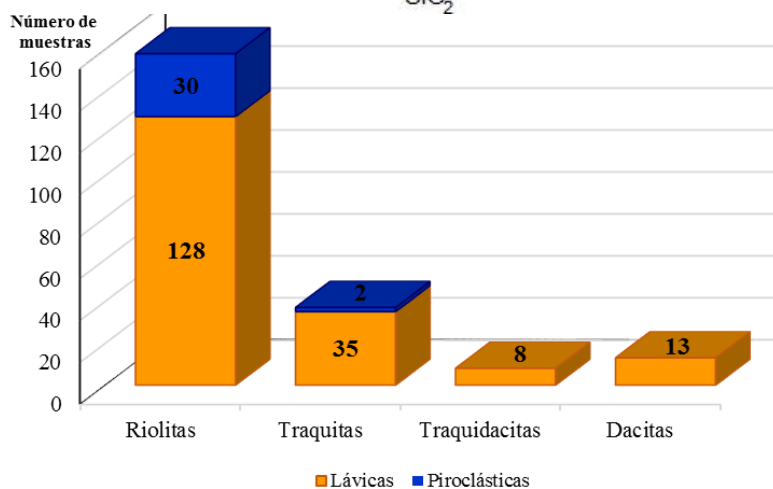


Figura 10. Gráfica de columnas que muestra las cantidades obtenidas de cada tipo de roca al clasificarlas mediante el diagrama TAS. Distinguiendo también a las rocas lávicas de las piroclásticas.

Por otro lado, las muestras que no cuentan con análisis de elementos mayores, pero sí con la información de los elementos traza Rb, Ti, Zr y Nb, como para el caso de las muestras recopiladas del sitio web de las fuentes de obsidiana del Gran SW Americano (Shackley, 2021), al graficarlas en el diagrama propuesto por Pearce (1996), para definir tipos de rocas volcánicas, se clasificaron como riolitas alcalinas (17 muestras), y como riolitas y dacitas (2 muestras; Figura 12). Estas muestras de obsidianas provienen de 3 localidades distintas, nombradas “Lago el Barreal”, “Los Jagueyes” y “Sierra Fresnal”. Las dos muestras que corresponden a Sierra Fresnal a diferencia de las anteriores, sí contienen información de elementos mayores. Por lo tanto, fue posible también clasificarlas mediante el diagrama TAS, donde también se obtuvo como resultado que se trata de Riolitas.

IV.2 Determinación geoquímica y mineralógica de las rocas hiperalcalinas

Mediante el diagrama del *índice de Shand* propuesto por Maniar-Piccoli (1989), se identificaron 17 muestras con rasgos geoquímicos hiperalcalinos donde todas resultaron ser riolitas, a excepción de una muestra que se clasificó como traquita (Figura 11A). Por otro lado, 92 muestras mostraron rasgos de metaluminosas (Figura 11B), y 107 muestras mostraron un carácter hiperaluminoso (Figura 11C). En ambos casos se tienen ejemplares de los cuatro tipos de rocas (riolitas, traquitas, traquidacitas y dacitas).

Se utilizó el diagrama propuesto por Pearce (1996), que contempla una distinción de las riolitas convencionales, para definir la naturaleza geoquímica de las obsidianas de las localidades Los Jagueyes y Lago Barreal, debido a que, al no contar con elementos mayores, con este diagrama se determinó que se trata de especímenes alcalinos (probablemente hiperalcalinos; Figura 12). Por otra parte, en el caso de las obsidianas provenientes de Sierra Fresnal, no correspondieron con el campo de las riolitas alcalinas, pero al contar con elementos mayores, se les calculó el *índice de Shand* y mediante este criterio resultaron ser hiperalcalinas (Figura 11A). De esta forma, se obtuvo como resultado que las 19 muestras de las obsidianas son hiperalcalinas.

Por último, otras 7 muestras más fueron identificadas como de tipo hiperalcalino, por su asociación mineral obtenida mediante estudios petrográficos, en donde se reporta la presencia de feldespatos alcalinos sódicos de tipo sanidina, clinopiroxeno de Fe y Na, llamado

aegirina, olivino de la variedad fayalita, y en algunos casos la presencia de riebeckita. Esta asociación mineralógica anhidra es característica de las rocas hipercalinas (Macdonald et al., 2002).

Mediante los criterios explicados anteriormente se obtuvieron en total, 41 rocas hipercalinas. La caracterización de estas muestras es descrita a detalle por Arredondo-Contreras (2023).

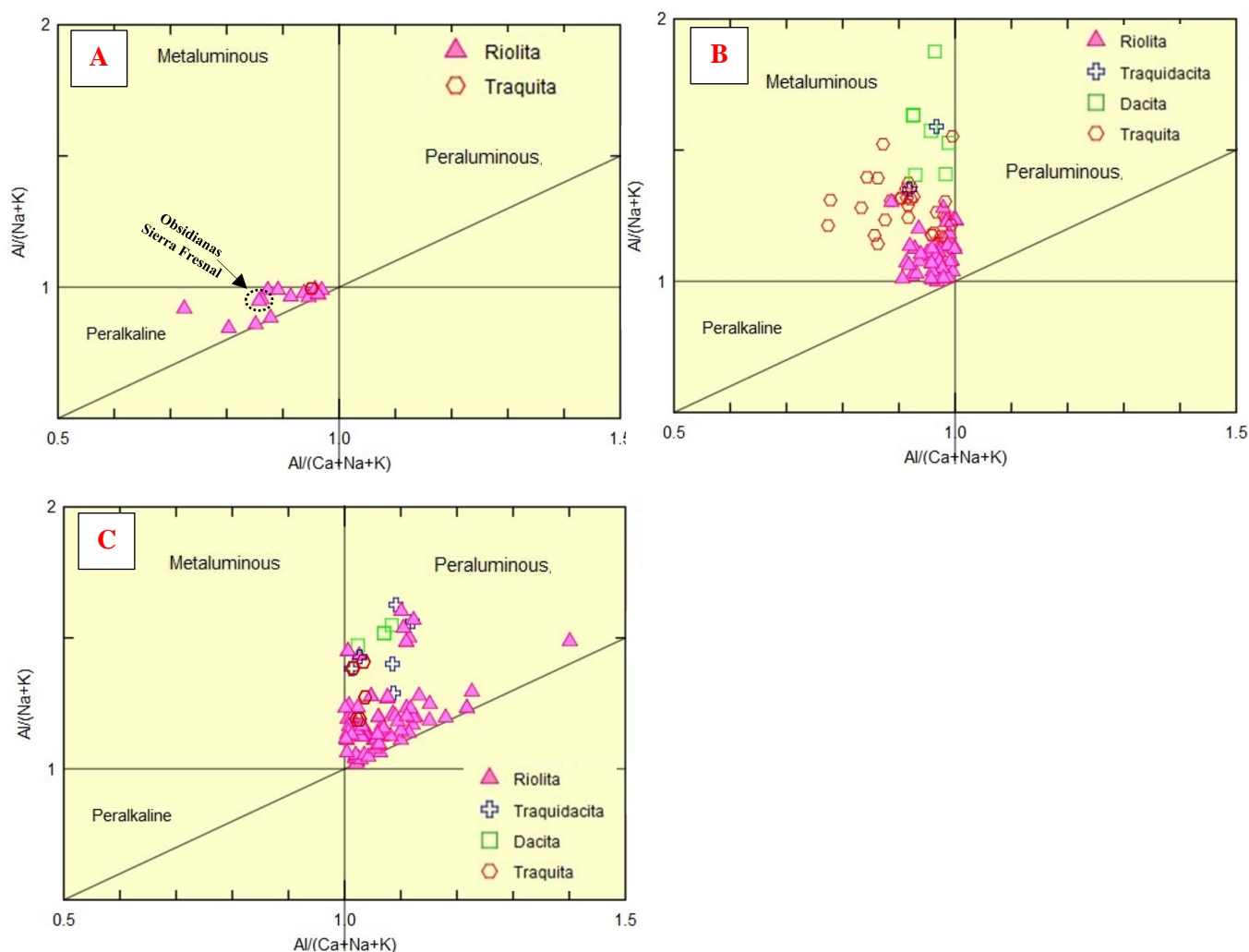


Figura 11. Diagrama de índice de Shand propuesto por Maniar-Piccoli (1989), con los datos distinguidos según el tipo de roca obtenido mediante el diagrama TAS (Figura 9). (A) Rocas clasificadas hipercalinas, las obsidias de Sierra Fresnal están señaladas con línea discontinua; (B) Muestras clasificadas como metaluminosas; (C) Contiene a las dacitas a las rocas hiperaluminosas. Los términos en inglés peraluminous y peralkaline son equivalentes a hiperaluminoso e hipercalino respectivamente.

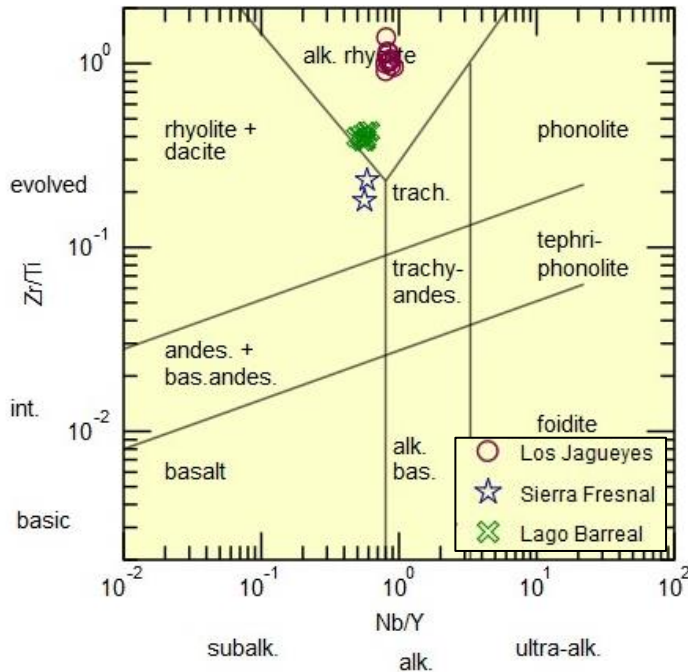


Figura 12. Diagrama de clasificación de rocas de Pearce (1996) donde se muestran las obsidianas identificadas según la localidad de dónde se obtuvieron.

IV.3 Caracterización geoquímica de las rocas félsicas

En base a la proporción de Fe total con respecto al MgO del diagrama propuesto por Frost et al. (2008) las muestras félsicas de Chihuahua se distribuyen principalmente en el campo ferroso (“ferroan”, 145 muestras), que regularmente es asociado a rocas de la serie toleítica. Por otro lado, las 65 muestras restantes se agrupan en el campo magnesiano (“magnesian”), común para rocas de la serie calcoalcalina. Sin embargo, considerando solo a las rocas hiperalcalinas, estas se restringen únicamente al campo “ferroan” (Figura 13A), en caso contrario, las rocas hiperaluminosas y metaluminosas se distribuyen en ambos campos (Figura 13B). En cuanto a la distribución de las muestras en función de su clasificación petrológica, se observa que las muestras de rocas riolitas y traquitas tienden al campo superior (Figura 13C). Mientras que las dacitas muestran preferencia por el campo inferior (Figura 13D). Por su parte, las traquidacitas se encuentran equitativamente distribuidas en ambos campos (Figura 13D).

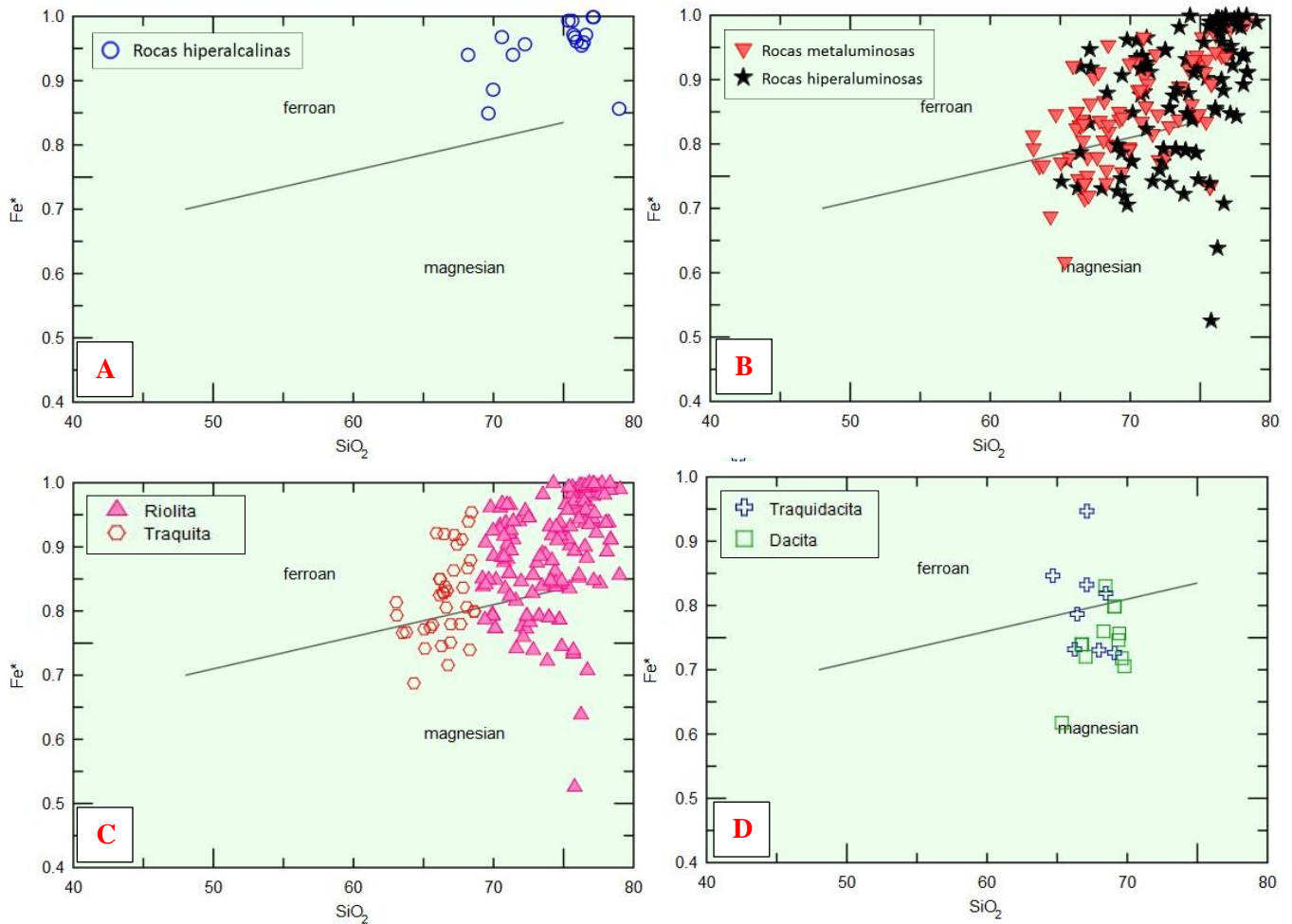


Figura 13. Diagrama discriminante de granitos SiO_2 vs Fe^* propuesto por *Frost et al. (2008)*: (A) Comportamiento de rocas clasificadas como hiperalcalinas; (B) Comportamiento de las muestras que resultaron ser hiperaluminosas y metaluminosas; (C) Distribución de las rocas clasificadas como riolitas y traquitas; (D) Distribución de traquidacitas y dacitas.

En cuanto a un uso más completo para la clasificación de las rocas, contemplando a la mayoría de los contenidos de los elementos mayores, el diagrama propuesto por *De la Roche et al. (1980)* resulta ser el más adecuado. En este diagrama es posible distinguir tendencias para las series de rocas que, en este caso, son más marcadas en las rocas hiperalcalinas e hiperaluminosas, mostrando en las primeras, variedades de cuarzo-traquita y riolita alcalina, mientras que, en las segundas, ocurren principalmente cuarzo-latita, riolita y riodacita (**Figura 14A**). Las rocas metaluminosas se reparten dentro de todos los campos félsicos sin un patrón definido (**Figura 14 B**).

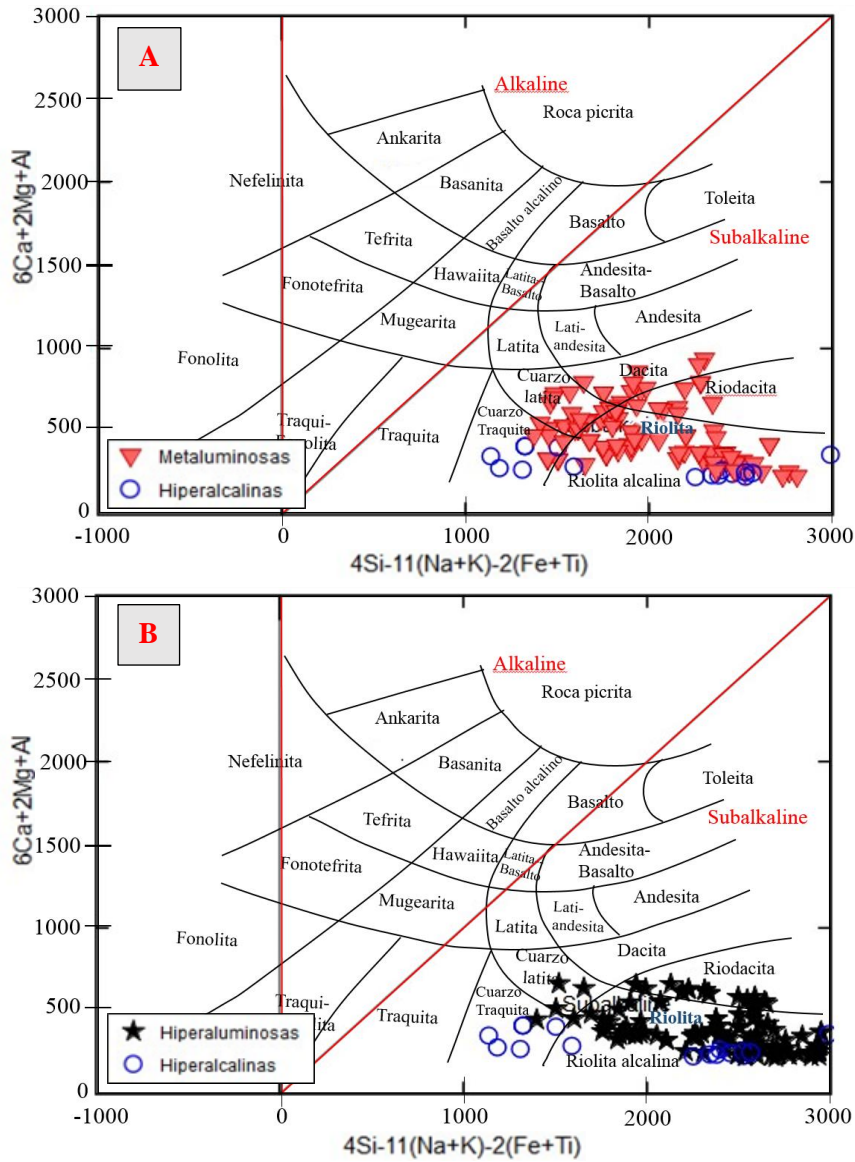


Figura 14. Diagrama de clasificación de rocas volcánicas propuesto por De la Roche et al. (1980). (A) Distribución de rocas hiperalkalinas y metaluminosas; (B) Distribución de rocas hiperaluminosas e hiperalkalinas.

IV.4 Distribución espacial de las muestras

La distribución geográfica que se tiene para los datos de las rocas volcánicas de composición félsica que han sido contempladas en este estudio, indica que se distinguen 7 zonas de interés con información geoquímica de elementos mayores y/o traza, las cuales han sido nombradas como Grupo A, B, C, D, E y F. (Figura 15).

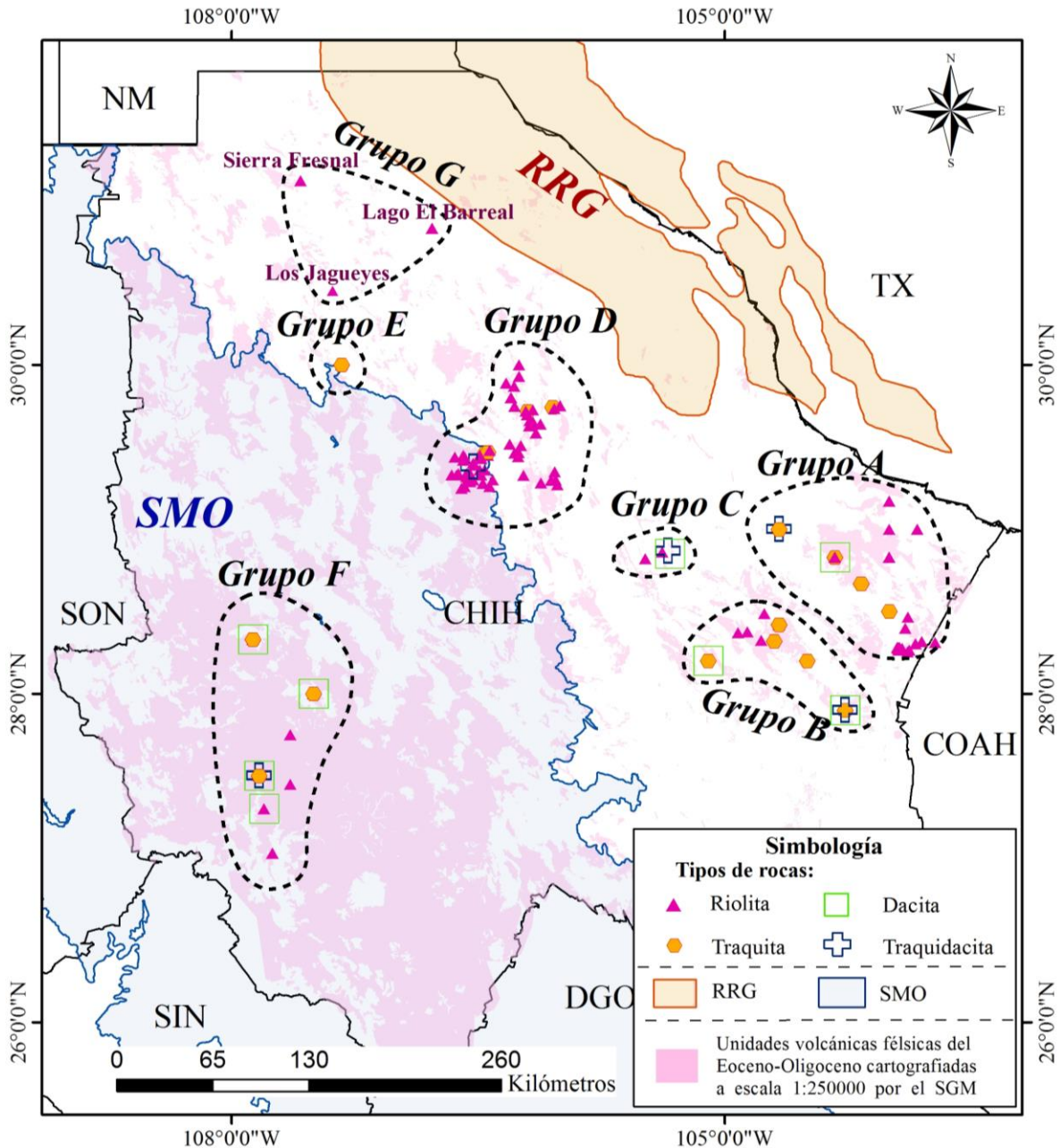


Figura 15. Mapa de distribución de datos donde se representan las muestras de rocas volcánicas de composición félsica y de edad Eoceno tardío-Oligoceno, distinguiéndolas según su clasificación petrológica. Se muestra también los grupos de muestras asignados para cada conjunto. **SON:** Sonora; **SIN:** Sinaloa, **DGO:** Durango, **COAH:** Coahuila, **TX:** Texas, **NM:** Nuevo México, **RRG:** Rift del Río Grande (sedimentos asociados), **SMO:** Sierra Madre Occidental (Provincia Fisiográfica). La cartografía de las unidades volcánicas félsicas fue obtenida de las cartas geológicas en formato shapefile, a escala 1:250 000 recopiladas del GeoInfoMex (Servicio Geológico Mexicano, 2022), y modificadas para esta investigación. La provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental se obtuvo del Sitio del INEGI. (2022). La delimitación del Rift del Río Grande es una modificación de Villarreal-Fuentes et al. (2016), donde se representa el límite espacial de los sedimentos plio-cuaternarios asociados a este Rift, digitalizado por Arredondo-Contreras (2023), para representar la extensión que de los productos asociados a esta provincia en Chihuahua o la morfología de cuencas asociadas a esta provincia magmática en Chihuahua.

IV.5 Ubicación y descripción de los grupos de muestras identificados

Grupo A.- Se localiza en la porción más oriental del estado de Chihuahua (**Figura 15**), comprende a 68 muestras que se distribuyen siguiendo principalmente una alineación NW-SE, que coincide con la alineación de las unidades volcánicas félsicas reportadas según la cartografía 1:250,000 del SGM. De estas muestras sólo 44 cuentan con elementos mayores, y fueron clasificadas como riolitas (29), traquitas (20) y traquidacitas (2; **Figura 16**). Dos rocas de esta área fueron clasificadas como hiperalcalinas (ambas de composición riolítica), una al calcular el *índice de Shand* y la otra por la asociación mineralógica reportada en el informe técnico de la carta geológico-minera H13-D54 (**Arredondo y Guzmán, 2008**). Por otro lado, la afinidad metaluminosa es dominante en este grupo, ya que se cuenta con 33 datos clasificados de este tipo; mientras que, 10 muestras se definieron como hiperaluminosas (**Figura 17**).

Grupo B.- También se localiza en la parte este de Chihuahua, pero más al suroeste con respecto al grupo A (**Figura 15**). Cuenta con 42 muestras de las cuales cinco son hiperalcalinas (cuatro de composición riolítica y una traquítica), donde cuatro de ellas fueron identificadas así por el *índice de Shand* y una por su asociación mineralógica (reportada en el informe técnico de la carta H13-D71 escala 1:50000; **Hernández et al., 2003**). De las rocas metaluminosas e hiperaluminosas se obtuvieron 28 y 7 ejemplares respectivamente (**Figura 17**). En cuanto a la clasificación petrológica de acuerdo con el diagrama TAS, se obtuvieron 18 riolitas, 21 traquitas, 3 dacitas y 2 traquidacitas (**Figura 16**).

Grupo C.- Localizado en la porción centro-este del estado (**Figura 15**), es el grupo con menor número de muestras, donde se cuenta con dos riolitas, una dacita, y una traquidacita (**Figura 16**), además, todas son de afinidad metaluminosa (**Figura 17**).

Grupo D.- Es la zona de mayor concentración de muestras en todo el estado de Chihuahua y se ubica en su porción central (**Figura 15**). Se cuenta con 79 datos de rocas volcánicas félsicas donde la mayoría tiene información de elementos mayores (74 muestras). Las variedades de rocas que se tienen según la clasificación petrológica dada por el diagrama TAS son: riolitas (69), traquitas (4) y sólo una traquidacita (**Figura 16**). También se tiene una cantidad importante de rocas hiperalcalinas, ya que se cuenta con 14 de estas rocas, donde 8 fueron clasificadas así mediante la geoquímica (*índice de Shand*), y 5 mediante la asociación

mineralógica identificada mediante el uso de la petrografía. De rocas hiperaluminosas y metaluminosas se tienen 51 y 15 datos respectivamente (Figura 17). Las muestras de este grupo forman una alineación NW-SE y se distribuyen dos subzonas donde una de ellas se encuentra en el borde de la Sierra Madre Occidental y la otra más hacia el Este.

Grupo E.- Se encuentra localizada en el borde este de la Sierra Madre Occidental, más al este del grupo D (Figura 15). Se tiene tan sólo seis muestras que corresponden a cinco riolitas y una traquita según su clasificación geoquímica (Figura 16). Del total de las muestras, cuatro son metaluminosas y dos hiperaluminosas (Figura 17).

Grupo F.- Se trata del grupo de muestras que se encuentra al oeste del estado de Chihuahua, en el centro de la Sierra Madre Occidental (Figura 15), donde se cuenta con 71 muestras, de las cuales 46 cuentan con información de elementos mayores y se clasificaron petrológicamente como riolitas (32), traquitas (3), traquidacitas (3) y dacitas (8; Figura 16). Donde sólo una de estas muestras de composición riolítica es clasificada como hiperalcalina (según el *índice de Shand*). Por otro lado, de rocas hiperaluminosas se tiene un total de 37 ejemplares y de metaluminosas se cuenta con sólo 8 muestras (Figura 17).

Grupo G.- Esta zona corresponde a las 19 muestras de obsidianas que se localizan en la parte norte del estado (Figura 15). Mediante el diagrama de clasificación tipos de rocas de Pearce et al. (1996; Figura 13) se determinó que estas obsidianas son de composición riolítica (Figura 16), mostrando, además, una afinidad alcalina (probablemente hiperalcalina; Figura 17)

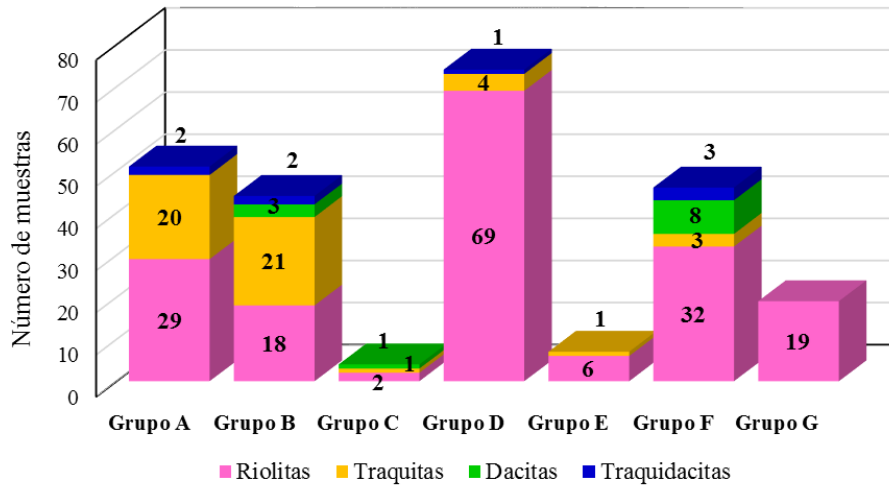


Figura 16. Gráfica representativa de los tipos de rocas que componen a cada grupo de muestras definidos en este estudio.

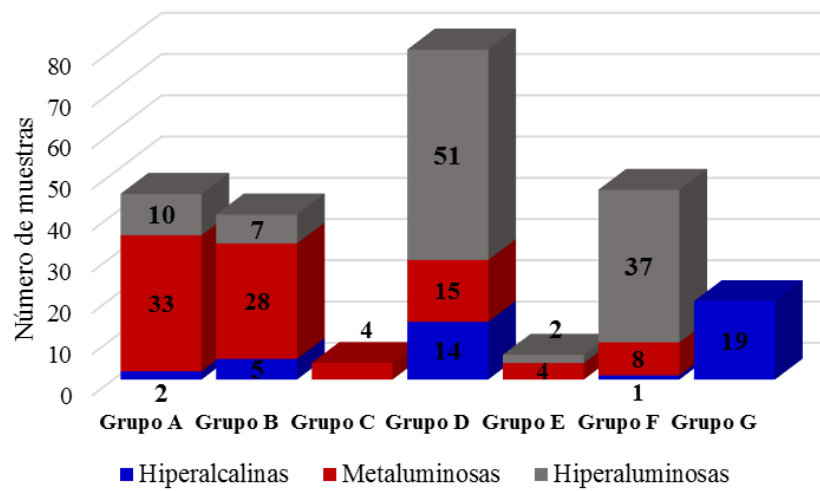


Figura 17. Gráfica representativa de la cantidad de rocas hiperalkalinas, hiperalkalinas, y metaluminosas presente en cada grupo de muestras.

V.- DISCUSIÓN

V.1. Rocas volcánicas félsicas “*tipo*” para la Sierra Madre Occidental

Para distinguir entre las rocas de la SMO y las del RRG fue necesario recurrir a muestras de referencia reportadas en estudios geológicos como rocas genéticamente asociadas con el volcanismo de la Sierra Madre Occidental. [Magonthier \(1988\)](#) propone tres grupos de riolitas que forman a la Sierra Madre Occidental, que se distinguen por sus características geoquímicas, mineralógicas, estratigráficas y geográficas. De estos grupos, dos son reportados en el estado de Chihuahua y se utilizaron en este estudio como muestras de referencia para comparar con los datos de rocas recopilados. El primer grupo es identificado como un conjunto de **riolitas de biotita**, que se caracteriza por ser el más antiguo, con un rango de edad que va de los 34 a 36 Ma y su presencia predomina en la parte central de la Sierra Madre Occidental. El segundo grupo es reconocido como **riolitas de fayalita**, que ocurre en un periodo restringido a 31 Ma, se trata de riolitas potásicas ricas en sílice y pobres en Ba, Sr y Eu; y su distribución ocurre a lo largo de la parte Oriental de la Sierra Madre Occidental. Comparando la mineralogía reportada por el autor para los dos grupos, las riolitas de biotita contienen plagioclasas y fenocristales de biotita ricos en Mg con relaciones de Mg/Mg+Fe alrededor de 0.6. Por otro lado, las riolitas de fayalita contienen feldespatos casi exclusivamente de la variedad sanidina y también pueden contener hasta 1% de fenocristales de fayalita. Otras muestras utilizadas como referencia son las provenientes de la región de **Batopilas**, Chihuahua. Reportadas por [Cameron et al. \(1980\)](#), al realizar un estudio sobre las ignimbritas del Terciario Medio de la Sierra Madre Occidental. En ese trabajo se analizan rocas tipo de esta provincia, de composiciones máficas a félsicas, pero para este trabajo, se seleccionaron sólo a las variedades félsicas para las comparaciones realizadas. En estas rocas, se reporta la asociación mineralógica de cuarzo, plagioclasa, biotita, ortopiroxeno, clinopiroxeno (en rocas con Si₂O₃ menor a 75%), hornblenda y magnetita.

Las muestras que reflejan un comportamiento geoquímico y mineralógico típico de las rocas félsicas de las SMO son las de la región de **Batopilas** ([Magonthier, 1988](#)), así como las **riolitas de biotita** ([Magonthier, 1988](#)) descritas anteriormente, siendo consideradas ambas en este estudio como rocas “*tipo*” de la SMO, con el fin de realizar comparaciones

con todos los datos recopilados de las muestras y clasificarlas en función del contexto tectónico al que estén asociadas según las características que presentan.

V.2. Comparación de acuerdo con la geoquímica de elementos mayores

V.2.1. Evolución del contenido de álcalis con respecto a la diferenciación magmática.

En los datos geoquímicos de rocas recopilados, coexisten dos comportamientos en función de la evolución del contenido de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) con respecto al SiO_2 . Donde el primer comportamiento (1) queda evidenciado por los grupos A, B1, D, E y G (Figura 18A), mostrando que por lo regular las rocas a partir del 66% de SiO_2 , ya contienen importantes cantidades de álcalis ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) superiores al 9 %. Los rangos más altos en álcalis en esta tendencia se presentan principalmente para las rocas con valores de SiO_2 de 66 a 72%, y después de este rango tienden a disminuir, pero manteniendo aún a proporciones importantes. Las variedades que tienen una extrema diferenciación (>75% en sílice), representadas principalmente por algunas muestras del grupo D, muestran una disminución de álcalis hasta llegar a valores que coinciden con el campo de las riolitas de fayalita.

El segundo comportamiento (2), que es contrastante con respecto al anterior, es definido por las muestras de referencia de la SMO (riolitas de fayalita y Batopilas) y por los grupos B2, C y F y representa a magmas que tienen menores contenidos álcalis que no supera el 8% para el mismo porcentaje de sílice (66%). Conforme a estos magmas se diferencia que el aumento de álcalis por lo regular no supera al 9%. A excepción de una muestra del grupo F identificada con la clave “88/1-10”, la cual es la única muestra clasificada como hiperalcalina de este grupo (Figura 18A).

El comportamiento de ambas tendencias mostradas evidencia a dos magmas que, de acuerdo con el contenido en álcalis, cada uno muestra una trayectoria que obedece al contexto tectónico al que se asocia. Sin embargo, en las rocas más diferenciadas de ambos casos, con sílice mayor a 75%, tienden a mostrar contenido de álcalis similares.

Las rocas hiperalcalinas localizadas en el estado de Chihuahua, son evidencia del volcanismo félsico anorogénico asociado al rift del Río Grande Arredondo-Contreras (2023), como es de esperarse, estas rocas siguen la tendencia rica en álcalis de tipo (1), haciendo

posible la relación de este comportamiento con su contexto anorogénico. Sin embargo, la cantidad de datos de rocas hiperalcalinas representa a la minoría de las muestras. No obstante, dentro de los grupos A, B1, D, E y, se cuenta con rocas hiperaluminosas y metaluminosas que exhiben un comportamiento similar rico en álcalis y se distinguen de las rocas hiperaluminosas y metaluminosas de los grupos F, B2 y C, que se asocian por su contenido en álcalis a la Sierra Madre Occidental (**Figura 18B**).

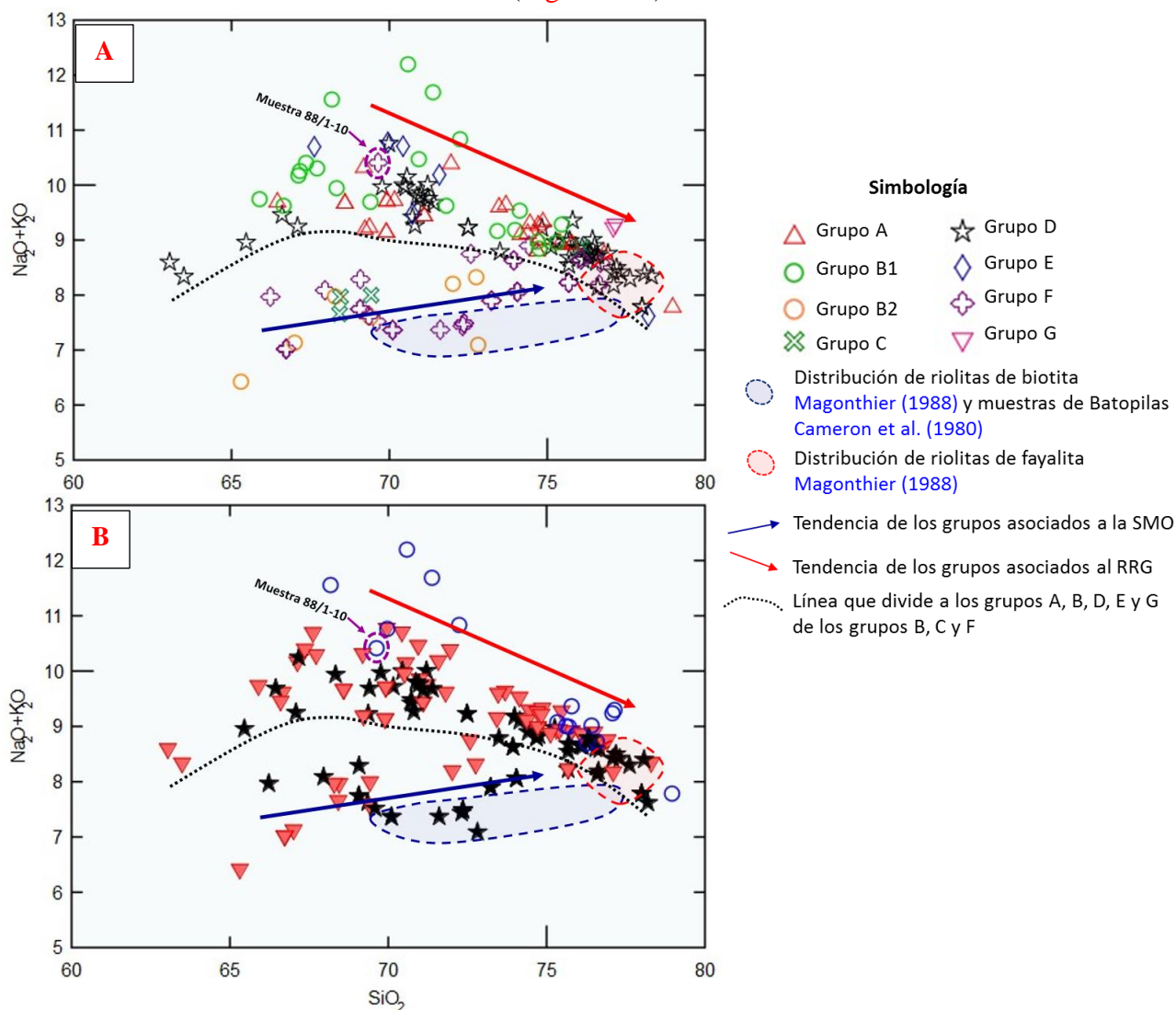


Figura 18. Diagrama de variación de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ con respecto al SiO_2 , que sirve para diferenciar la evolución del contenido de álcalis con respecto a la diferenciación. (A) Muestras clasificadas por grupos; (B) Muestras graficadas según la clasificación obtenida mediante el índice de Shand.

V.2.2 Evolución del contenido de CaO y Al₂O₃ en la diferenciación magmática

Considerando las tendencias identificadas en el apartado anterior: (1) rica en álcalis y (2) pobre en álcalis (Figura 18A), se puede asociar un comportamiento ligado para cada caso con respecto a los contenidos de CaO y Al₂O₃. Las rocas asociadas a la primera tendencia (1; grupos A, B2, D, E, y G) muestran menor contenido en CaO con respecto a las rocas pobres en álcalis (2) (grupos B2 y F), donde los valores de CaO son más parecidos a los de las rocas típicas de la SMO. En ambos casos, ocurre un empobrecimiento de CaO conforme a la diferenciación de los magmas, pero manteniéndose siempre relativamente más cálcicas, las de la SMO (Figura 19A).

Algo similar sucede con los contenidos en Al₂O₃, donde las rocas ricas en álcalis (1) presentan valores inferiores que las pobres en álcalis (2), coincidiendo nuevamente estas últimas, con las muestras *tipo* de la SMO. A excepción de las rocas del grupo C, que en este caso se comportan más acorde a las rocas anorogénicas (Figura 19B).

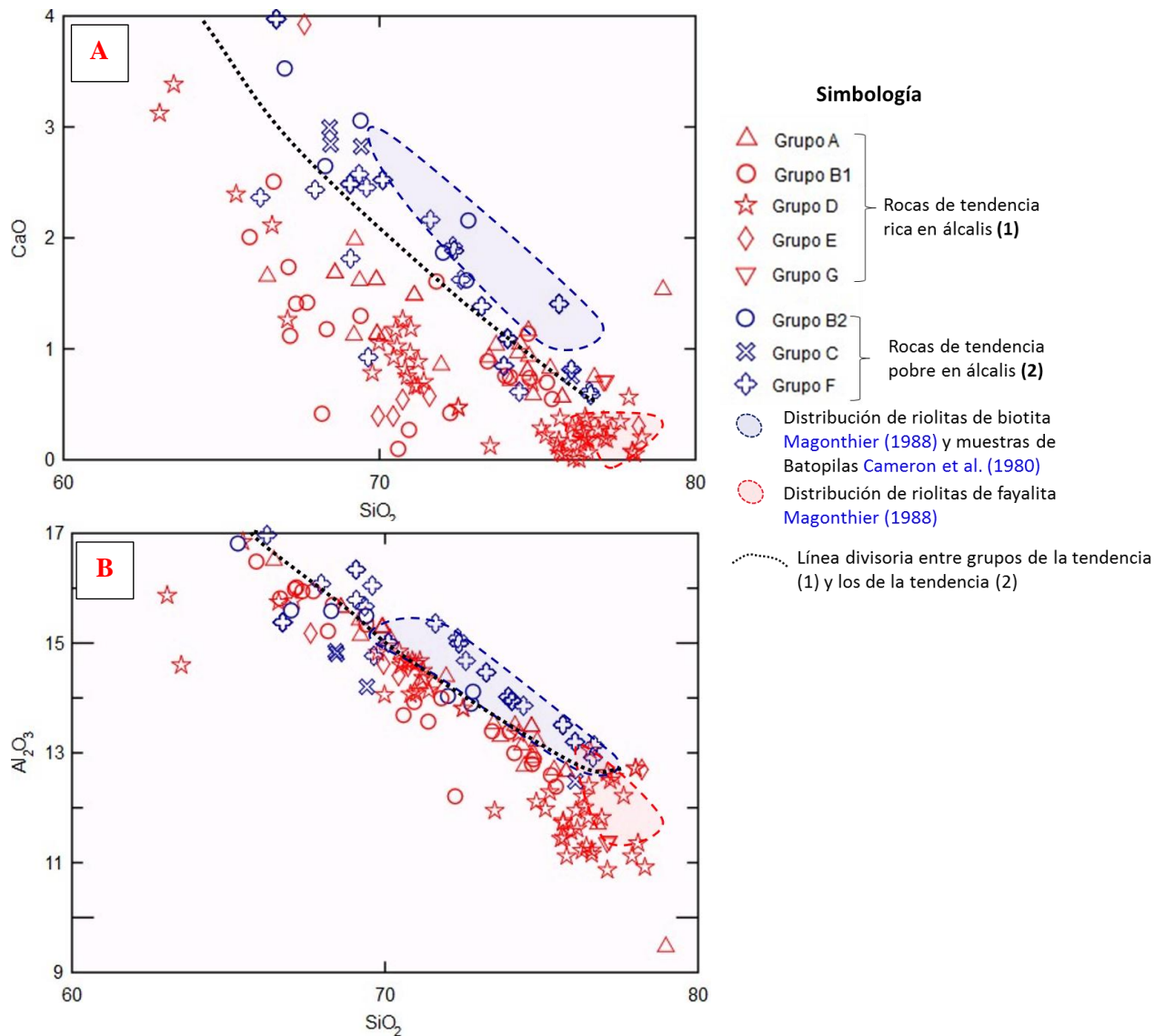


Figura 19. Diagramas de variación de elementos mayores contra SiO_2 . (A) Porcentaje de CaO vs SiO_2 ; (B) Porcentaje de Al_2O_3 contra SiO_2 .

V.2.3 Rasgos petrológicos de acuerdo con todos los elementos mayores

Considerando la relación entre las proporciones de todos los elementos mayores, como se hace en el diagrama R1R2 propuesto por De la Roche et al. (1980), las rocas relacionadas a cada contexto tectónico tienen un comportamiento característico.

Las rocas del *tipo* de la Sierra Madre Occidental muestran que, si son formadas mediante cristalización fraccionada, generan rocas desde félsicas que varían de dacitas a

riodacitas siguiendo una trayectoria típica de rocas calcoalcalinas según lo propuesto por [Vidal-Solano \(2005\)](#), y finalmente sus miembros más diferenciados llegan a ser riolitas. De forma similar se comportan las rocas del grupo F y las identificadas como grupo B2. En estos grupos también se tiene la misma sucesión de rocas, pero en un área no tan restringida como en las muestras de referencia. Las rocas del grupo C no muestran una distribución definida, debido a la poca cantidad de datos. Sin embargo, estas están restringidas a una zona que es más acorde a las del grupo F y B2 (**Figura 20A**). Las relaciones tomando en cuenta este criterio, entre estos grupos de muestras junto con las riolitas de biotita y Batopilas, permiten atribuirles también al proceso que originó a la SMO. La única excepción de este comportamiento es la muestra hiperalcalina **88/1-10** del grupo F.

Por otro lado, las muestras asociadas a un contexto de rift continental en este estudio muestran dos tendencias en las series de rocas. Donde una primera serie, indica la asociación cuarzo latita-riolita acorde a la serie transicional ([Vidal-Solano, 2005](#)), que es representada por la mayoría de las muestras de los grupos A y B1, y algunas del grupo D. El resto de las muestras del grupo D, junto con las del grupo E, G y algunas del grupo B, pertenecen a la segunda serie que, forma la asociación cuarzo traquita-riolita alcalina (**Figura 20B**). Dentro de esta tendencia se encuentran las rocas hiperalcalinas identificadas en este estudio (representadas por rocas de los grupos D y G), donde las variedades riolíticas coinciden en distribución con las evidenciadas por [Vidal-Solano \(2005\)](#) en el estado de Sonora. Además, se muestran miembros menos diferenciados del tipo cuarzo traquíticos, que también tienen afinidad hiperalcalina (mayormente representadas por rocas del grupo B1). Sin embargo, no todas las muestras de esta segunda serie son clasificadas como hiperalcalinas, pero si exhiben estar fuertemente asociadas a ellas por seguir una misma tendencia y distribución. Las riolitas de fayalita, se comportan de esta manera a pesar de clasificarse como hiperaluminosas, al igual que gran parte del grupo D.

Las tendencias de estos grupos anorogénicos sugieren que, mediante un proceso de cristalización fraccionada, es posible explicar una relación petrogenética entre ellos, en la cual, puede evidenciarse un carácter transicional en la serie, donde en los miembros riolíticos resultan en rocas hiperalcalinas. Algunas muestras de los grupos B2, y D, que exponen esta

afinidad en miembros menos félsicos de tipo cuarzo traquítico, indicando en esos casos un mayor enriquecimiento en álcalis para rocas con menores contenidos de sílice.

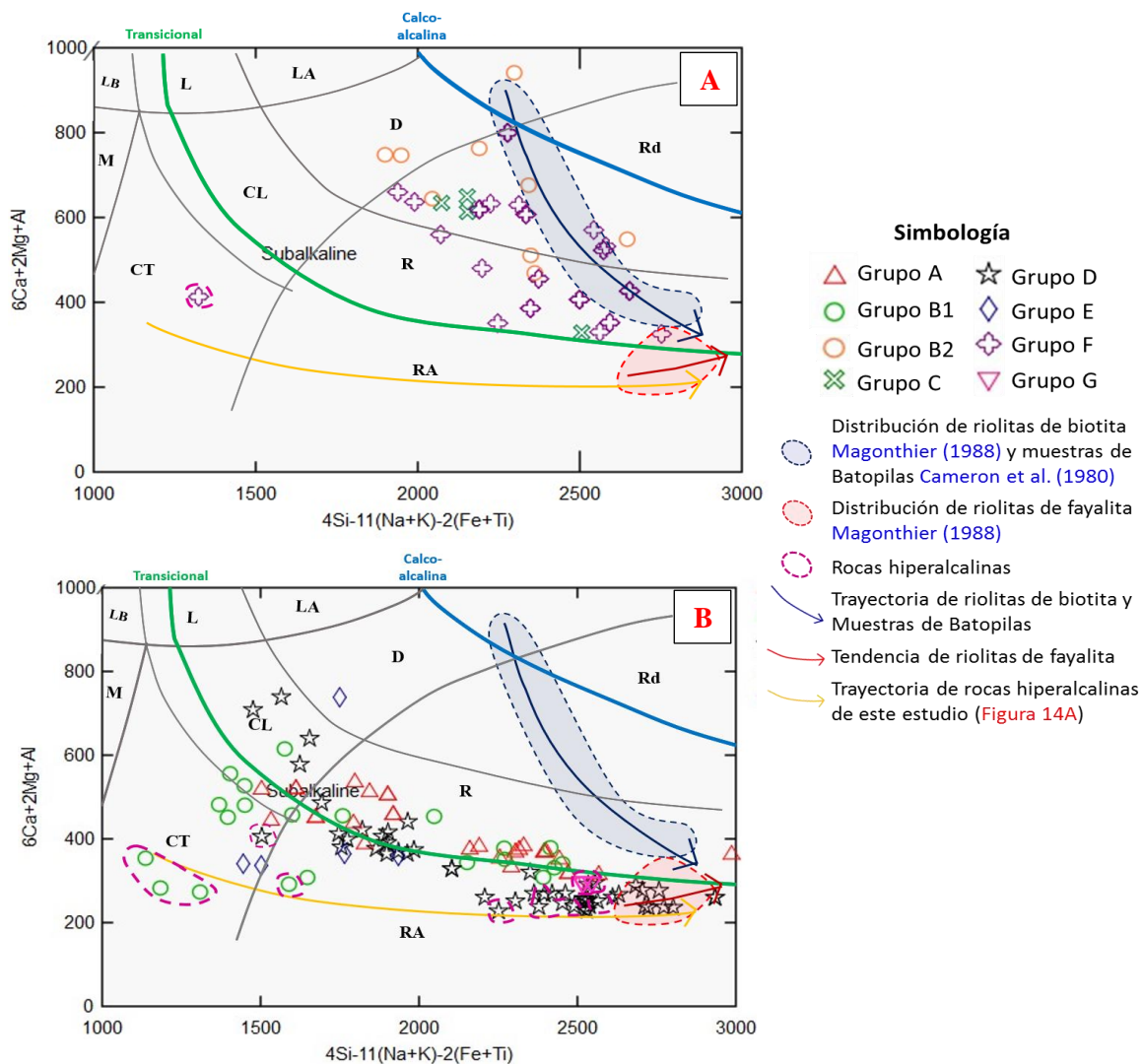


Figura 20. Diagrama de clasificación de rocas volcánicas R1R2 propuesto por De la Roche et al. (1980). Se graficaron los grupos de muestras, comparando con los campos de las muestras de referencia. (A) Distribución de los grupos B2, C y F, representando a las rocas orogénicas; (B) Distribución de las muestras de los grupos A, B1, D, E y G, representando a las rocas anorogénicas.

Las trayectorias de asociación de rocas para calcoalcalinas y transicionales son propuestas por Vidal-Solano (2005), la primera considerando los datos de roca recopilados de lavas de la SMO (Magonthier, 1988) y del Batolito Larámide (Valencia-Moreno et al. 2001, 2003). La segunda en base a De la Roche et al. (1980). CL: Cuarzo Latita, CT: Cuarzo Traquita, D: Dacita, L: Latita, LA: Latita-Andesita, LB: Latita-Basalto, M: Mugarita, R: Riolita, RA: Riolita Alcalina, Rd: Riodacita.

V.2.3 Rasgos petrológicos de los minerales normativos

La geoquímica de elementos mayores resultante para cada contexto tectónico define proporciones de minerales normativos en cada caso. El contenido en minerales normativos de cuarzo, ortoclasa, albita y anortita de acuerdo con el diagrama *Q-ANOR* propuesto por Whalen y Frost (2013), evidencia distintos comportamientos de evolución para los grupos de muestras, indicando la tendencia de diferenciación de la serie más acorde a cada caso. Las **riolitas de biotita** y las muestras de Batopilas se comportan de forma similar, siguiendo una tendencia de rocas calcoalcalinas según el diagrama mostrado en la **Figura 21 A**). Mientras que las **riolitas de fayalita** se restringen a un área más puntual, donde debido a la cantidad de datos y la homogeneidad entre ellos en minerales normativos, no se observa una tendencia, pero la relación de $Q/(Q+Or+Ab+An)$ es más alta que la de $An/(Or+An)$, indicando que el contenido bajo de Anortita normativa, y/o las altas cantidades de Ortoclasa normativa, son un rasgo peculiar en esas rocas.

La distribución de las muestras de los grupos A, D y E, reflejan la trayectoria de rocas alcalinas-cálcicas a alcalinas (**Figura 21 A**). Por otro lado, las muestras del grupo F, muestran tendencias más cálcicas, variando de rocas calcoalcalinas a alcalina-cálcicas (**Figura 21B**). Comparando las rocas de los grupos B1 y B2, se tienen tendencias muy contrastantes, donde en el primero la tendencia es alcalina y en el segundo es de tipo calco-alcalina (**Figura 22B**).

Las diferentes trayectorias de los grupos de muestras, mediante este criterio de cuarzo, anortita, albita y ortoclasa normativos, indican las principales tendencias de evolución bajo condiciones ideales de cristalización fraccionada. Dos conjuntos de grupos son claramente identificados de acuerdo con el comportamiento de los datos. El primero incluye a los grupos A, D, E y B1, que siguen una tendencia alcalina a alcalina-cálcica, y los miembros reflejan cantidades significativamente más bajas de anortita normativa, que disminuye abruptamente conforme las rocas se vuelven más félsicas (**Figura 21A y 21C**). Por otro lado, el segundo conjunto abraza los grupos F, B2 y C, que muestran una tendencia de evolución más cálcica de tipo alcalina-cálcica a calcoalcalina (**Figura 21A y 21C**). Estas dos tendencias evolutivas ponen en evidencia la relación, por un lado, de las riolitas de fayalita con el primer conjunto más alcalino (grupos A, D, E y B1) y, por otro lado, de las riolitas de biotita y las rocas de Batopilas con el segundo conjunto más cálcico (grupos F, B2 y C).

Las riolitas hiperalcalinas, como no forman anortita en la norma debido al bajo contenido en CaO y Al₂O₃, no muestran un comportamiento en el diagrama *Q-ANOR*, restringiéndose a su ubicación en el eje Y. Esto involucra a las rocas del grupo G, donde las muestras que presentan elementos mayores son hiperalcalinas. Sin embargo, si se tratara de traquitas, seguramente estas rocas tendrían comportamientos muy similares a las rocas más alcalinas (e.g. grupo E), ya que una característica de esos especímenes es la poca o nula presencia de plagioclasa cálcica.

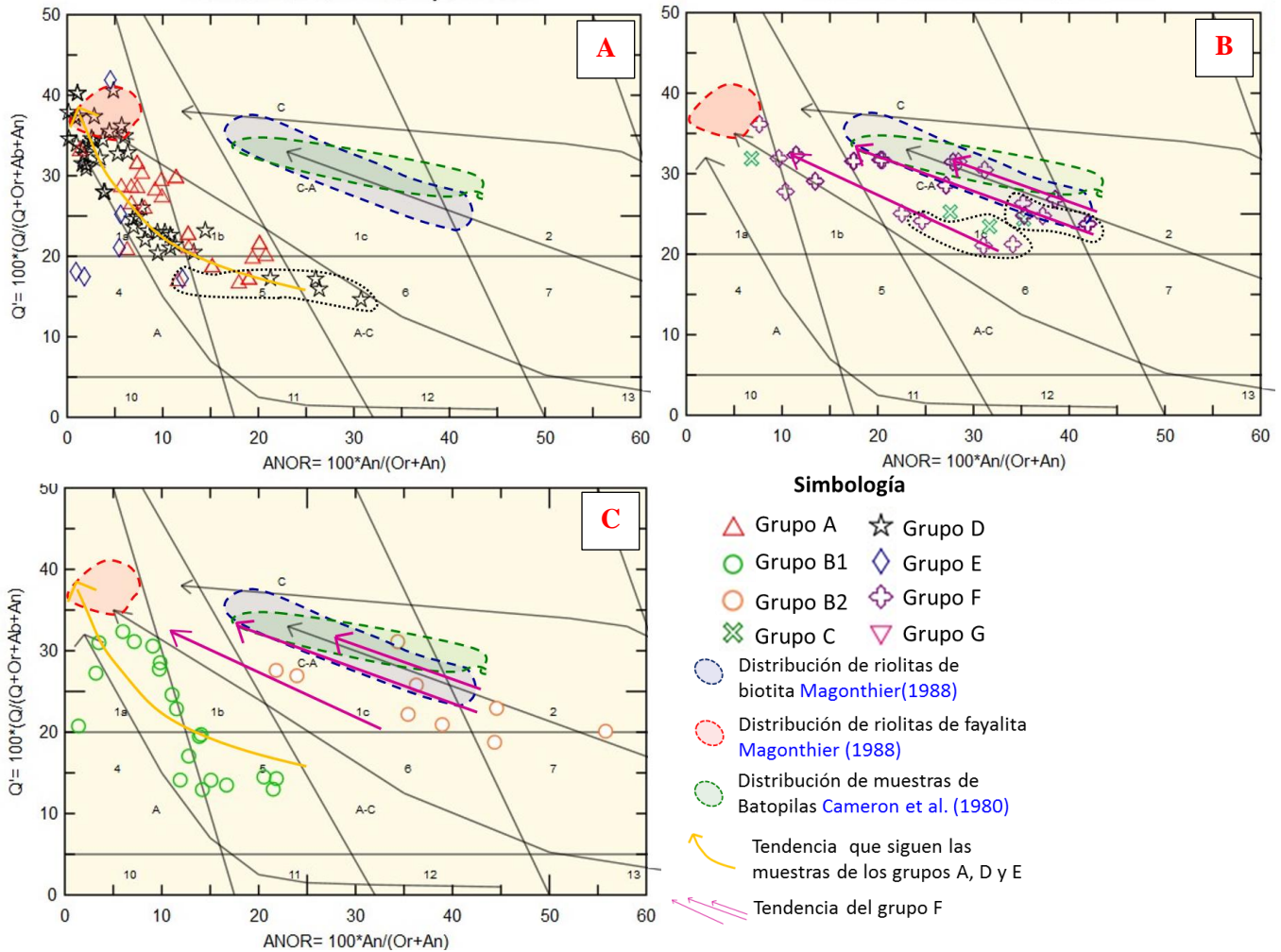


Figura 21. Diagrama Q-ANOR propuesto por Whalen y Frost (2013), se graficaron las muestras clasificándolas por grupos y comparándolas con las muestras de referencias. (A) Distribución de las muestras de los grupos A, D y E; (B) Distribución de las muestras de los grupos F y C; (C) Distribución de las muestras del grupo B, comparándolas con las tendencias principales de los grupos anteriores y subdivididas en B1 y B2 de acuerdo con su comportamiento.

1a: Granito de Feldespato alcalino, **1b:** Sienogranito, **1c:** Monzogranito, **2:** Granodiorita, **3a:** Tonalita, **3b:** Tonalita cálcica, **4:** Cuarzo-sienita de Feldespato alcalino, **5:** Cuarzo-sienita, **6:** Cuarzo-monzonita, **7:** Cuarzo-monzodiorita, **10:** Sienita de Feldespato alcalino, **11:** Sienita, **12:** Monzonita, **13:** Monzo-gabro. Tendencias: **A:** Alcalina, **A-C:** Alcalina-cálcica, **C-A:** Calcoalcalina, **C:** Cálcica

V.2.4 Contexto tectónico

Como lo describe [Magonthier \(1988\)](#) para las riolitas de biotita y [Cameron et al. \(1980\)](#) para las muestras de Batopilas, las rocas félsicas calcoalcalinas típicas de la Sierra Madre Occidental se caracterizan por tener una relación baja de FeOt/MgO, provocando que en el diagrama SiO₂ vs Fe* propuesto por [Frost et al. \(2008\)](#), estas rocas se confinen al campo magnesiano, que coincide con rocas de la serie calcoalcalina. Este comportamiento coincide con las rocas de los grupos F y B1 ([Figura 22A](#)), que anteriormente mediante otros elementos mayores demostraron también un comportamiento a fin a las muestras tipo de la SMO. En cambio, las muestras del grupo C, en este caso, no coinciden tanto con el comportamiento típico de la SMO, ya que presentan una relación más alta de FeOt/MgO. Esto podría deberse a un enriquecimiento en Fe por procesos secundarios.

Por otro lado, las relaciones altas de FeOt/MgO que presentan las rocas de los grupos anorogénicos (A, B1 D, E y G) los sitúa en dentro del campo ferroso, a excepción de algunas muestras que se encuentran en el límite de los dos campos ([Figura 22B](#)). Una característica importante que presentan las rocas hiperalcalinas en general, son los altos contenidos de FeO y bajos contenidos de MgO ([Black et al., 1997](#)). Las rocas hiperalcalinas de estos grupos coinciden con esta característica y son clasificadas en los resultados dentro de este campo ([Figura 13A](#)). Además, asociadas a estas se tienen rocas de carácter hiperaluminoso y metaluminoso ([Figura 13B](#)), que también reflejan importantes proporciones de FeOt en relación con el MgO, siendo las de los grupos D, G, y B1 las que presentan valores más altos. Mientras que las rocas del grupo A, son ligeramente menos ferrosas que los grupos anteriores.

Esta analogía entre las rocas hiperalcalinas con el resto de los grupos anorogénicos (no hiperalcalinas) permite distinguirlas de las típicas rocas hiperaluminosas y metaluminosas calcoalcalinas de la SMO, que son evidentemente de tipo magnesianas.

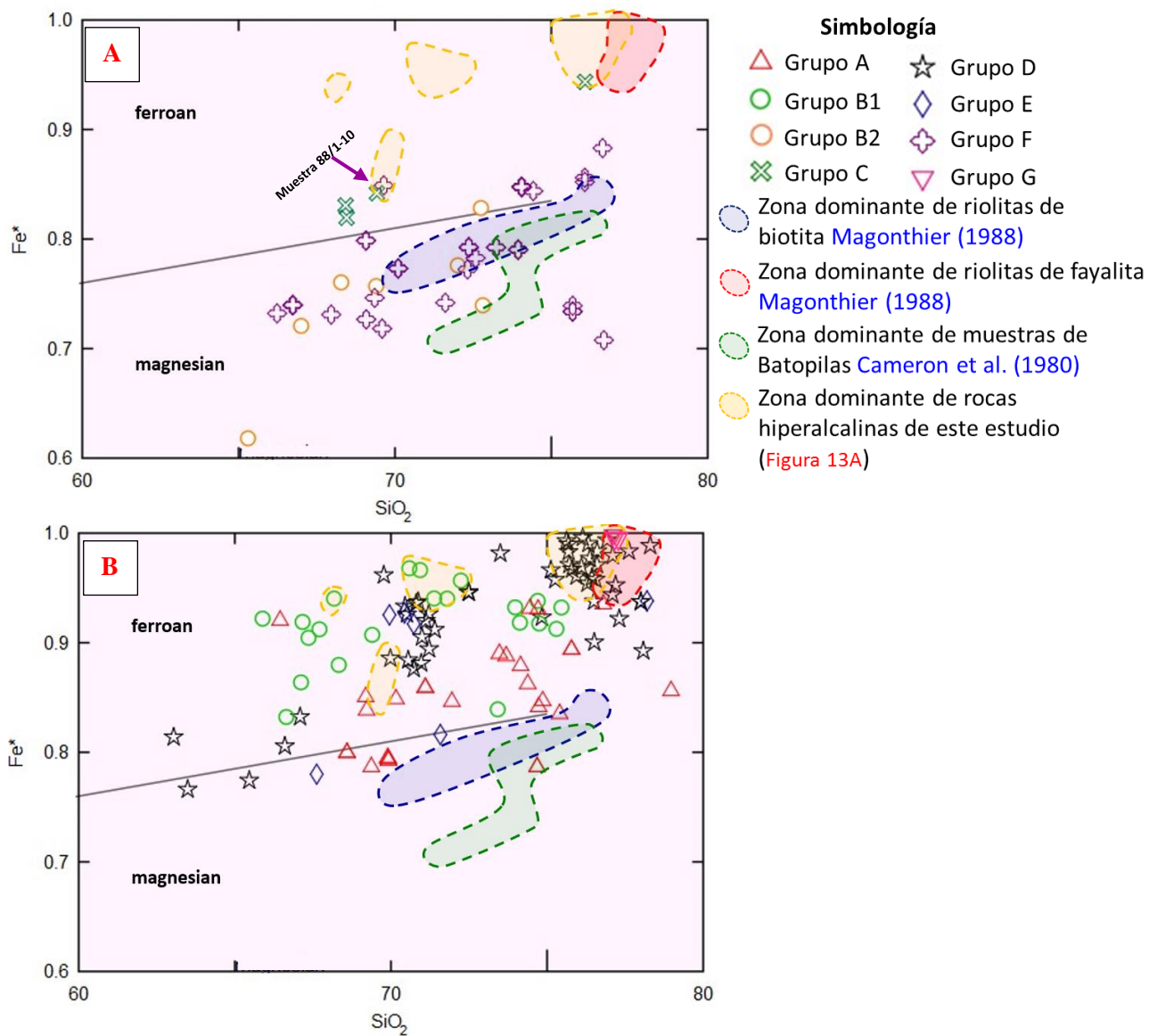
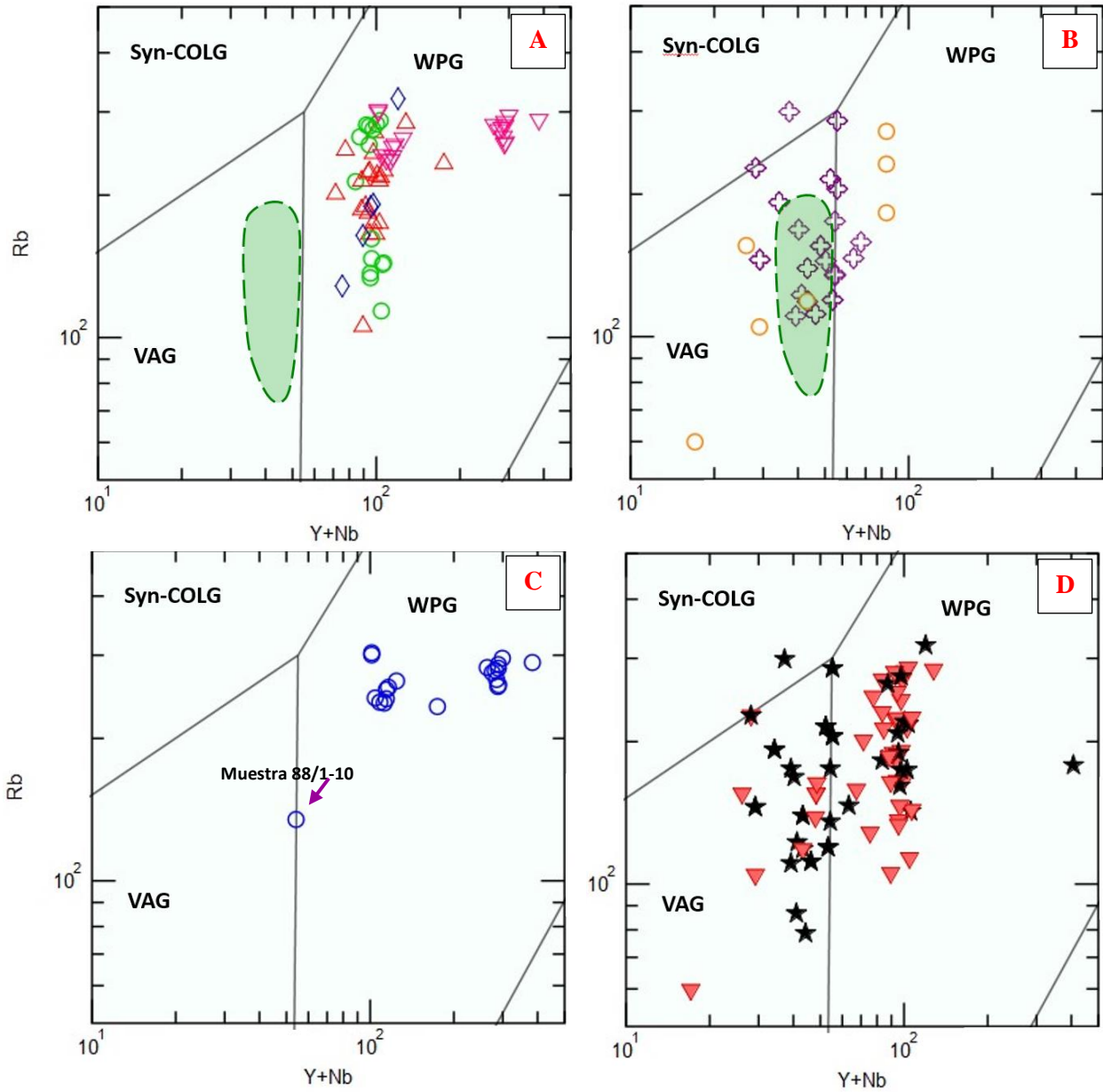


Figura 22. Diagrama discriminador de granitos SiO₂ vs Fe propuesto por [Frost et al. \(2008\)](#) donde se grafican los datos por grupos de muestras. (A) Grupos B2, C y F; (B) Grupos A, B1, D, E y G.*

La proporción de Rb contra el contenido de Y+Nb permite, mediante el diagrama propuesto por Pearce et al. (1984), discriminar entre varios contextos tectónicos. Las rocas tipo de la Sierra Madre Occidental representadas en este caso por las muestras de Batopilas, son clasificadas como Granitos de Arco Volcánico (VAG), de igual forma sucede con la mayoría de las rocas orogénicas de este estudio de los grupos B2 y F (Figura 23A). Por otro lado, las proporciones más altas de Nb+Y de las rocas asociadas al RRG (grupos A, B1, E y G) ocasionan que estas sean clasificadas como Granitos Intraplaca (WPG; Figura 23B).

Desde la perspectiva del cálculo del *índice de Shand* de las muestras, todas las rocas hiperalcalinas que tienen los elementos necesarios para este diagrama (muestras de obsidias del grupo G y muestra hiperalcalina del grupo F), exponen una distribución que se restringe únicamente al campo WPG (Figura 23C), lo que permite asociar a esta categorización con volcanismo anorogénico. Mientras que, las rocas metaluminosas e hiperaluminosas se distribuyen en ambos campos (Figura 23D) sin mostrar alguna tendencia clara, indicando que ambas afinidades se pueden formar en cualquiera de los dos contextos tectónicos, pero mostrando diferencias en el contenido de estos elementos traza que los discrimina a unos de otros. La única muestra del grupo F clasificada como hiperalcalina (88/1-10), parece no coincidir con el dominio principal del resto de estas rocas.

Las rocas de los grupos D y C, al no contener información de elementos traza no es posible clasificarlas mediante el uso de este diagrama. Sin embargo, la fuerte afinidad anorogénica mostrada anteriormente para el Grupo D considerando a los elementos mayores, es una premisa de que estas rocas se categorizarían dentro del campo WPG. Por otro lado, si se contara con elementos traza para el grupo C, se definiría con mayor seguridad a qué volcanismo está asociado, esto debido a que en algunos casos dio indicio de corresponder a la SMO, pero en la relación de FeOt/MgO se comportó más a fin de las rocas del RRG (Figura 22A).



Simbología

- △ Grupo A
- Grupo B1
- Grupo B2
- ◇ Grupo E
- ⊕ Grupo F
- ▽ Grupo G
- Distribución de muestras de Batopilas Cameron et al. (1980)
- Rocas hipercalinas
- ▽ Rocas metaluminosas
- ★ Rocas hiperaluminosas

Figuro 23. Diagrama discriminador de granitos Rb vs Y+Nb de Pearce et al. (1984) donde se muestra el campo de dominio de las muestras de referencia de Batopilas. (A) Se representan las rocas pertenecientes al grupo A y F; (B) Se muestran las rocas de los grupos B, E y G con su respectiva simbología cada grupo; (C) Rocas hipercalinas presentes en toda la base de datos; (D) rocas metaluminosas e hiperaluminosas.

VAG: Granito de arco volcánico WPG: Granito intraplaca Syn-COLG: Granitos sin-colisión

Para las riolitas de biotita y las de fayalita al no contar con valores de Rb y Nb, se utilizó otro diagrama discriminante de granitos propuesto también por [Pearce \(1984\)](#), pero que sólo contempla a los elementos Ta y Yb. En este diagrama que también sirve para identificar contextos tectónicos, se observa que las riolitas de biotita se restringen al campo de arco volcánico, y las riolitas de fayalita tienden a comportarse más acorde a los granitos intraplaca ([Figura 24](#)). Esta asociación distinta es evidencia de que las riolitas de fayalita podrían estar asociadas a otro proceso petrogenético diferente a las riolitas de biotita.

El grupo F reafirmó en este diagrama que tiende más a comportarse como las rocas asociadas a un ambiente de subducción ([Figura 24](#)). Los demás grupos no cuentan con *Ta*, por lo tanto, no es posible visualizarlos en este diagrama.

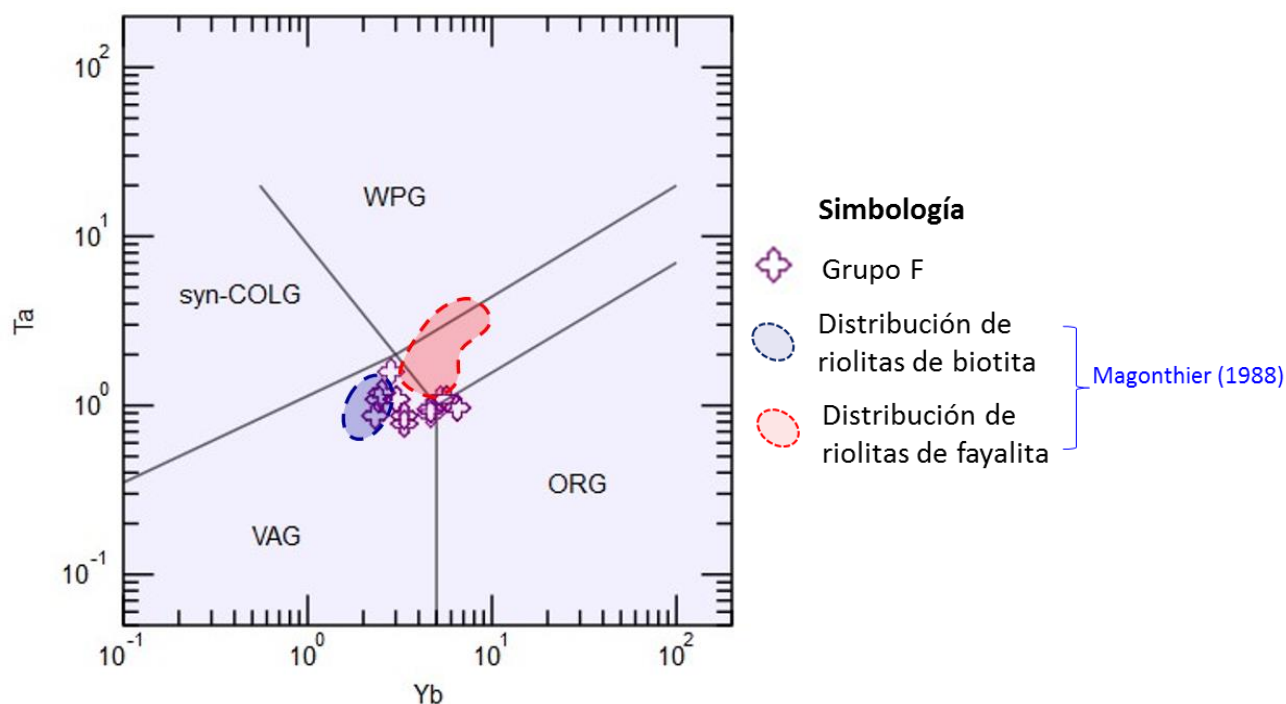


Figura 24. Diagrama discriminador de granitos [Pearce et al. \(1984\)](#) de *Ta* vs *Yb*. Se indican los campos que abarcan las riolitas de Biotita, las riolitas de Fayalita y la distribución de las muestras del grupo F.

V.3. Rasgos geoquímicos de identidad en elementos traza

V.3.1. Elementos traza de las rocas asociadas a cada provincia

Por medio del uso de diagramas multielementales, las muestras *tipo* (riolitas de Biotita) de la SMO junto con las de los grupos B2 y F muestran concentraciones menores de Zr, Hf, Sm, Y y Yb ([Figura 25A](#)), con respecto a las riolitas de fayalita y a las rocas de los

grupos anorogénicos asociados al RRG (A, B1, E) que, por el contrario, tienen altos contenidos en estos elementos y en Nb, y Ce, Rb y Th, y presentan anomalías negativas de Sr, Ba y P más pronunciadas (**Figura 25B**). Dichas anomalías, coincide con las reportadas en la provincia Magmática del Trans-Pecos (PMTP) para las rocas hipercalcinas y algunas metaluminosas (**Parker y Hederson, 2021**), y el contenido alto en Y y Zr concuerda con las reportadas por **Cameron et al. (1980)** para las riolitas de ferroaugita, relacionadas por el mismo autor a la PMTP.

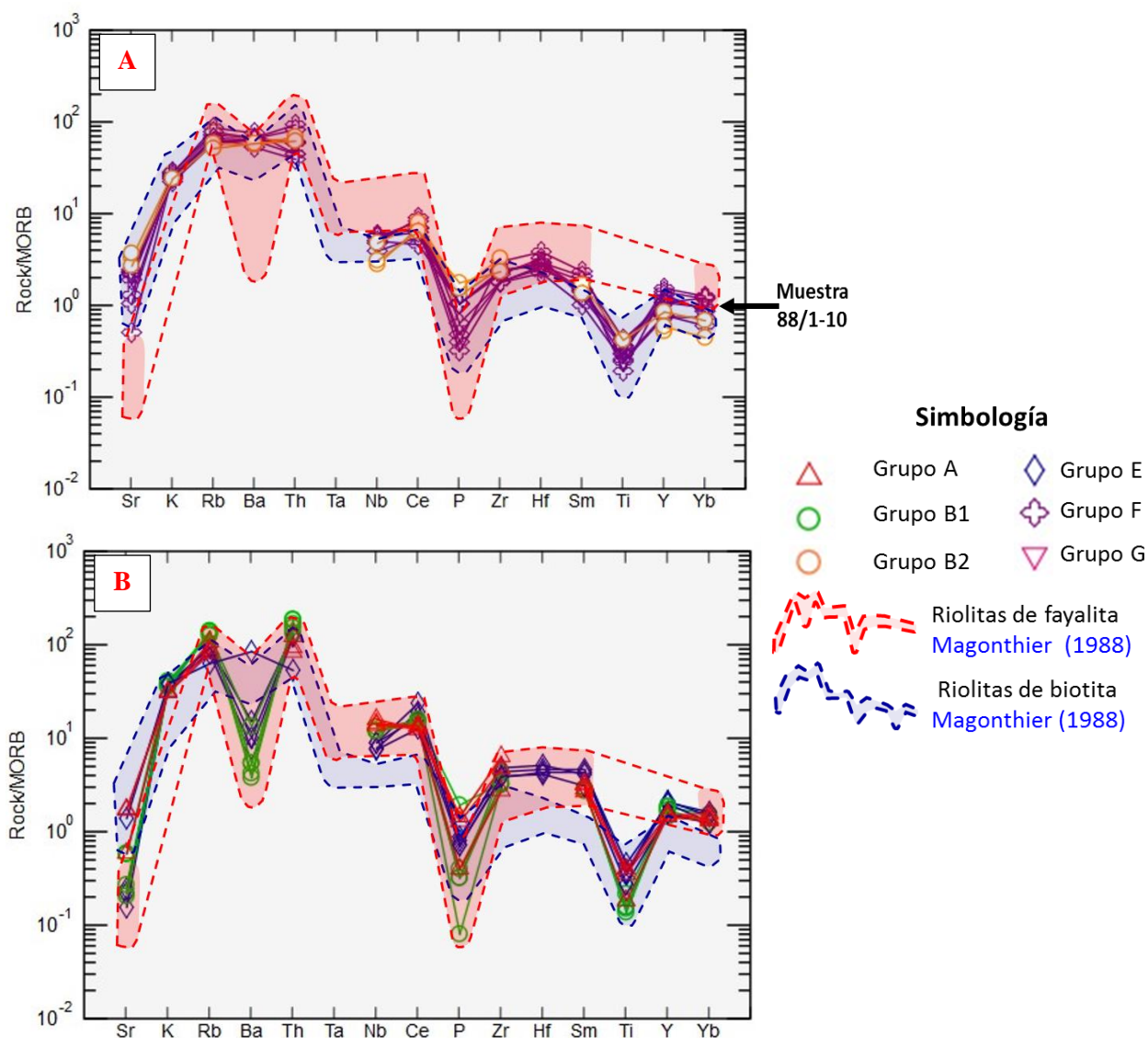


Figura 25. Diagrama Spidernormalizado a MORB según **Pearce (1983)**. (A) Comportamiento de muestras representativas de los grupos B2 y F; (B) Comportamiento de muestras representativas de los grupos A, B1 y E.

V.3.2 Comportamiento geoquímico de REE

Las riolitas de biotita y de fayalitas tomadas como referencia, muestran un comportamiento distinto en el contenido de tierras raras (REE). En las riolitas de fayalita se observa una mayor concentración de tierras raras ligeras (LREE) y pesadas (HREE), además, se observa una pronunciada anomalía en Europio (Eu). Las muestras asociadas al volcanismo del RRG de los grupos A, B1 y E tienen un comportamiento muy acorde a estas riolitas (Figura 26A), a excepción de la anomalía en Europio que es variante dependiendo del grupo, con contenidos menores las del grupo B1, después las del grupo A y con valores más altos en Eu, las muestras del grupo E. En el volcanismo félsico hiperalcalino y metaluminoso reportado en la Provincia Magmática del Trans-Pecos, los patrones tierras raras también muestran un enriquecimiento de LREE y patrones planos de HREE, con anomalías negativas en Eu muy marcadas (Parker y Hederson, 2021). La similitud en elementos traza y en tierras raras entre las muestras identificadas como anorogénicas en esta investigación y las del Trans-Pecos, permite una vez más evidenciar la relación de estas muestras con el volcanismo del Rift del Río Grande.

Por otro lado, las muestras del grupo F y B2, tienen un comportamiento similar a las riolitas de biotita, con concentraciones de REE notablemente más bajas que las riolitas de Fayalita y sin tener una anomalía en Eu tan contrastante con los demás elementos (Figura 26B).

Las comparaciones entre las firmas geoquímicas observadas permiten confirmar la presencia de rocas anorogénicas asociadas al RRG y orogénicas relacionadas a la SMO, donde las representantes de las primeras son los grupos A, B1 y E, y seguramente, si se contara con REE del grupo D, y G, mostraría un comportamiento similar, debido a la asociación que se ha tenido entre estos grupos con las rocas anorogénicas en otros diagramas. Por otro lado, los ejemplares claros de rocas orogénicas son las rocas del grupo F, y al parecer, las rocas del grupo B2. En cuanto al Grupo G, en otros diagramas parecía estar asociado a la SMO, aunque si se contara con más datos o con información geoquímica de REE se podría confirmar o refutar esta hipótesis.

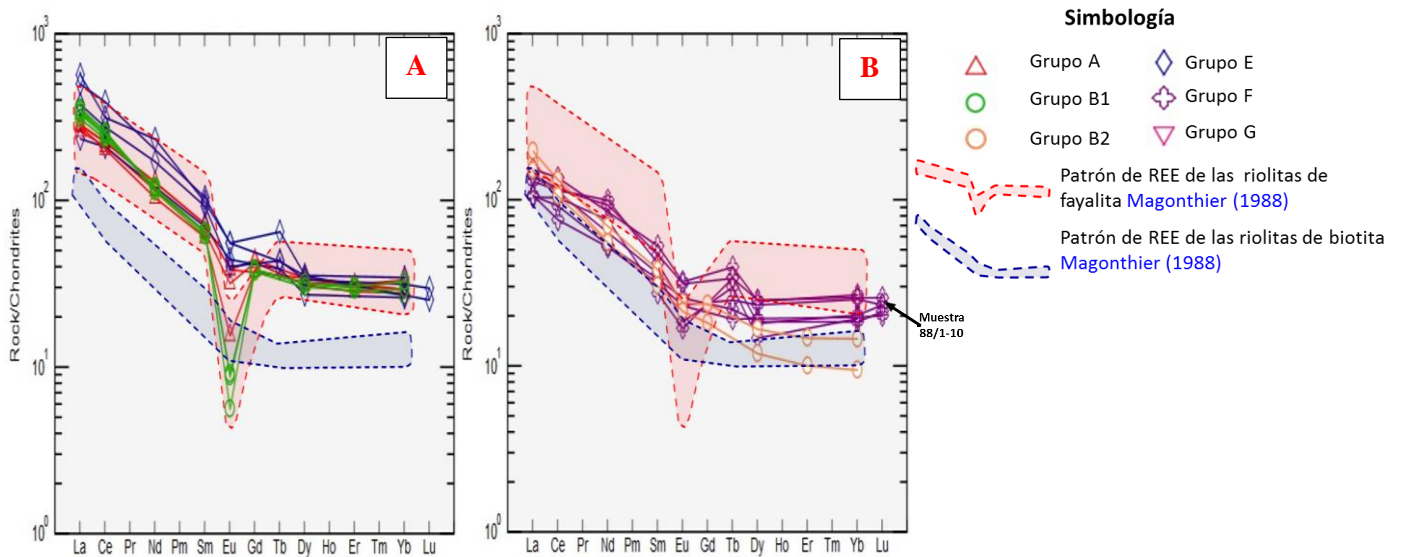


Figura 26. Diagrama de tierras raras normalizado a condritas propuesto por Sun y McDonough (1989). (A) Comportamiento de las muestras representativas de los grupos A, B1 y E; (B) Comportamiento de las muestras representativas de los grupos B2 y F.

V.5.- Datos geocronológicos

En general, la variación de edades, para las rocas ubicadas dentro la delimitación de la Provincia de la Sierra Madre Occidental está influida por la zona en la que se encuentran localizadas. Las que se ubican en el centro de la provincia, que conciernen al grupo F, que corresponden a un rango de edad muy variado que va desde 36.6 Ma a 25.9 Ma (Figura 27).

Por otro lado, las muestras ubicadas en el borde Oriental de la SMO, que corresponden a algunas muestras del grupo D y a las del Grupo E, cuentan con edades más jóvenes que las anteriores (Grupo F) restringiéndose al rango de 29.1 a 33 Ma (Figura 27), siendo las del grupo E, las más antiguas. El resto de las rocas del grupo D, localizadas fuera de la SMO y en el centro del estado, son notoriamente más antiguas en su mayoría, con un rango de edades que se limita de 37.9 a 35.7 Ma (Figura 27).

Las rocas localizadas al este del estado, que incluyen a los grupos A, B1, B2 y C, son rocas relativamente más jóvenes, con edades que varían de 34.6 a 29.5 en su mayoría, a excepción de las muestras del grupo C, que se destacan por ser las rocas más jóvenes dentro de esta base de datos, con la edad de 24 Ma (Figura 27).

Por último, las rocas del norte, que corresponden a las obsidiasnas del grupo G, no tienen edad exacta registrada, pero según la información original, se menciona que son del Oligoceno, lo que significa que podrán tener edades dentro del rango de 33.9 a 23 Ma.

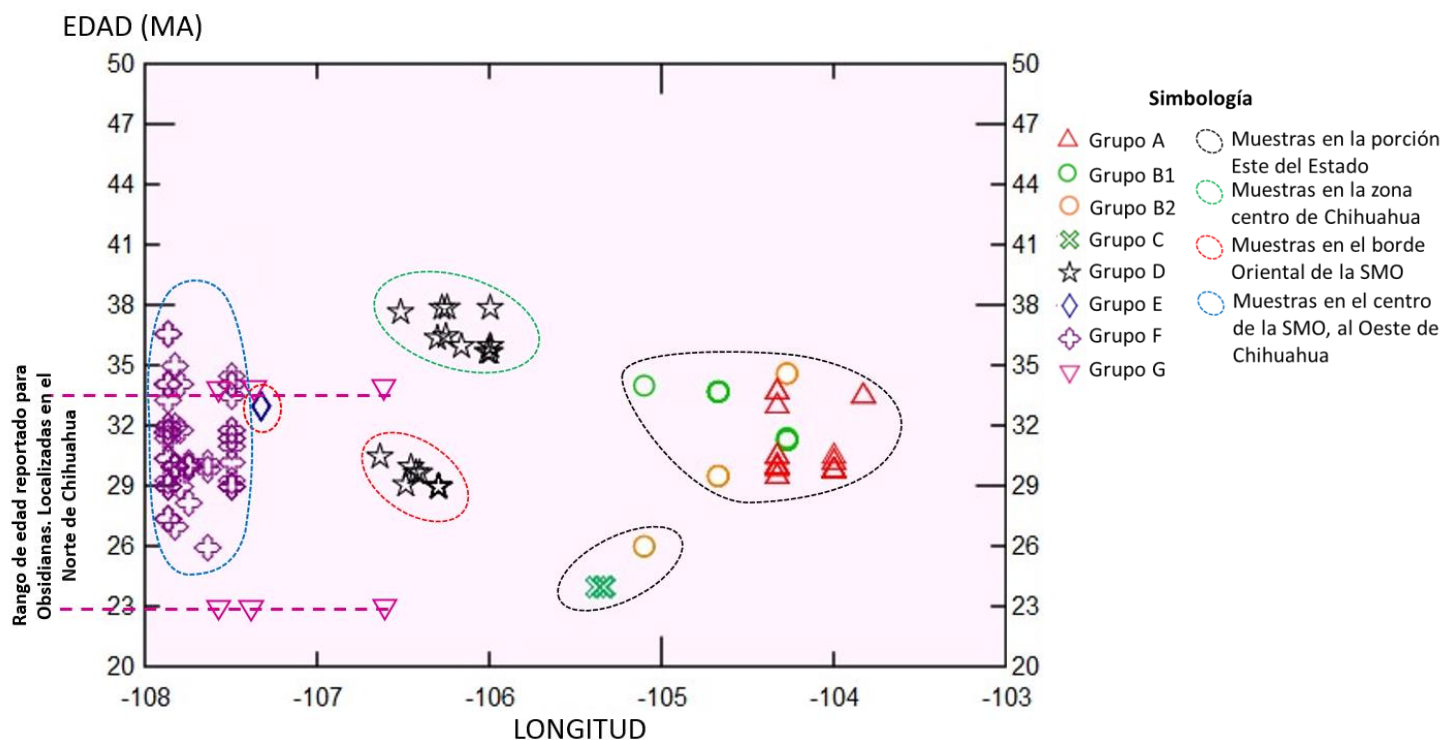


Figura 27. Diagrama que muestra la edad en millones de años que tiene cada roca con respecto a la longitud. Los datos están agrupados en polígonos dependiendo de la zona donde se encuentre en el estado de Chihuahua, cada zona se representa con un color distinto. Se muestra un símbolo diferente para cada grupo de rocas.

Tomando en cuenta los análisis petrogenéticos mencionados anteriormente que establecen que los grupos A, B1, D, E y G se relacionan entre sí y que están asociados a la migración al oeste del volcanismo del Rift del Río Grande en Chihuahua, es posible en base a los datos geocronológicos tener una noción en cuanto al desarrollo de este volcanismo en función del tiempo y del espacio. El Grupo D, cuenta con las rocas evidentemente más antiguas asociadas al RRG, y su variación en edad disminuye conforme se acerca a las muestras del mismo grupo localizadas en el borde Oriental de la SMO. Esta distribución de datos es muy evidente y permite establecer que el volcanismo migró de noreste a suroeste desde Texas hacia el centro de Chihuahua (Figura 28). Además, al tratarse de las rocas más antiguas, se propone que este grupo corresponde a una primera etapa (1) en el desarrollo del Rift en la región. La segunda etapa (2), se plantea que está evidenciada por las rocas de los grupos A, y B1 ya que cuentan edades más recientes que en la etapa 1, pero con un

comportamiento similar en donde también se evidencía una sucesión de edades en la misma dirección, pero menos notoria.

Al no contar con edad exacta de las unidades localizadas en el norte asociadas a este Rift (grupo G), no se puede afirmar si el volcanismo de esta zona fue una etapa anterior, posterior o contemporánea a la asociada al Grupo D. Pero de acuerdo con las edades de las muestras del grupo E, que se encuentran en el borde Oriental de la Sierra Madre, pero más al norte que las del Grupo D, y al contar con edades relativamente más antiguas que estas (33 Ma), podría indicar que se trata de una etapa anterior de desarrollo del Rift. Pero se requirieren datos geocronológicos exactos de rocas relacionadas al RRG en el norte de Chihuahua para confirmar o contradecir esta teoría.

La variación de norte a sur de las edades del grupo F, permite evidenciar que la migración del volcanismo de la SMO asociado a estas rocas es en esta dirección, al menos en el centro de la provincia. Siendo por lo general, las rocas del norte más antiguas que las del sur, teniendo una variante secundaria este-oeste. Sin embargo, fuera de los límites fisiográficos establecidos para esta provincia, las rocas de los grupos C y B2, también presentan características geoquímicas que son similares a las rocas *típo* de la SMO. La distribución de edades para estas muestras parece indicar que la migración del volcanismo en esta zona es de sur a norte. Donde las rocas del grupo C son las más jóvenes. Sin embargo, una mayor cantidad de datos sería importante para establecer de mejor manera la evolución del volcanismo de la SMO en esta porción de Chihuahua. Ya que esta interpretación está basada en una cantidad mínima de datos que pueden no ser representativos. Además, para el Grupo C, haría falta definir mediante elementos traza si realmente se puede asociar a las SMO.

Comparando al volcanismo de las dos provincias, las edades indican que el desarrollo de cada una fue en diferente dirección, mientras el volcanismo de la Sierra Madre Occidental migra de norte a sur con variaciones este-oeste, el del Rift del Río Grande aparentemente migró de noreste a suroeste, en diferentes episodios de norte a sur (**Figura 28**).

Estas relaciones en edades, que muestran una migración del volcanismo asociado al RRG, difiere con la propuesta de que las rocas félsicas alcalinas del Trans-Pecos son la migración del volcanismo de la SMO hacia el estado de Texas, siendo las primeras las más

antiguas y las de Texas las más jóvenes. Sin embargo, considerando estos datos se propone que, la migración del volcanismo de las rocas anorogénicas de Chihuahua proviene de Texas, en diferente sentido a lo propuesto por [Barker et al. \(1979\)](#).

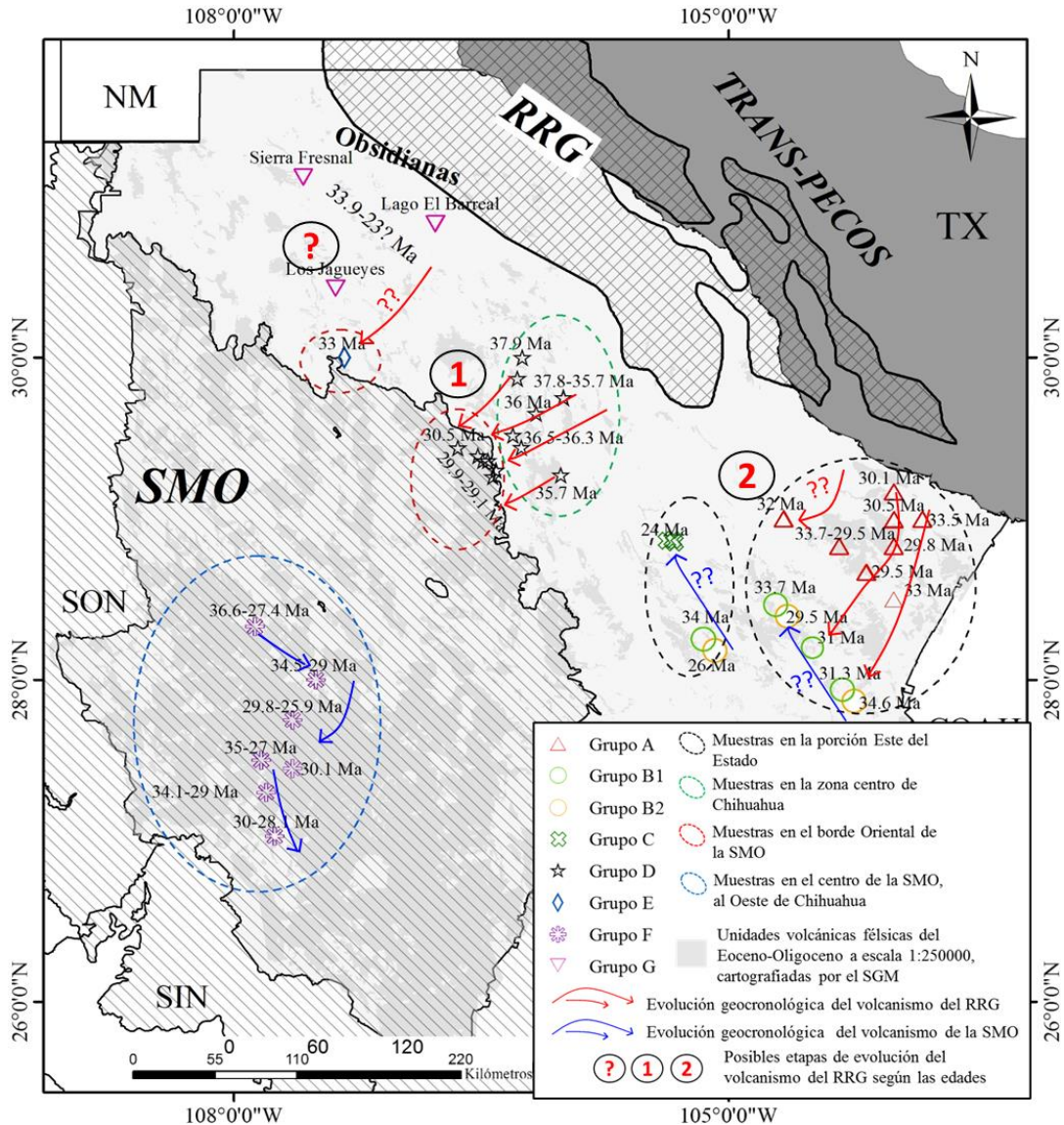


Figura 28. Mapa de distribución de edades para cada roca que cuenta con datación exacta. Las muestras están separadas por grupos con su respectiva simbología cada uno. Además, se muestran las mismas zonas de la Figura 27. Delimitadas con línea punteada distinguidas por colores. Se muestra la dirección de evolución del volcanismo asociado a las dos provincias y las etapas de desarrollo establecidas para el Rift del Río Grande en este estudio. **SON:** Sonora; **SIN:** Sinaloa, **TX:** Texas, **NM:** Nuevo México **SMO:** Sierra Madre Occidental, delimitación obtenida de Sitio del [INEGI \(2022\)](#); **RRG:** Rift del Río Grande es una modificación de [Villarreal-Fuentes et al. \(2016\)](#), donde se representa el límite espacial de los sedimentos Plio-Cuaternarios asociados a este Rift, digitalizado por [Arredondo-Contreras \(2023\)](#) para representar la extensión que de los productos asociados a esta provincia en Chihuahua o la morfología de cuencas asociadas a esta provincia magmática en Chihuahua. La cartografía de las litologías fue obtenida de las cartas geológicas en formato *shapefile*, a escala 1:250 000 recopiladas del GeoInfoMex ([Servicio Geológico Mexicano, 2022](#)), y modificadas para esta investigación. La delimitación de la Provincia del Trans-Pecos fue obtenida de [Cook \(2022\)](#).

V.6. Rocas anorogénicas hiperaluminosas y metaluminosas

Inicialmente, se contemplaba que la migración del volcanismo asociado al Rift del Río Grande en Chihuahua estaría en su mayoría representada por rocas con afinidad hiperalcalina, tal como está evidenciado en Texas en la Provincia Magmática del Trans-Pecos (Barker et al., 1977; en Parker y Hederson, 2021). Aunque, es evidente la presencia de especímenes hiperalcalinos en Chihuahua, con edades del Eoceno tardío-Oligoceno, la mayoría de las muestras procesadas en esta investigación, que reflejan ser anorogénicas, son carácter hiperaluminoso o metaluminoso. Estas rocas muestran proceder de magmas que originalmente contienen menores proporciones de CaO (Figura 19A) y mayores de Na₂O+K₂O en comparación con las rocas asociadas de la SMO (e.g. riolitas de biotita; Figura 18B), proponiendo que estos últimos provienen de una fuente distinta a la de los magmas del RRG. Como se ha mostrado anteriormente, el contenido en elementos traza, REE y relaciones de FeOt/MgO, también permitieron diferenciar a las rocas provenientes de contextos tectónicos orogénicos, de los anorogénicos.

La existencia de rocas anorogénicas metaluminosas e hiperaluminosas asociadas al Rift del Río Grande, ya ha sido reportada por Barker (1977) en el Trans-Pecos. En Chihuahua, la ocurrencia de las rocas anorogénicas con esta afinidad puede tener varias explicaciones, que se enuncian a continuación:

- ***Riolitas de topacio***

Se ha documentado en el oeste de Estados Unidos a lo largo del Basin and Range y del Rift del Río Grande, la ocurrencia de rocas félsicas de origen anorogénico y de carácter metaluminoso e incluso, hiperaluminoso, que se caracterizan por contener altos contenidos en flúor (>0,2 % en peso; Christiansen et al., 1983). Estas rocas son descritas como **riolitas de topacio**, ya que regularmente tienen la característica de presentar a este mineral. En México, este tipo de rocas (también conocidas como riolitas de estaño; Foshag y Fries (1942) en Christiansen et al., 1986) se reportan con edades de 32 a 27 Ma (Huspeni et al., 1984 en Christiansen et al., 1986) y ocurren abundantemente en La Mesa Central de México dentro del Campo Volcánico de San Luis Potosí (Rodríguez-Riós et al., 2007, 2009), así como de forma paralela a la SMO, donde se han reportado en sitios desde el estado de Durango hasta cerca de la Ciudad de México.

Las riolitas de topacio coinciden con las rocas anorogénicas no hiperalcalinas de esta investigación en sus relaciones de elementos traza, ya que ambos contienen una menor concentración en Sr, Ba y Eu y contenidos mayores en Rb, Y, Nb y Th que en las rocas calcoalcalinas, así como bajos valores de Ca, Ti y P. Considerando las proporciones de Rb contra la relación Y+Nb, las riolitas de topacio y las anorogénicas no hiperalcalinas de este estudio son clasificadas dentro del campo de granitos intraplaca (VAG) y, además, ambas presentan altas relaciones de Fe/Mg (Christiansen, et al., 1986).

Estas características en común sustentan la idea de que existen rocas metaluminosas e hiperaluminosas de origen anorogénico, además de las rocas hiperalcalinas. Y que, en el caso de Chihuahua, podrían tratarse de riolitas de topacio. Sin embargo, hace falta información geoquímica y mayormente mineralógica, de los datos recopilados en esta investigación para confirmar esta idea.

- ***Alteración en las muestras***

Al no contar con información sobre el estado de alteración de las muestras, no se conoce si los resultados al calcular el *índice de Shand* son siempre confiables para todas las muestras, ya que la alteración puede causar pérdida o enriquecimiento en los álcalis, en particular en el Na₂O, que es altamente móvil. Esto puede causar que al calcular el *índice de Shand*, la pérdida de Na₂O provoque que las rocas hiperalcalinas pierdan su identidad mediante este criterio, pero que conserven sus características hiperalcalinas mediante otras consideraciones, como en las relaciones de Fe/Mg o los contenidos de elementos traza y de REE, y por esta razón, se justificaría el porqué del comportamiento hiperalcalino de las rocas metaluminosas e hiperaluminosas en diagramas donde no están involucrados los álcalis. De igual forma, puede ocurrir de manera inversa en donde rocas originalmente metaluminosas o hiperaluminosas se enriquezcan en Na₂O a tal grado que refleje un carácter hiperalcalino, pero que mediante elementos traza y REE demuestren lo contrario.

Esto parece suceder con la muestra hiperalcalina **88/1-10**, localizada en el centro de a SMO occidental, que contiene cantidades de Na₂O demasiado elevadas incluso para una roca hiperalcalina si se compara con las de los otros grupos (Figura 30). Además, el contenido en elementos traza (Figura 23A) y el comportamiento de REE (Figura 24B) muestran patrones más acordes a las muestras tipo de la Sierra Madre Occidental.

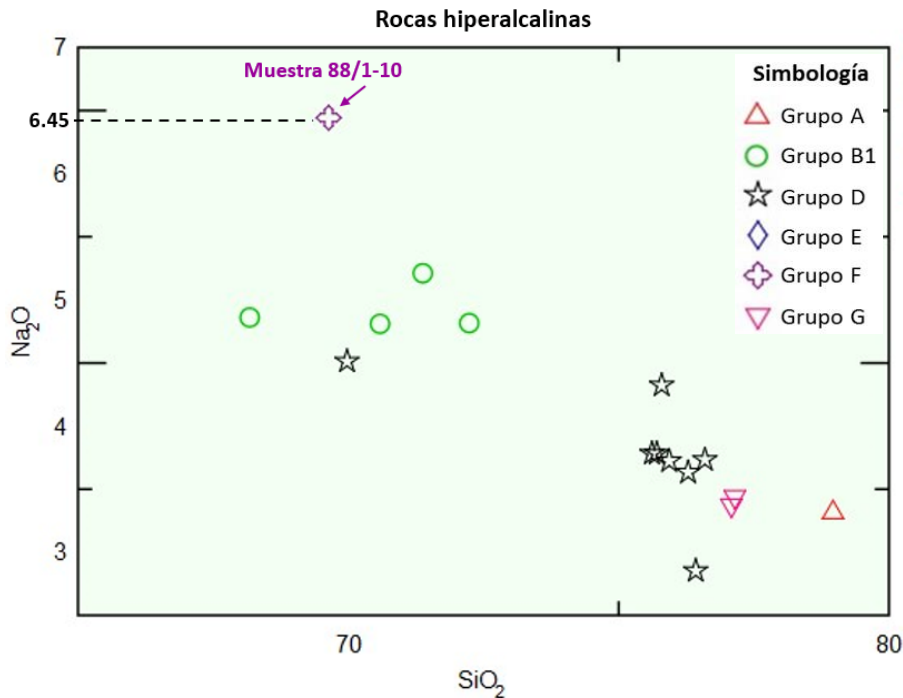


Figura 30. Diagrama de variación de Na_2O vs SiO_2 . Se muestran a las rocas hipercalinas con información de elementos mayores. Clasificadas por grupos de muestras.

- **Riolitas de Fayalita**

La mineralogía reportada para las riolitas de fayalita es comúnmente asociada a riolitas hipercalinas. Sin embargo, mediante el *índice de Shand* son clasificadas como hiperaluminosas. Pero muestran mediante las relaciones de FeO_t/MgO , y por los contenidos de elementos traza y REE una fuerte correlación con las rocas anorogénicas. Esto pudiera dar un indicio de que puede existir alguna alteración, que repercute especialmente en el contenido de álcalis, ocasionando que los análisis geoquímicos de elementos mayores no sean tan representativos de la roca. Por otro lado, Cameron et al. (1980) reporta riolitas con mineralogía similar de rocas donde la relación molar de Na_2O+K_2O/Al_2O_3 varía de un rango de 0.89 a 1.03, es decir, no necesariamente son hipercalinas. En el caso de las riolitas de fayalita, esta relación tiene un rango de 0.80 a 0.97, que es notablemente mayor al de las riolitas de biotita con rangos <0.81 , para lo cual se le puede atribuir el criterio de rocas con tendencia hipercalina.

Las similitudes petrológicas, geográficas y temporales entre las riolitas de fayalita que reporta Mangothier (1988) y las que reporta Cameron et al. (1980) descritas como riolitas

de ferroaugita, podrían indicar que se trata de la misma unidad. De ser así, se puede asociar a ambas unidades a las rocas de Texas que resultan de los magmas producto del desarrollo del RRG, tal como lo hace [Cameron et al. \(1980\)](#) para las riolitas de ferroaugita. Esto podría explicar el comportamiento petrogenético tan diferente que han mostrado las riolitas de biotita y de fayalita a lo largo de este estudio.

V.7 Diferencias mineralógicas

La asociación mineralógica de feldespato alcalino sódico del tipo sanidina, clinopiroxeno de Fe y Na, llamado aegirina, olivino del tipo fayalita, obtenida par algunas de las muestras hiperalcalinas del grupo D a las cuales se obtuvo acceso a la petrografía, y para las riolitas de ferroaugita, junto con la asociación de sanidina-fayalita de las riolitas de fayalita ([Mangothier 1988](#)), demuestra que el volcanismo félsico anorogénico asociados al Rift del Río Grande se puede diferenciar por esa asociación mineralógica del volcanismo félsico calcoalcalino de la Sierra Madre Occidental, que típicamente se caracteriza por la ocurrencia de clinopiroxeno>ortopiroxeno ambos ricos en Mg, y una importante presencia de Plagioclasas y con los minerales hidratados como la biotita y la hornblenda ([Cameron et al., 1980](#)). Para el resto de las rocas hiperaluminosas y metaluminosas, las cuales, no cuentan con información petrográfica, se pueden asociar dependiendo de las características geoquímicas que presentan. Las rocas de estas afinidades de los grupos anorogénicos (A, B1, D, y E), muestran relaciones de elementos mayores más acorde a las muestras hiperalcalinas, por lo que se esperaría que tuvieran una mineralogía similar a pesar de no ser de este tipo, como lo hacen las riolitas de fayalita y ferroaugita. Las rocas del grupo G se excluyen porque al tratarse de obsidianas, no se garantiza la presencia de minerales observables. Sin embargo, las muestras de Sierra Fresnal son hiperalcalinas, por lo tanto, se esperaría que se formaran lo mismos minerales en el caso de haber tenido un enfriamiento no tan abrupto, lo cual pudiera corroborarse en otras litofacies en los afloramientos de esos cuerpos rocosos.

Mientras que las rocas hiperaluminosas y metaluminosas de los grupos B2 y F tienen una geoquímica de elementos mayores que corresponden con el comportamiento de las muestras tipo de la SMO (Batopilas y riolitas de biotita). Por lo tanto, se esperaría una mineralogía típica de las rocas calcoalcalinas reportadas en Chihuahua.

V.8. Delimitación espacial de las unidades del RRG

En el estado de Chihuahua, las unidades de rocas volcánicas de composición félsica relacionadas genéticamente al Rift del Río Grande, se distribuyen en una franja Oriental que se extiende desde el límite de la provincia del Trans-Pecos en Texas, hacia el borde oriental del límite fisiográfico de la Sierra Madre Occidental. Esta franja de volcanismo del RRG, parece tener una orientación NW-SE, mostrando un paralelismo con la provincia del Trans-Pecos. Existen zonas donde el volcanismo de la SMO y el del RRG coexisten, mostrando un área de volcanismo mixto (Figura 31A).

En este estudio, el volcanismo del RRG se atribuye a las rocas de los grupos A, B1, D, E y G, por las características geoquímicas y mineralógicas que permiten correlacionarlos con un proceso anorogénico. Los especímenes hiperalcalinos se presentan a lo largo de toda la franja, acompañados de rocas hiperaluminosas y metaluminosas (Figura 31B).

En la zona central (representada por el grupo D), se encuentra la mayor concentración de rocas hiperalcalinas, lo que puede atribuirse a mayor manifestación de este tipo de volcanismo en esta zona, o bien, a la cantidad de datos que es mayor en este caso. Además, en este grupo, existe un dominio de rocas hiperaluminosas por encima de las metaluminosas. Mientras que, en las unidades localizadas más al sur (grupo A y B1), el volcanismo metaluminoso domina en comparación con el hiperaluminoso (Figura 17).

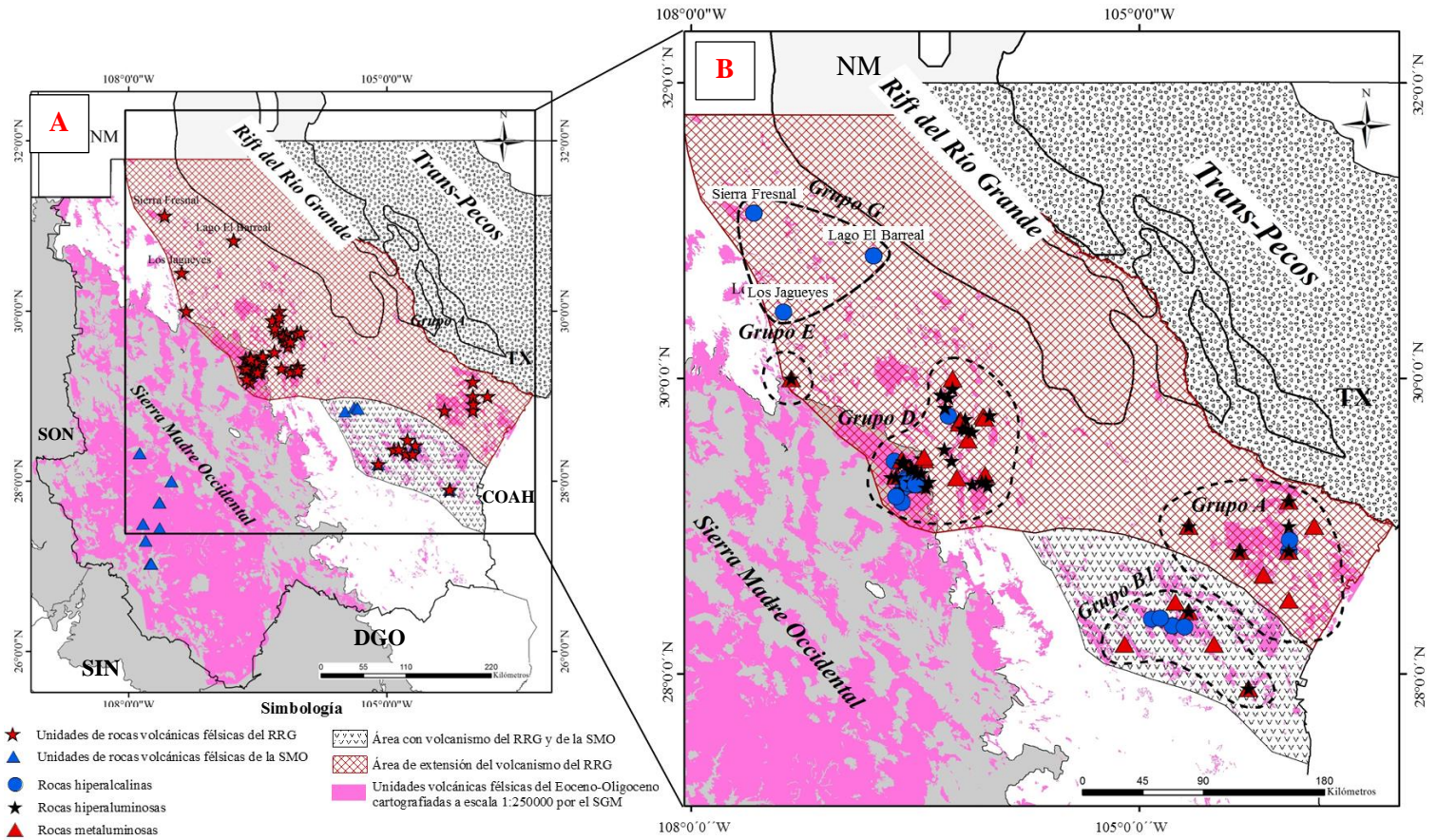


Figura 31. Mapa de distribución espacial de las unidades del RRG y de la SMO. (A) Se muestran las unidades de rocas volcánicas del Eoceno tardío-Oligoceno clasificadas según la Provincia magmática a la que se atribuyen (RRG, estrellas rojas, o SMO, triángulos azules); (B) Ampliación a la zona oriental del Estado, mostrando sólo a las unidades atribuidas al RRG, indicando los grupos a los que pertenecen y clasificadas en hiperaluminosas (estrellas negras), metaluminosas (triángulos rojos) e hipercalinas (círculos azules).

Rift del Río Grande: Modificación de Villarreal-Fuentes et al. (2016), donde se representa el límite espacial de los sedimentos Plio-Cuaternarios asociados a este Rift, digitalizado por Arredondo-Contreras (2023) para representar la extensión que de los productos asociados a esta provincia en Chihuahua. Delimitación de la **Provincia del Trans-Pecos:** Obtenida de Cook, T. (2022). **Sierra Madre Occidental:** Delimitación obtenida de Sitio del INEGI. (2022); **COAH:** Coahuila, **SON:** Sonora, **SIN:** Sinaloa, **DGO:** Durango **TX:** Texas, **NM:** Nuevo México

VI. CONCLUSIÓN

El volcanismo del Rift del Río Grande (RRG) en Chihuahua es evidenciado por la presencia de rocas volcánicas félsicas tanto de carácter hiperalcalino, como hiperaluminoso y metaluminoso, presentando características mineralógicas y geoquímicas de rocas anorogénicas que se pueden diferenciar de las rocas orogénicas de la Sierra Madre Occidental.

Las rocas del RRG localizadas en el estado, provienen de magmas que contienen mayores concentraciones de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ y contenidos relativamente más bajos de CaO y Al_2O_3 en comparación a las rocas típicas de la SMO. Conforme estos magmas se diferencian se asemejan en la proporción de estos elementos mayores. Por lo tanto, cuando alcanzan porcentajes de $\text{SiO}_2 > 75\%$ tienden a presentar proporciones parecidas en estos elementos, dificultando la distinción entre las rocas de cada contexto. Esta asociación de elementos mayores provoca que para las rocas del RRG se formen menos cantidades de anortita normativa y mayor proporción de ortoclasa normativa en comparación con las rocas félsicas de la SMO.

La relación de $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ es mayor en el caso de las rocas anorogénicas relacionadas al RRG clasificándose siempre como “ferrosas” en el diagrama SiO_2 vs Fe^* propuesto por [Frost et al. \(2008\)](#), donde las muestras localizadas en el centro y noreste del estado presentan las relaciones más altas. Y las rocas anorogénicas localizadas al este son ligeramente menos ferrosas. En cambio, las rocas de orogénicas de la Sierra Madre Occidental tienen proporciones de Mg más importantes, clasificándose siempre como “magnesianas”.

La mineralogía modal es otro criterio por el cual se puede diferenciar a las rocas félsicas de cada provincia magmática. Las rocas félsicas del RRG presentan como feldespato característico casi exclusivamente a la sanidina (feldespato rico en Na), al clinopiroxeno de tipo aegirina y al olivino rico en Fe llamado fayalita. Mientras que las rocas típicas de la SMO son ricas en plagioclasas, clinopiroxeno > ortopiroxeno ambos ricos en Mg y los minerales hidratados biotita y hornblenda ([Cameron et al., 1980](#)). Como productos petrológicos, las rocas volcánicas félsicas de la Sierra Madre Occidental varían de dacitas-riodacita-riolitas conforme se vuelven más félsicas coincidiendo con la serie típica de rocas

calcoalcaldas. Mientras que las variedades típicas del RRG forman las series cuarzo latita-riolita y cuarzo traquita-riolita hiperalcalina donde ambas series representan un carácter transicional a alcalino respectivamente.

El contenido de HFS y de Nb, Ce, Rb y Th es mayor en las rocas del RRG y presentan anomalías negativas de Sr, Ba y P más abruptas que para las rocas de la SMO. Por otro lado, estas últimas presentan menor cantidad de LREE y HREE, en comparación con las del RRG que se caracterizan por tener un enriquecimiento de LREE. Pero presentan anomalías de Eu más pronunciadas.

La distribución espacial de las unidades asociadas al RRG muestra que sus productos volcánicos félsicos se distribuyen a lo largo de una franja Oriental en el estado de Chihuahua, donde las rocas localizadas más al oeste de esta franja colindan con el límite este de la delimitación fisiográfica de la SMO. Además, en la porción este del estado de Chihuahua, coexisten las rocas asociadas a ambas provincias (grupos B1 y B2). Los datos geocronológicos y del volcanismo félsico asociado a cada evento magmático indican, por un lado, que ambos magmatismos coexistieron, y, por otro lado, que la migración del volcanismo del RRG ocurrió a partir de la Provincia magmática del Trans-Pecos en Texas, hacia el estado de Chihuahua (de este a oeste). Caso contrario, el volcanismo de la Sierra Madre Occidental muestra una evolución del volcanismo principalmente de norte a sur con variedades este-oeste.

La prolongación sur del volcanismo del RRG en Chihuahua es propuesta con los datos geoquímicos de este manuscrito. Sin embargo, es necesario complementar con la cartografía, estudios petrográficos, análisis estructurales y otras observaciones realizadas en campo, para definir de manera más acertada la presencia y extensión de este volcanismo en Chihuahua.

VII. REFERENCIAS

- Arredondo-Contreras, T. A., (2023).** Caracterización y puesta en evidencia de riolitas hiperalcalinas en Chihuahua, México: Significado geodinámico. [Tesis de Licenciatura].
- Arredondo-Contreras, T. A., Moreno-García C. M., Vidal-Solano J. R., (2022).** [Seminario] El Rift del Río Grande en México, posible fuente de REE (?). Proyecto LA ROCATECA y programa de Divulgación y Difusión Científica/Tecnológica y Humanística (DAVD).
- Arredondo-Contreras, T. A., Vidal-Solano, J. R., Moreno-García, C. M., Robles-Robles P. G., (2022).** [Póster] El Rift del Río Grande en México: rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.
- Arredondo-Contreras, T. A., Vidal-Solano, J. R., (2022).** [Ponencia] El Rift del Río Grande en México: las rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.
- Arredondo-Contreras T. A., Vidal-Solano, J. R., Moreno-García, C. M., Paz-Moreno F. A., Velderrain-Rojas L. R., (2022).** [Ponencia] El Rift del Río Grande en México: geoquímica de las rocas félsicas anorogénicas de chihuahua correlacionadas con Texas, nuevo México y colorado. Congreso Nacional de Geoquímica XXXII-INAGEQ 2022.
- Barker, D. S., (1977).** Northern Trans-Pecos magmatic province: Introduction and comparison with the Kenya rift. Geological Society of America Bulletin, 88(10), 1421-1427.
- Arredondo, M. J. A., Guzmán, I. Iván., (2008).** Álamos de San Antonio H13-D54, escala 1:50,000, estado de Chihuahua [Informe Técnico].
- Bryan, S. E., Riley, T. R., Jerram, D. A., Stephens, C. J., Leat, P. T., Menzies, M. A. & Ebinger, C. J., (2002).** Silicic volcanism: an undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. Special Papers-Geological Society of America, 97-118.
- Barker, D. S., (1979).** Cenozoic magmatism in the Trans-Pecos province: Relation to the Rio Grande rift. Rio Grande Rift: Tectonics and Magmatism, 14, 382-392.

- Black, S., Macdonald, R. & Kelly, M. R., (1997).** Crustal origin for peralkaline rhyolites from Kenya: evidence from U-series, disequilibria and Th-isotopes. *Journal of Petrology*, 38(2), 277-297.
- Cameron, K. L., Cameron, M., Bagby, W. C., Moll, E. J. & Drake, R. E., (1980).** Petrologic characteristics of mid-Tertiary volcanic suites, Chihuahua, Mexico. *Geology*, 8(2), 87-91.
- Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S. & Gunn, S., (1989).** Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: A link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B6), 7817-7840.
- Cameron, M., Bagby, W. C. & Cameron, K. L., (1980).** Petrogenesis of voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 74(3), 271-284.
- Christiansen, E. H., Sheridan, M. F. & Burt, D. M., (1986).** The geology and geochemistry of Cenozoic topaz rhyolites from the western United States.
- Cipar, J. H., Garber, J. M., Kylander-Clark, A. R., & Smye, A. J., (2020).** Active crustal differentiation beneath the Rio Grande Rift. *Nature Geoscience*, 13(11), 758-763.
- CONABIO, (2022).** Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [diciembre 2022].
- Cook, T., (2022).** Travels in Geology: Touring Texas' Trans-Pecos. Recuperado de: Earth: The Science Behind the Headlines website: <https://www.earthmagazine.org/article/travels-geology-touring-texas-trans-pecos/> [4 de enero de 2023].
- De la Roche, H. D., Leterrier, J. T., Grandclaude, P. & Marchal, M., (1980).** A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses—its relationships with current nomenclature. *Chemical geology*, 29(1-4), 183-

- Elston, W. E. & Bornhorst, T. J., (1979).** The Rio Grande Rift in Context of Regional Post-40 MY Volcanic and Tectonics Events. *Rio Grande rift: Tectonics and magmatism*, 14, 416-438.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. & Bryan, S., (2005).** Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.
- Frost, B. R. & Frost, C. D., (2008).** A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49(11), 1955-1969.
- Herrera G. J. D. & Hernández R. O. M., (2002).** Carta Chorreras clave H13-C59 escala 1:50 000 estado de Chihuahua [Informe Técnico].
- Hughes, C. J., (1972).** Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, 109(6), 513-527.
- Huspeni, J. R., Kesler, S. E., Ruiz, J., Tuta, Z., Sutter, J. F. & Jones, L. M., (1984).** Petrology and geochemistry of rhyolites associated with tin mineralization in northern Mexico. *Economic Geology*, 79(1), 87-105.
- INEGI, (2022).** Fisiografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#Mapa> [diciembre del 2022].
- Le Bas, M. L., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B. & IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, (1986).** A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Lehnert, K., Su, Y., Langmuir, C. H., Sarbas, B. & Nohl, U., (2000).** A global geochemical database structure for rocks. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 1, 1012, [doi:10.1029/1999GC000026](https://doi.org/10.1029/1999GC000026). [octubre del 2022].
- Luévano P. J. A., Figueroa P. E. S. & Rivera O. E., (2019).** Trancas H13-C58, escala 1:50, 000, estado de Chihuahua [Informe Técnico].
- Magonthier, M. C., (1988).** Distinctive rhyolite suites in the mid-Tertiary ignimbritic complex of the Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Bulletin de la Société géologique de France*, 4(1), 57-68.

- Maniar, P. D. & Piccoli, P. M., (1989).** Tectonic discrimination of granitoids. Geological society of America bulletin, 101(5), 635-643.
- Macdonald, R., Marshall, A.S., Dawson, J.B., Hinton, R.W. y Hill, P. G., (2002).** Chevckinite-group minerals from salic volcanic rocks of the East African Rift. Mineralogical Magazine, Vol. 66(2), p. 287-299.
- McDowell, F. W. & Mauger, R. L., (1994).** K-Ar and U-Pb zircon chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in central Chihuahua State, Mexico. Geological Society of America Bulletin, 106(1), 118-132.
- Moreno-García, C. M., Vidal-Solano, J. R., Arredondo-Contreras, T. A., Paz-Moreno, F. A., Velderrain-Rojas, L. R., (2022).** [Ponencia] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Congreso Nacional de Geoquímica XXXII-INAGEQ 2022.
- Moreno-García, C. M., Vidal-Solano, J. R., Arredondo-Contreras, T. A., Robles-Robles P.G., (2022).** [Póster] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.
- Moreno García, C. M., Vidal-Solano J. R., (2022).** [Póster] El Rift del Río Grande en Chihuahua, México: Diferencias mineralógicas y geoquímicas con el volcanismo félsico de la Sierra Madre Occidental. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.
- NAV DAT. (2014).** The North American Volcanic and Intrusive Rock Database. Obtenido de Recuperado de: <https://www.navdat.org/NavdatSearch/index.cfm> [diciembre del 2022]
- Servicio Geológico Mexicano, (2022).** GeoInfoMex, El Banco de Datos del SGM. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/> [noviembre del 2022].
- Servicio Geológico Mexicano, (2022).** Consulta de informes. Recuperado de: https://www.sgm.gob.mx/publicaciones_sgm/boletin_sgm.jsp?wparam=4 [noviembre del 2022].
- Shand, S. J., (1927).** Eruptive Rocks. New York: D. Van Nostrand Company

- Sun, S. S., & McDonough, W. F., (1989).** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1), 313-345.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. & Tindle, A. G., (1984).** Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of petrology, 25(4), 956-983.
- Pearce, J. A., (1983).** Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins.
- Pearce, J. A., (1996).** A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12(79), 113.
- Porto T. C. E., (2020).** Descarga Gratuita de Capas Vectoriales (*.shp). EfrainMaps. Recuperado de: <https://www.efrainmaps.es/descargas-gratuitas/estados-unidos/> [diciembre del 2022].
- Riecker, R. E. & Inter-Union Commission on Geodynamics. Working Group 4. (1979).** Rio Grande Rift: tectonics and magmatism (p. 438). Washington, DC: American Geophysical Union.
- Robles-Robles P. G., Vidal-Solano, J. R., Arredondo-Contreras, T. A., Moreno-García, C. M., (2022).** [Póster] Estrategias metodológicas para identificar al Rift del Río Grande en Chihuahua, México. Semana Cultural de Geología XLIII- 2022.
- Robles-Robles, P. G., Vidal-Solano, J. R., Arredondo-Contreras, T. A., Moreno-García C. M., (2022).** [Póster] Estrategias metodológicas para identificar al Rift del Río Grande en chihuahua, México. Reunión Universitaria de Investigación en Materiales XXV-RUIM 2022.
- Rodríguez-Ríos, R., Aguillón-Robles, A., Leroy, J. L., (2007).** Evolución petrológica y geoquímica de un complejo de domos topacíferos en el Campo Volcánico de San Luis Potosí (México): Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24(3), 328-343.
- Rodríguez-Ríos, R., Torres-Aguilera, J. M., (2009).** Evolución petrológica y geoquímica del vulcanismo bimodal oligocénico en el Campo Volcánico de San Luis Potosí (México): Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26(3), 658-673.

Vidal-Solano, J., (2005). Le volcanisme hyperalcalin d'âge miocène moyen du nord-ouest du Mexique (Sonora). Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique (Doctoral dissertation, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III).

Villarreal-Fuentes, J., Levresse, G., Nieto-Samaniego, A. F., Alexandre, P., & Corona-Esquivel, R., (2016). Geochemistry and geochronology of the Sierra de Gomez Limestone-hosted U deposit, Chihuahua: implications for distribution of Rio Grande rift mineral deposits in northern Mexico. *Ore Geology Reviews*, 76, 19-34

Whalen, J. B., & Frost, C. D., (2013). The Q-ANOR diagram: A tool for the petrogenetic and tectonomagmatic characterization of granitic suites. In *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 45, No. 3, p. 24).

Williams, H., Turner, F. J., & Gilbert, C. M., (1954). *Petrography: An introduction to the study of rocks in thin section.*

Winchester, J. A., & Floyd, P. A., (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology*, 20, 325-343.

Softwares:

Carr Michael J., Gazel Esteban. (2017). (Versión 2021) [Software] Igpert para modelar procesos ígneos: ejemplos de aplicación utilizando la versión educativa abierta. *Miner Petrol* 111, 283–289. doi: <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0473-z>

ESRI, (2016). ArcGIS (versión 10.5) [software GIS]. <https://support.esri.com/en/products/desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-5>

Microsoft 365, (2021). Excel (versión 18.0). Windows. <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/excel>