

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



TESIS

ANÁLISIS GEOLÓGICO INTEGRAL
DEL CORREDOR LINARES-BURGOS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA

ING. YADIRA ZULEMA ANTONIO DURÁN

LINARES, NUEVO LEÓN

AGOSTO DE 2024



LA TESIS

**ANÁLISIS GEOLÓGICO INTEGRAL
DEL CORREDOR LINARES-BURGOS**

QUE PRESENTA

ING. YADIRA ZULEMA ANTONIO DURÁN

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

Director de Tesis



DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

LINARES, NUEVO LEÓN

AGOSTO DE 2024



LA TESIS

**ANÁLISIS GEOLÓGICO INTEGRAL
DEL CORREDOR LINARES-BURGOS**

QUE PRESENTA

ING. YADIRA ZULEMA ANTONIO DURÁN

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

COMITÉ DE TESIS


DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS


DR. JORGE ALÁN SALINAS JASSO

CO-DIRECTOR DE TESIS


DR. JUAN CARLOS MONTALVO ARRIETA

CO-DIRECTOR DE TESIS

LINARES, NUEVO LEÓN

AGOSTO DE 2024

Por este medio declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, herramientas y metodologías descritas en la misma.

Atentamente:

Yadira Zulema Antonio Durán

Agosto de 2024

Para David Elí, el niño de mis ojos.

“...Aprenda por qué el mundo se mueve y qué se mueve. Eso es lo único que la mente nunca puede agotar, nunca alienar, nunca ser torturada, nunca temer o desconfiar, y nunca soñar con arrepentirse. Aprender es lo único para ti. Mira cuántas cosas hay que aprender”

- T.H. White en El rey que fue y será.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por regalarme vida para llevar a cabo mis proyectos personales y no dejarme desistir.

Gracias hijo, David Elí, por tu amor, tu paciencia y por todo lo que me has enseñado desde que llegaste a mi vida. Este y todos mis logros son para ti.

Agradezco a mi familia por su comprensión y apoyo durante el tiempo dedicado a la Maestría.

Agradezco con creces al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, mi director de tesis, por su consejo profesional y su guía, así como su comprensión y apoyo durante mi estadía estudiantil.

Gracias al Dr. Jorge Alán Salinas Jasso y al Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta por depositar su tiempo y confianza en este trabajo. Agradezco su entusiasmo y todas las recomendaciones que nutrieron esta tesis.

Agradezco a las personas que nos apoyaron durante las campañas de campo, trabajo de laboratorio y con sus observaciones para esta tesis (M.C. Luis Alejandro Elizondo Pacheco, Ing. Luis Gerardo Ramos Zúñiga, Dr. Víctor Alejandro Leal Cuéllar, Ing. Leyslie López, Omar, Dylan, Hiram, Flor, Alexa).

También agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT), por la oportunidad de pertenecer al programa de Becas Nacional (Tradicional) 2022 - 2 (CVU: 1051321).

Agradezco a mis compañeros Leyslie López y Milton Gómez, por su compañía y su sincera amistad en el posgrado. Así mismo, agradezco a Luis Arista y Eladio Campos, por darme asilo en su hogar y ánimos durante la Maestría.

Mikhail Carbajal, Baebe, gracias por tu amor, paciencia y apoyo durante estos años. Gracias por su amor gatuno a Henry, Eliot, Nicté, Desireé y Rupert.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Características generales de los magmas graníticos	2
1.2.1 Clasificación de rocas graníticas	2
1.2.2 Ocurrencia de los magmas graníticos.....	4
1.2.3 Aplitas.....	4
1.3 Cuerpos hipabisales	5
1.3.1 Mecanismo de emplazamiento dique-fractura.....	6
1.3.2 Sistemas de fracturas y fallas conjugadas.....	7
1.4 Localización del área de estudio.....	9
1.5 Trabajos previos	10
1.6 Justificación	14
1.7 Hipótesis	15
1.8 Objetivos.....	15
1.8.1 Objetivo general	15
1.8.2 Objetivos específicos	15
1.9 Metodología.....	15
1.9.1 Trabajo de campo y recopilación bibliográfica	15
1.9.2 Análisis geoespacial	16
1.9.2.1 Geología	20
1.9.2.2 Lineamientos	22
1.9.2.3 Análisis estructural.....	31
1.9.2.3.1 Tensor de esfuerzos	32
1.9.2.3.2 Método de inversión de esfuerzos.....	32
1.9.3 Análisis geofísico	34
1.9.3.1 Tomografía de Resistividad eléctrica.....	34

1.9.3.2	Resistividad eléctrica en el subsuelo.....	35
1.9.3.3	Software RES2INV.....	36
1.9.3.4	Equipo.....	36
1.9.3.5	Conexión del dispositivo y adquisición de los datos.....	37
1.9.3.6	Procesado de los datos de campo.....	38
1.9.4	Análisis petrográfico.....	38
1.9.5	Análisis geoquímico.....	39
1.9.6	Análisis geocronológico.....	41
2.	GEOLOGÍA REGIONAL.....	42
2.1	Introducción.....	42
2.2	Cuenca de Burgos.....	43
2.2.1	Evolución sedimentaria.....	43
2.2.2	Evolución tectónica.....	45
2.2.3	Marco estructural.....	47
2.3	Provincia Alcalina Oriental Mexicana.....	48
2.3.1	Sierra de San Carlos-Cruillas.....	51
2.3.1.1	Estratigrafía.....	54
2.3.1.1.1	Formación Tamaulipas Inferior (Hauteriviano-Aptiano Superior).....	55
2.3.1.1.2	Formación Otates (Aptiano Superior).....	55
2.3.1.1.3	Formación Tamaulipas Superior (Albiano).....	55
2.3.1.1.4	Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano).....	55
2.3.1.1.5	Formación Agua Nueva (Cenomaniano- Turoniano).....	55
2.3.1.1.6	Formación San Felipe (Coniaciano- Santoniano Inferior).....	56
2.3.1.1.7	Formación Méndez (Campaniano-Maastrichtiano).....	56
2.3.1.1.8	Paleógeno.....	56
2.3.1.1.9	Cuaternario.....	57
2.3.2	Complejo Hipabisal San Lázaro.....	57
2.3.3	Geología estructural.....	58
2.4	Planicie Costera del Golfo de México.....	60
3.	GEOLOGÍA LOCAL.....	62
3.1	Introducción.....	62
3.2	Geología del Corredor Linares-Burgos.....	62

3.2.1	Formación San Felipe.....	64
3.2.2	Formación Méndez.....	66
3.2.3	Formación La Providencia.....	67
3.2.4	Paleógeno-Cuaternario.....	67
3.2.5	Pozo Trincheras-1.....	68
3.3	Geología del Enjambre de Diques Linares.....	71
4.	ANÁLISIS GEOESPACIAL.....	93
4.1	Introducción.....	93
4.2	Lineamientos.....	93
4.3	Clasificación geoespacial de diques.....	99
4.4	Análisis estructural en <i>Wintensor</i>	105
4.4.1	<i>Basin and Range</i>	107
4.4.2	Sierra Madre Oriental.....	108
5.	ANÁLISIS PETROGRÁFICO.....	110
5.1	Introducción.....	110
5.2	Muestras en Presa Cerro Prieto.....	110
5.2.1	Aplitas – muestras Pr7, Pr8, Pr9 y Pr10.....	110
5.3	Muestras en Purísima de Conchos.....	113
5.3.1	Aplitas - muestras PD1, AV2, PCD3, PCD7 y PCD8.....	113
5.3.2	Marga – muestra PCD4.....	118
5.3.3	Toba alterada (embebida en resina) – muestra SF1.....	119
6.	ANÁLISIS GEOQUÍMICO.....	121
6.1	Introducción.....	121
6.2	Diagramas de variación para elementos mayores.....	123
6.3	Diagramas de variación para elementos traza.....	127
6.4	Diagrama de clasificación de rocas alteradas.....	129
6.5	Diagrama de Tierras Raras.....	131
6.6	Diagrama multielementos.....	133
6.7	Diagrama de discriminación tectonomagmática.....	134
6.8	Diagramas para granitoides.....	135
7.	ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO.....	138
7.1	Muestra Pr5 – Aplita (Presa Cerro Prieto).....	138

7.2	Muestra Pr6 – Aplita (Presa Cerro Prieto)	138
7.3	Muestra PC4 – Aplita (Purísima de Conchos)	139
7.4	Muestra PC12 – Aplita (Purísima de Conchos).....	145
7.5	Muestra SF1 – Toba alterada de la Fm. San Felipe (El Mulato).....	146
7.6	Relación Th-U	151
8.	ANÁLISIS GEOFÍSICO	152
8.1	Resultados.....	153
8.2	Interpretación.....	156
9.	DISCUSIÓN.....	158
9.1	Análisis geoespacial	158
9.2	Corredor Linares-Burgos.....	159
9.3	Petrología de diques aplíticos.....	160
9.4	Relación genética de las aplitas con sienitas de la SSCC.....	166
9.5	Relación genética con tobas alteradas de la Fm. San Felipe	167
9.6	Tomografía de Resistividad Eléctrica	170
10.	CONCLUSIONES.....	174
11.	RECOMENDACIONES	177
12.	BIBLIOGRAFÍA	178
13.	ANEXO I.....	194
14.	ANEXO II	210
15.	ANEXO III.....	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructuras ígneas hipabisales. El dique es tabular y discordante a los estratos que sirven como referencia, aunque estos también se pueden emplazar en intrusiones ígneas previas. El sill es paralelo a los estratos, respetando su plano de estratificación. Adaptada de Sen (2014).	6
Figura 1.2. Tipos de fracturas con la relación de los ejes principales de esfuerzo ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). (A) Fractura de tensión, (B) Fractura híbrida de extensión-cizalla donde $2\theta < 45^\circ$ y (C) Fractura de cizalla donde $2\theta' > 45^\circ$. Adaptada de Singhal y Gupta (2010).	7
Figura 1.3. Fracturas de cizalla conjugadas y su relación con la tensión. (A) Falla normal donde σ_1 es vertical, (B) Falla inversa donde σ_3 es vertical y (C) Falla de cizalla donde σ_2 es vertical. Modificado de Singhal y Gupta (2010).	8
Figura 1.4. Localización del área de estudio. (A) Área del Enjambre de Diques Linares. (B) Extensión del Corredor Linares-Burgos en los estados de Nuevo León y Tamaulipas. (C) Área del Corredor Linares-Burgos. FCT: Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. BSI: Baño de San Ignacio.	9
Figura 1.5. Mapa geológico donde se muestran los lineamientos en los alrededores de la Presa Cerro Prieto. Tomado de De León-Gómez (1993).	13
Figura 1.6. Detalle de la carta geológica G14C56 (INEGI, 1978), donde se muestran los diques de Purísima de Conchos. Las líneas negras corresponden a los diques con orientaciones preferenciales W-E, aunque también es posible observar diques orientados N-S	14
Figura 1.7. Clasificación para diques de Hoek (1991). Los diques que se muestran en la figura son generados por dilatación. Por lo tanto, considera a cada dique como una medida de deformación. El esfuerzo mínimo es perpendicular al dique. Tomado de Llambías (2001).	17
Figura 1.8. Modelo Digital de Elevación (MDE) de 5 metros de resolución para el área de estudio.	18
Figura 1.9. Mapa de sombras (<i>Hillshade</i>) generado a partir del MDE para el área de estudio.	18
Figura 1.10. Estructuras geológicas en vista satelital. (A) Se observan las líneas profusas de vegetación (flechas rojas) y estructuras globulares (flechas verdes). (B) Lineamientos (flechas rojas) y estructuras globulares (flechas verdes) en el mapa de sombras.	19
Figura 1.11. Ejemplo de cómo se identificaron y marcaron los lineamientos sobre el mapa de sombras. (A) Zona del EDL colindante con Purísima de Conchos. (B) Se indican los diques con la línea roja.	24
Figura 1.12. Manejo de la tabla de atributos perteneciente a los lineamientos. (A) Abrir la tabla de atributos. (B) Añadir un campo nuevo.	25

Figura 1.13. Secuencia para medir la longitud de los lineamientos. (A) Añadir un nuevo campo nombrándolo Longitud. (B) Abrir calculadora de campos. (C) Seleccionar la opción geometría e identificar la expresión “length\$”.	26
Figura 1.14. Secuencia para medir el rumbo de los lineamientos. (A) Añadir un nuevo campo nombrándolo Strike°. (B) Abrir la calculadora de campos. (C) Seleccionar la opción de geometría e identificar la expresión “azimuth”. Colocar en la caja de expresiones la función presentada en el texto donde se refiere esta figura.	27
Figura 1.15. Delimitación de triángulos correspondientes a los vértices donde se cruzan los diques. Las líneas rojas corresponden a los diques.	29
Figura 1.16. Secuencia para medir el ángulo entre ambos diques. (A) Abrir la pestaña de Procesos>Caja de herramientas. (B) Caja de herramientas>LFTTools>Calculate polygon angles. (C) Ventana emergente para proceder a insertar la capa vectorial donde se crearon los polígonos triangulares. Posteriormente se selecciona la opción Ejecutar.	30
Figura 1.17. Cálculo de ángulos internos de los triángulos. El ángulo del vértice que coincide con el punto donde se cruzan los diques, corresponde al ángulo entre estos dos diques. Las líneas rojas corresponden a los diques.	31
Figura 1.18. Elipsoides con los ejes principales de esfuerzos, así como el índice de régimen de esfuerzo (R') y la relación de esfuerzos (R). Revisar el texto que refiere a la figura para la descripción de la simbología. Redibujada de Delvaux <i>et al.</i> (1997).	33
Figura 1.19. Análisis geofísico (A) Tendido de cableado y electrodos cada 5 metros. (B) Instrumentos del sistema TRE: electrodos, conexiones, resistivímetro Ares y una batería.	37
Figura 2.1. Provincias geológicas y fisiográficas aledañas al Corredor Linares-Burgos (CLB). PCGM: Planicie Costera del Golfo de México. SSCC: Sierra de San Carlos-Cruillas. ST: Sierra de Tamaulipas. CVM: Cinturón Volcánico Mexicano. Figura construida con datos vectoriales de INEGI (2001) y CNH (2024a).	42
Figura 2.2. Localización de la Cuenca de Burgos y sus franjas de afloramientos sedimentarios. Tomado de Eguiluz de Antuñano (2011a).	47
Figura 2.3. Sección de la cuenca de Burgos (B-B'), SW-NE. Tomada del Atlas de Cuenca Sabinas-Burgos de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH, s.f.).	48
Figura 2.4. Cuerpos magmáticos pertenecientes a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM). Provincia magmática de Trans-Pecos (PMTP), Sierra Maderas del Carmen (SMC), Cinturón Candela-Monclova (CCM), Sierra de Picachos (SP), Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC), Sierra de Tamaulipas (ST), Planicie de Tampico (PT), Sierra Madre Oriental (SMO), Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Figura tomada de Elizondo-Pacheco (2019).	50
Figura 2.5. Mapa geológico de la parte central de la Sierra Chiquita. Tomado de Leal-Cuéllar (2020). Se incluye la división propuesta por Nick (1988).	53
Figura 2.6. Estructuras de la carta geológica Linares G14-11 del SGM (2008).	60

Figura 3.1. Geología del Corredor Linares-Burgos. Litología= cz: caliza, lu: lutita, al: aluvión, cg: conglomerado, ar: arcilla, D: diorita, Ga: gabro, Si: sienita, B: basalto. Edades= Q: Cuaternario, Terciario Superior (Mioceno y Plioceno), Tpl: Plioceno, To: Oligoceno, Te: Eoceno, Tpal: Paleoceno, T: Terciario, Ki: Cretácico Inferior, Ks: Cretácico Superior. Polígono punteado celeste muestra el área del EDL. Elaborado con archivos de INEGI (2003a, 2003b, 2013) y datos propios.	63
Figura 3.2. Enjambre de Diques Linares (EDL). Detalle de la Figura 3 (Rectángulo punteado celeste). Litología= cz: caliza, lu: lutita, al: aluvión, cg: conglomerado, ar: arcilla, D: diorita, Ga: gabro, Si: sienita, B: basalto. Edades= Q: Cuaternario, Terciario Superior (Mioceno y Plioceno), Tpl: Plioceno, To: Oligoceno, Te: Eoceno, Tpal: Paleoceno, T: Terciario, Ki: Cretácico Inferior, Ks: Cretácico Superior. El polígono punteado celeste muestra el afloramiento del EDL. Elaborado con archivos de INEGI (2003a, 2003b, 2013) y datos propios.	64
Figura 3.3. Columna estratigráfica del pozo Trincheras-1 de PEMEX. La columna se dibujó con las descripciones estratigráficas y edades presentadas en el reporte técnico final del pozo de PEMEX (1962). La simbología de la litología es la propuesta por la USGS (2006). Modificada de Antonio-Durán (2022).	69
Figura 3.4. Estratos de la Formación Méndez. (A) Estratificación. (B) Superficie del estrato.	72
Figura 3.5. Estratos de la Formación San Felipe. Coordenadas UTM: 14R 458304.52 E 2759408.01 N.	73
Figura 3.6. (A) Fragmento de toba alterada de la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 456906.75 E 2759502.09 N. (B) Moldes de carga en la superficie de un estrato de la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 471551.93 E 2750164.40 N.	73
Figura 3.7. Fracturas de la Formación San Felipe. (A) Afloramiento de las fracturas. (B) Estereograma que muestra las dos familias de fracturas (SF1: 250°/78°; SF2:179°/86°), además se muestra el rumbo y buzamiento de un estrato de la Fm. San Felipe (SS: 264°/13°). Coordenadas UTM: 14R 472035.22 E 2754910.53 N.	74
Figura 3.8. Pliegues de la Formación San Felipe. (A) Pliegue con un flanco de 177°/38° (4 mediciones) y el segundo de 81°/17° (cuatro mediciones), en promedio. (B) Pliegue con un flanco de 267°/11° (cuatro mediciones) y otro de 145°/41° (cinco mediciones), en promedio. Coordenadas UTM: 14R 460110.805 E 2758990.259 N. Las líneas punteadas significan los estratos que fueron medidos. El color de los estereogramas corresponde al color de cada conjunto de estratos.	75
Figura 3.9. Dique del Enjambre Linares y su contacto con la Formación San Felipe. (A) Dique emplazado en la Fm. San Felipe. (B) Detalle de la fig. 3.9 A, contacto de un dique con la Fm. San Felipe. Coordenadas del afloramiento = UTM: 14R 458611.299 E 2759622.03 N.	76

Figura 3.10. Diques del Enjambre Linares en la Fm. San Felipe (A; Coordenadas UTM: 14 R 472859.26 E 2754886.42 N) y Fm. Méndez (B; Coordenadas UTM: 14 R 458594.43 E 2758738.62 N).....	77
Figura 3.11. Dique del Enjambre Linares en la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 474766.77 E 2754351.43 N. (A) y (B) Dique de la muestra PCD6. Coordenadas UTM: 14R 474535.59 E 2753572.68 N.....	78
Figura 3.12. Contactos de diques con la Fm. San Felipe. (A) Muestras PCD3 y PCD4, respectivamente. Coordenadas UTM: 14R 474350.19 E 2754167.6 N. (B) Dique de la muestra PCD1. Coordenadas UTM: 14R 474352.211 E 2754445.404 N.....	79
Figura 3.13. Dique de la muestra PCD5, emplazado en la Fm. San Felipe. (A) Afloramiento del dique PCD5. En los laterales del dique se puede observar un ligero levantamiento de los estratos que oscilan los 20° de buzamiento. (B) Dirección del dique = 254°/81°. Coordenadas UTM: 14R 474376.48 E 2754112.19 N.	80
Figura 3.14. Dirección de diques oblicuos del EDL. (A) Dique PCD7 con dirección 169°/83°. (D) Estereograma con la dirección de ambos diques: PCD7= 169°/83° y PCD8= 264°/62. Coordenadas UTM: 14R 474886.949 E 2752882.723 N.....	81
Figura 3.15. Sill emplazado en la Fm. Méndez. Coordenadas UTM: 14R 469734 E 2755070 N.	82
Figura 3.16. Dique emplazado en Fm. San Felipe, perteneciente a la SSCC. Esta estructura ejemplifica la intrusión de un dique en una secuencia sedimentaria, se observa que los laterales del dique se encuentran ligeramente levantados por la intrusión. Coordenadas UTM: 14R 502387.08 E 2739554.79 N.	82
Figura 3.17. Relación de los diques con la roca encajonante. (A) Se muestra la forma de badén y el ligero levantamiento (~20°) de las paredes de la fractura. (B) Esquema (sin escala) del emplazamiento del dique respecto al estrato. Coordenadas UTM: 14R 474320.1 E 2754274.4 N.	83
Figura 3.18. Muestras del área del Enjambre de Diques Linares. (A) PCD2, (B) PC6, (C) AD1, (D) AV2, (E) PC8, (F) PCD1, (G) Pr5 y (H) PC7.....	84
Figura 3.19. Muestras al oeste de la localidad Purísima de Conchos. Se enfatiza el tipo de litología (aplitas y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Así mismo se señalan los tipos de análisis a las que fueron expuestas (petrografía, geoquímica y/o geocronología). Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	86
Figura 3.20. Muestras al oeste de Purísima de Conchos, lado oeste del Río San Fernando. Se enfatiza el tipo de litología (aplitas, tobas alteradas de la Fm. San Felipe y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y/o descripción de campo. Se observa el lugar de donde fueron tomados los datos de fracturas en la Fm. San Felipe de la Figura 7. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i> . Nota: Las muestras PC2 y PC3 se sobreponen en vista satelital por la escala de la imagen.....	87

Figura 3.21. Muestras al este de Purísima de Conchos, lado este del Río San Fernando. Se enfatiza el tipo de litología (aplitas, tobas alteradas de la Fm. San Felipe y rocas sedimentarias de la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	88
Figura 3.22. Muestras en la localidad Providencia, al sur de las mesetas conformadas por calizas de la Fm. Providencia. Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	89
Figura 3.23. Muestras en la localidad El Avileño, al sureste de Purísima de Conchos. Tipos de análisis a los que las aplitas fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	90
Figura 3.24. Muestras tomadas al norte de la Presa Cerro Prieto. Se presenta el tipo de litología (aplitas y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica, geocronología y/o descripción de campo. Así mismo se observa el lugar de donde fueron tomados los datos de pliegues en la Fm. San Felipe de la Figura 8. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	91
Figura 3.25. Localización de la muestra SF1, en el límite septentrional de la Sierra de San Carlos-Cruillas. Tipos de análisis a los que la muestra fue expuesta: petrografía, geocronología y descripción de campo. Imagen satelital de <i>Bing Maps</i>	92
Figura 4.2. Histograma vs. longitud (m) de diques del EDL.....	94
Figura 4.2. Clasificación de familias de fracturas para el Enjambre de Diques Linares. N= número de diques.....	95
Figura 4.3. Fracturas en la parte norte del CLB. N= número de fracturas.	95
Figura 4.4. Fracturas y fallas en la parte septentrional de la SSCC. N=número de estructuras geológicas mencionadas en el texto que refiere a esta imagen.....	96
Figura 4.5. Lineamientos inferidos de los cuellos volcánicos de Burgos. N= número de alineaciones inferidas de cuellos volcánicos.	97
Figura 4.6. Lineamientos del Corredor Linares-Burgos. Se incluyen los estereogramas con las orientaciones de los diques, fracturas y fallas de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC), la alineación de cuellos volcánicos de Burgos y otras fracturas ubicadas en el límite norte del Corredor Linares-Burgos (CLB).	98
Figura 4.7. Diques irregulares (A) de acuerdo con la clasificación de Hoek (1991), en el Enjambre de Diques Linares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.	99
Figura 4.8. Diques <i>en echelon</i> (A) de acuerdo con la clasificación de Hoek (1991), en el Enjambre de Diques Linares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.	100
Figura 4.9. Diques anastomosados (A) de acuerdo con la clasificación de Hoek (1991), en el Enjambre de Diques Linares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques. ..	101
Figura 4.10. Diques zigzag (A) de acuerdo con la clasificación de Hoek (1991), en el Enjambre de Diques Linares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.	102

Figura 4.11. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a diques.....	103
Figura 4.12. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.	103
Figura 4.13. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.	104
Figura 4.14. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.	104
Figura 4.15. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques. Los diques tienen ángulos > 60° y <90°	105
Figura 4.16. Análisis estructural en <i>Wintensor</i> (Delvaux, 2006). (A) Estereograma de los planos de los diques del EDL. (B) Dirección de σ_3 (00°/347°). (C) Planos de los diques y direcciones de σ_1 , σ_2 y σ_3	106
Figura 5.1. Microfotografías de aplita, muestra Pr7. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	110
Figura 5.2. Microfotografías de aplita, muestra Pr8. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Objetivo 10x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	111
Figura 5.3. Microfotografías de aplita, muestra Pr9. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B. Cristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos. C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespatos alcalinos (Afs) y biotita (Bt). Objetivo 10x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	112
Figura 5.4. Microfotografías de aplita, muestra Pr10. A y B. Textura microporfirítica de la aplita Pr10, con fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos. Objetivo 2.5x. C. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Objetivo 10x. D. Cristal de feldespato alcalino. Objetivo 20x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	113
Figura 5.5. Microfotografías de aplita, muestra PD1. A. Textura microporfirítica de la aplita PD1. Objetivo 2.5x. B. Fenocristales de cuarzo (Qz). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	114
Figura 5.6. Microfotografías de aplita, muestra AV2. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B y C. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl) y biotita (Bt). Objetivos 4 x y 10x, correspondientemente. D. Cristal de circón. Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.	115

- Figura 5.7.** Microfotografías de aplita, muestra **PCD3**. A. Textura porfirítica de la aplita PCD3. Objetivo 4x. B y C. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespato alcalino (Afs). Objetivos 4 x y 10x, correspondientemente. D. Mineral opaco. Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm. 116
- Figura 5.8.** Microfotografías de aplita, muestra **PCD7**. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl), biotita (Bt) y una posible alteración de sericita (Ser(?)). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm. 117
- Figura 5.9.** Microfotografías de aplita, muestra **PCD8**. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl), biotita (Bt) y una posible alteración de sericita (Ser(?)). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm. 118
- Figura 5.10.** Microfotografías de marga, muestra **PCD4**. A y B. Textura de mudstone. Objetivos 4x y 10x, correspondientemente. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm. 119
- Figura 5.11.** Microfotografías muestra **SF1**. A y B. Clastos de la muestra pulverizada embebidos en la resina. En NX y NII, respectivamente. Objetivo 2.5 x. C. Cristales de feldespatos alcalinos (Afs(?)) y calcita secundaria (Cal). Objetivo 4x, NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm. 120
- Figura 5.12.** Microfotografías de la toba alterada, muestra **PC7**. a) Textura de la toba. Cristales de clorita (Chl) y cuarzo (Qz), con abundantes sectores de calcita secundaria. Objetivo 10x. b) Cristal de apatito (Ap) asociado a la clorita. Objetivo 4x. c) Cristal de clorita asociado a la matriz. Objetivo 20x. d) Cristal de plagioclasa con macla polisintética. Objetivo 4x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tomada de Antonio-Durán (2022). 120
- Figura 6.1.** Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ vs. Óxidos de elementos mayores (Al₂O₃, FeO_T, CaO, y Na₂O). Los datos de la SSCC tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021). Todos los valores de óxidos de elementos mayores están en unidades de % en peso, ajustados en base anhidra. 125
- Figura 6.2.** Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ vs. Óxidos de elementos mayores (P₂O₅, MgO, TiO₂ y K₂O). Los datos de la SSCC tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021). Todos los valores de óxidos de elementos mayores están en unidades de % en peso, ajustados en base anhidra. 126
- Figura 6.3.** Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ (%p. aj.) vs. Elementos traza Ba, Sr, Ce y La (ppm). Los datos de la SSCC tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021). 128
- Figura 6.4.** Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ (%p. aj.) vs. Elementos traza Y, Zr y Rb (ppm). Los datos de la SSCC tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021). 129

Figura 6.5. Diagrama Zr/TiO ₂ vs. Nb/Y de Winchester y Floyd (1977). Diagrama de rocas volcánicas alteradas aplicado al Enjambre de Diques Linares, las rocas hipabisales de la SSCC y tobas de la Formación San Felipe. Los datos de SSCC fueron tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019; Tabla 6.1). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021; Tabla 6.1).....	130
Figura 6.6. Patrones de elementos de tierras raras. Los datos analíticos fueron normalizados a condrita según Boynton (1984). Se presentan las aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021).....	132
Figura 6.7. Diagrama multielementos para las aplitas del Enjambre de Diques Linares, las sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021). Los datos se encuentran normalizados con los valores del Manto Primitivo de los autores McDonough y Sun (1995).....	133
Figura 6.8. Diagramas de discriminación tectónica de granitoides, Yb vs. Ta (Pearce <i>et al.</i> , 1984), para aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021).....	135
Figura 6.9. Diagramas para granitoides. (A) Diagrama de índice de Fe: $(FeO+0.9*Fe_2O_3)/(FeO+0.9*Fe_2O_3+MgO)$. (B) Diagrama MALI (NaO+K ₂ O-CaO) vs SiO ₂ . (C) Diagrama ASI vs. SiO ₂ . (D) Diagrama de índice de alcalinidad (AI) (molecular Al - Na + K) vs. índice de saturación en sílice Feldespatóidico (<i>Feldspathoid Silica Saturation Index</i> , $FSSI = (Q-(Lct+2Nph))/100$). Se grafican aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021). Estos diagramas preceden a los autores Frost y Frost (2008).....	136
Figura 7.1. Datación U-Pb en circones del dique aplítico Pr5 . A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb. Las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}Pb/^{238}U$	140
Figura 7.2. Datación U-Pb en circones del dique aplítico Pr5 . A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}Pb/^{206}Pb$ KDE (<i>Kernel density estimates</i>). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de Boynton (1984).....	141
Figura 7.3. Datación U-Pb en circones del dique aplítico Pr6 . A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}Pb/^{238}U$	142
Figura 7.4. Datación U-Pb en circones del dique aplítico Pr6 . A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}Pb/^{206}Pb$ KDE (<i>Kernel density estimates</i>). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de Boynton (1984).....	143
Figura 7.5. Datación U-Pb en circones del dique aplítico PC4 . A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}Pb/^{238}U$	144

Figura 7.6. Datación U-Pb en circones del dique aplítico PC4 . A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (<i>Kernel density estimates</i>). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de Boynton (1984)......	145
Figura 7.7. Datación U-Pb en circones del dique aplítico PC12 . A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	147
Figura 7.8. Datación U-Pb en circones del dique aplítico PC12 A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (<i>Kernel density estimates</i>). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de Boynton (1984)......	148
Figura 7.9. Datación U-Pb en circones de la toba alterada de la Fm. San Felipe SF1 . A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	149
Figura 7.10. Datación U-Pb en circones de la toba alterada de la Fm. San Felipe SF1 . A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (<i>Kernel density estimates</i>). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de Boynton (1984).	150
Figura 7.11. Diagrama bivariado de la mejor edad aparente con respecto a la relación Th/U (Adaptado de Martens <i>et al.</i> , 2012).	151
Figura 8.1. Ubicación de la línea de tomografía de resistividad eléctrica. El punto A es el principio de la sección. El punto medio (en el metro 120 del tendido) marcado como “Dique” es donde se distingue la estructura en superficie. A’ es el final de la sección. La estructura del dique, marcada con líneas punteadas rojas, se logra identificar por la densidad de vegetación.	152
Figura 8.2. Perfil topográfico correspondiente a la línea de TRE.	154
Figura 8.3. Malla de datos de resistividad. (A) Malla con datos originales medidos. (B) Malla con datos descartados.	154
Figura 8.4. Histogramas de datos de resistividad. (A) Histograma con datos originales medidos. (B) Diagrama con datos originales medidos. (C) Histograma con datos después de la depuración de datos con errores del más del 30%. (D) Histograma con datos sin errores mayores a 30%.	155
Figura 8.5. Modelo de bloques de sensibilidad relativa.	156
Figura 8.6. Modelo inverso de la TRE.	156
Figura 8.7. Modelo inverso de la TRE con zonas de análisis. Explicación de la figura en el texto que la refiere.	157
Figura 9.1. Perfil geológico de la interpretación del TRE. Explicación en el texto que refiere a esta figura.....	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cuatro tipos principales de rocas graníticas en orden decreciente de abundancia. Tomado de Frost y Frost (2014).....	4
Tabla 3.1. Muestras del Enjambre de Diques Linares.	85
Tabla 4.1. Datos estadísticos y tabla de frecuencias de longitudes del EDL.....	94
Tabla 6.1 Muestras correspondientes a la Sierra de San Carlos-Cruillas* por Elizondo-Pacheco (2017, 2019) y muestras de la Presa Cerro Prieto por Ortega-Torres (2021).	121
Tabla 6.2. Datos de elementos mayores (% en peso) y elementos traza (ppm) de las muestras selectas de los diques en el Corredor Linares-Burgos. LOI: Pérdida por ignición. Mg#: Número de magnesio ($100 \text{ Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$). Valor inferior al límite de detección (-).	122
Tabla 6.3. Datos de elementos mayores ajustados al 100% en base seca y norma CIPW para la selección de diques del Corredor Linares-Burgos. Abreviaciones: Q=Cuarzo; Or=Ortoclasa; Ab=Albita; An=Anortita; Ne=Nefelina; Zrn=Circón; Di=Diópsido; Wo=Wollastonita; Mt=Magnetita; Il=Ilmenita. Los datos con el símbolo (-) significan que están por debajo del límite de detección.....	123
Tabla 9.1. Composiciones de diques aplíticos en otras localidades (SiO_2 y MgO % en peso).	161
Tabla 9.2. Resistividades de materiales (rocas, sedimentos y agua) reportadas por diversos autores.....	172

RESUMEN

En este trabajo se describe el complejo geológico-estructural Corredor Linares-Burgos (CLB), que geográficamente se extiende desde Linares, Nuevo León, hasta Burgos en Tamaulipas (México). Geológicamente, el CLB se encuentra en el límite septentrional de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) y al sur de la Cuenca de Burgos (CB), en la provincia fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México (PCGM). El CLB se distingue por contar con lineamientos de diques, fracturas, fallas y cuellos volcánicos, que presentan una orientación general NE-SW.

Adicionalmente, se presenta el análisis integral del Enjambre de Diques Linares (EDL) que se realizó mediante el estudio de relaciones de campo, geospaciales, geofísicas, petrográficas, geoquímicas y geocronológicas. El EDL fue emplazado en las Formaciones San Felipe (Santoniano-Campaniano) y Méndez (Campaniano-Maastrichtiano) del CLB.

Los diques aplíticos del EDL presentan valores de SiO₂ de 55.9% a 74.7% en peso y la composición es de una riolita-dacita (subalcalina). Los diques muestran una afinidad geoquímica de arco volcánico y una edad del Cretácico Tardío.

Debido a la ubicación geográfica y naturaleza magmática, se realizó una comparación de los diques aplíticos con los diques sieníticos cenozoicos de la SSCC y las tobas del Cretácico Tardío de la Formación San Felipe. Los resultados sugieren que las aplitas presentan una afinidad geoquímica más cercana a las tobas que a las sienitas.

Los resultados aquí descritos representan nuevos hallazgos para una mejor interpretación de la tectónica de la región.

ABSTRACT

This work describes the geological-structural complex Linares-Burgos Corridor (LBC), which geographically extends from Linares, Nuevo León, to Burgos in Tamaulipas (Mexico). Geologically, the LBA is located on the northern limit of the Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) and southern limit of the Burgos Basin (CB), in the Coastal Plain of the Gulf of Mexico (CPGM) physiographic province. The LBC is distinguished by having lineaments of dikes, fractures, faults and volcanic necks, which have a general NE-SW orientation.

In addition, the analysis of the Linares Dikes Swarm (LDS) is presented, which was carried out through the study of field, geospatial, geophysical, petrographic, geochemical and geochronological relationships. The LDS intruded in the San Felipe (Santonian-Campanian) and Méndez (Campanian-Maastrichtian) Formations of the LBC.

The LDS aplitic dikes display a rhyolite-dacite (subalkaline) composition, with SiO₂ values of 55.9% to 74.7 wt%. Dikes show a volcanic arc geochemical affinity and are Late Cretaceous in age.

Due to the geographical location and magmatic nature, a comparison of the aplitic dikes was carried out to the Cenozoic syenitic dikes of the SSCC and to the Late Cretaceous tuffs of the San Felipe Formation, to find any petrogenetic connection with the aplitic dikes. The results suggest that the aplites have a geochemical affinity closer to the tuffs than to the syenites.

The results described here represent new findings for a better interpretation of the regional tectonics.

1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La Planicie Costera del Golfo de México (PCGM) es una provincia fisiográfica que se extiende en el noreste de México, desde el litoral oriental hasta el límite con el frente de la Sierra Madre Oriental (SMO), donde alcanza su elevación máxima de 500 m.s.n.m. (Rodríguez-Palacios, 1993; Dávila-Pórcel, 2011). Aunque la PCGM no se considera un gran atractivo geológico por la característica de que lleva en su nombre “planicie”, en esta hay evidencia de diversos acontecimientos geológicos. Algunos de estos eventos son el desarrollo de la Cuenca de Burgos (Eguiluz de Antuñano, 2011) y la evolución tectonomagmática de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

La Cuenca de Burgos es un prisma sedimentario compuesto por rocas siliciclásticas del Cenozoico, así como carbonatos y evaporitas. En esta cuenca se han documentado diversas etapas tectónicas, como la apertura del Golfo de México, subsidencia cortical, el periodo de deformación laramídica, así como su etapa posttectónica finalizando con una fase de deformación tardía (Eguiluz de Antuñano, 2011).

La SSCC está conformada por unidades magmáticas alcalinas del Oligoceno al Mioceno que intrusieron la secuencia sedimentaria del Mesozoico. Además, afloran diques y sills en su periferia occidental, agrupados como el Complejo Hipabisal San Lázaro (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019; Leal-Cuéllar, 2020; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

En el límite de la Cuenca de Burgos y la SSCC, se encuentra el Corredor Linares Burgos (CLB), por primera vez descrito de manera integral en este trabajo. El CLB es un complejo geológico-estructural conformado por diques, fracturas, fallas, manantiales y cuellos volcánicos emplazados en unidades sedimentarias del Cretácico Tardío al Paleógeno, que se extienden ~80 km desde el Municipio de Linares, Nuevo León, hasta Burgos, Tamaulipas.

Dentro del CLB se encuentra el Enjambre de Diques Linares (EDL) cuyos afloramientos principales se ubican en las cercanías de la Presa Cerro Prieto, Purísima de Conchos y Presa Libertad (actualmente en construcción).

El EDL, de acuerdo con la revisión bibliográfica (p.e. [INEGI, 1978](#); [De León-Gómez, 1993](#)) había sido apenas registrado, hasta el trabajo de [Antonio-Durán \(2022\)](#). Por lo que en este trabajo se presenta la continuación de su análisis de campo, petrográfico, geoquímico, geocronológico, geofísico y estructural, postulando por primera vez un modelo geodinámico y una comparativa petrológica con otras unidades ígneas como las tobas alteradas de la Formación San Felipe ([Ortega-Torres, 2021](#)) y los diques sieníticos de la SSCC ([Elizondo Pacheco, 2017, 2019](#)).

1.2 Características generales de los magmas graníticos

Los magmas graníticos, también conocidos como magmas félsicos, se derivan de un fundido silicatado rico en iones formadores de redes como SiO_2 y Al_2O_3 . Estos iones consisten en tetraedros unidos con un alto grado de polimerización, haciendo al magma granítico viscoso ([Frost y Frost, 2014](#)). La viscosidad es importante para controlar procesos ígneos incluidos el transporte de magma en diques y sills.

En cuanto la temperatura, [Philpotts y Ague \(2009\)](#) reportan que la lava riolítica, el equivalente extrusivo del granito, tiene una temperatura entre 800 a 1000°C. Por otro lado, [Frost y Frost \(2014\)](#) mencionan que el incremento de agua contenido en las rocas plutónicas tiene el efecto de disminuir las temperaturas del *liquidus* al grado de que los magmas graníticos pueden emplazarse a temperaturas alrededor de los 700°C.

Las rocas graníticas, que abarcan las contrapartes de andesita, dacita y riolita, de grano grueso y medio, son las rocas ígneas más abundantes de la corteza continental de la Tierra ([Gill, 2010](#)).

Los magmas suelen ser menos densos que las rocas encajonantes y, por lo tanto, tienden a ascender. La velocidad de ascenso depende de su densidad y viscosidad ([Frost y Frost, 2014](#)). [Philpotts y Ague \(2009\)](#) mencionan que la viscosidad de la riolita es de 10^5 a 10^8 Pa·s.

1.2.1 Clasificación de rocas graníticas

Existen distintas maneras de clasificar las rocas graníticas, aunque la principal es la clasificación geoquímica. También existe la mineralógica, así como la alfabética dependiendo del origen de los granitos y de acuerdo con el contenido de magnetita ([Frost y Frost, 2014](#)).

La clasificación mineralógica de las rocas graníticas se basa en la composición modal de cuarzo, plagioclasa y feldespato alcalino. Sin embargo, con este método no se distingue presencia o ausencia de fases menores (Frost y Frost, 2014).

La clasificación de Ishihara (1977) se basa en la ocurrencia o ausencia de magnetita en las rocas graníticas, que puede ser medida con susceptibilidad magnética. El autor menciona que los granitos con magnetita suelen encontrarse relativamente oxidados, presentando magnetita e ilmenita como óxidos principales. Por otro lado, los granitos de ilmenita se encuentran relativamente reducidos y contienen ilmenita como único óxido de Fe-Ti.

La fusión parcial de rocas pelíticas produce magma del cual cristalizan granitos peraluminosos de ilmenita, las rocas pelíticas contienen grafito, un agente reductor que produce que la magnetita sea inestable en estos magmas (Frost y Frost, 2014).

Chappell y White (1974) propusieron un esquema de clasificación de acuerdo con el origen de los granitos. Sin embargo, la composición de las rocas graníticas pueden variar independientemente de su origen.

La clasificación de estos autores consiste en: (a) Tipo I (I=ígneos), granitos metaluminosos que contienen magnetita. Se producen por la diferenciación de andesita o fusión parcial de una fuente ígnea. (b) Tipo S (S=sedimentarios), granitos peraluminosos libres de magnetita. Producidas por la fusión parcial de rocas pelíticas o sedimentarias. (c) Tipo A (A=anorogénicos), contienen fierro y son altos en K, REE's y Zr. Se producen por la fusión parcial o cristalización fraccionada de rocas micas (Chappel y White, 1974; Frost y Frost, 2014).

Los elementos mayores han sido utilizados para identificar los procesos de evolución magmática, tal es el caso de los esquemas de clasificación de Frost *et al.* (2001) y de Frost y Frost (2008). Estos se centran en cuatro características geoquímicas principales para clasificar rocas graníticas: (1) *Fe-index* $(\text{FeO}+0.9*\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{FeO}+0.9*\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$, (2) *Modified Alkali-Lime Index* (MALI; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$), (3) *Aluminum Saturation Index* (ASI; molecular $\text{Al}/((\text{Ca}-1.67*\text{P})+\text{Na}+\text{K}))$, (4) *Alkalinity Index* (AI; molecular $\text{Al} - \text{Na} + \text{K}$; Frost y Frost, 2014).

[Shand \(1951\)](#) empleó los siguientes términos para referirse al análisis mineralógico de granitoides. El autor menciona que los granitoides peraluminosos se caracterizan, en términos modales, por contener muscovita, biotita y otros minerales ricos en Al_2O_3 (topacio, granate almandino, andalucita o cordierita). Por el contrario, los granitos peralcalinos son deficientes en aluminio, con un contenido modal de piroxenos (aegirina-augita) y/o anfíboles sódicos.

1.2.2 Ocurrencia de los magmas graníticos

[Gill \(2010\)](#) menciona que el génesis del magma granítico se relaciona principalmente a uno de estos dos procesos: (i) cristalización fraccionada extendida del manto - magma básico derivado; y (ii) la fusión parcial de la antigua corteza continental.

De acuerdo con [Frost y Frost \(2014\)](#) se han reconocido cuatro entornos principales en los que se generan los granitos ([Tabla 1.1](#)). Estos grupos de granito son geoquímicamente distintos, lo que permite a los geólogos asignarles un contexto tectónico particular a cada grupo.

Tabla 1.1 Cuatro tipos principales de rocas graníticas en orden decreciente de abundancia. Tomado de [Frost y Frost \(2014\)](#).

Tipo de granito	Ambiente tectónico	Composición	Otros nombres
Cordillerano	Arco magmático	Rocas calco-alcalinas magnesianas y graníticas cálcicas	Calco-alcalinos, Tipo I
Ferrosos	Rift intercontinental	Rocas calco-alcalinos ferrosos a calco-alcalinas graníticas	Anorogénico o granitos Tipo A
Caledoniano	Post colisión orogénica	Rocas magnesianas calco-alcalinas graníticas	
Himalayo	Zonas de colisión continente-continente	Lucogranitos peraluminosos	Tipo S

1.2.3 Aplitas

Al final de la cristalización magmática, es decir, en la etapa de pegmatitas y cristalización pneumatolítica, a menudo el magma penetra en las grietas de las rocas circundantes de la corteza y cristaliza en forma de cuerpos hipabisales (diques o sills; [Gill, 2010](#); [Haldar y Tisljar, 2020](#)).

Teniendo en cuenta a [Haldar y Tisljar \(2020\)](#), estas se definen como “*rock veins*” o su traducción literal “rocas de vena o filón”. Estos autores mencionan que una característica textural importante de las rocas de filón (aplitas, pegmatitas y lamprófidos) es holocristalina

y microcristalina, en aplitas y lamprófidos, macrocristalina en pegmatitas y, a menudo, con cristales gigantes de hasta varios metros de diámetro.

Gill (2010) menciona que las pegmatitas y la aplitas son fenómenos de "etapa tardía", asociados con los últimos restos de fusión en un plutón que se cristaliza lentamente. Suele contener elementos incompatibles como Nb, Sn, REE y Th.

De acuerdo con Haldar y Tisljar (2020), la aplita es una roca ígnea intrusiva, dura y el equivalente de grano fino del granito. La aplita se caracteriza por tener una textura sacaroide, de tamaño de grano generalmente de 0.1 - 2 mm. Está compuesta principalmente de cuarzo y feldespato alcalino con cantidades muy pequeñas de muscovita y biotita. Se encuentran en intrusivos félsicos como granitos y granodioritas.

1.3 Cuerpos hipabisales

Las rocas hipabisales cristalizan a profundidades someras (< 3 km). Si la intrusión ocurre a una profundidad > 3 km, se trataría de un plutón (Sen, 2014).

Los magmas emplazados cerca de la superficie enfrían relativamente más rápido, por lo tanto, contienen típicamente texturas de grano fino, aunque pueden llegar a tener granos de tamaño intermedio. Algunos ejemplos de cuerpos hipabisales son domos de lava, cuellos volcánicos, diatremas, diques anulares, cónicos o radiales y sills (Frost y Frost, 2014; Sen, 2014).

Según Sen (2014), los términos de concordante y discordante son utilizados para definir la naturaleza del contacto entre la intrusión y las paredes de roca que la rodean. El autor menciona que una intrusión es discordante cuando los cuerpos hipabisales cortan a través de esta pared de roca y concordante cuando la intrusión es paralela a las estructuras, p.e., estratos.

Cuando el magma intrusión rocas sedimentarias y se posiciona paralelo a los estratos, en lugar de atravesar el plano de estratificación, forman sills (Frost y Frost, 2014). Un sill es una intrusión tabular concordante, pueden tener kilómetros de longitud y hasta cientos de metros de espesor (Sen, 2014; Figura 1.1).

Un dique se refiere a una estructura tabular intrusiva y discordante, comúnmente son formados por magmas basálticos y pueden variar de centímetros a metros (Sen, 2014; Figura

1.1). Cuando la corteza se fractura en un régimen tectónico extensional, la intrusión de magma en las fallas generadas produce enjambres de diques (Frost y Frost, 2014).

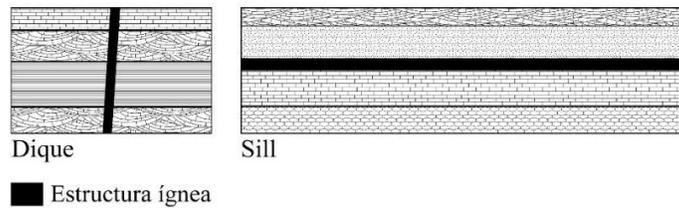


Figura 1.1 Estructuras ígneas hipabisales. El dique es tabular y discordante a los estratos que sirven como referencia, aunque estos también se pueden emplazar en intrusiones ígneas previas. El sill es paralelo a los estratos, respetando su plano de estratificación. Adaptada de Sen (2014).

1.3.1 Mecanismo de emplazamiento dique-fractura

Skarmenta (2011) menciona que las intrusiones de diques es uno de los mecanismos más eficientes para transportar magmas desde profundos reservorios hacia niveles someros de la corteza terrestre y su emplazamiento es manejado por la sobrepresión interna del magma que resulta fracturando las rocas que lo rodean. Las intrusiones de diques también pueden ocurrir a lo largo de fracturas preexistentes.

Este mismo autor indica que independientemente de cuándo se formaron las fracturas, cualquier inyección de magma a través de ellas puede causar reactivación y por lo tanto estar sujeto al cizallamiento a lo largo de las paredes de la fractura.

Cuando un dique intruye una fractura preexistente de la roca huésped se genera la fábrica de flujo del magma (Baer, 1995). El desarrollo de estas fábricas de flujo es controlado por el esfuerzo compuesto por factores internos (presión magmática) y externos (procesos tectónicos), que pueden generar fracturas o fallas local a la roca huésped y/o reactivación de fallas (Skarmenta, 2011).

Los diques también pueden ocurrir en fracturas de cizalla (Escher *et al.*, 1976). Incluso, si el máximo esfuerzo principal es vertical, se podrían formar fracturas conjugadas con inmersiones de $\sim 60^\circ$ (Skarmenta, 2011).

Una fractura es cualquier discontinuidad aproximadamente tabular, la cual suele ser angosta en una dimensión cuando se compara con las otras dos. Esta se forma como resultado de esfuerzos externos (tectónicos) o internos (residuales o térmicos; Fossen, 2010). La

dirección de las fracturas propagadas se determina por la orientación del esfuerzo en la fractura y es perpendicular al mínimo esfuerzo principal compresivo (σ_3), de acuerdo con la teoría de [Anderson \(1995\)](#).

Genéticamente las fracturas se pueden dividir en: (1) Fracturas de cizalla, (2) fracturas extensionales y (3) fracturas híbridas ([Figura 1.2](#); [Singhal y Gupta, 2010](#)). Una fractura de cizalla es una discontinuidad a lo largo de la cual el movimiento relativo es paralelo a al plano de fractura. Presenta un corte oblicuo en la roca con la dirección de la tensión principal (σ_1) y un ángulo obtuso con la dirección de la tensión de compresión mínima (σ_3 ; [Fossen, 2010](#)).

Las fracturas extensionales presentan un sentido de desplazamiento perpendicular desde el plano de la fractura, se forman de manera paralela a los esfuerzos σ_1 y σ_2 . Pueden presentarse sin relleno, con, fluidos, minerales, o magma ([Nelson, 2001](#); [Twiss y Moores, 2007](#)).

Así mismo, existen las fracturas híbridas que tienen características de cizalla y extensional, pueden ocurrir en sets conjugados con ángulos diedrales $2\theta < 45^\circ$ ([Singhal y Gupta, 2010](#)). Estas son de extensión, pueden estar rellenas con vetas, y además pueden tener algo de cizallamiento. Además, de acuerdo con [Hancock \(1985\)](#) pueden ser consideradas fracturas de tensión cuando cuentan con buzamientos semiverticales.

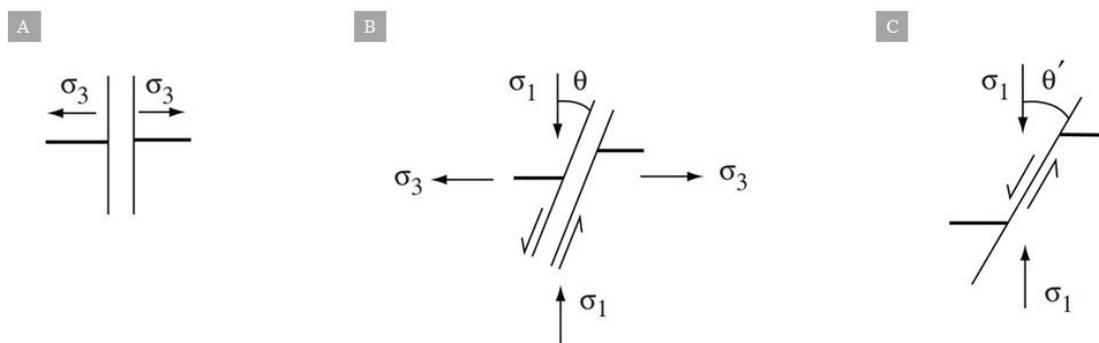


Figura 1.2. Tipos de fracturas con la relación de los ejes principales de esfuerzo ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). (A) Fractura de tensión, (B) Fractura híbrida de extensión-cizalla donde $2\theta < 45^\circ$ y (C) Fractura de cizalla donde $2\theta' > 45^\circ$. Adaptada de [Singhal y Gupta \(2010\)](#).

1.3.2 Sistemas de fracturas y fallas conjugadas

Para los tres regímenes tectónicos principales, un sistema conjugado tiene dos conjuntos de fallas con buzamiento opuesto donde las lineaciones son perpendiculares a la línea de

intersección de la falla. Las fracturas de cizalla conjugadas que se forman a grandes profundidades son de naturaleza dúctil y tienen un 2Θ grande ($\sim 90^\circ$). Por otra parte, las que se forman a menos profundidad son de naturaleza frágil tienen un 2Θ de $\sim 60^\circ$ (Fossen, 2010; Singhal y Gupta, 2010).

La deformación frágil en las fracturas de cizalla conjugadas causa que los cortes derivados de varios órdenes formen tendencias que se desvían, lo que provoca una dispersión en las tendencias de los cortes conjugados (Ruhland, 1973).

Los conjuntos conjugados suelen desarrollarse simétricamente con respecto a las tensiones principales tanto para fallas normales, inversas y cizalla (Figura 1.3). Según la teoría andersoniana de fallas, la dirección de deslizamiento o lineación sería en la dirección de buzamiento (fallas inversas y normales) o en la dirección de rumbo (fallas de cizalla; Fossen, 2010).

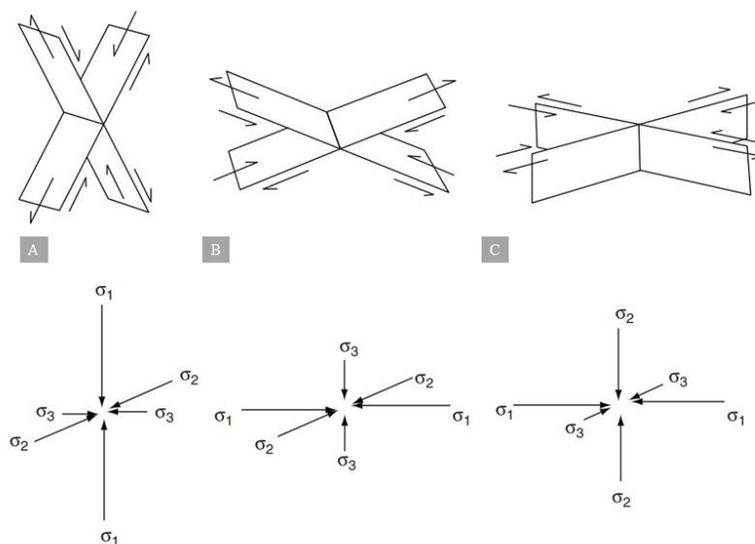
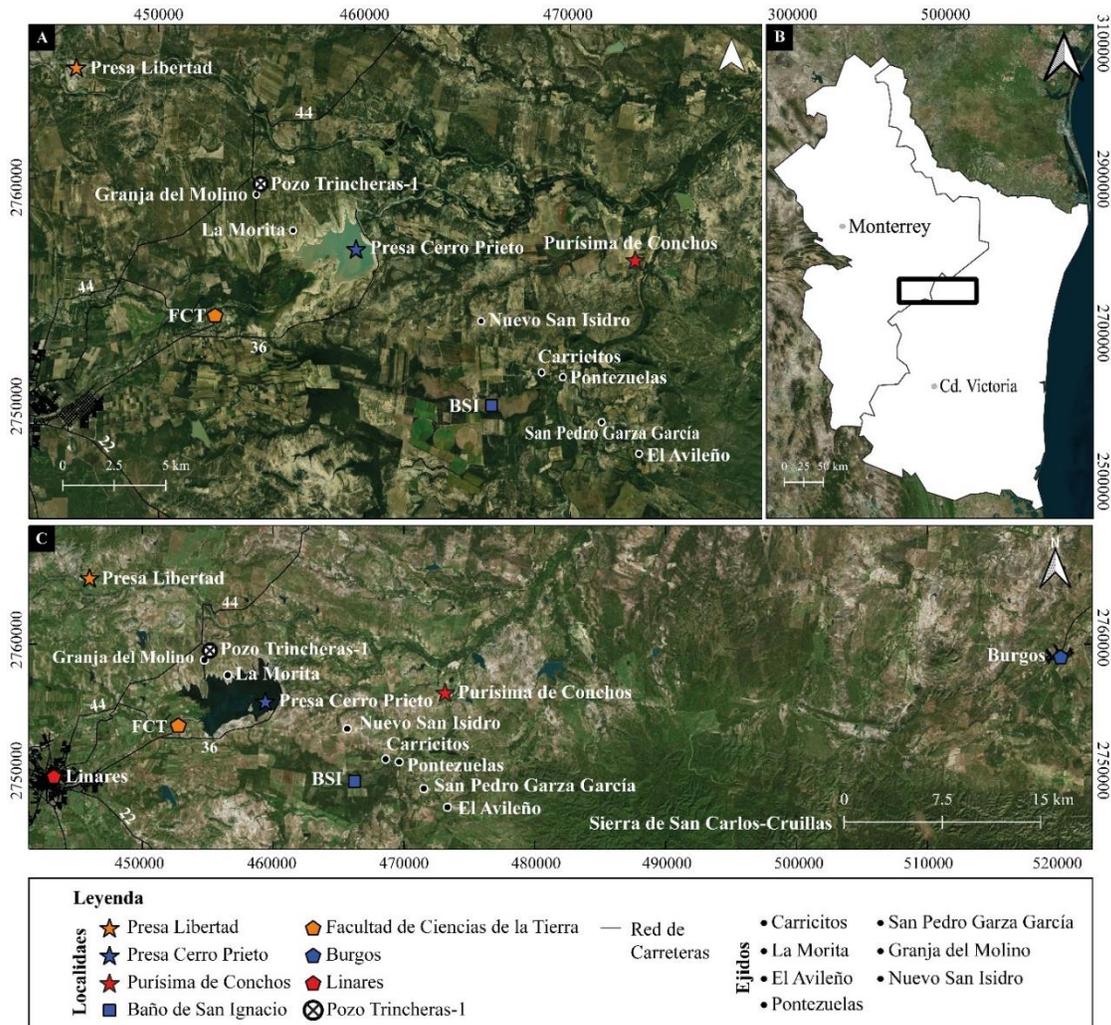


Figura 1.3. Fracturas de cizalla conjugadas y su relación con la tensión. (A)Falla normal donde σ_1 es vertical, (B) Falla inversa donde σ_3 es vertical y (C) Falla de cizalla donde σ_2 es vertical. Modificado de Singhal y Gupta (2010).

Según Fossen (2010) las fallas conjugadas y las estrías correspondientes revelan la orientación de las tensiones principales. El eje de tensión principal máxima biseca el ángulo agudo de las fallas conjugadas.

1.4 Localización del área de estudio

El EDL, objeto del presente estudio, se localiza en las inmediaciones de la Presa Cerro Prieto, la Presa Libertad y la localidad Purísima de Conchos en el municipio de Linares, N. L (Figura 1.4).



La Presa José López Portillo (Cerro Prieto) se localiza a ~15 km al NE de la Ciudad de Linares, y a escasos ~5 km de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El afloramiento de diques se encuentra en el borde norte de la

PCP colindando con los ejidos Granja el Molino y La Morita. La vía de acceso es a través de las carreteras estatales 36 y 44.

La Presa Libertad se encuentra a ~15 km al norte de la Cd. de Linares, en los límites de Linares y Montemorelos. Los afloramientos se encuentran en los taludes de la obra civil de esta presa.

Adicionalmente, se presenta la localización del pozo exploratorio Trincheras 1 de PEMEX, que de acuerdo con los datos vectoriales de la [Comisión Nacional de Hidrocarburos \(CNH, 2024b\)](#) se encuentra en las coordenadas 14 R 455402.97E 2759591.44N.

Purísima de Conchos se encuentra a 16 km hacia este de la Presa Cerro Prieto, siendo el ejido Nuevo San Isidro el sitio donde los diques se interconectan. Para llegar a este lugar se toma la carretera estatal 36 y después una desviación al oeste, una carretera que se dirige hacia Purísima de Conchos.

Los diques se concentran principalmente al sur de la localidad. Sin embargo, al sur de los tres cerros constituidos por las calizas de la Fm. Providencia del Cenozoico, colindando con los ejidos Carricitos, San Pedro Garza García y El Avileño, se encuentran otros afloramientos de este mismo enjambre.

Debido la extensión de los lineamientos geológicos-estructurales, el área de estudio se proyecta desde Linares, N.L., hasta Burgos en Tamaulipas, correspondiendo al aquí nombrado Corredor Linares-Burgos.

1.5 Trabajos previos

El área geográfica que corresponde al EDL ha sido testigo de diversas investigaciones relacionadas con la hidrogeología e ingeniería de la Presa Cerro Prieto y la Presa La Libertad, así como la geología, análisis ambientales y ecología del municipio de Linares.

La presa José López Portillo o también conocida como Presa Cerro Prieto (PCP) se construyó entre los años 1980 a 1982 por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), ahora conocida como Comisión Nacional del Agua (CONAGUA; [Yutsis et al., 2009; 2014](#)).

La capacidad calculada para la PCP fue de $\sim 400 \text{ Mm}^3$, con el objetivo de proveer al área metropolitana de Monterrey con un suministro de $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, irrigar una superficie de 673 hectáreas y controlar los afluentes de los ríos de la localidad, Pabillo y Hualahuises, durante la temporada de huracanes (De León-Gómez, 1993; De León-Gómez *et al.*, 1994; De León-Gómez y Schetelig, 1996).

A continuación, se presentan las publicaciones, tesis e informes que contienen información sobre el contexto geológico-estructural del área.

Rodríguez-Palacios (1993) realizó un mapeo geológico e investigaciones de la estructura tectónica del Baño de San Ignacio, que se encuentra al este de Linares. El autor mapeó las Formaciones San Felipe y Méndez, donde describe la estratificación con un rumbo NE-SW y buzamiento al NW. Menciona que el fracturamiento preferencial de la zona tiene direcciones NE-SW y NW-SE. Adicionalmente, describió las calizas terciarias de la Fm. Providencia.

Montalvo-Arrieta *et al.* (2005) realizaron la microzonación de la región de Linares a partir de velocidades de onda S mediante la técnica de sismología de refracción e interpretación de pozos y geología superficial.

Garza-Castillo (2006) realizó la caracterización hidrogeoquímica del Baño de San Ignacio (BSI). En esta tesis se explican las razones de las variantes de su temperatura relativamente alta y mineralización. La autora resalta que las características se incrementan en dirección a la salida de la cuenca y las aguas asociadas a flujo regional revelan una interacción con rocas evaporíticas.

De León-Gómez *et al.* (2006) elaboraron una matriz de geoindicadores de impacto ambiental con el fin de conocer el estado de la presa José López Portillo (Cerro Prieto) en Linares, N.L. En este estudio se destaca el abastecimiento de agua potable, donde una de las situaciones problemáticas encontradas fueron las filtraciones que interfieren en el suministro de agua potable y la estabilidad de la cortina que podría generar colapsos hidráulicos.

Yutsis *et al.* (2009) realizaron un estudio geofísico-geológico en la cuenca Pabillo buscando en el subsuelo una posible influencia del comportamiento del reservorio de agua de la Presa Cerro Prieto. En este trabajo se modeló el basamento de la Presa Cerro Prieto,

que se encuentra desde 900 hasta 1,600 de profundidad. Los datos geofísicos sugieren que hay lineamientos en el basamento en dos direcciones, SW-NE y NW-SE.

Dávila-Pórcel (2011) realizó un estudio sobre el desarrollo sostenible de usos de suelo en Linares, donde trabajó con hidrogeología urbana como parámetro de planificación territorial. Este estudio permitió definir zonas de alta y baja vulnerabilidad, donde el extremo oriental de la Presa Cerro Prieto es de baja vulnerabilidad.

Yutsis *et al.* (2014) estudiaron la topografía, sedimentación reciente y volumen del agua en la presa Cerro Prieto. La sedimentación reciente en la Presa Cerro Prieto se acumula de 2 cm a 14 cm/año, estimando un volumen aproximado de 9 millones de m³ de estos sedimentos.

Martínez-Solís (2016) analizó el efecto que produjo la sequía del año 2011, en el acuífero de grietas del Centro de Producción Agropecuaria (CPA)/UANL, en este trabajo se propuso un manejo sostenible del uso de agua subterránea.

Pérez-Aguirre (2017) realizó un estudio geofísico para determinar la estructura geológica en los alrededores en el Baño de San Ignacio. El autor concluye que su área de estudio está controlada por una estructura semi-regional que definió como un alto de basamento, donde posteriormente se depositaron las secuencias marinas sedimentarias del Jurásico-Cretácico Superior. Los altos de basamento fueron detectados con el pozo Trincheras-1, lo que sugiere que el alto estructural tiene una orientación NW-SE.

Ortega-Torres (2021) estudió la mineralogía y geoquímica de tobas de la Formación San Felipe del Cretácico Tardío en el margen oriental de la Presa Cerro Prieto. Describió que los estratos volcanoclásticos están constituidos por una matriz vítreo-arcillosa fina de ilita y clorita. Estos se caracterizan como un depósito alterado de ceniza volcánica de composición riolítica o riodacítica, con afinidad a un arco continental de 85 a 75 Ma.

Antonio-Durán (2022) reporta la existencia de diques en las localidades de la Presa Cerro Prieto y Purísima de Conchos, generalizado como Enjambre de Diques Linares. Estudió los diques mediante petrografía, geoquímica, análisis geoespacial y geofísica. Estos diques son de aptitas subalcalinas y con una afinidad tectónica de arco volcánico. Así mismo propuso el nombre de Corredor Linares-Burgos para el complejo geológico-estructural, conformado por

fracturas, fallas y diques. Estos lineamientos presentan una orientación preferencial SW-NE. Este trabajo se presentó en la memoria de congreso de [Antonio-Durán et al. \(2023\)](#).

En cuanto al reporte de lineamientos estructurales, [De León-Gómez \(1993\)](#) realizó un análisis hidrogeológico de la cuenca del Río Pablillo. En este trabajo se hizo una fotointerpretación donde se ilustra principalmente la Presa Cerro Prieto y sus alrededores, se muestran los lineamientos, de interés en este trabajo, como fracturas extensionales ([Figura 1.5](#)).

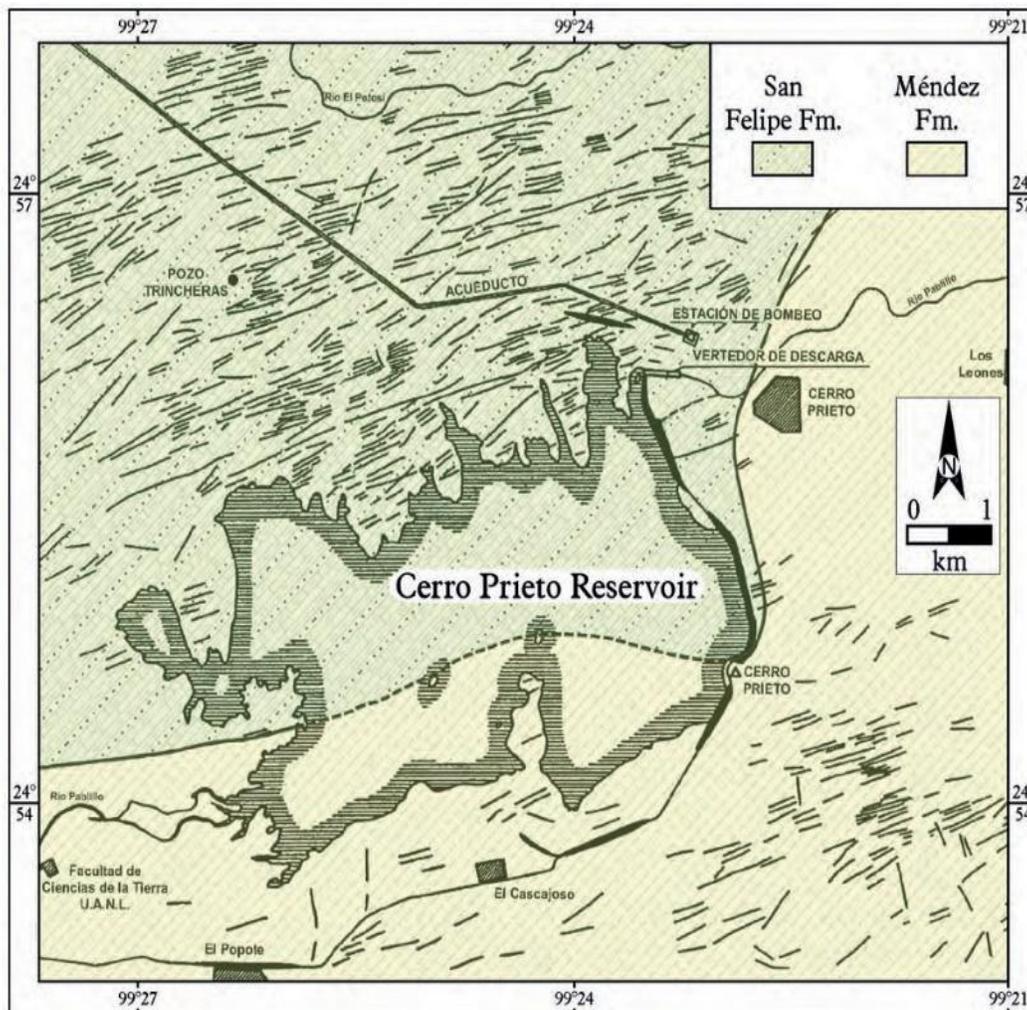


Figura 1.5. Mapa geológico donde se muestran los lineamientos en los alrededores de la Presa Cerro Prieto. Tomado de [De León-Gómez \(1993\)](#).

En la carta geológica G14C59 El Porvenir, escala 1:50,000 del INEGI (1978; Figura 1.6) se registraron diques al sur de la localidad Purísima de Conchos. Estos diques se localizan al norte de las lomas Guayacán, Pontezuela y La Providencia. Los diques colindan con el río Anegado, que cruza la localidad. Las longitudes de los diques en esta carta geológica van desde 1 hasta 3 km.

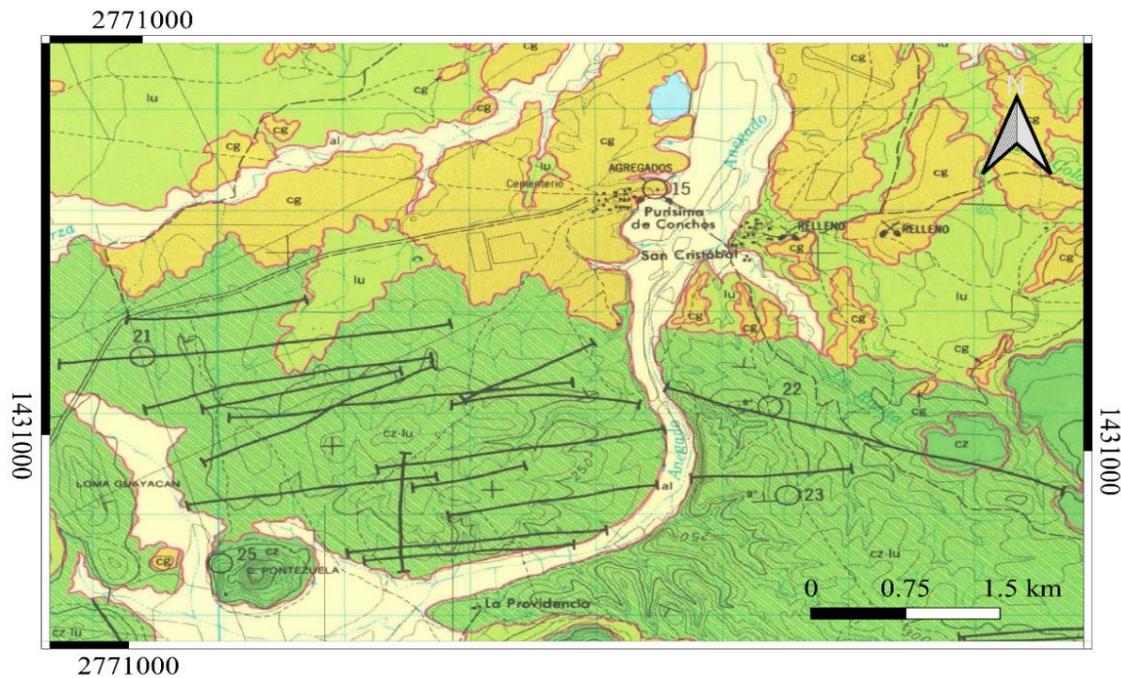


Figura 1.6. Detalle de la carta geológica G14C56 (INEGI, 1978), donde se muestran los diques de Purísima de Conchos. Las líneas negras corresponden a los diques con orientaciones preferenciales W-E, aunque también es posible observar diques orientados N-S.

1.6 Justificación

Se analizan los diques de aptitas emplazados en la secuencia sedimentaria localizados en la Planicie Costera del Golfo de México. Se considera que se trata de evidencias de un pulso magmático que hasta ahora no se ha descrito para todo el Noreste de México.

El estudio del Corredor Linares-Burgos contribuirá a la descripción geológica de la provincia fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México, y a la evolución geológica de la Sierra de San Carlos-Cruillas y la Cuenca de Burgos.

1.7 Hipótesis

El Enjambre de Diques Linares se relaciona petrogenéticamente con la Sierra de San Carlos-Cruillas (Eoceno-Pleistoceno) o con las tobas de la Fm. San Felipe (Santoniano-Campaniano), debido a sus proximidades geográficas y naturaleza magmática.

La distribución y dirección de los lineamientos del Corredor Linares Burgos indican un evento extensional. La extensión se asocia al levantamiento post laramídico de la Sierra de San Carlos-Cruillas y la subsidencia de la Cuenca de Burgos.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Proponer un modelo geológico para el Enjambre de Diques Linares y el Corredor Linares Burgos, producto de un análisis geológico integral.

1.8.2 Objetivos específicos

- Especificar la petrología, la geofísica y el análisis geoespacial-estructural del Enjambre de Diques Linares.
- Contrastar la naturaleza petrológica del Enjambre de Diques Linares con los diques sieníticos de la Sierra de San Carlos-Cruillas y tobas alteradas de la Fm. San Felipe.
- Postular un modelo petrogenético del Enjambre de Diques Linares.
- Determinar el origen de los lineamientos en el Corredor Linares Burgos.

1.9 Metodología

1.9.1 Trabajo de campo y recopilación bibliográfica

La hipótesis, justificación, objetivo general y objetivo específico de esta tesis se redactaron con base en la perspectiva metodológica de [Schmelkes](#) y [Elizondo-Schmelkes \(2010\)](#).

Se realizaron seis campañas de campo para la recolección de muestras, identificación de estructuras geológicas y descripción de la geología local. Se utilizaron diversas imágenes satelitales (Google Earth Pro y Bing Satellite) del área de estudio para identificar puntos de interés establecidos en la fotointerpretación como lineamientos de vegetación, traza de diques y vías de acceso.

En campo se reconocieron las unidades litoestratigráficas, descritas en la sección de geología local de esta tesis. Así mismo se visitaron los afloramientos de los diques y se recolectaron muestras para su posterior análisis.

La recopilación bibliográfica inició con la documentación de estudios realizados en la región de la Presa Cerro Prieto y Purísima de Conchos. Se revisó la bibliografía de la fisiografía del área de estudio que corresponde a la Planicie Costera del Golfo de México. Debido a que el CLB se localiza en los límites de la Cuenca de Burgos y de la Sierra de San Carlos-Cruillas se recopiló información acerca de estos complejos geológicos. Particularmente se realizó una revisión de la estratigrafía del área de estudio, debido al contenido de rocas volcanosedimentarias en la Formación San Felipe.

1.9.2 Análisis geoespacial

El área de estudio se extiende fisiográficamente sobre la PCGM, desde Linares hasta el municipio de Burgos y se delimitó hasta la zona norte de la SSCC con el fin de reconocer el contexto geomorfológico-estructural de la zona.

El polígono final del área de estudio fue delimitado en *Google Earth Pro* (formato kmz) para posteriormente colocarlo en un Sistema de Información Geográfica (SIG). De la misma manera, se guardaron puntos de referencia para el mapa de localización, que corresponden a (1) la cabecera municipal de Linares, (2) la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León, (3) el Baño de San Ignacio, (4) el ejido Purísima de Conchos, (5) la Presa Cerro Prieto, (6) la cabecera municipal de Burgos, así como los ejidos (7) Carricitos, (8) El Avileño, (9) Granja del Molino, (10) La Morita, (11) Nuevo San Isidro, (12) Pontezuelas, (13) San Pedro Garza García y (14) Presa Libertad. La localización del pozo exploratorio Trincheras-1 fue sustraída de los archivos vectoriales de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH; 2024b).

Para definir las líneas que corresponden a diques se tomaron como referencia las trazas de vegetación, que las líneas no pertenecieran a actividad antropogénica (carreteras, caminos o población) y que los lineamientos no fueran ríos o arroyos. Además, la característica de que los diques son tabulares y discordantes a la estratificación fue de gran utilidad para definir los lineamientos que corresponden a estas estructuras (Llambías, 2001).

Los diques analizados en este trabajo se agrupan en enjambres, característica que es frecuente en esta clasificación de cuerpos hipabisales.

Adicionalmente, se utilizó la clasificación de Hoek (1991) para identificar a los diques en la fotointerpretación y en campo (Figura 1.7). El autor menciona que los diques generados por dilatación pueden tener arreglos irregulares, anastomosados o zigzag.

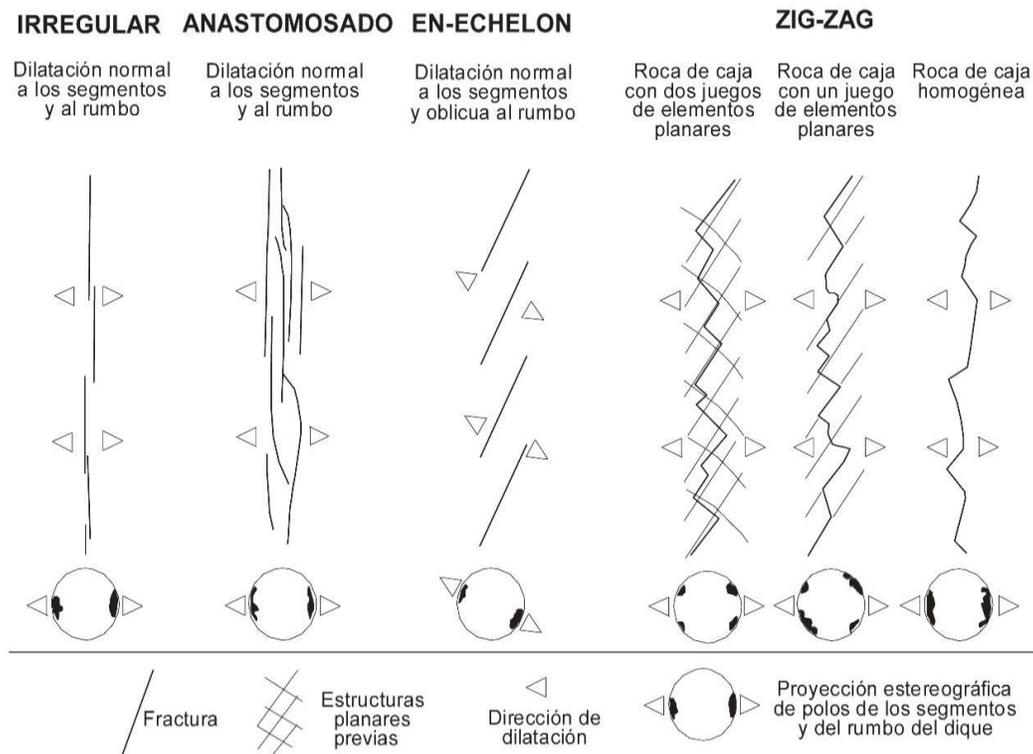


Figura 1.7. Clasificación para diques de Hoek (1991). Los diques que se muestran en la figura son generados por dilatación. Por lo tanto, considera a cada dique como una medida de deformación. El esfuerzo mínimo es perpendicular al dique. Tomado de Llambías (2001).

Para el análisis geoespacial fue necesario utilizar un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 5 m de resolución. Se procesaron 32 cartas individuales escala 1:10,000 con el fin de configurar el MDE regional para el área de estudio (Figura 1.8).

A partir del MDE se generó un mapa de sombras (*hillshade*) mostrando las pendientes topográficas sombreadas, lo cual permite observar el contraste de relieve en la zona de estudio (Figura 1.9).

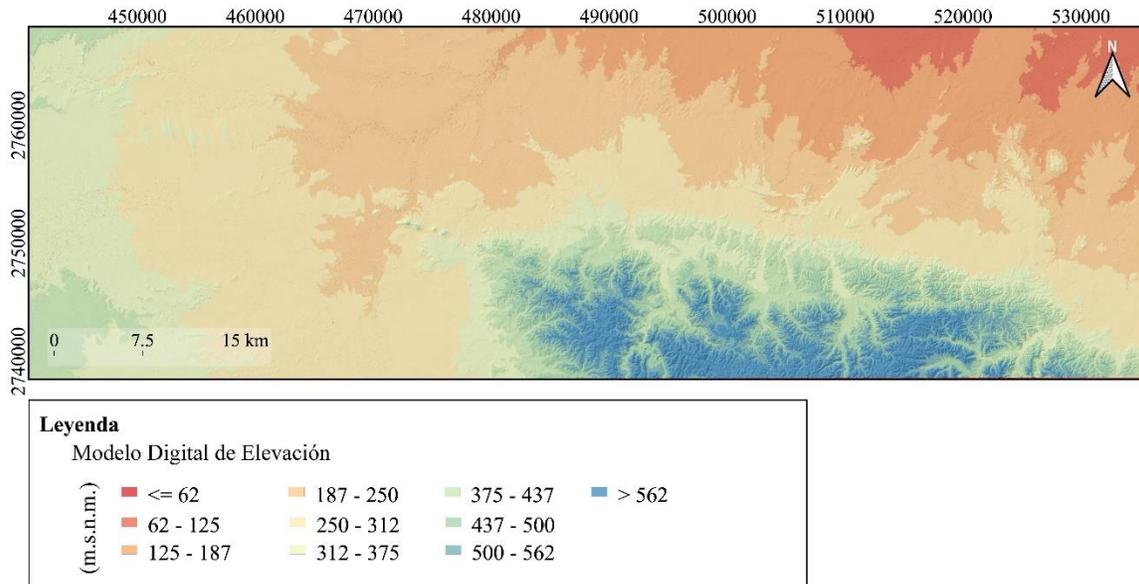


Figura 1.8. Modelo Digital de Elevación (MDE) de 5 metros de resolución para el área de estudio.

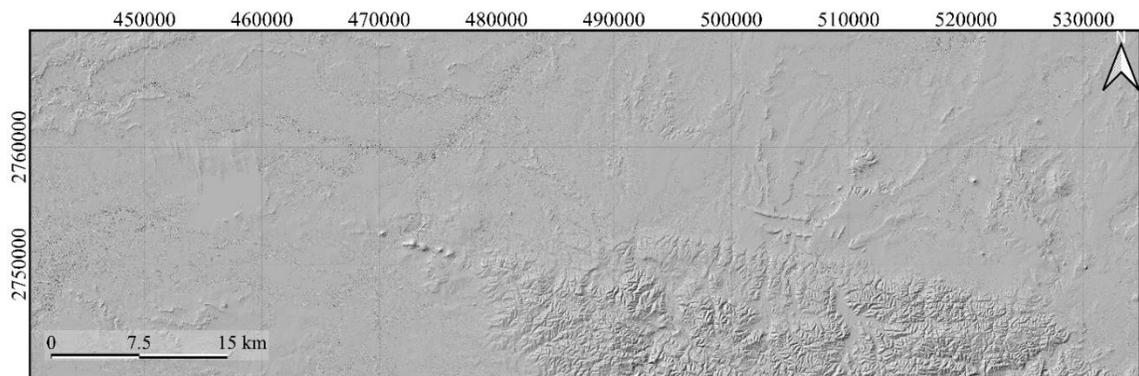


Figura 1.9. Mapa de sombras (*Hillshade*) generado a partir del MDE para el área de estudio.

La información satelital del software *Google Earth Pro* se utilizó para identificar las estructuras de los diques mediante la fotointerpretación. Las estructuras se identificaron por observarse líneas marcadas con profusa vegetación, principalmente en el margen norte de la Presa Cerro Prieto y al sur de Purísima de Conchos (Figura 1.10a).

Posteriormente se identificó y cuantificó la distribución espacial del enjambre de diques en el programa QGIS versión 3.6.2, así mismo se describieron las características geológicas del CLB.

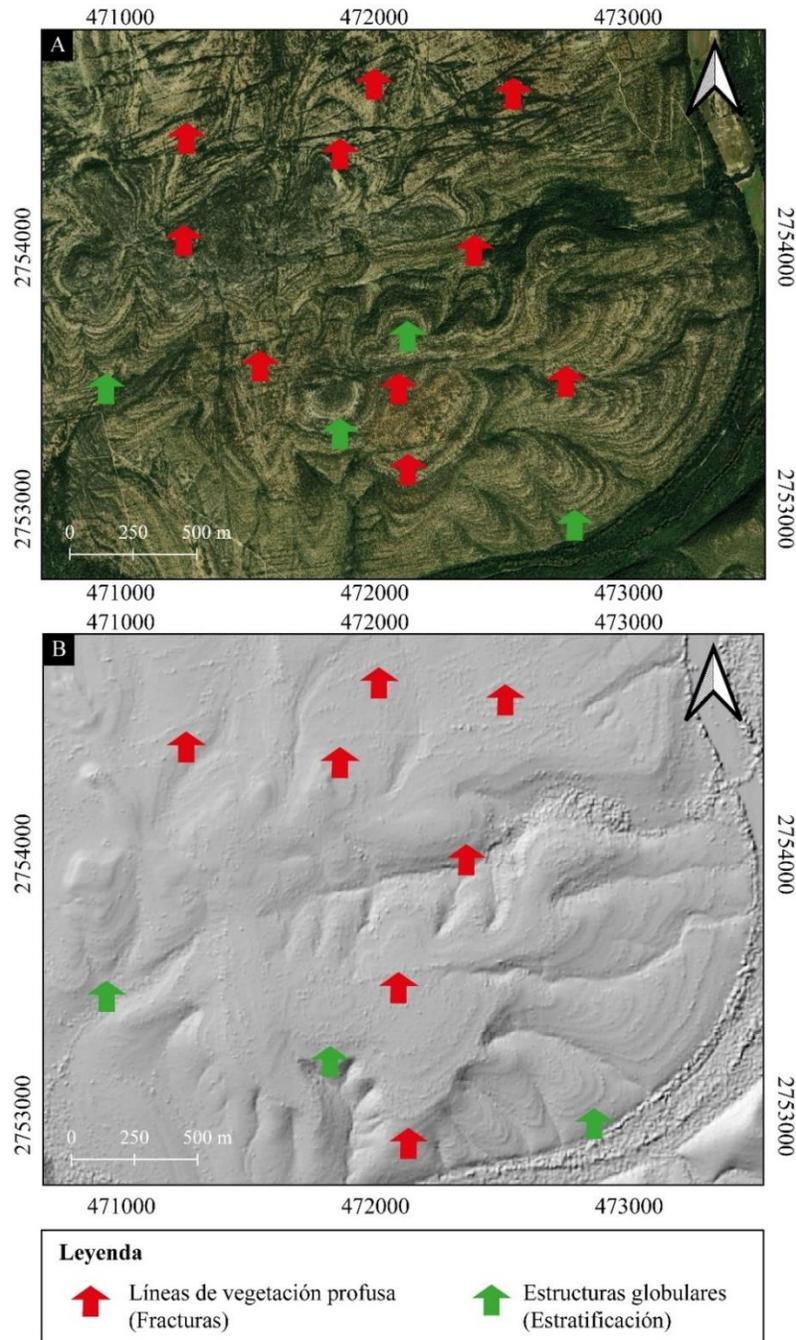


Figura 1.10. Estructuras geológicas en vista satelital. (A) Se observan las líneas profundas de vegetación (flechas rojas) y estructuras globulares (flechas verdes). (B) Lineamientos (flechas rojas) y estructuras globulares (flechas verdes) en el mapa de sombras.

Debido a la versatilidad del mapa de sombras fue posible reconocer el enjambre de diques y otros lineamientos, ya que estas estructuras generan ligeras pendientes, se sombream y se distinguen en el color gris del MDE (Figura 1.10b).

Lo anterior permitió corroborar los sistemas de lineamientos principales de la región, así como destacar cualquier estructura que no perteneciera al contexto geológico-estructural y que estuviera relacionada con la actividad antropogénica (vías de comunicación terrestre, poblados, etc.).

1.9.2.1 Geología

El mapa geológico generado, parte de los resultados de este trabajo, contiene la litología (polígonos), fallas (líneas) y fracturas (líneas) de la zona de interés, así como los elementos geológicos que se tomaron en campo (rumbo y echado de estructuras) y el enjambre de diques, representado con líneas producto de la fotointerpretación y trabajo de campo.

Para el mapa geológico se descargaron los datos vectoriales del (INEGI, 2003a, 2003b) correspondientes a las cartas geológicas G14-08 (Río Bravo) y G14-11 (Linares), las cuales delimitan al área de estudio.

Los datos geológicos vectoriales consultados contienen las unidades rocosas que afloran en el área de estudio, referidas a un tiempo geológico y estructuras originadas por eventos tectónicos (fallas y fracturas). De acuerdo con el INEGI (2003a, 2003b) la información que contienen los datos vectoriales es la siguiente:

- a) Tipo de roca por génesis y edad (unidades cronoestratigráficas).
- b) Estructuras geológicas.
- c) Aspectos económicos (zonas geotérmicas y recursos minerales).

El nombre de cada archivo descargado está compuesto de la clave del conjunto de datos (g1411 y g1408), seguida de la sigla de la cobertura y por último la del tema de geología con su inicial “g” (INEGI, 2003a; 2003b). La representación del tipo de cobertura se indica de la siguiente forma:

- a) l: cobertura estructuras geológicas (entidades de línea).
- b) p: cobertura de unidades de roca (entidades de área).
- c) pt: cobertura de entidades puntuales (entidades de puntos).

Los archivos vectoriales de ambas cartas fueron combinados con herramientas de geoprocreso en QGIS. Con el fin de optimizar el procesado, solamente se extrajeron los archivos vectoriales de la zona de estudio, tomando como capa de entrada el polígono generado en *Google Earth Pro*.

La litología se categorizó de acuerdo con las edades de las rocas, datos definidos en la tabla de atributos en la columna CLAVE, tomando como base la simbología presentada en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (Cohen *et al.*, 2013), a excepción de los cuerpos ígneos (sienita, diorita, gabro y basalto).

Las Formaciones Méndez y San Felipe fueron reconocidas en campo. Sin embargo, no se reconocieron los límites o contactos de dichas formaciones, por lo que las unidades geológicas se categorizaron con las edades presentadas en los archivos vectoriales proporcionados por el INEGI (2003a, 2003b).

Un aspecto para considerar dentro de los datos vectoriales del INEGI (2003a, 2003b), es que se refieren a las épocas Plioceno, Mioceno, Oligoceno, Eoceno, Paleoceno como Periodo Terciario, a su vez dividiéndolo en Terciario Inferior y Terciario Superior. Sin embargo, en la actual Tabla Cronoestratigráfica Internacional (Cohen *et al.*, 2013), se le llama Paleógeno (66.0-23.03 Ma) al periodo de épocas Paleoceno, Eoceno y Oligoceno. Además, al Mioceno y Plioceno fue nombrado Neógeno (23.03-2.58 Ma).

Las fallas y fracturas se tomaron de este mismo conjunto de datos vectoriales (g1411lg y g1408lg) que pasaron por el mismo proceso de combinar ambos archivos y posteriormente cortarlos para ajustarlos al área de estudio. Para representarlos se utilizó una línea sencilla en color negro de 0.26 mm para las fracturas, y para las fallas normales se usó su representación universal, realizada traslapando una línea sencilla negra de 0.5 mm y el marcador sencillo Line, con punto de anclaje abajo-centro horizontal, de 2.4 mm en color negro. El obtener las fallas y fracturas fue de utilidad para reconocer las lineaciones de este ámbito que siguieran el patrón de lineamientos antes mencionado.

Para generar las cotas del mapa geológico se descargó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM; INEGI, 2013) de 15 m de resolución para los estados de Nuevo León y Tamaulipas. De estos archivos ráster se extrajeron las curvas de nivel con un intervalo entre

curvas de 50 m. Una vez obtenidas las curvas de nivel de ambos estados en manera de un archivo vectorial, se geoprocesaron combinándolas y cortándolas de acuerdo con el área de estudio. Las curvas de nivel son representadas con líneas sencillas de color negro, 2.0 mm de grosor, 60% de opacidad y colocando etiquetas sencillas de acuerdo con la columna en la tabla de atributos ELEV.

La red hidrográfica y cuerpos de agua dentro del área de estudio fueron geoprocesados con anterioridad ([Antonio-Durán, 2022](#)) para identificar la relación con los diques y lineamientos, así como para descartar cualquier confusión en cuanto a la dirección preferencial de los afluentes distinguiéndolos de los diques.

1.9.2.2 Lineamientos

Los lineamientos se identificaron mediante la fotointerpretación. En las imágenes satelitales (*Google Earth Pro* y *Bing Maps*) primero se reconocieron los objetos individuales como ríos, cuerpos de agua (p.e.) presa Cerro Prieto), área correspondiente a una planicie, área correspondiente a sierra, carreteras, caminos, poblaciones y áreas de cultivo. En la tesis de licenciatura realizada con anterioridad ([Antonio-Durán, 2022](#)), se muestra el análisis de la red hidrográfica, carreteras y población. Este paso sirvió para evitar confusiones en la identificación de estructuras geológicas

Posteriormente se identificaron unidades que presentan características similares como tonos, texturas y patrones. El área correspondiente a planicie muestra una textura lisa en el MDE y en vista satelital se muestra con escasa vegetación, pero una variedad de tonos como café, gris, ocre y verde. En esta área es donde se observan las poblaciones, ríos, arroyos, la presa y áreas de cultivo.

Una unidad significativa, dentro del área de la planicie, es la zona de tono ocre-amarillento con textura lisa. Esto indica un cambio en la litología, esta zona corresponde a las formaciones San Felipe y Méndez, que afloran como unidades arcillosas principalmente.

En esta unidad significativa se observaron lineamientos de vegetación profusa que no corresponden a ríos o arroyos, caminos, carreteras, áreas de cultivo, ni a asentamientos humanos. Estos son los que fueron marcados como diques y que posteriormente fueron identificados en campo.

Por otra parte el área de la SSCC se observa con vegetación más profusa que le da un tono verde cuasi homogéneo. En el MDE la SSCC se caracteriza por tener una textura rugosa. En el área de la sierra, se identificaron otros lineamientos no correspondientes a ríos o arroyos, ni a carreteras. Estas últimas fueron marcadas como fracturas.

Adicionalmente, se nutrió la base de datos geológicos con los archivos del INEGI (2003a, 2003b, 2013) donde se encuentra información de estructuras geológicas como fracturas y fallas, particularmente El Multo y Palos Blancos.

Para realizar la interpretación fotogeológica se utilizaron como guía las imágenes satelitales de *Bing*, *Google Earth Pro* y el MDE de 5 m de resolución. Las líneas pertenecientes a las estructuras geológico-estructurales de interés se marcaron generando una capa de archivo *shape*.

Para la categorización de los lineamientos en el mapa, al enjambre de diques se le asignó una simbología de línea simple de color rojo (Figura 1.11), los lineamientos del margen sur del área de estudio se les asignó líneas simples de color negro, a las fallas y fracturas de la SSCC líneas simples de color negro (las fallas conservaron su simbología de falla normal), y a los posibles lineamientos de los cuerpos subvolcánicos se les asignó una línea punteada de color rojo.

Una vez marcados los lineamientos se agregaron dos columnas en la tabla de atributos para calcular la longitud y rumbo de cada una de estas, utilizando la calculadora de campos.

Para calcular la longitud, en metros, de los lineamientos con la calculadora de campos se sigue la siguiente ruta dentro de la tabla de atributos (Figura 1.12): añadir campo>color Longitud a la caja del nombre >aceptar>abrir calculadora de campo>seleccionar actualizar campo existente> buscar geometría>seleccionar \$length>aceptar (Figura 1.13).

Para medir el rumbo de los lineamientos se sigue la ruta: añadir campo> nombrar al campo Strike°> aceptar> abrir calculadora de campo> buscar geometría> seleccionar geometría> seleccionar azimuth> escribir en expresión: “azimuth(start_point(\$geometry), end_point(\$geometry))/pi()*180”> aceptar (Figura 1.14).

Este último paso se realizó para convertir las unidades en radianes de los rumbos (cálculo por default en el programa) a grados. Al finalizar este proceso, la capa vectorial se guardó como hoja de cálculo con extensión *.xlsx*.

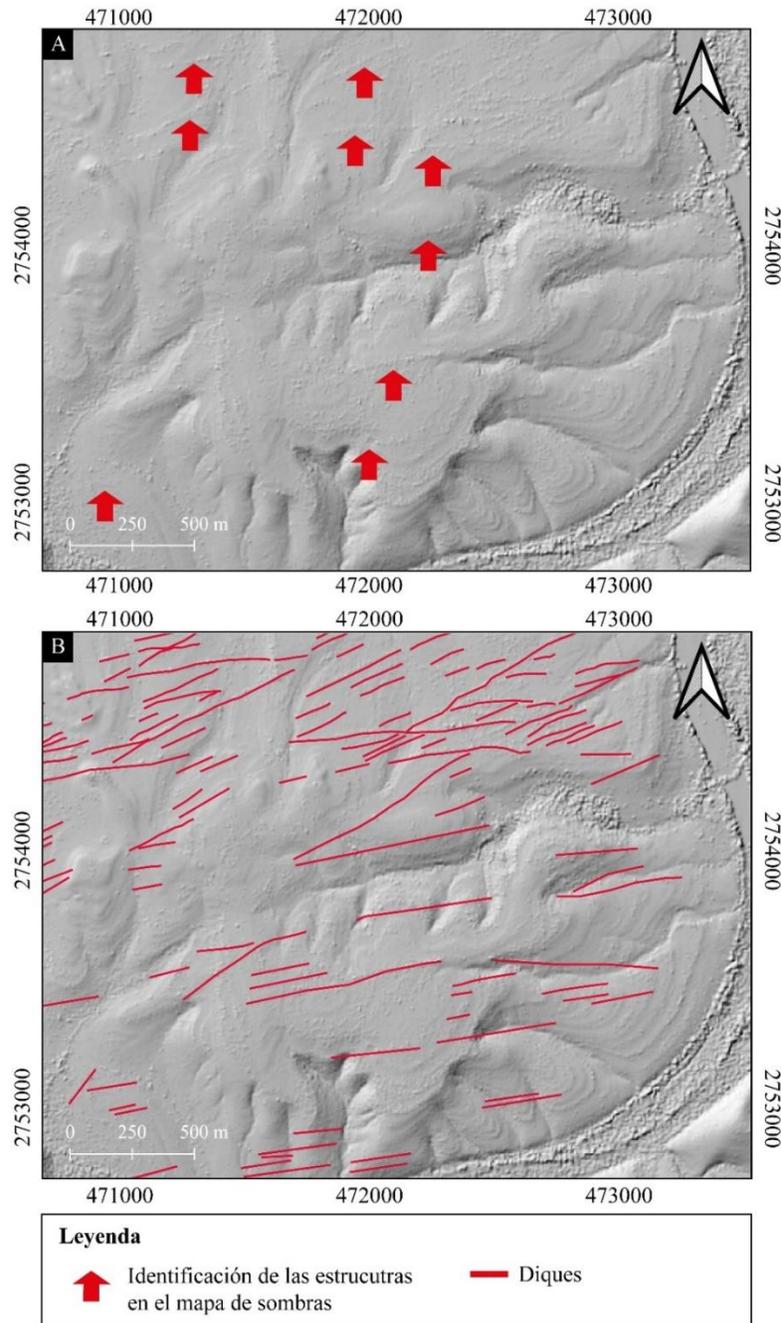


Figura 1.11. Ejemplo de cómo se identificaron y marcaron los lineamientos sobre el mapa de sombras. (A) Zona del EDL colindante con Purísima de Conchos. (B) Se indican los diques con la línea roja.

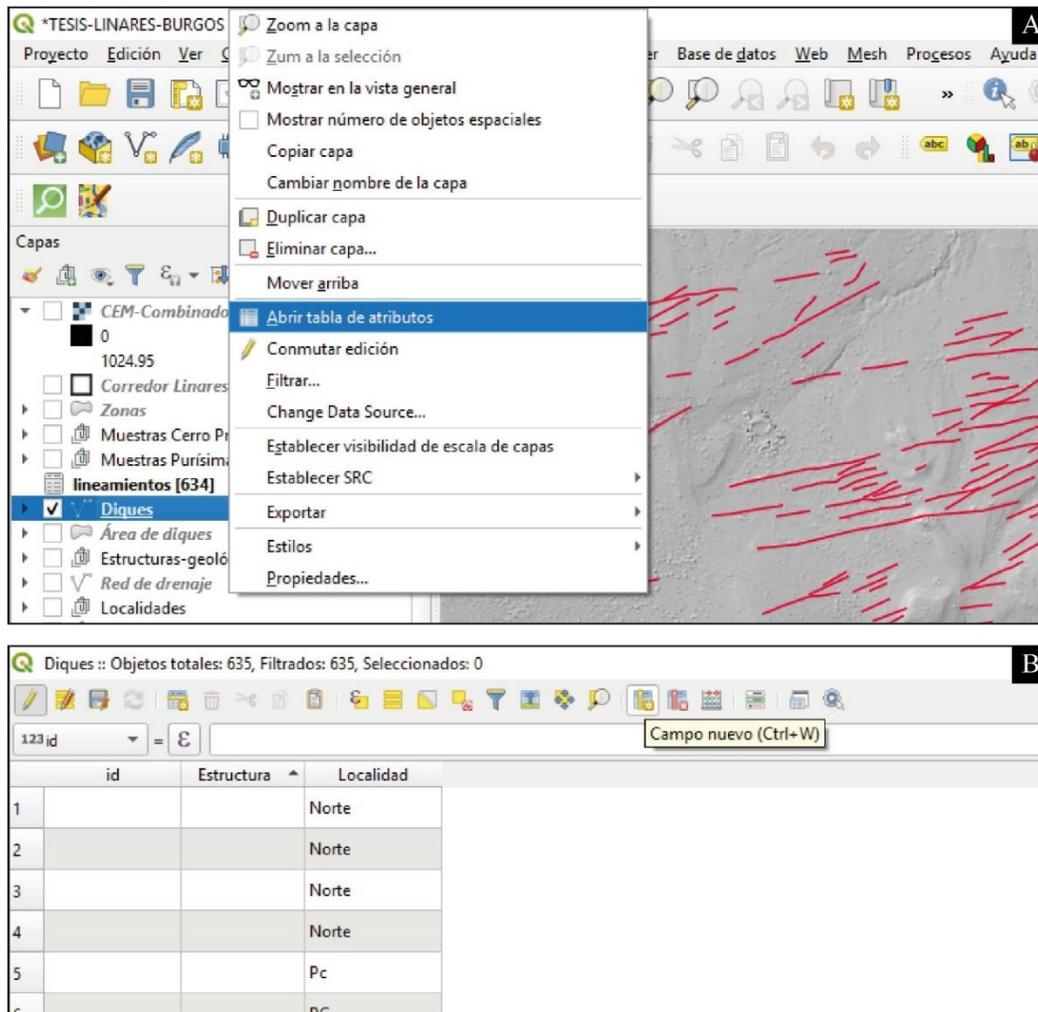


Figura 1.12. Manejo de la tabla de atributos perteneciente a los lineamientos. (A) Abrir la tabla de atributos. (B) Añadir un campo nuevo.

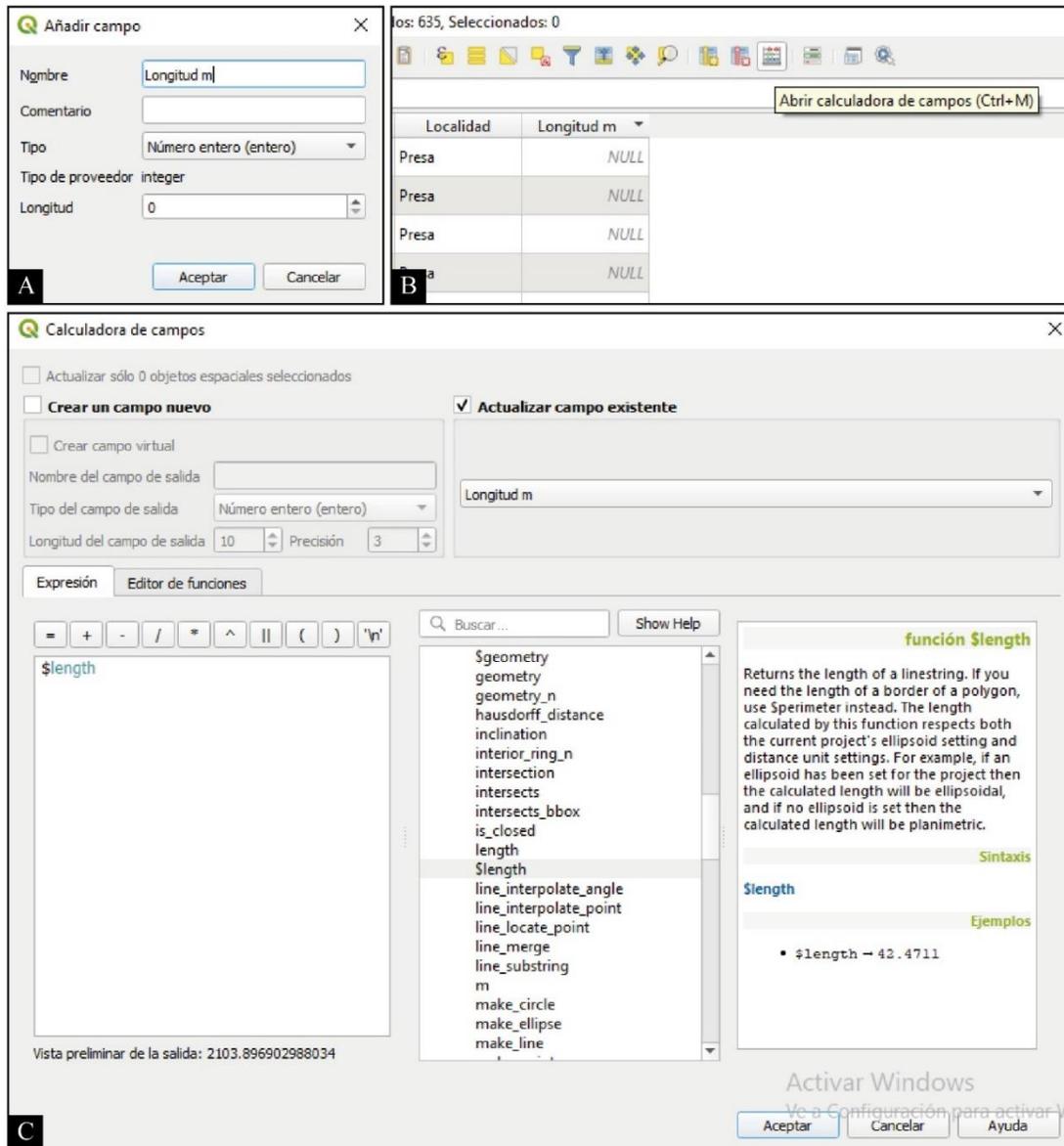


Figura 1.13. Secuencia para medir la longitud de los lineamientos. (A) Añadir un nuevo campo nombrándolo Longitud. (B) Abrir calculadora de campos. (C) Seleccionar la opción geometría e identificar la expresión “lenght\$”.

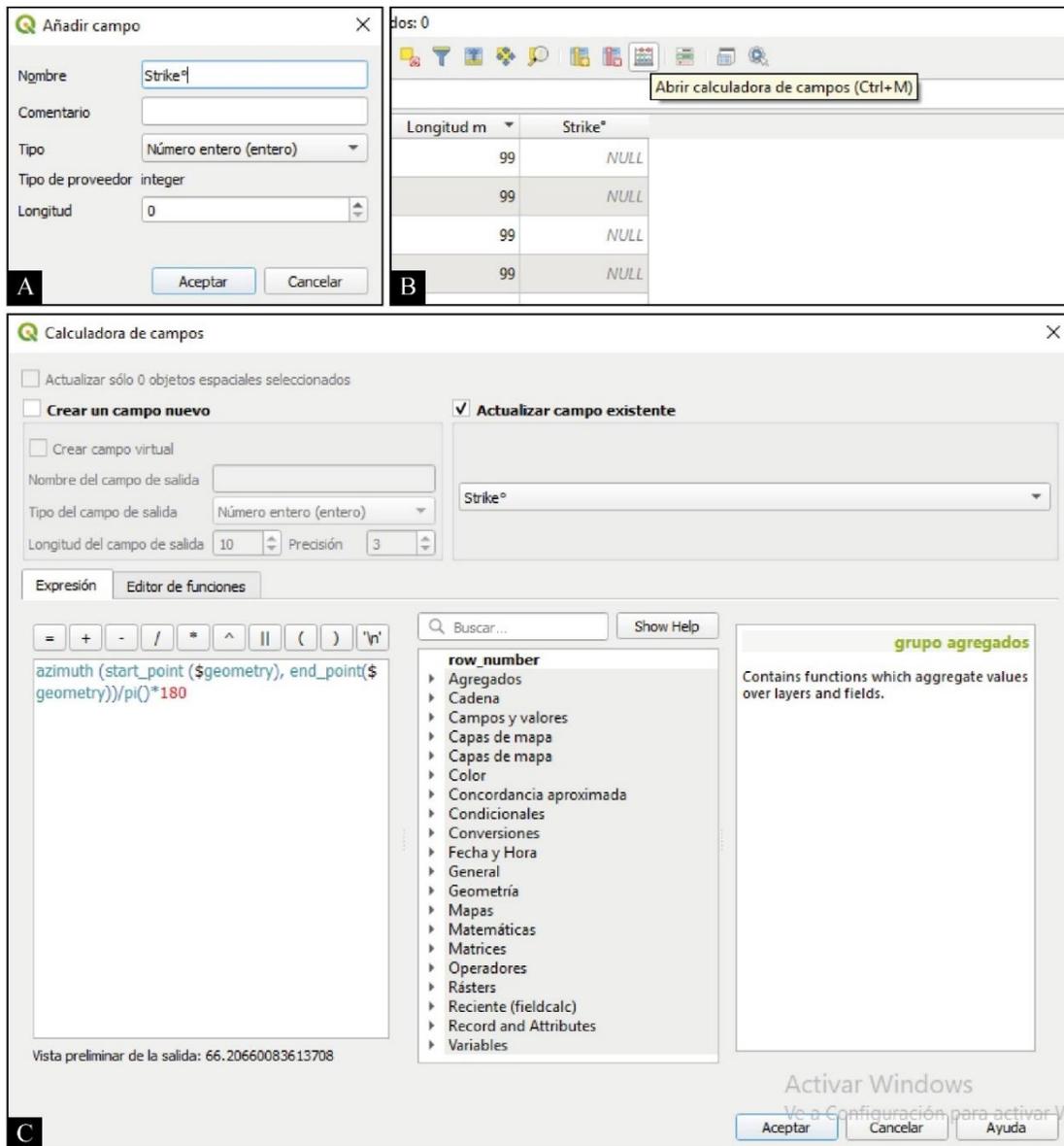


Figura 1.14. Secuencia para medir el rumbo de los lineamientos. (A) Añadir un nuevo campo nombrándolo Strike°. (B) Abrir la calculadora de campos. (C) Seleccionar la opción de geometría e identificar la expresión "azimuth". Colocar en la caja de expresiones la función presentada en el texto donde se refiere esta figura.

Con los datos obtenidos se determinaron las frecuencias de longitudes de acuerdo con las fronteras de clase, este proceso se utilizó para los diques debido a que se tiene una mejor caracterización geológica y control geoespacial. Cabe mencionar que presentan solamente

los datos de los diques observados en el periodo de este proyecto. Sin embargo, anteriormente se realizó este procedimiento para otro conjunto de diques (Antonio-Durán, 2022).

Para el análisis geoestadístico se ordenaron los datos (n) de las longitudes jerarquizadas ascendentemente, se identificó el valor mínimo (Xn) y el valor máximo (Xi) dentro de la lista de longitudes. Mediante la regla de Sturges (1926), se determinó el número de clases para elaborar el histograma siendo m= número de intervalos, con la fórmula (1):

$$m = 1 + 3.33 \log n \quad (1)$$

Posteriormente se determinó la anchura de clase mediante la siguiente fórmula (2; Triola, 2004):

$$A = X_i - X_n / m \quad (2)$$

Se realizó una tabla de frecuencias documentando los límites inferior y superior de las clases, fronteras de clase (fi) y frecuencia (ni). Para construir los histogramas se graficó la frecuencia acumulada vs. fronteras de clase.

Con los datos de rumbo estimados a partir de la interpretación fotogeológica, análisis geoespacial y datos verificados en campo, se generaron las rosetas de diaclasas en el programa *Orient* con el fin de identificar las principales direcciones de los lineamientos reconocidos. Adicionalmente, se realizó un análisis estructural que fue útil para definir un tensor de esfuerzos.

Para calcular ángulos entre pares de diques, primeramente se identificaron los diques que se cortaban entre sí, a continuación se creó un archivo vectorial (*geopackage*) para polígonos. Se coloraron estos polígonos triangulares en los vértices donde se unen los diques (Figura 1.15).

Para calcular los ángulos internos del triángulo, se recurre a la pestaña de procesos, se selecciona la caja de herramientas y una vez dentro de la caja de herramientas se selecciona LF Tools. En LF Tools se selecciona la opción Vector>Calculate polygon angles.

Posteriormente, se extiende una ventana emergente con el título: Calculate polygon angles. En esta venta se selecciona el archivo que se creó con los polígonos triangulares, en la lista con el nombre de Polygon Layer. Se presiona la opción de ejecutar y se obtienen los ángulos

internos del triángulo, donde el que coincide con el vértice de ambos diques, corresponde al ángulo entre ellos (Figuras 1.16 y 1.17). Cabe mencionar que LF Tools se instala previamente en los complementos de QGIS.

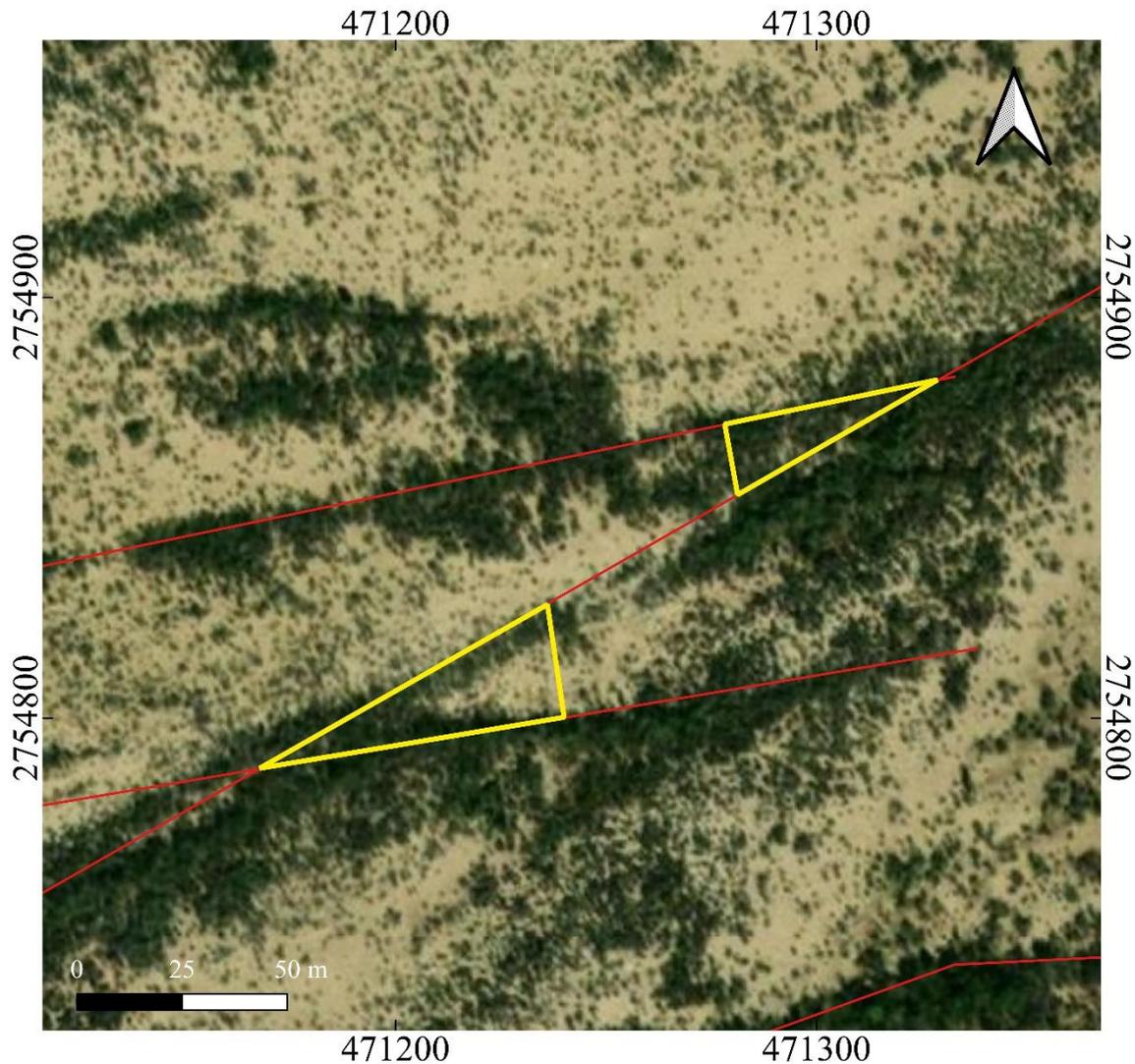


Figura 1.15. Delimitación de triángulos correspondientes a los vértices donde se cruzan los diques. Las líneas rojas corresponden a los diques.

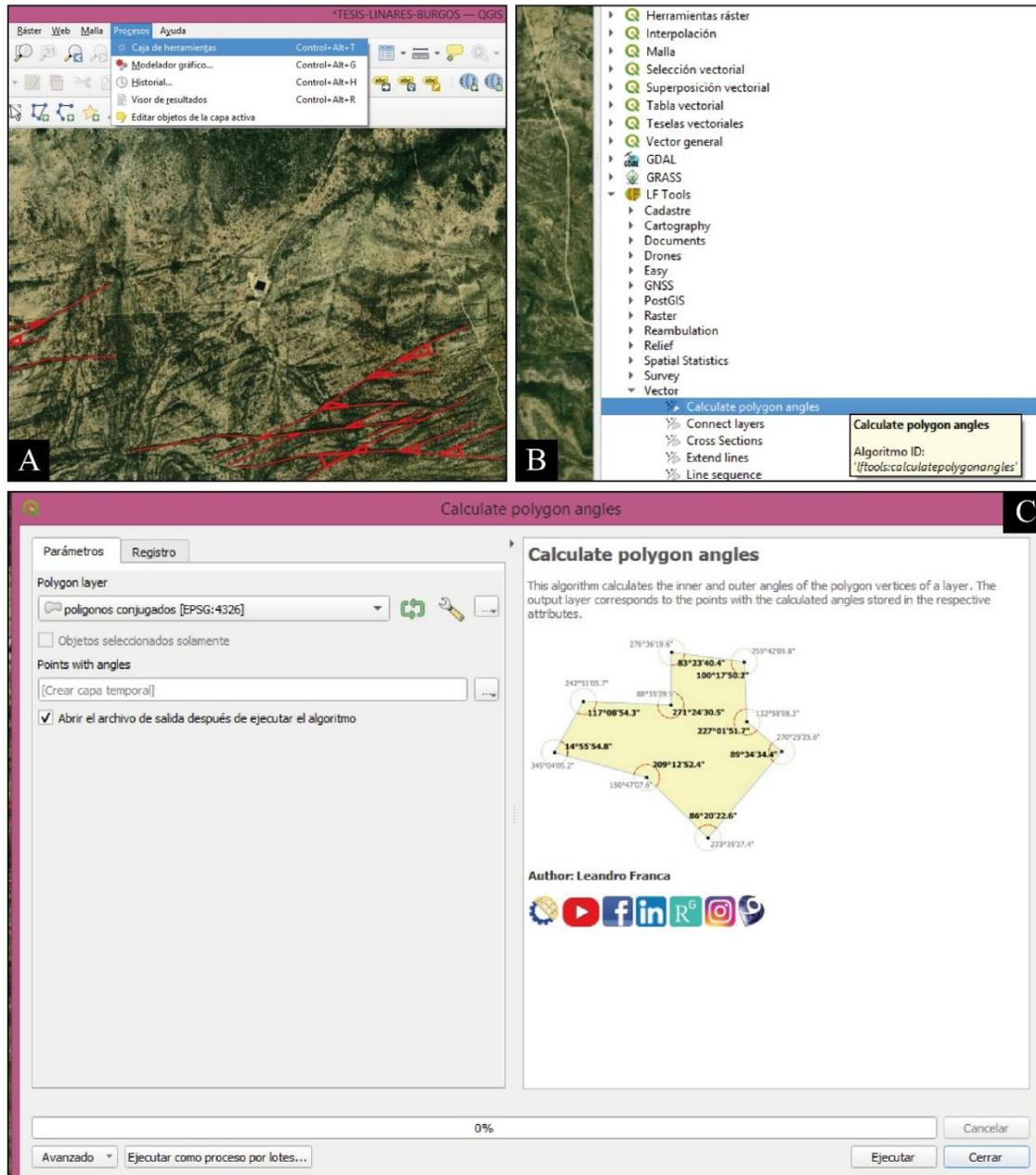


Figura 1.16. Secuencia para medir el ángulo entre ambos diques. (A) Abrir la pestaña de Procesos>Caja de herramientas. (B) Caja de herramientas>LFTools>Calculate polygon angles. (C) Ventana emergente para proceder a insertar la capa vectorial donde se crearon los polígonos triangulares. Posteriormente se selecciona la opción Ejecutar.

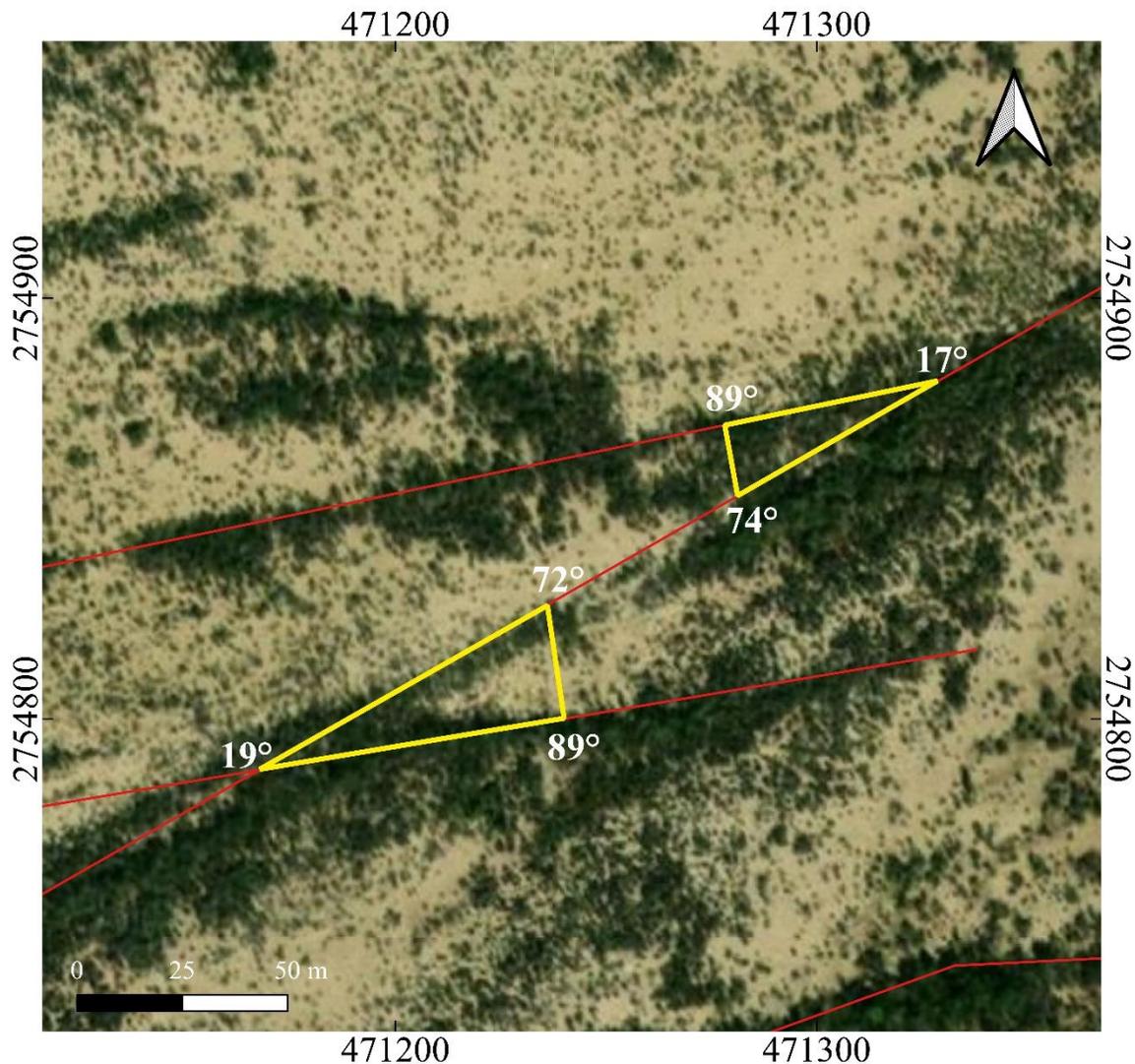


Figura 1.17. Cálculo de ángulos internos de los triángulos. El ángulo del vértice que coincide con el punto donde se cruzan los diques, corresponde al ángulo entre estos dos diques. Las líneas rojas corresponden a los diques.

1.9.2.3 Análisis estructural

Con el fin de complementar el análisis estructural se tomaron en cuenta los datos de rumbo generados en el análisis geoespacial del EDL para realizar un análisis de tensor de esfuerzos. Así mismo, el buzamiento de los diques fue generalizado a 90° , debido a cómo interactúan con los estratos de la Fm. San Felipe (roca encajonante) y las observaciones del perfil de tomografía de resistividad eléctrica.

1.9.2.3.1 *Tensor de esfuerzos*

Las mesoestructuras se consideran indicadores precisos del paleoesfuerzo y la orientación de la deformación (Delvaux *et al.*, 1995, 1997). Estos autores mencionan que los tensores se pueden reconstruir utilizando estructuras de tensión y compresión. Por ejemplo, las vetas y los diques se consideran fracturas de tensión y se desarrollan perpendicularmente al eje de tensiones de menor compresión (σ_3 ; Khatib *et al.*, 2010).

Si las fracturas de extensión y cizalla se analizan estadísticamente mediante la aplicación de métodos de inversión, pueden proporcionar información sobre el campo o campos de extensiones a los que han estado asociados (Caputo, 1991).

1.9.2.3.2 *Método de inversión de esfuerzos*

Las inversiones que realiza el software *WinTensor* (Delvaux, 2006), utilizado en este trabajo, es el método de optimización cuatridimensional numérico rotacional de Delvaux y Sperner (2003).

En la técnica de optimización rotacional de los autores anteriormente mencionados, durante cada ejecución, uno de los ejes de tensión principales (tensor de entrada) se fija y cualquiera de los otros dos ejes se gira alrededor del fijo con varios ángulos hasta obtener el tensor más estable. La relación de tensión se optimiza a través de un rango de valores hasta que se alcanza la relación más estable y los datos que quedan incompatibles se eliminan del conjunto de datos característicos del tensor optimizado final (Al-jumaily y Al-khatoni, 2013).

Los datos se invierten para obtener los cuatro parámetros tensores de paleo esfuerzos que son: el eje de esfuerzo principal σ_1 (compresión máxima), σ_2 (compresión intermedia), σ_3 (compresión mínima) y la diferencia de la relación del esfuerzo principal $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ (Khatib *et al.*, 2010). Este último define la figura del elipsoide de esfuerzo (Delvaux *et al.*, 1997).

Como se mencionó anteriormente, el software *Wintensor* utiliza la inversión de rotación progresiva, calculando distintos valores de R hasta estabilizarlo (Delvaux *et al.*, 1995). De acuerdo con Delvaux *et al.* (1997), el régimen de extensión también varía en función de la relación de esfuerzo R : extensión radial (σ_1 vertical, $0 < R < 0.25$), extensión pura (σ_1 vertical, $0.25 < R < 0.75$), trans-tension (σ_1 vertical, $0.75 < R < 1$ o σ_2 vertical, $1 >$

$R > 0.75$), lateral pura (σ_2 vertical, $0.75 > R > 0.25$), transpresión (σ_2 vertical, $0.25 > R > 0$ o σ_3 vertical, $0 > R > 0.25$), compresión pura (σ_3 vertical, $0.25 < R < 0.75$), y compresión radial (σ_3 vertical, $0.75 < R < 1$).

En la **Figura 1.18** modificada de [Delvaux et al. \(1997\)](#), los símbolos de esfuerzos con ejes de tensiones horizontales (S_{Hmax} y S_{Hmin}), son en función de la relación de tensiones R . La longitud y color de las flechas simbolizan la magnitud de la tensión desviatoria horizontal, relativa a la tensión isotrópica (σ_1). Las flechas blancas hacia afuera indican la tensión desviatoria extensiva ($<\sigma_i$). Las flechas negras hacia adentro indican la tensión desviatoria de compresión ($>\sigma_i$). La tensión vertical (σ_v) está simbolizada por un círculo sólido para regiones extensionales ($\sigma_1 = \sigma_v$), un punto para regímenes de rumbo-deslizamiento ($\sigma_2 = \sigma_v$) o un círculo abierto para regímenes de compresión ($\sigma_3 = \sigma_v$).

El tipo de régimen de esfuerzo se calcula numéricamente utilizando el índice R' , que ronda desde 0.0 hasta 3.0 ([Delvaux et al., 1997](#)), definiéndose de la siguiente manera: $R'=R$, cuando σ_1 es vertical (régimen de esfuerzo extensivo); $R'= 2 - R$ cuando σ_2 es vertical (régimen de esfuerzo de cizalla); $R'= 2 + R$ cuando σ_3 es vertical (régimen de esfuerzo compresional; **Figura 1.18**).

Tensor de esfuerzos	Extensión				Deslizamiento lateral				Compresión				
Símbolos de esfuerzo													
R	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Régimen de esfuerzos	Extensivo radial	Extensivo puro		Trans-tensivo	Deslizamiento lateral puro		Trans-presivo	Compresivo puro		Compresivo radial			
R'	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
Determinación de R'	R' = R				R' = 2 - R				R' = 2 + R				

Figura 1.18. Elipsoides con los ejes principales de esfuerzos, así como el índice de régimen de esfuerzo (R') y la relación de esfuerzos (R). Revisar el texto que refiere a la figura para la descripción de la simbología. Redibujada de [Delvaux et al. \(1997\)](#).

1.9.3 Análisis geofísico

Para complementar el análisis estructural de los diques y conocer sus propiedades petrofísicas, se utilizó la técnica Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). A continuación, se exponen los fundamentos de esta técnica y proceso.

1.9.3.1 Tomografía de Resistividad eléctrica

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) fue descrita por Lytle y Dines (1980) como una unión del sondeo eléctrico tradicional (Schlumberger) y los métodos de inversión de datos de la tomografía (Andrade, 2011). La teoría y la práctica de la TRE ocurrió a finales de los años 1980 y 1990, respectivamente (Daily *et al.*, 2004).

Las imágenes de resistividad 2D son una combinación de perfilado y sondeo eléctrico (Dahlin, 1996; Keller y Frischknecht, 1966; Griffiths y Turnbull, 1985). La TRE proporciona una sección de pseudopropundidad de resistividad verdadera del subsuelo (Andrade, 2011).

La resistividad eléctrica (resistencia eléctrica específica) es una medida de la fuerza con la que un material se opone al flujo de corriente eléctrica (Andrade, 2011). De acuerdo con Dentith y Mudge (2014), la resistividad (ρ) de un material se obtiene aplicando el factor de corrección geométrico (k_{geom}) a la resistencia medida (3):

$$\rho = Rk_{geom} \quad (3)$$

La unidad de resistividad eléctrica es ohm-metro (Ω m) y la unidad de la resistencia eléctrica es el ohm (Ω). Dentith y Mudge (2014) mencionan que en términos de parámetros eléctricos equivalentes, la corriente (I) es proporcional a la diferencia potencial (V), aplicada a la resistencia (R) e inversamente proporcional a la resistencia dada por (4):

$$Corriente = \frac{Voltaje}{Resistencia} \text{ o } I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

La relación lineal entre la corriente y el voltaje se conoce como la Ley de Ohm. Esta ley cuantifica la relación intrínseca entre el diferencial potencial, corriente y resistividad (Dentith y Mudge, 2014). Suele ser representada como:

$$Voltage = Corriente \times resistividad \text{ o } V = IR \quad (5)$$

Expresado en términos de resistividad y geometría del cuerpo (6):

$$V = I \frac{\rho}{k_{geom}} \quad (6)$$

De la Ley de Ohm se desprende que la diferencia de potencial entre las partes de un cuerpo será menor si tiene baja resistividad (Dentith y Mudge, 2014).

1.9.3.2 Resistividad eléctrica en el subsuelo

De acuerdo con Andrade (2011) los sondeos de resistividad eléctrica mapean la conductividad y resistividad en el subsuelo. Estas mediciones de resistividad se llevan a cabo inyectando corriente a través de electrodos de corriente y midiendo la diferencia de voltaje resultante a través de electrodos de potencial.

Este mismo autor menciona que el valor de la resistividad de campo calculado no es la resistividad verdadera del subsuelo, sino un valor “aparente”, refiriéndose a la resistividad en un medio heterogéneo. Por lo tanto, se obtiene un valor de resistencia variable para diferentes posiciones y espaciado de electrodos (Andrade, 2011).

Así mismo Dentith y Mudge (2014), reportan que cualquier falta de homogeneidad de resistividad en el subsuelo distorsiona el campo eléctrico y hace que la diferencia de potencial medida difiera de la debida a un subsuelo homogéneo. Los autores mencionan que esta es la *resistividad aparente* (ρ_a) del subsuelo, siempre que las mediciones se realicen en un subsuelo eléctricamente homogéneo.

En esta tesis la resistividad real del subsuelo se determinó mediante el proceso de inversión que se realiza con el software RES2DINVx64, que será explicado a continuación.

Los valores de resistividad obtenidos del proceso de inversión posteriormente se comparan con valores de resistividad para los mismos materiales ya sea obtenidos en las vecindades del área de estudio o descriptor en la literatura para confirmar que sean valores adecuados con el tiempo de material geológico explorado, para realizar una correcta interpretación del modelo geológico-geofísico.

1.9.3.3 Software RES2INV

RES2DINVx64 es un *software* que determina automáticamente un modelo de resistividad bidimensional del subsuelo a partir de datos en campo o previamente adquiridos en otros estudios (Dahlin, 1996).

El modelo 2D utilizado por el programa de inversión consta de bloques rectangulares generados automáticamente, la distribución y el tamaño de los bloques se crea utilizando la ubicación de los puntos de datos como guía aproximada (Loke, 2017).

Loke (2017) reporta que la rutina de inversión utilizada por RES2DINVx64 se basa en el método de mínimos cuadrados restringido por el suavizado (Groot-Hedin y Constable 1990, Sasaki 1992, Loke *et al.*, 2003).

Los mínimos cuadrados restringidos por suavizados se basan en la siguiente ecuación (7):

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (7)$$

Donde:

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_z C_z^T C_z ,$$

C_x = horizontal roughness filters, C_z = vertical roughness filter

J= Jacobian matrix of partial derivatives, J^T = transpose of J

Λ = damping factor, q = model change vector, g = data misfit vector

Este método de optimización reduce la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos, lo anterior ocurre ajustando la resistividad de los bloques modelo sujetos a las restricciones de suavizado utilizadas (Loke, 2017).

1.9.3.4 Equipo

Para realizar la línea de tomografía de resistividad eléctrica, el equipo cuenta con 48 electrodos, barras metálicas que cuya función es inyectar y conducir la electricidad al subsuelo (Figura 1.19a). Así mismo se requirió de conexiones y conectores.

Se utilizó el resistivímetro Ares (*GF Instruments*) para ejecutar las medidas, verificar la conexión entre electrodos, así como para almacenar digitalmente los datos de campo (Figura

1.19b). Como fuente de energía del resistivímetro y pulso eléctrico del sistema se requirió de una batería de automóvil.

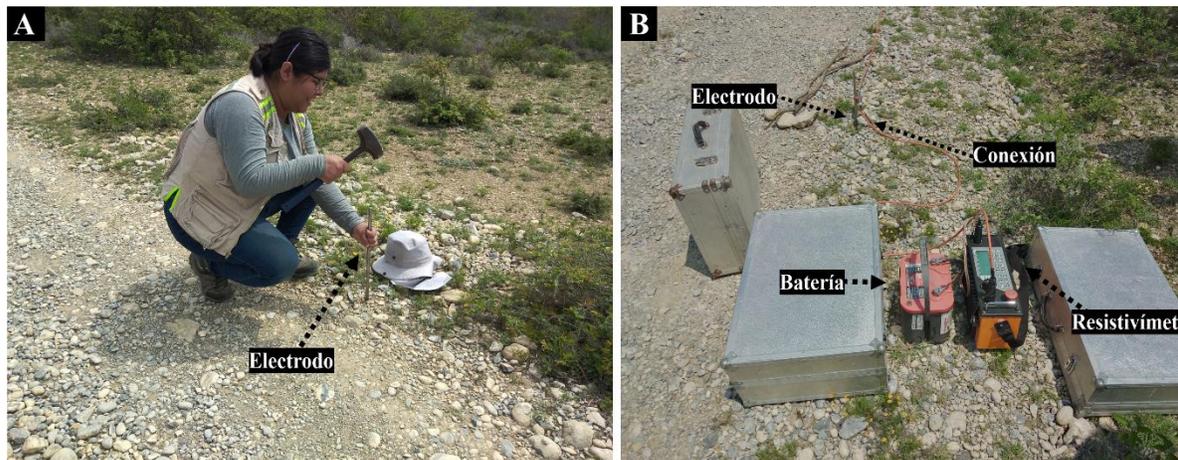


Figura 1.19. Análisis geofísico (A) Tendido de cableado y electrodos cada 5 metros. (B) Instrumentos del sistema TRE: electrodos, conexiones, resistivímetro Ares y una batería.

1.9.3.5 Conexión del dispositivo y adquisición de los datos

- I. Se seleccionó un dique en la parte norte de la PCP para colocar un tendido de electrodos.
- II. Se coloraron los electrodos en superficie de forma equiespaciada (cada 5 metros), asegurando mantener una línea recta y perpendicular al rumbo del dique.
- III. Se definió el inicio y final del tendido cuya longitud final fue de 240 m. Las coordenadas UTM del punto de inicio son 14R 455999 E 2757875 N y las coordenadas del punto final son 14R 456008 E 2758162 N.
- IV. Los electrodos se clavaron a lo largo del tendido de los cables, esto asegurando un buen contacto electrodo-suelo. Una vez colocados, se conectaron al cable por medio de las conexiones.
- V. Se configuraron las variables del dispositivo: Algunas de estas variables son el número de electrodos utilizados, la distancia entre los electrodos, el dispositivo de medida, además del número de medidas a realizar.
- VI. Se verifica que todas las conexiones funcionen adecuadamente.
- VII. Se inicia la secuencia de medidas, proceso que duró aproximadamente 2 horas, aunque esto ocurre en función de medidas a realizar.

VIII. Una vez concluido el proceso de captura de datos, la información digital se guarda en el equipo de cómputo a fin de proceder a su procesamiento e interpretación con el programa RES2DINV.

1.9.3.6 Procesado de los datos de campo

El objetivo del procesamiento es obtener un modelo 2D de resistividades reales. Este modelo se crea a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenidas en campo mediante el proceso de inversión. Para ello se utilizó el programa de inversión RES2DINVx64 3.50, desarrollado por *Geotomo Software*. El esquema básico de funcionamiento se presenta a continuación.

En los modelos de bloques se observan las medidas obtenidas en campo con el fin de verificarlas y eliminar posibles valores erróneos, que son visibles por tener valores diferentes al de la mayoría de los puntos. Estos errores pueden ser simplemente de la conexión entre electrodos y es importante señalar que, al momento de generar el modelo de resistividades, el error se recomienda que no debe exceder al 10 %.

Para los parámetros de cálculo de la inversión se utilizaron los valores predeterminados del programa, así el programa generó un modelo homogéneo de resistividades. Para esto realizó la siguiente secuencia: (1) se calculó el modelo de resistividades aparentes derivado del modelo de resistividades reales (2) se realizó un proceso iterativo para encontrar un modelo de resistividades reales. El proceso finaliza cuando se alcance un RMS inferior al predefinido, en este caso se utilizaron las 5 iteraciones.

Como resultado se obtuvo la pseudosección de resistividades aparentes medida en campo y el modelo de resistividades aparentes calculado en RES2DINVx64. Finalmente, para generar la interpretación geológica se utilizaron valores para rocas graníticas reportados en diversos artículos y libros (Telford *et al.*, 1976; Palacky, 1987; Rolland, 2011; Ravindran, 2012; Khalil *et al.*, 2013; Loke, 2022). Así mismo, se utilizó el programa Surfer para las figuras de los modelos de resistividad aparente y calculada.

1.9.4 Análisis petrográfico

Las secciones delgadas se elaboraron en el laboratorio de preparación de la Facultad de Ciencias de la Tierra, de acuerdo con su procedimiento estándar. El primer paso para la

elaboración de la lámina delgada consiste en cortar un prisma de 3.5 x 2 x 2.5 cm con un disco fabricado con incrustaciones de diamante.

Posteriormente se pule la superficie del prisma con un disco metálico sobre una placa de vidrio, para facilitar el proceso se le agrega agua y polvo abrasivo de silicio de 200 μm . El proceso se repite con polvos más finos de 400 a 800 μm hasta obtener una superficie libre de asperezas. Finalmente, una vez seca la mezcla se corta el cubo dejando ~ 1 mm de roca adherido al vidrio, para repetir el procedimiento hasta que el espesor de la roca reduzca hasta ~ 30 μm .

El análisis petrográfico se efectuó en 12 láminas delgadas correspondientes a diferentes localidades del EDL. Para seleccionar las muestras del análisis petrográfico, las rocas se observaron en un corte fresco con lupa y se descartaron las que estaban más intemperizadas. Las muestras seleccionadas son de los diques (Pr7, Pr8, Pr9, Pr10, PD1, AV2, PCD6, PCD7, PCD8 y PCD3) y de la roca encajonante (Fm. San Felipe; PCD4 y SF1). Se utilizó el microscopio Leica modelo DM750P de luz transmitida, posteriormente las microfotografías se capturaron con una cámara Leica DFC295, utilizando el Software *Leica application suite V3 3.0*. En el apartado de geología local se presentan todas las muestras que fueron tomadas, así como los análisis realizados en cada muestra y las coordenadas de cada una.

La identificación de minerales se realizó reconociendo las características ópticas propias de cada cristal y comparándolos con ejemplares reportados en el atlas de rocas ígneas (Heinrich, 1956, 1965; McKenzie *et al.*, 1982) y sedimentarias (Adams *et al.*, 1984; Pethijohn *et al.*, 1987), así como del sitio web de Alessandro Da Mommio (<http://www.alexstrekeisen.it>).

Las abreviaturas para nombrar los minerales pertenecientes a las muestras corresponden a las propuestas por Whitney y Bernard (2010).

1.9.5 Análisis geoquímico

La selección de muestras para su caracterización geoquímica se realizó durante el análisis petrográfico, donde se eligieron las muestras Pr2, AV2, PCD6 y Pr9. Anteriormente, para

este mismo trabajo de investigación (Antonio-Durán, 2022), se obtuvieron datos geoquímicos de las muestras de los diques Pr5, Pr6, PC4 y PC12.

Los resultados anteriormente generados, en conjunto con una recopilación de datos de Elizondo-Pacheco (2017, 2019), que corresponden a diques sieníticos de la Sierra de San Carlos-Cruillas y de Ortega-Torres (2021) correspondientes a tobas de la Formación San Felipe, fueron utilizados para construir los diagramas que se presentan en el apartado de geoquímica para su posible correlación y/o comparación.

El análisis de elementos mayores y traza de las muestras del EDL, se realizó con el método de fusión metaborato-tetraborato de litio (Actlabs, 2019), utilizando el paquete *4Litho*. El análisis se efectuó en los laboratorios de Actlabs (<https://actlabs.com>), en Ancaster, Ontario, Canadá.

El procedimiento de disolución por fusión metaborato-tetraborato de litio es una técnica cuya finalidad es disolver las muestras de roca. La solución resultante incluye los óxidos principales, que incluye el SiO₂, minerales refractarios (circón, esfena, monacita, cromita, etc.), REE y otros elementos (Actlabs, 2019, 2021).

Para efectuar el paquete *4Litho* se requieren ~5 gramos de muestra (Actlabs, 2021). De acuerdo con el certificado de análisis expedido por los laboratorios, los elementos mayores fueron analizados por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente, por sus siglas en inglés, ICP-OES. Los elementos traza fueron determinados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, ICP-MS.

Los diagramas que presentan los análisis geoquímicos se realizaron con la caja de herramientas GCDKit versión 6.0 (<http://www.gcdkit.org> ; Janoušek, 2019), cargada en el software RStudio, versión 3.6. Posteriormente, los diagramas fueron organizados y editados en el programa Adobe Illustrator versión 2021. Los valores ajustados al 100% en base anhidra (expresada en % en peso) y la norma CIPW fueron calculados con el programa shiny NORRRM (<https://github.com/TheRFrog/shinyNORRRM/tree/main> ; González-Guzmán *et al.*, 2023).

Para caracterizar las muestras se utilizaron los siguientes diagramas: diagramas de Harker (1909), diagramas de clasificación de Winchester y Floyd (1977) para elementos traza

inmóviles, diagrama de tierras raras (Boynton, 1984), diagrama de multielementos (McDonough y Sun, 1995), diagrama de discriminación tectónica (Pearce *et al.*, 1984) y diagramas de granitoides (Frost y Frost, 2008).

1.9.6 Análisis geocronológico

Las muestras seleccionadas para el proceso de datación U-Pb en circones (LA-ICP-MS) fueron la Pr5, Pr6, PC4, PC12 y SF1, correspondiente a los diques aplíticos y la última (SF1) a una muestra de toba de la Fm. San Felipe.

La separación de circones y el proceso analítico se llevó a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos de Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en Querétaro, México con la metodología de Solari *et al.* (2009).

Las muestras fueron trituradas y cribadas para posteriormente separar los circones mediante técnicas convencionales de susceptibilidad magnética y a base de agua.

La ablación en circones se realizó con una estación de trabajo láser excimer, de Resolución M050, en sitios de análisis (“spots”) de 23 μm de diámetro. El material ablacionado se transportó a través de gas de He al espectrómetro de masas iCapQc de Thermo Scientific®.

El material de calibración fue el circón 91,500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995; ID-TIMS, 1065.4 ± 0.6 Ma) y el circón Plešovice fue utilizado como control secundario (Slama *et al.*, 2008; ID-TIMS, 337.13 ± 0.37 Ma). Estos circones de referencia fueron calculados en relaciones isotópicas mayores a 5% (Solari *et al.*, 2010).

El software Iolite (Paton *et al.*, 2011) fue utilizado para la reducción de datos y calcular el error. El cálculo de edades de análisis individuales y la construcción de los diagramas Wheterill (Wetherill, 1956), *Kernel Density Estimates* (KDE) y graficado de histogramas de edades promedio ponderadas se realizó en la versión en línea del software IsoplotR (Vermeesch, 2018). El diagrama de tierras raras (Boynton, 1984) se construyó en GCDkit versión 6.0 (Janoušek, 2019).

2. GEOLOGÍA REGIONAL

2.1 Introducción

El CLB se ubica fisiográficamente en la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM) y geológicamente entre dos provincias geológicas. Colinda con la culminación norte de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC), que forma parte de la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM), y con el límite sur de la Cuenca de Burgos (CB; [Figura 2.1](#)).

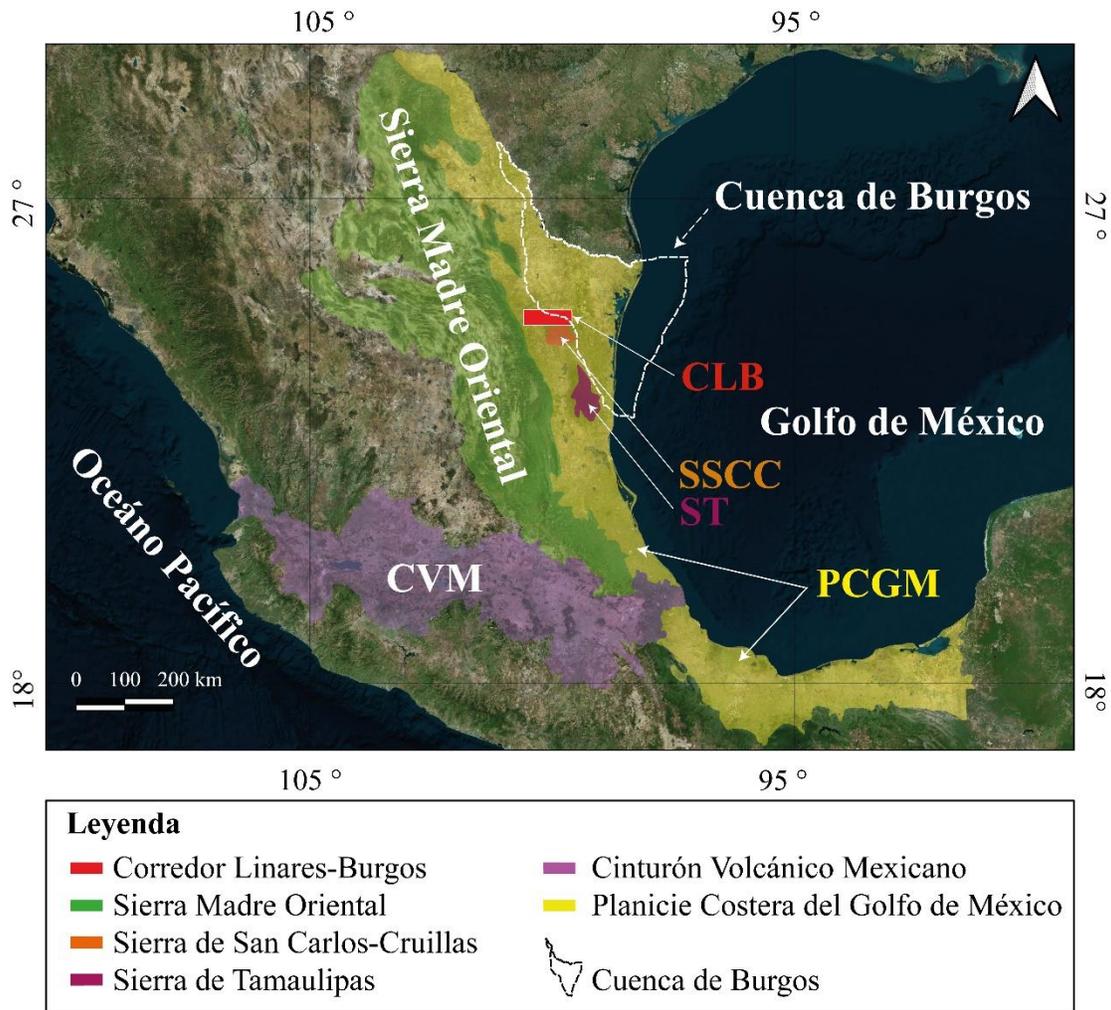


Figura 2.1. Provincias geológicas y fisiográficas aledañas al Corredor Linares-Burgos (CLB). PCGM: Planicie Costera del Golfo de México. SSCC: Sierra de San Carlos-Cruillas. ST: Sierra de Tamaulipas. CVM: Cinturón Volcánico Mexicano. Figura construida con datos vectoriales de [INEGI \(2001\)](#) y [CNH \(2024a\)](#).

2.2 Cuenca de Burgos

La Cuenca de Burgos se caracteriza por tener un prisma sedimentario masivo (con unidades del Mesozoico al Cenozoico), de 8,000 a 10,000 m de espesor, que se desarrolló sobre un basamento metamórfico e ígneo, y que cuenta con diversas etapas estructurales (Ortiz-Ubilla, 2006a y 2006b; Eguiluz de Antuñano, 2011a). La CB se localiza entre los estados de Tamaulipas y Nuevo León, y se extiende hasta costa afuera hacia el Golfo de México, con una superficie total de 73,800 km² (Figura 2.2; CNH, 2024b).

La exploración petrolera de la Cuenca de Burgos comenzó en 1920 y 1930 por empresas extranjeras, y a partir de 1936 por Petróleos Mexicanos (PEMEX; Echánove, 1986a).

La Comisión Nacional de Hidrocarburos (s.f.) reporta que la producción comercial de la cuenca comenzó en 1945 con el descubrimiento del campo Misión. Los campos de producción más importantes en la cuenca son: Reynosa, Brasil, Monterrey, Culebra, Arcabuz, Arcos, Cuitláhuac, Enlace, Fundador, Nejo y General (CNH, s.f.; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

La Cuenca de Burgos tiene dos rocas generadoras principales, la Formación Pimienta (Titoniano) y la Formación Agua Nueva (Cenomaniano-Turoniano). El kerógeno que se encuentra en esta cuenca es de Tipo II y Tipo III (CNH, s.f.; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

2.2.1 Evolución sedimentaria

El origen de la Cuenca de Burgos se asocia a la apertura del Golfo de México durante el Jurásico Medio (Eguiluz de Antuñano, 2011a), así mismo con un proceso de *rifting* en la ruptura de Pangea (Hudec *et al.*, 2013).

De acuerdo con información de pozos de PEMEX (p.e. Linares 1 y Trincheras-1), el basamento se conforma por rocas metamórficas como esquistos y rocas plutónicas que incluyen granitoides, asignadas al Sistema Ouachita, deformada durante el Paleozoico (Echánove, 1986; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

Ortiz-Ubilla (2006) menciona que la litología del basamento de la CB puede agruparse en tres unidades mayores: (1) Unidad Esquistos y/o Gneises (UEG), (2) Unidad Intrusivos Graníticos (UIG) y (3) Unidad Rocas Metamórficas (URM).

[Coombs et al., \(2022\)](#) sugieren que el basamento cristalino al oeste del Golfo de México es resultado de tres eventos magmáticos distintos, reemplazando y retrabajando la corteza continental preexistente de Oaxaquia. Estos eventos son: (1) Un arco continental del Pérmico Temprano (294 Ma) formado por la subducción del Océano Reico debajo del margen norte de Gondwana, antes del amalgamamiento de Pangea. Estos granitoides del Pérmico Temprano se relacionan con los granitoides del Carbonífero-Pérmico Temprano que intruyeron el Complejo Acatlán y al área de Oaxaca. (2) El magmatismo tardío a poscolisional (Pérmico Tardío-Triásico Temprano; 263-243 Ma) que se formó a partir de la orogenia Maratón-Sonora de la zona de colisión de Pangea. Este magmatismo se relaciona con los granitoides del Pérmico Tardío-Triásico Temprano de Oaxaca y al Macizo de Chiapas. (3) Un arco continental de Jurásico Temprano (188-164 Ma), que probablemente es parte del arco de Nazas.

En la CB se ha depositado un prisma sedimentario con rocas del Jurásico, Cretácico y Cenozoico ([Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)). La depositación comenzó con capas continentales del Grupo Huizachal (Formaciones Alamar, La Boca y La Joya; Triásico-Jurásico Medio), que está compuesto principalmente por rocas siliciclásticas, que fueron acumulados en bajos estructurales, asociadas a fosas y pilares en una cuenca de tipo rift ([Echánove, 1986a, 1986b](#); [Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)).

La subsidencia cortical (Calloviano-Oxfordiano) permitió la invasión de un mar somero que propició acumulaciones de sal, anhidrita y carbonatos de alta energía, dejando como testigo las Formaciones Minas Viejas y Olvido ([Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)). Durante Calloviano al Oxfordiano, los principales controladores sedimentarios de la CB fueron la plataforma Burro-Picachos y la Isla de Tamaulipas ([Pérez-Cruz, 1992](#)).

El durante el Kimeridgiano y Titoniano se depositaron pelitas ricas en materia orgánica (Formaciones La Casita y Pimienta) consideradas como las fuentes más importantes generadoras de hidrocarburos en la CB. La subsidencia continuó (Cretácico Temprano-Cenomaniano) depositándose carbonatos micríticos de ambiente profundo, cuyos testigos son la Formación Tamaulipas (Inferior y Superior) y la Formación Agua Nueva, así como pelitas del Aptiano (Formación Otates; [Ortiz-Ubilla, 2006](#); [Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)).

Posteriormente, durante el Turoniano-Maasrichtiano, existió un cambio en la sedimentación de la CB. El depósito de carbonatos fue gradualmente sustituido por siliciclastos de volumen creciente (Formación San Felipe, Formación Méndez y Grupo Taylor; [Ortiz-Ubilla, 2006](#); [Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)).

Durante el Cenozoico, la CB recibió siliciclastos (areniscas y pelitas), con facies someras al occidente y facies profundas al oriente, producto de trasgresiones y regresiones cíclicas, hasta la retirada del mar hacia el oriente, dejando áreas continentales expuestas al occidente ([Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)). De acuerdo con [Ortiz-Ubilla \(2006\)](#) este conjunto de rocas arcillo-arenosas a areno-arcillosas y con algunos paquetes areno-conglomeráticos, se conforma por las Formaciones: Midway, Wilcox, Reclaw, Queen City, Weches, Cook Mountain, Yegua, Jackson, Frío, Norma, Anáhuac, Catahoula, Oakville y Lagarto, con un rango de edad desde el Paleoceno al Reciente.

En la Cuenca de Burgos se han descrito productos volcánicos (Eoceno-Oligoceno) que podrían relacionarse con el magmatismo de la SSCC ([López-Ramos, 1979](#); [Salvador, 1991](#); [Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)). Lo anterior sustentándose con la edad de magmatismo de la SSCC de 43.8 ± 1.30 Ma ([Viera-Décida, 2006](#)) y de la evidencia del vulcanismo en la Formación Yegua cuyo límite inferior es de 39.5 Ma ([Eguiluz de Antuñano, 2011b](#)).

La Formación Jackson contiene horizontes de ceniza intercaladas con areniscas y lutitas arenosas. Así mismo, la Formación Vicksburg está conformada por capas de ceniza volcánica alternada con arcillas y arenas fosilíferas. Estas Formaciones tienen un intervalo de depósito de 37 a 32 Ma ([López-Ramos, 1979](#); [Rosen *et al.*, 1994](#)). La Formación Frío tiene granulometría gruesa con tobas y clastos volcánicos de composición alcalina ([Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)).

2.2.2 Evolución tectónica

Los elementos tectónicos que rodean la Cuenca de Burgos son el Arco Salado, el Lineamiento del Río Grande y el Cinturón Plegado Perdido ([Figura 2.2](#); [Eguiluz de Antuñano, 2011a](#)).

El basamento de la CB se encuentra inclinado al oriente y al noreste, presenta fallas escalonadas en bloques altos y bajos, los datos indican que tiene una etapa inicial de acortamiento con metamorfismo-magmatismo y un periodo extensional de rifting. El

basamento está relacionado con el cinturón Ouachita-Marathon y con la orogenia Apalachiana (Pérez, 1992; Ortiz-Ubilla, 2006; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

Desde el Jurásico Superior al Eoceno la CB se desarrolló bajo un régimen de subsidencia tectónica tipo margen pasivo. Se ha reportado que la cubierta sedimentaria del Paleógeno se encuentra deslizada por desprendimiento (*detachment*) sobre la secuencia del Cretácico, con fallas extensionales orientadas al oriente (Pérez, 1992; Ortiz-Ubilla, 2006; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

En rocas del Paleógeno se encuentran superficies de mayor erosión contemporáneas con los eventos de la deformación orogénica Laramide (48.5 y 39.5 Ma). La deformación formó amplios anticlinales y sinclinales ligeramente orientados N-S. La Formación Vicksburg (Oligoceno Inferior) presenta fallas extensionales, que se profundizan y afectan estratos del Mesozoico y al complejo basal. Encima de esta Formación se distingue una superficie de erosión mayor, las fallas y la discordancia coincide con la edad de emplazamiento de la PAOM (30 Ma; Ortiz-Ubilla, 2006; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

Las Formaciones Frío (Oligoceno Superior), Anáhuac, Oakville, Catahoula y Lagarto (Neógeno) representan el levantamiento continental y la retirada del mar hacia el Golfo de México (Eguiluz de Antuñano, 2011a).

Eguiluz de Antuñano (2011a), sugiere que el emplazamiento de plutones que conforman la Sierra de San Carlos-Cruillas provocó la exhumación de la secuencia sedimentaria y una regresión marina.

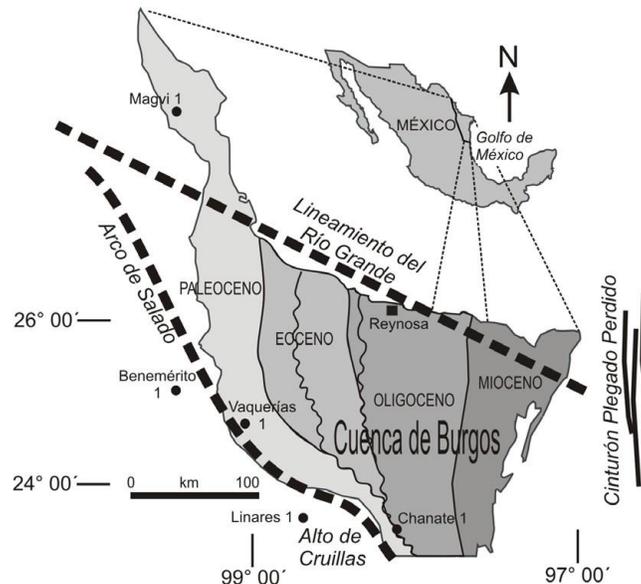


Figura 2.2. Localización de la Cuenca de Burgos y sus franjas de afloramientos sedimentarios. Tomado de [Eguiluz de Antuñano \(2011a\)](#).

2.2.3 Marco estructural

En la Cuenca de Burgos predomina un sistema de fallas normales, con orientación NW-SE, buzando hacia el oriente, estas las fallas se vuelven más jóvenes con desplazamientos de escasos centenares de metros ([CNH, s.f.](#)).

La [CNH \(s.f.\)](#) ha reportado en la cuenca estructuras *roll-over* con nivel de despegue en sedimentos arcillosos del Paleoceno, precisamente en la parte occidental y en niveles más jóvenes (Oligoceno), hacia el oriente.

Conforme a lo expuesto por el [CHN \(s.f.; Figura 2.3\)](#) se han identificado tres estilos principales de fallas normales: (1) En la parte occidental (Paleoceno), predominan las fallas normales que ocurrieron durante la deposición. (2) En las zonas correspondientes al Eoceno y Oligoceno, se observan fallas sinsedimentarias con ángulos medios a bajos. (3) En la región oriental, que se extiende hasta la plataforma continental, se encuentran fallas de crecimiento con planos casi verticales, que afectan la columna del Mioceno y Plioceno.

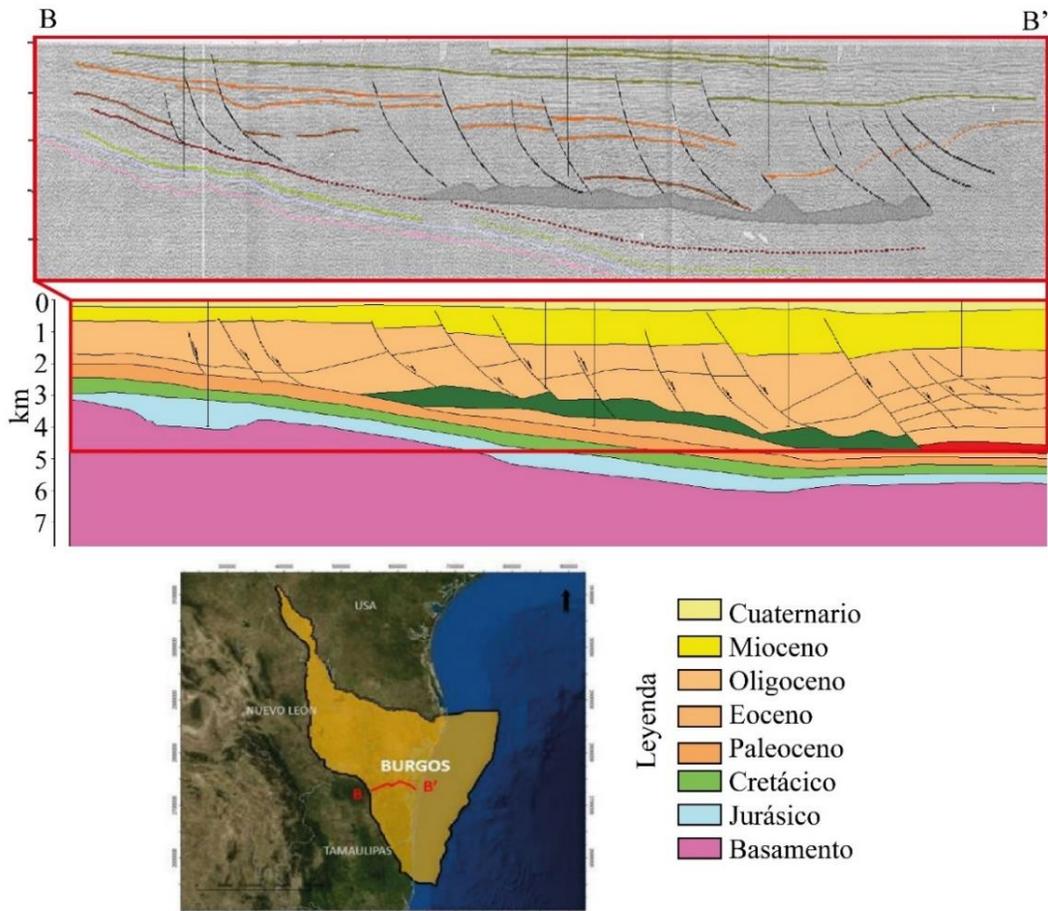


Figura 2.3. Sección de la cuenca de Burgos (B-B'), SW-NE. Tomada del Atlas de Cuenca Sabinas-Burgos de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH, s.f.).

2.3 Provincia Alcalina Oriental Mexicana

La Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM) se compone de complejos magmáticos Cenozoicos con una alineación preferencial NNW-SSE. Se localiza en el noreste de México, extendiéndose principalmente en Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. La PAOM inicia probablemente al sureste de los Estados Unidos de América (EUA) y culmina en la Planicie de Tampico, México, alargándose por más de 2,000 km. La dirección de la PAOM es paralela a la costa del Golfo de México y la cadena se sitúa sobre la provincia fisiográfica PCGM (Ramírez-Fernández *et al.*, 2000; Elizondo-Pacheco, 2017; Elizondo-Pacheco, 2019; Leal-Cuéllar, 2020; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

La característica que da nombre a esta provincia es la composición geoquímica principalmente alcalina de las rocas que la componen, cuya edad oscila desde el Eoceno al Pleistoceno (Viera-Décida *et al.*, 2009).

Recientemente se han realizado estudios exhaustivos de la gran variedad litológica: (1) rocas alcalinas, que son las más abundantes; (2) rocas subalcalinas, con composiciones de ultrabásicas hasta ácidas; (3) rocas peralcalinas en todos los complejos de la PAOM, excepto en el Cinturón Candela-Monclova ([Elizondo-Pacheco et al., 2022](#)).

Los complejos magmáticos que componen la PAOM, de acuerdo con [Elizondo-Pacheco et al. \(2022; Figura 2.4\)](#) son: Sierra de Maderas del Carmen (SMC), Cinturón Candela Monclova (CCM), Sierra de Picachos (SP), Sierra de San Carlos–Cruillas (SSCC), Sierra de Tamaulipas (ST) y Planicie de Tampico (PT).

Anteriormente ([Ramírez-Fernández et al., 2000; Viera-Décida et al., 2009](#)) adjudicaban a la PAOM el Intrusivo La Cueva Macizo de Palma Sola, San Andrés de los Tuxtlas y Sierra de Otontepec (Tantima).

En los EEUU se han reportado otros complejos de la PAOM: Sierra Blanca ([Ramírez-Fernández et al., 2000; Viera Décida et al., 2009](#)) en Nuevo México, y el complejo Trans-Pecos ([James y Henry, 1991](#)) en Texas.



Figura 2.4. Cuerpos magmáticos pertenecientes a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM). Provincia magmática de Trans-Pecos (PMTP), Sierra Maderas del Carmen (SMC), Cinturón Candela-Monclova (CCM), Sierra de Picachos (SP), Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC), Sierra de Tamaulipas (ST), Planicie de Tampico (PT), Sierra Madre Oriental (SMO), Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Figura tomada de [Elizondo-Pacheco \(2019\)](#).

Se han propuesto diversos modelos tectónicos para explicar la petrogénesis de la PAOM, que serán expuestos a continuación.

[Demant y Robin \(1975\)](#) infieren el magmatismo de esta provincia como producto de la generación de una cuenca marginal de la Placa Norteamericana.

[Clark et al. \(1982\)](#) propuso que el magmatismo de la PAOM se debe a la migración del arco magmático, que originalmente estaba ubicado en la paleotrinchera del Pacífico, hacia el oriente, un proceso que tuvo lugar durante el Eoceno, hace aproximadamente 30 millones de años. Esta migración, junto con un proceso de roll-back ocurrido alrededor de la misma época, provocó la formación de magmatismo de composición subalcalina (calcoalcalina) y alcalina rica en potasio en el noreste de México y el oeste de Texas, Estados Unidos. [Viera-](#)

Décida *et al.* (2009) y Poliquin (2009) propusieron que el magmatismo de la PAOM se relaciona con la subducción de la Placa Farallón bajo Norteamérica, generando rocas de alto LILE/HFSE, iniciando durante el Eoceno, emplazando los plutones del Cinturón Candela-Monclova, la SSCC y la Sierra de Tamaulipas.

Posteriormente, durante el Oligoceno (~30 Ma), el arco magmático inició un retroceso, que propició el ascenso del manto astenosférico generando rocas con características geoquímicas de intraplaca (bajo LILE/HSFE; Viera-Décida *et al.*, 2009).

El retroceso del arco hacia su posición original se atribuye a la colisión de la dorsal oceánica Pacífico-farallón con el borde continental del suroeste de Estados Unidos, hace ~30 Ma (Severinghause-Atwater, 1990; Atwater y Stock, 1998, consultado en Leal-Cuellar, 2020).

Ortega-Gutiérrez *et al.* (2014) sugieren que el magmatismo de la PAOM se debe a que la subducción que ocurría en la placa Farallón durante Eoceno-Oligoceno Temprano cambió a una dispersión tras-arco en el Oligoceno-Mioceno Temprano.

Elizondo-Pacheco *et al.* (2022) sugieren que el paso y el hundimiento de la Conjugada de Hess bajo el noreste de México durante el Cenozoico indujeron la eclogitización de la placa, provocando su desgarramiento y su posterior desprendimiento, como consecuencia se produjo un levantamiento astenosférico a lo largo de la PAOM, alterando el estado térmico de esta región del manto.

2.3.1 Sierra de San Carlos-Cruillas

La Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) se localiza en la parte centro occidental del estado de Tamaulipas, NE de México, abarcando los municipios de San Carlos, Cruillas, Burgos y Villagrán extendiéndose por ~3000 km². La SSCC se localiza a ~50 km al sureste del municipio de Linares.

Márquez-Domínguez (1970) definió la SSCC como un anticlinal suave de rocas sedimentarias marinas depositadas durante el Cretácico inferior al Superior, posteriormente, esta secuencia sedimentaria fue intrusionada en el Cenozoico por plutones, diques y sills, y en de manera más limitada, lavas basálticas.

De la Fuente-García (1976) sugirió que la SSCC se trata de un stock, el cual reemplazó el espacio de lo que originalmente era un anticlinal con orientación N-S, que después fue arqueado hacia el oriente.

En la SSCC se encuentran los cuerpos plutónicos de la Sierra de San Carlos (SSC) o Sierra Chiquita y la Bufa del Diente, Sierra Baja, estructuras hipabisales en la periferia de la SSC, derrames basálticos de la Mesa de Morteros y cuellos volcánicos del Cerro Ibarría. La variedad litológica de estos cuerpos la componen: basaltos alcalinos, fonotefritas, gabros, dioritas, monzodioritas, monzonitas, sienitas cuarcíferas o feldespatoides, lamprófidos alcalinas y derrames basálticos que contienen xenolitos del manto (Finlay, 1904; Watson, 1937; Bloomfield y Cepeda, 1973; Ramírez-Fernández *et al.*, 2000; Rodríguez-Saavedra, 2003; Treviño-Cázares *et al.*, 2005; Viera-Décida, 2006; Mendoza-Vargas, 2010; Elizondo-Pacheco, 2017; Leal-Cuellar 2018; Elizondo Pacheco, 2019; Leal-Cuellar, 2020; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

Elizondo-Pacheco *et al.* (2022) sugieren que los magmas de la SSCC evolucionaron a través de cristalización magmática con contribuciones limitadas de la corteza, además pudieron llegar a tener sistemas abiertos (como recargas), que crea un sistema dinámico y complejo.

Estos autores (Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022) sugieren que las rocas más antiguas de la SSCC (Eoceno) se relacionan con un evento post-orogénico, con una firma de tipo arco. Estas rocas tipo arco tienen decrementos en HSFE (Nb, Ta and Ti) con altas relaciones de LILE/FSE.

Por el contrario, las rocas más jóvenes de la SSCC tienen una firma de intraplaca, relacionadas con un ambiente extensional, ausencia de decrementos de HFSE y tienen un patrón en forma de joroba en el manto primordial del patrón de multielementos (Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

Leal-Cuéllar (2020) propuso una división para la Sierra Chiquita que brinda nombre a las localidades de este complejo y brinda una mejor descripción de la composición de las rocas: (1) *Gabros Rincón Murillo*, (2) *Monzodioritas San José*, (3) *Gabros San José*, (4) *Sienitas Nefelínicas El Rosario* y (5) *Sienitas Alcalinas El Bagre* (Figura 2.5).

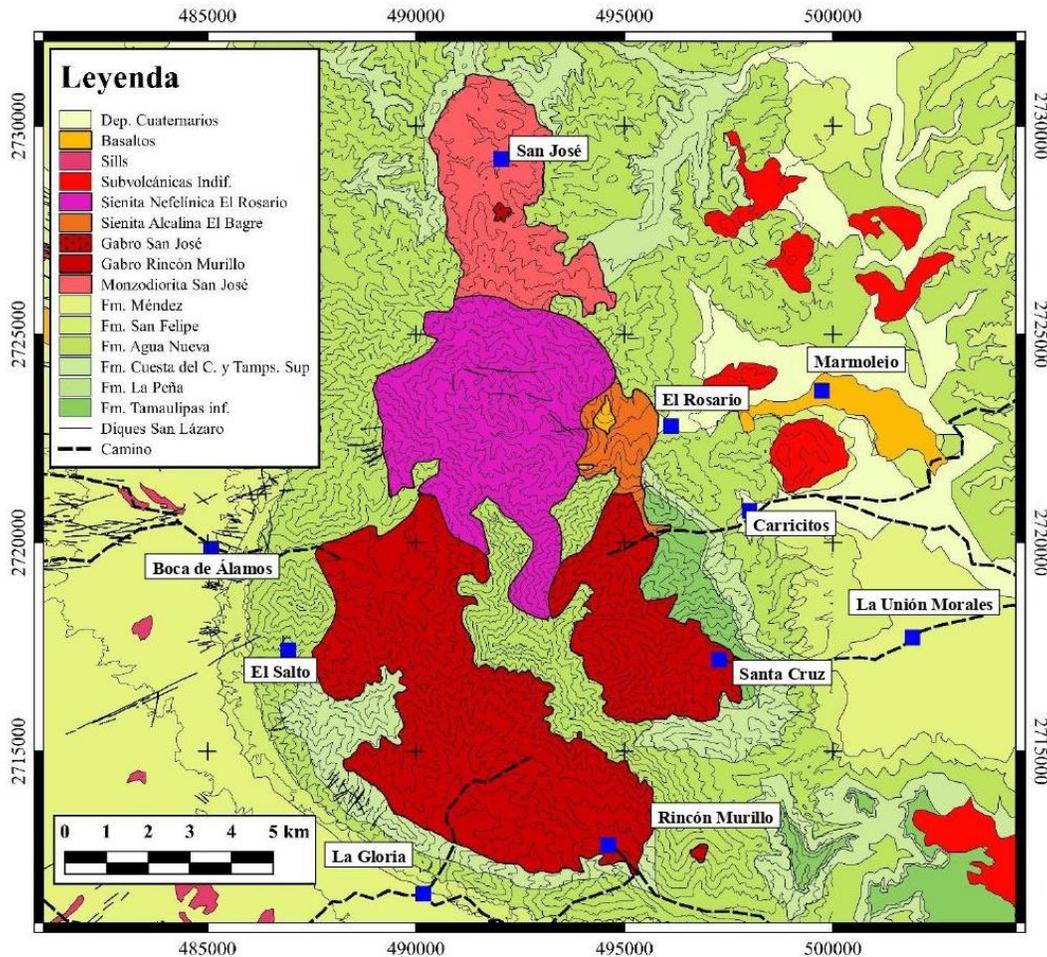


Figura 2.5. Mapa geológico de la parte central de la Sierra Chiquita. Tomado de [Leal-Cuéllar \(2020\)](#). Se incluye la división propuesta por [Nick \(1988\)](#).

[Leal-Cuéllar \(2024\)](#) propone que el magmatismo de la SSCC inició como consecuencia, rompimiento y hundimiento de la Meseta Oceánica de Hess (MOH) bajo el NE de México (Paleoceno-Eoceno). Este suceso derivó en la fusión parcial del manto previamente metasomatizado por subducción. Posteriormente (Eoceno Tardío-Oligoceno), el rompimiento y hundimiento de la MOH provocó el ascenso de material astenosférico, generando peridotitas de granate con anfíbol.

El autor señala que la fusión parcial de las litologías anteriores produjo magmas parentales de gabros del tipo OIB. Además, la cristalización fraccionada y la contaminación

cortical de estos magmas dieron lugar a la formación de sienitas en la SSCC. Durante el Mioceno Medio, el fin de la subducción en el noroeste de México y las primeras etapas de extensión en el Golfo de California provocaron un cambio en el régimen tectónico continental (Leal-Cuéllar, 2024).

Como resultado de lo anterior, la SSCC experimentó una fusión parcial debido al adelgazamiento de la corteza, lo que generó magmas alcalinos parentales que formaron los cuellos volcánicos de basanita/basalto alcalino. Estos cuellos volcánicos parecen estar alineados en el CLB. Finalmente, durante el Pleistoceno, ocurrió la última fase de magmatismo en la SSCC, caracterizada por derrames volcánicos de composición basáltica y fonotefrítica, como consecuencia de un ambiente extensional continental en el norte de México (Leal-Cuéllar, 2024).

2.3.1.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica de la SSCC se compone por rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas del Cretácico Inferior al Cretácico Superior, que posteriormente fue intrusionada por cuerpos ígneos durante el Cenozoico (Bloomfield y Cepeda-Dávila, 1973; Ramírez-Fernández, 1992; Poliquin, 2009; Viera-Décida, 2009; Elizondo-Pacheco, 2017 y 2019; Leal-Cuéllar, 2020; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022).

De la Fuente-García (1976) propone que la secuencia sedimentaria se acumuló durante el Mesozoico, en torno a la antigua Isla de San Carlos, la cual fue parte del Archipiélago de Tamaulipas hasta finales del Jurásico.

En la actualidad la profundidad del basamento se encuentra entre los ~931 m a ~2630 m a lo largo del Arco de Tamaulipas. En Linares, NE del Arco de Tamaulipas, el basamento, compuesto por granodioritas, se encuentra a una profundidad de ~2630 m (Villagómez-Díaz *et al.*, 2019).

Las rocas sedimentarias del Mesozoico que afloran en la SSCC corresponden a las Formaciones: Tamaulipas Inferior, Otates, Tamaulipas Superior, Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y Méndez (Márquez-Domínguez, 1970; Ramírez-Fernández, 1989).

2.3.1.1.1 *Formación Tamaulipas Inferior (Hauteriviano-Aptiano Superior)*

La Formación Tamaulipas Inferior está compuesta por una secuencia de calizas micríticas de color gris, alternadas con lutitas en estratos de espesor grueso (70-100 cm). El espesor total de la formación llega a los 300 metros, aunque se cree que es mayor debido a su contacto con cuerpos intrusivos (De la Fuente-García, 1976; Ramírez-Fernández, 1992).

2.3.1.1.2 *Formación Otates (Aptiano Superior)*

La Formación Otates se encuentra de forma concordante sobre la Formación Tamaulipas Inferior. Esta formación está constituida por calizas arcillosas de color café rojizo y calizas grises, con estratos que tienen un espesor de 10 a 30 cm. El espesor total de la Formación es de <200 m. en la SSCC (De la Fuente-García, 1976; Ramírez-Fernández, 1992).

2.3.1.1.3 *Formación Tamaulipas Superior (Albiano)*

La Formación Tamaulipas Superior se sitúa de manera concordante sobre la Formación Otates. Esta formación está formada por calizas micríticas con bandas y lentes de pedernal intercaladas, y tiene un espesor total de 80 m (Ramírez-Fernández, 1992; Mendoza-Vargas, 2010).

2.3.1.1.4 *Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano)*

La Formación Cuesta del Cura se caracteriza por estratos ondulados de espesor medio a delgado, compuestos principalmente de calizas micríticas. Además, incluye pedernal negro, dispuesto en bandas y lentes de hasta 15 cm de espesor (Ramírez-Fernández, 1992; Mendoza-Vargas, 2010).

Esta unidad también presenta estratos de lutitas intercalados, que se vuelven más arcillosos hacia la parte superior. El espesor total de la unidad es de ~70 m, y su contacto superior es concordante y transicional con la Fm. Agua Nueva (Ramírez-Fernández, 1992; Mendoza-Vargas, 2010).

2.3.1.1.5 *Formación Agua Nueva (Cenomaniano-Turoniano)*

La Formación Agua Nueva está compuesta por calizas arcillosas grises, con estratificación de mediana a gruesa, intercaladas con capas finas de margas y lutitas de color café y gris oscuro. En ocasiones, se observa pedernal. El espesor total de la formación es de ~160 m. Su

contacto superior con la Fm. San Felipe es concordante y transicional (De la Fuente-García, 1976; Ramírez-Fernández, 1992; Miranda-Huerta y Ramírez-Gutiérrez, 2001).

2.3.1.1.6 *Formación San Felipe (Coniaciano- Santoniano Inferior)*

La Fm. San Felipe se compone de calizas arcillosas intercaladas con margas y lutitas de color amarillo debido al intemperismo, presentando también estratos vulcanosedimentarios. Su espesor total es de 180 m (Ramírez-Fernández, 1992).

Además, en la carta geológico-minera San Carlos G14-D61, Miranda-Huerta y Ramírez-Gutiérrez (2001), describen la Fm. San Felipe como una secuencia de calcarenitas con estratos delgados a laminares, intercalados con capas de lutitas que muestran colores que van del gris al blanco debido al intemperismo. El contacto con la Fm. Méndez es concordante y transicional.

2.3.1.1.7 *Formación Méndez (Campaniano-Maastrichtiano)*

La Formación Méndez está formada por lutitas y margas de colores que van del café al verde, con una estratificación poco pronunciada. Su espesor total en el valle de San Carlos es de 400 m (Ramírez-Fernández, 1992).

2.3.1.1.8 *Paleógeno*

La SSCC durante el Cenozoico comenzó a experimentar distintos pulsos de actividad magmática generando cuerpos plutónicos, subvolcánicos y volcánicos (Leal-Cuéllar, 2020).

El primer pulso dejó como evidencia los cuerpos intrusivos sieníticos, monzodioríticos y gabróticos (Nick, 1988; Ramírez-Fernández, 1992; Rodríguez-Saavedra, 2003; Viera-Décida, 2006; Mendoza-Vargas, 2010; Leal-Cuellar, 2018, 2020).

Las rocas subvolcánicas están representadas por diques y sills de gabros, monzogabros, sienitas y monchiquitas, así como de sienita nefelínica y, en particular, lamprófidos (Rodríguez-Saavedra, 2003; Elizondo-Pacheco, 2017, 2019).

Los derrames basálticos, que contienen xenolitos del manto (wherlitas, lherzolitas, harzburguitas y dunitas; Treviño Cázares *et al.*, 2005) son evidencias del vulcanismo en las periferias de la SSCC.

En la parte sureste de la Bufa del Diente, las rocas encajonantes carbonatadas fueron metamorfizadas por los intrusivos obteniendo bancos de mármol (Ramírez-Fernández, 1989).

Existe evidencia de metasomatismo de contacto al norte de la SSCC, donde se observan mineralizaciones como sulfuros de cobre (Cu) y hierro (Fe), en el área de San José (Mendoza-Vargas, 2010).

Así mismo, Bastin (1937) registró depósitos minerales de Pb, Ag y Zn en las minas San Nicolás, El Palmar y Moctezuma.

En las rocas sedimentarias del Mesozoico se han identificado minerales generados por metamorfismo de contacto, como diópsido, tremolita, wollastonita, vesuvianita y granate (Ramírez-Fernández, 1989; Mendoza-Vargas, 2010).

2.3.1.1.9 Cuaternario

El periodo Cuaternario está caracterizado por depósitos aluviales y fluviales de grava, arenas y arcillas. Estos depósitos pueden llegar hasta 20 m de espesor y cubren parcialmente, de manera discordante, las rocas sedimentarias del Mesozoico (Ramírez Fernández, 1989; Miranda-Huerta y Ramírez-Gutiérrez, 2001).

2.3.2 Complejo Hipabisal San Lázaro

En este estudio, se utilizaron los cuerpos hipabisales que afloran en la periferia occidental de la SSCC para compararlos con los diques examinados, con el fin de identificar o descartar una posible relación petrogenética (Rodríguez-Saavedra, 2003; Elizondo-Pacheco, 2017, 2019). El límite norte del Complejo Hipabisal San Lázaro (CHSS) se encuentra a aproximadamente 10 km del EDL.

Algunos autores (Rodríguez-Saavedra, 2006; Elizondo-Pacheco, 2017, 2019; Leal-Cuéllar, 2020) mencionan que los cuerpos hipabisales que intrusionan la secuencia Mesozoica son la representación de las etapas finales del magmatismo de la SSCC.

Según Elizondo-Pacheco *et al.* (2022) los diques del CHSS se emplazan en la Formación Méndez y están dispuestos de manera radial y concéntrica en relación con la SSCC. Los autores describen las siguientes litologías: gabros, dioritas, monzodioritas, monzonitas, sienitas, sienita fidítica y lamprófidos, con una textura porfídica de grano fino.

Además, algunos diques presentan xenolitos de hasta a ~15 cm, con composiciones gabrónica, sienítica, ijolítica y granítica.

Estos cuerpos subvolcánicos tienen un espesor de 0.3 a 2 m y longitudes mayores a ~5 km. Muestran *chilled margins*, *backed zones* y alteración deutérica (con minerales p.ej. clorita, epidota y calcita; [Elizondo-Pacheco et al., 2022](#)).

Los sills del CHSS forman mesetas con orientaciones NW-SE, emplazados de manera concordante a los estratos de la Fm. Méndez. Los sills tienen espesores de hasta ~6 m y, de acuerdo con las observaciones de campo, el autor menciona que el emplazamiento de los sills precede al de los diques. Los sills son gabróticos, monzogabróticos y monzodioríticos ([Elizondo-Pacheco, 2017](#); [Elizondo-Pacheco, 2019](#)).

[Leal-Cuéllar \(2020\)](#) registró diques y sills que se emplazaron el Gabro Rincón Murillo. Estos diques corresponden a pórfidos gabróticos, sieníticos, tingüaíticos (equivalentes subvolcánicos de sienita nefelínica) y lamprófidos alcalinos.

2.3.3 Geología estructural

La Sierra de San Carlos, es un anticlinal erosionado de forma semidómica y recumbente en su parte media con vergencia al SW-W, acentuando por el emplazamiento de un cuerpo plutónico que afecta a la secuencia sedimentaria cretácica ([Miranda-Huerta et al., 2001](#)).

De acuerdo a [Miranda-Huerta et al. \(2001\)](#) en el flanco oriental se observan pliegues ondulados con un buzamiento suave que varía entre 5 y 15°, con orientación NW-SE. En el flanco occidental, el buzamiento es más pronunciado, variando de 15 a 75° cerca del contacto con el cuerpo intrusivo. Esta estructura tiene una dirección predominante N-S, con aproximadamente 25 km de longitud y 10 km de ancho.

[Miranda-Huerta et al. \(2001\)](#) mencionan que las fracturas de las rocas sedimentarias son paralelas a los ejes de las estructuras antes descritas y se caracterizan por un rumbo preferencial NW-SE. Además, es posible identificar un fracturamiento radial, representado por el enjambre de diques que afloran sobre el valle, al pie del flanco occidental de la Sierra Chiquita ([Elizondo-Pacheco 2017](#); [Elizondo-Pacheco, 2019](#); [Elizondo-Pacheco et al., 2022](#)).

[Miranda-Huerta et al. \(2001\)](#) describen al Cerro del Diente, que es la propagación hacia el sureste de la Sierra Chiquita, como un anticlinal ligeramente asimétrico hacia el noreste, cuya zona axial se encuentra emplazada por un cuerpo ígneo de sienitas de feldespató alcalino. La dirección del anticlinal es de NW-SE con una longitud de 10 km y 5 km de ancho.

La Sierra de Cruillas, situada al noreste de San Carlos, está formada por anticlinales y sinclinales suaves, donde afloran rocas de las Formaciones Agua Nueva y San Felipe. Estos pliegues tienen una orientación NW 75° SE y una longitud que varía entre 5 y 15 km ([Miranda-Huerta y Ramírez-Gutiérrez, 2001](#)).

Estos autores mencionan que la Sierra de Cruillas está conectada con la Sierra de San Carlos mediante un sinclinal orientado NW-SE, ubicado en el valle de San Carlos, que tiene aproximadamente 10 km de longitud y 4 km de ancho ([Miranda-Huerta y Ramírez-Gutiérrez, 2001](#)).

Según el reporte de la carta geológica Linares G14-11 de [Arredondo-Mendoza et al. \(2004\)](#) y [SGM \(2008; Figura 2.6\)](#), se identifican estructuras relacionadas con procesos tectónicos distensivos postlaramídicos.

Estas estructuras son fallas normales con diversas orientaciones, aunque predominan en la dirección NW-SE. El sistema incluye las fallas Aramberri, El Puerto, El Milagro, Los Reyes, San Juan, El Japón, La Soledad, Palos Blancos y El Mulato. Las dos últimas fallas se encuentran en el límite norte de la SSCC y se extienden a través del CLB [SGM \(2008\)](#).

Los mismos autores ([Arredondo-Mendoza et al., 2004](#)) indican que las fallas Palos Blancos y El Mulato constituyen un sistema escalonado de fallas normales. Ambas presentan deflexiones, y sus trazas están orientadas en dirección NW-SE con buzamiento hacia el norte.

[Arredondo-Mendoza et al. \(2004\)](#) menciona que la falla Palos Blancos se encuentra a 22 km al suroeste de Burgos, con una longitud aproximada de 43 km, afectando rocas de la Fm. San Felipe. Por su parte, la falla El Mulato está situada a 15 km al suroeste de Burgos, tiene una traza de 33 km y también impacta rocas de la Fm. San Felipe.

Llanura, compuesta por lomeríos formados durante el Terciario y Cuaternario [altura: 50 a 250 m.s.n.m.]. (3) La zona de Piedemonte, situada cerca de la Sierra Madre Oriental [altura: 250 a 500 m.s.n.m.].

En los datos vectoriales del INEGI ([Cervantes-Zamora et al., 1990](#)) no aparece el nombre ni la extensión precisa de la PCGM, en cambio, se muestran las provincias: Grandes Llanuras de Norteamérica, Llanura Costera del Golfo Norte y la Llanura Costera del Golfo Sur.

El [SGM \(2017\)](#) indica que la provincia fisiográfica de las Grandes Llanuras de Norteamérica, que incluye los estados de Coahuila y Nuevo León, es una llanura aluvial con altitudes que varían entre 300 y 400 m.s.n.m. Esta provincia está interrumpida por una serie de lomeríos bajos y dispersos, con pendientes suaves, formados por materiales conglomeráticos.

Según datos del Servicio Geológico Mexicano ([SGM, 2017](#)), la provincia Llanura Costera del Golfo Norte se divide en cuatro subregiones: (1) Llanuras y Lomeríos, (2) Llanura Costera Tamaulipeca, (3) Sierra de Tamaulipas y (4) Sierra de San Carlos. Esta provincia se distingue por sus relieves variados, que incluyen amplias llanuras interrumpidas por lomeríos, con sedimentos antiguos de origen arcilloso y/o arenoso.

En la región de la Sierra de Tamaulipas y la Sierra de San Carlos, las altitudes máximas oscilan entre 1200 y 1400 m.s.n.m. Por su parte, la Llanura Costera alberga sedimentos marinos no consolidados en áreas inundables, así como lomeríos y mesetas dispersas ([SGM, 2017](#)).

De acuerdo con [FIDESUR \(2021\)](#) la Llanura Costera del Golfo Sur se extiende a través de los estados de Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas y Campeche. Está formada por sedimentos del Pleistoceno y del Cuaternario que descansan sobre calizas, areniscas y margas del Terciario. Esta llanura asciende gradualmente hacia el interior del continente hasta encontrar los relieves de las cordilleras.

3. GEOLOGÍA LOCAL

3.1 Introducción

Este capítulo contiene la recopilación de las características geológicas del CLB y del EDL.

Se retoman las descripciones bibliográficas que han sido definidas en esta área, principalmente la de las Formaciones San Felipe y Méndez, además de los conglomerados y sedimentos del Paleógeno-Cuaternario. Adicionalmente, se presenta la columna estratigráfica del pozo Trincheras-1 (PEMEX, 1962), que representa el registro estratigráfico más completo del CLB.

Se muestran las observaciones de campo, así como los datos estructurales que fueron tomados en los estratos y en los diques. Así mismo, se muestran los afloramientos de los diques y su interacción con las rocas encajonantes, la Fm. Méndez y la Fm. San Felipe. Finalmente, se indican las muestras de roca que fueron tomadas en campo para su posterior análisis.

3.2 Geología del Corredor Linares-Burgos

En el CLB afloran principalmente rocas sedimentarias del Cretácico Superior, Cenozoico y Cuaternario. En menor cantidad afloran intrusiones de sienita, diorita, gabro y derrames basálticos (INEGI, 2003a, 2003b, 2013). En la Figura 3 se presenta el afloramiento de diques aplíticos del EDL analizado en este trabajo.

En el área del CLB sobresalen las fallas normales El Mulato y Palos Bancos, que tienen una orientación preferencial NW-SE. El INEGI (2003a, 2003b) reconoció dos fracturas geológicas al norte de la Presa Cerro Prieto, con orientaciones SW-NE, coincidentes con la orientación de los diques del área (Figura 3.1).

En el borde norte de la Sierra de San Carlos-Cruillas, afloran calizas del Cretácico Superior. Alrededor de los cuerpos subvolcánicos situados en la región de Burgos, predominan conglomerados y arcillas del Paleoceno (Figura 3.1).

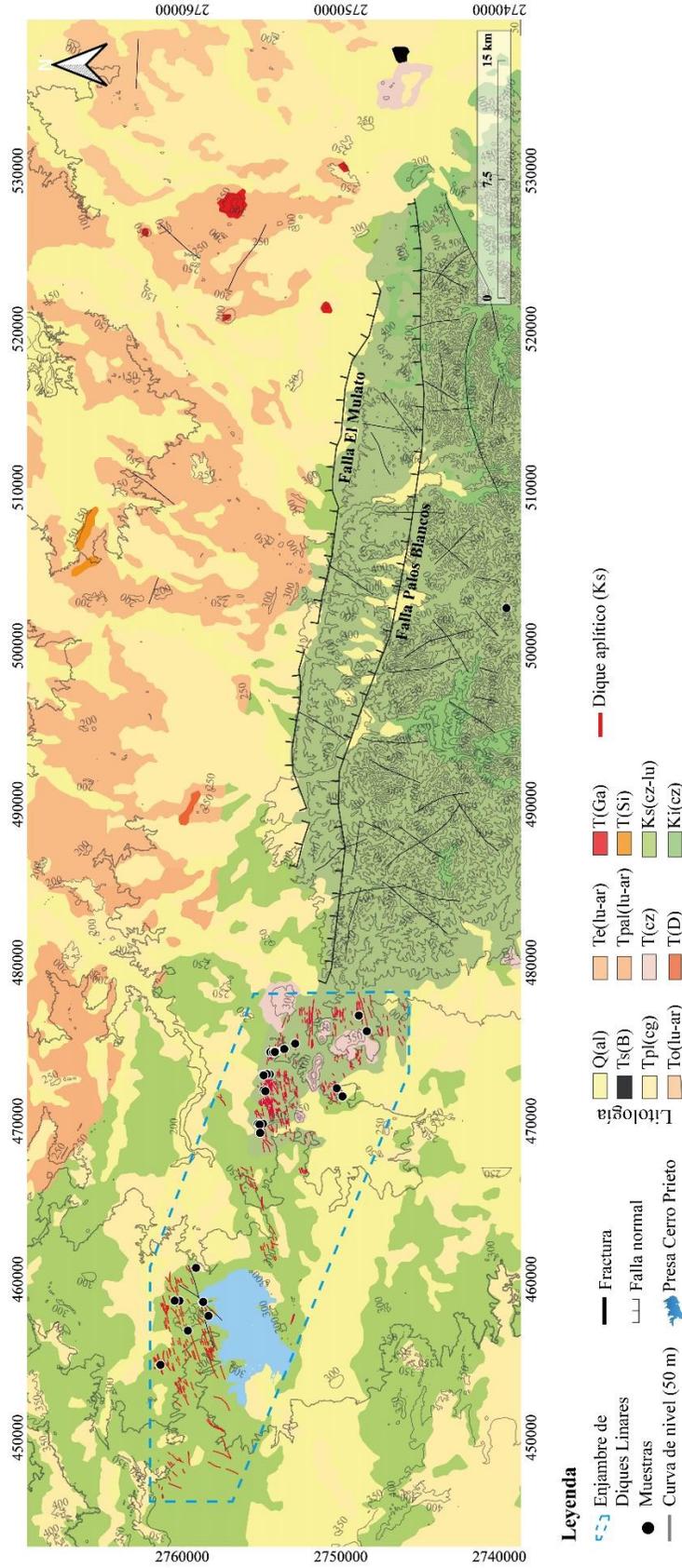


Figura 3.1. Geología del Corredor Linares-Burgos. Litología= cz: caliza, lu: lutita, al: aluvión, cg: conglomerado, ar: arcilla, D: diorita, Ga: gabra, Si: sienita, B: basalto. Edades= Q: Cuaternario, Terciario Superior (Mioceno y Plioceno), Tpl: Plioceno, To: Oligoceno, Te: Eoceno, Tpal: Paleoceno, T: Terciario, Ki: Cretácico Inferior, Ks: Cretácico Superior. Polígono punteado celeste muestra el área del EDL. Elaborado con archivos de INEGI (2003a, 2003b, 2013) y datos propios.

Se observa que el EDL fue emplazado en calizas y lutitas del Cretácico Superior (Figura 3.1 y 3.2). Aunque se desconoce el límite estratigráfico en esta área, en campo se corroboró que estas calizas y lutitas corresponden a las Formaciones San Felipe y Méndez. Geológicamente, los diques también colindan con las calizas de la Formación Providencia, pues afloran alrededor de los monolitos que las calizas conforman.

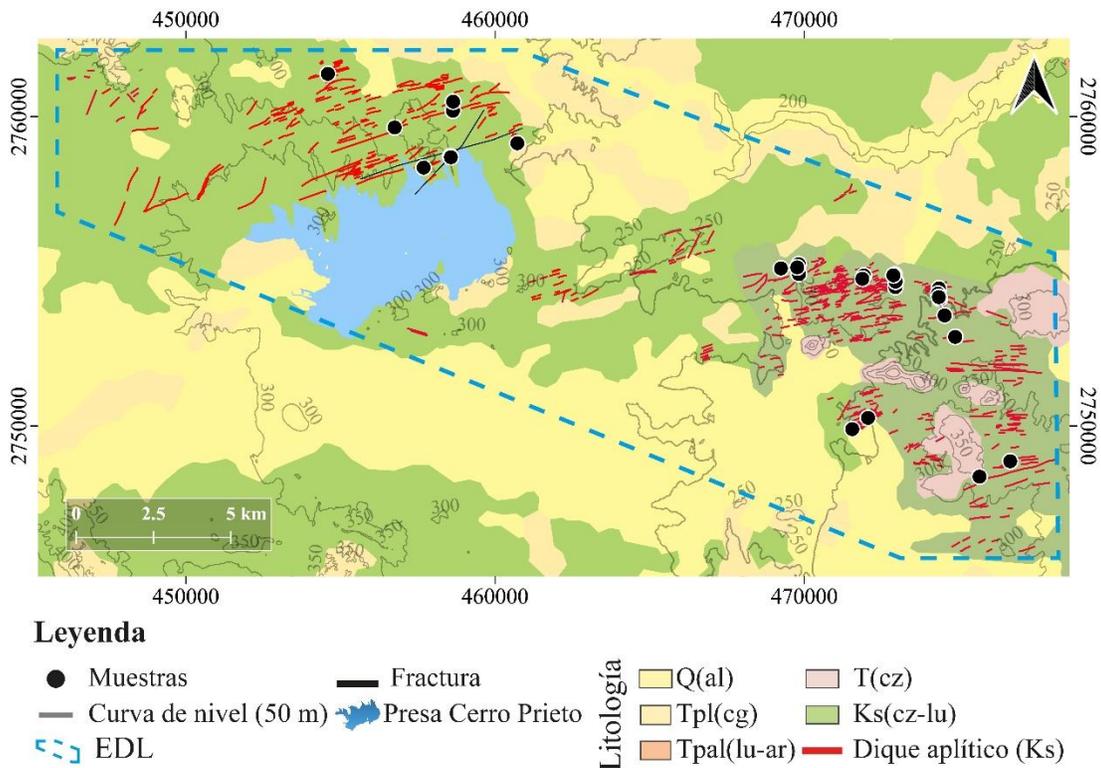


Figura 3.2. Enjambre de Diques Linares (EDL). Detalle de la Figura 3 (Rectángulo punteado celeste). Litología= cz: caliza, lu: lutita, al: aluvión, cg: conglomerado, ar: arcilla, D: diorita, Ga: gabro, Si: sienita, B: basalto. Edades= Q: Cuaternario, Terciario Superior (Mioceno y Plioceno), Tpl: Plioceno, To: Oligoceno, Te: Eoceno, Tpal: Paleoceno, T: Terciario, Ki: Cretácico Inferior, Ks: Cretácico Superior. El polígono punteado celeste muestra el afloramiento del EDL. Elaborado con archivos de INEGI (2003a, 2003b, 2013) y datos propios.

3.2.1 Formación San Felipe

Al norte de la presa Cerro Prieto, en el anticlinal Trincheras, De la Garza-González (2000) describió la Formación San Felipe como una secuencia de estratos de espesor medio compuestos por calizas margosas y arcillosas, con colores que van desde café claro y marrón

hasta amarillento debido al intemperismo. También registró la presencia de estratos delgados y medianos de lutitas y limolitas, con colores que varían de café amarillento a café y marrón.

En la periferia de la presa Cerro Prieto, la Fm. San Felipe tiene un espesor total de ~115 m y se describe como una secuencia de calizas silicificadas, con capas blancas que muestran bioturbación. Además, la formación incluye lutitas arcillosas, margas, areniscas verdes, limonitas verdosas y capas de bentonita (De León-Gómez, 1933; Martínez-Vallejo, 2007).

Martínez-Limas y Gómez-Alejandro (2008) identificaron que la Formación San Felipe, cerca de la presa Cerro Prieto, consiste en una secuencia de caliza arcillo-margosa compacta, lutita, arenisca, caliza silicificada y horizontes limolíticos, con un espesor de aproximadamente 75 m. Estos autores distinguieron dos miembros en la formación.

1. Miembro Inferior (~42 m de espesor): Consiste en calizas arcillo-margosas de color gris, intercaladas con lutitas que varían de gris a marrón y horizontes limolíticos de espesor que va desde delgado a mediano, de color verde claro.
2. Miembro Superior (~40 m de espesor): Se compone de calizas que van del gris al beige, intercaladas con lutitas de color gris claro y estratos limolíticos que varían de verde claro a oscuro. La característica principal de este miembro es la presencia de "calizas silicificadas", identificadas como capas blancas.

Cerca del lugar conocido como Baño de San Ignacio, la Fm. San Felipe se definió como una serie de estratos con espesores de 5 a 15 cm, intercalados con capas blancas de caliza silicificada, calizas, calizas arcillosas, lutitas y rocas clásticas de color verde (Rodríguez-Palacios, 1993; Garza-Castillo, 2006).

Ortega-Torres (2021) describió la Formación San Felipe en el margen oriental de la PCP como una serie de intercalaciones que incluyen calizas (<1.5 m de espesor), margas (<1.0 m), lutitas (<7 m), calizas silicificadas (<1.0 m) y estratos de tobas alteradas de color verde con espesores menores a 0.5 m. Estos estratos están dispuestos casi horizontalmente y presentan un alto grado de fracturación.

Según la autora, los estratos volcánicos corresponden a depósitos alterados de ceniza volcánica de composición ácida, con características de arco continental y una edad estimada de entre 85 y 75 Ma (Ortega-Torres, 2021).

3.2.2 Formación Méndez

La Fm. Méndez sobreyace de manera concordante a la Fm. San Felipe.

En los alrededores del Baño de San Ignacio, [Rodríguez Palacios \(1993\)](#) describió a la Fm. Méndez como una unidad de lutita gris intemperizando en café o gris verdoso, deleznable y con estratificación intemperizada.

[Lizárraga-Mendiola \(2003\)](#) realizó su estudio en las lomas El Tepeyac-San Paulo, El Cerrito y El Cerro La Tortuga en Linares, N. L. La autora indica que la Fm. Méndez consiste en una serie de intercalaciones de lutitas y areniscas calcáreas. En El Cerrito, observó lutitas alteradas intercaladas con areniscas masivas de espesores que van de 0.4 a 1.5 m. En El Cerro La Tortuga, la Fm. Méndez está formada por lutitas de ~0.4 m de espesor intercaladas con areniscas masivas de unos 1 m. En El Tepeyac-San Paulo, afloran lutitas deleznales.

[Arredondo-Mendoza *et al.* \(2004\)](#) elaboraron el informe de la carta geológico-minera Linares G14-11, en el cual describen la Fm. Méndez como una secuencia de lutitas calcáreas, físis, de color verde amarillento, desintegrables, ligeramente caolinizadas y con foliación. Estos autores estimaron que el espesor de la Formación Méndez en la carta Linares G14-11 es de entre 250 y 300 m.

[Arredondo-Mendoza *et al.* \(2004\)](#) sugieren que el ambiente de depósito para la Formación Méndez es un flysch, situado en áreas de antefosa en mar abierto. Según los autores, la formación incluye intercalaciones de flujos turbidíticos originados en áreas de plataforma que, al final del Maastrichtiano, evolucionaron hacia brechas calcáreas de talud cercanas al borde de la plataforma.

Además, los autores señalan que la Formación Méndez se formó en condiciones oxidantes y en soluciones de bario, lo que resultó en la presencia de margas o calizas arcillosas recristalizadas. La edad asignada a esta formación es Campaniano-Maastrichtiano ([Arredondo-Mendoza *et al.*, 2004](#)).

[Garza-Castillo \(2006\)](#) describió la Fm. Méndez, también en el Baño de San Ignacio, como una intercalación de lutitas calcáreas, areniscas, caliza y margas.

3.2.3 Formación La Providencia

La Formación Providencia se encuentra discordantemente sobre la Formación Méndez. Depositada durante el Cenozoico, está formada por una alternancia de calizas que varían de gris a roca y calizas arcillosas que pueden ser carbonosas. Topográficamente, las calizas de la Formación Providencia emergen en forma de mesetas (Rodríguez-Palacios, 1993; Garza-Castillo, 2006).

Esta formación aflora en varias áreas alrededor del Baño de San Ignacio, incluyendo (1) Cerro la Providencia, (2) Cerro Pontezuelas, (3) La Esperanza, (4) Las Carolinas y (5) La Mesa. El espesor total de la formación varía entre 25 y 100 m en el Cerro Providencia (Rodríguez-Palacios, 1993; Garza-Castillo, 2006).

Rodríguez-Palacios (1993) señala que en la base de la formación, el ángulo de inclinación es de 5° a 15°, y el espesor de los estratos varía entre 10 y 25 cm. No obstante, en la parte superior de la formación, las calizas se vuelven más gruesas y masivas. El autor sugiere que el ambiente de depósito de esta formación era un medio lacustre o salino, y le atribuye una edad de Eoceno Superior a Oligoceno.

Una descripción más reciente realizada por Arredondo-Mendoza *et al.* (2004) presenta esta formación como una unidad de caliza con texturas que varían desde wackestone hasta packstone, con un espesor de ~150 m y una edad que abarca desde el Mioceno hasta el Plioceno.

3.2.4 Paleógeno-Cuaternario

Diversas terrazas aluviales (Plioceno-reciente) se han depositado en los valles y antepaís de la Sierra Madre Oriental (SMO) sobre las formaciones San Felipe y Méndez, en la PCGM (Garza Castillo, 2006).

Los ríos Pablillo, Santa Rosa, Hualahuises y Camachito tienen su origen en la Sierra Madre Oriental y fluyen hacia el Golfo de México. Esta actividad ha dado lugar a la formación de diversos niveles de terrazas en la Planicie Costera del Golfo de México, donde también se pueden encontrar gravas originarias de la Sierra de San Carlos-Cruillas. Estas terrazas presentan superficies mayormente planas y con pocas irregularidades en el relieve,

y los sedimentos son heterogéneos según la zona de captación de las subcuencas (Ruiz-Martínez y Werner, 1997; Garza-Castillo, 2006; Dávila Pórcel, 2011).

Ruiz-Martínez (1990) propuso cinco niveles de terrazas (T1-T5) en Linares, N. L. La T1 está formada por lechos de ríos y arroyos, representando los depósitos más recientes. La T2 incluye depósitos aluviales situados en los márgenes de los ríos. La T3 está compuesta por conglomerados con gravas y bloques, unidos por caliche. La T4 abarca conglomerados de diversas granulometrías, incluyendo bloques, gravas y arenas, con lentes de arena, arcillas y limos. Finalmente, la T5 es la terraza más antigua, compuesta por conglomerados cementados con caliche.

En la carta geológica-minera G14-11 del SGM (2008), dentro del área del CLB, se muestran cuerpos ígneos. Al noreste de la localidad Navarro se encuentra un cuerpo diorítico-sienítico del Oligoceno. En la localidad El Consuelo, se encuentra otro cuerpo diorítico-sienítico del Oligoceno.

En esta carta geológica-minera se identifican varios cuerpos subvolcánicos (G14-11; SGM, 2008). En la localidad de La Esperanza, hay un cuerpo diorítico-sienítico datado del Oligoceno.

Entre el poblado de Soledad de los García y la cabecera municipal de Burgos, se localiza una estructura diorítica-sienítica del mismo período, y otra de esta misma composición y edad está situada al suroeste de la Mesa San Isidro. Al sureste de Burgos, entre El Sarnoso y Lázaro Cárdenas, se encuentra un cuerpo basáltico con una edad del Mioceno (SGM, 2008).

3.2.5 Pozo Trincheras-1

A continuación, se describe la estratigrafía del pozo exploratorio Trincheras-1 perforado por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en 1961. La información presentada en este apartado corresponde al informe técnico de este pozo (PEMEX, 1962; Figura 3.3).

El pozo alcanza el basamento granítico a los 1162 m de profundidad, esta es la profundidad máxima del pozo (PEMEX, 1962).

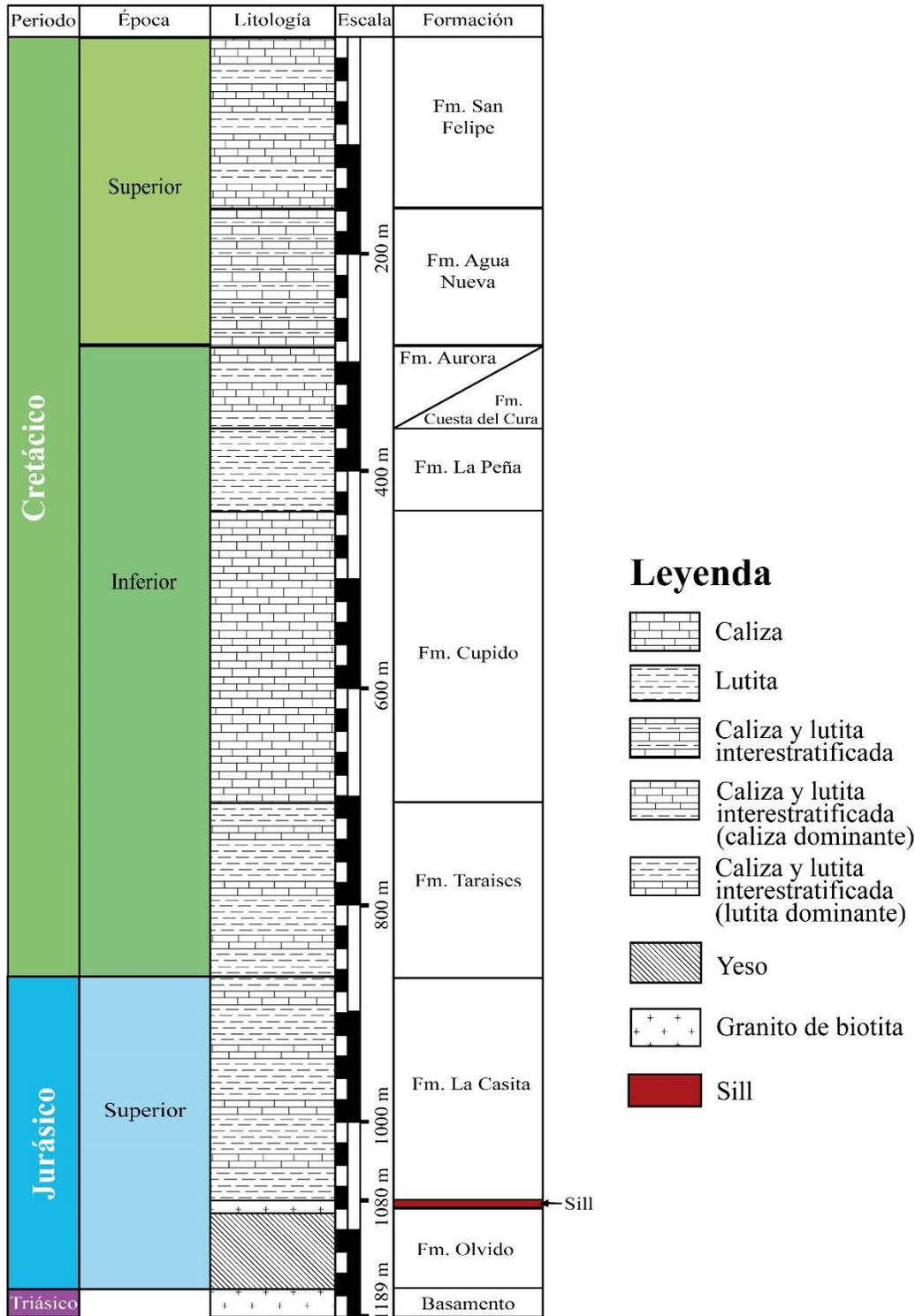


Figura 3.3. Columna estratigráfica del pozo Trincheras-1 de PEMEX. La columna se dibujó con las descripciones estratigráficas y edades presentadas en el reporte técnico final del pozo de PEMEX (1962). La simbología de la litología es la propuesta por la USGS (2006). Modificada de Antonio-Durán (2022).

Coombs *et al.* (2022) reportaron que el basamento del pozo Trincheras-1 es un granito de biotita. Los autores reportan que la edad U-Pb en circones de este granito de biotita es de 254.6 ± 3.4 Ma y el porcentaje en peso de SiO₂ es de 68.78 y 69.73.

Anteriormente, López-Ramos (1979) reportó que la edad de este basamento, de acuerdo con el método K-Ar en biotita, es de 147 ± 5 Ma.

Sobreyaciendo al basamento se encuentra la Fm. Olvido, con un espesor de 77 m. Se compone por yeso impuro que contiene escasos microcristales de piritita e intercalaciones de bentonita café claro (PEMEX, 1962).

Según la información del pozo (PEMEX, 1962), en la parte superior de la Fm. Olvido se encuentra un sill de 5 m de espesor, situado entre los 1080 y 1085 metros de profundidad. Este sill está compuesto de granito de biotita con una textura hipidiomórfica, formada por granos subhedrales de cuarzo, ortoclasa, oligoclasa, andesina, biotita y piroxeno. Se sugiere que su edad podría ser post-Jurásica, ya que el cuerpo hipabisal se encuentra entre la base de la Fm. La Casita y la cima de la Fm. Olvido.

Encima del sill granítico se encuentra la Fm. La Casita, que tiene un espesor de 205 m y está formada por una alternancia de lutitas negras carbonosas y calizas que varían de gris a negro. Por sobreyaciendo se encuentra la Fm. Taraises, con un espesor de 165 m, compuesta principalmente por calizas grises e intercaladas con capas delgadas de lutita negra carbonosa y calcárea. (PEMEX, 1962).

Sobreyace la Fm. Cupido, con un espesor de 265 m, está constituida por calizas grises con pedernales blancos y ocasionales capas delgadas de lutita negra carbonosa. Posteriormente, se depositó la Fm. La Peña, con un espesor de 80 m, caracterizada por estratos de caliza gris, carbonosa y arenosa de grano fino, además de contener delgadas capas intercaladas de lutita negra carbonosa (PEMEX, 1962).

Sobre la Fm. La Peña se encuentra, de manera concordante, la Fm. Aurora-Cuesta del Cura, con un espesor de 75 m. En el informe del pozo Trincheras-1, estas formaciones se agrupan debido a su similaridad litológica y paleontológica. Ambas formaciones están compuestas por calizas densas de color gris y crema, a veces silicificadas y arenosas, con intercalaciones de lutita negra carbonosa (PEMEX, 1962).

Encima de estas, se encuentra la Fm. Agua Nueva, que tiene un espesor de 130 m y se caracteriza por calizas oscuras, carbonosas y arenosas, con presencia de pedernal y lutita gris oscuro (PEMEX, 1962).

En el pozo Trincheras-1, la Fm. San Felipe, que tiene un espesor de 160 m, está compuesta por calizas densas de color gris claro. Estas calizas pueden ser ocasionalmente silicificadas, arenosas o arcillosas, y también incluyen pedernal (PEMEX, 1962).

3.3 Geología del Enjambre de Diques Linares

Debido a que la topografía de la PCGM es casi plana con ocasionales lomeríos y los estratos de las Formaciones son cuasi-horizontales, en el CLB no se disponen de amplios taludes de la Fm. Méndez y San Felipe, a excepción del talud estudiado por Ortega-Torres (2021), donde se realizó una excavación para extraer rocas durante la obra civil de la presa Cerro Prieto.

Debido a la topografía se tornó complicado percibir un afloramiento donde se observe claramente la parte lateral de los estratos, una secuencia sedimentaria completa y el límite de las Formaciones. De esta manera, los caminamientos fueron realizados en su mayoría sobre la superficie de los estratos.

En el área del EDL, la Fm. Méndez se caracteriza por tener estratos medianos a delgados, subhorizontales, compuestos por calizas, margas y lutitas calcáreas (Figura 3.4).

La Fm. San Felipe presenta estratos medianos subhorizontales compuestos por lutita y caliza arcillosa, además, se identificaron rocas detríticas como areniscas, grauvacas feldespáticas, litoarenitas y arcosas (Figura 3.5; Antonio-Durán, 2022).

Esta formación cuenta con estratos de toba alterada o ceniza volcánica alterada con su característico color verde y ocasionalmente con moldes de carga en la superficie de los estratos (Figura 3.6).



Figura 3.4. Estratos de la Formación Méndez. (A) Estratificación. (B) Superficie del estrato.



Figura 3.5. Estratos de la Formación San Felipe. Coordenadas UTM: 14R 458304.52 E 2759408.01 N.

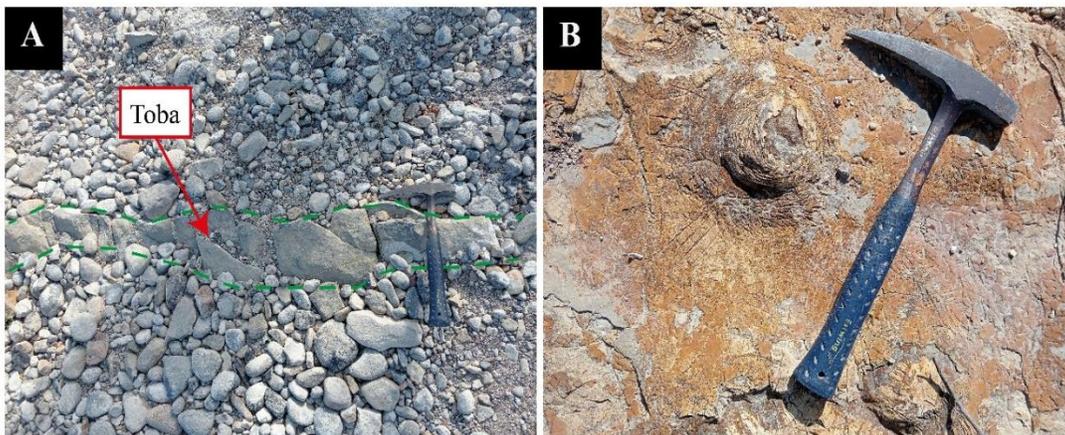


Figura 3.6. (A) Fragmento de toba alterada de la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 456906.75 E 2759502.09 N. (B) Moldes de carga en la superficie de un estrato de la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 471551.93 E 2750164.40 N.

Se ha observado que la Fm. San Felipe tiene dos principales familias de fracturas. La primera (**SF1**) con una orientación promedio de $250^{\circ}/78^{\circ}$ y la segunda (**SF2**) con una orientación promedio de $179^{\circ}/86^{\circ}$. Los datos anteriores fueron medidos en un estrato (**SS**) con orientación $264^{\circ}/13^{\circ}$, en las coordenadas 14R 472035.22 E 2754910.53 N (**Figura 3.7**).

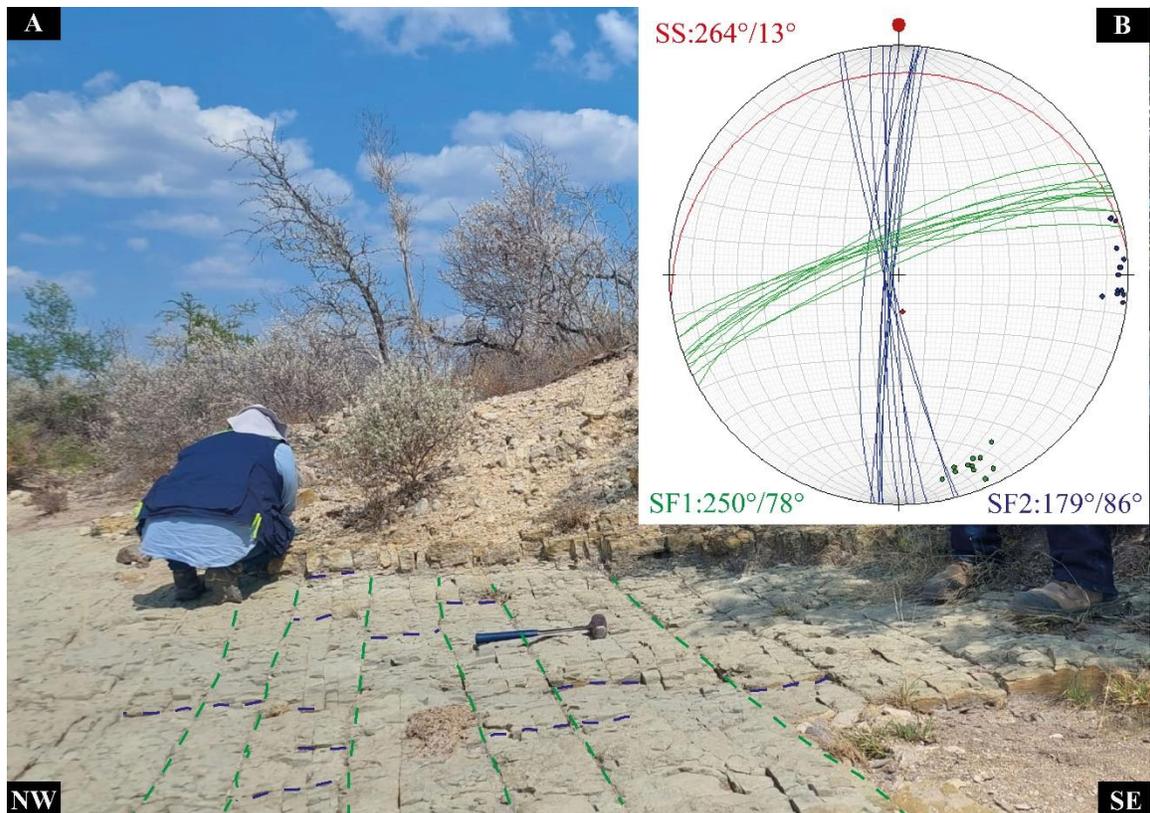


Figura 3.7. Fracturas de la Formación San Felipe. (A) Afloramiento de las fracturas. (B) Estereograma que muestra las dos familias de fracturas (SF1: 250°/78°; SF2: 179°/86°), además se muestra el rumbo y buzamiento de un estrato de la Fm. San Felipe (SS: 264°/13°). Coordenadas UTM: 14R 472035.22 E 2754910.53 N.

Así mismo se han observado pliegues suaves en la Fm. San Felipe. En la [Figura 3.8](#) se muestran ejemplos de estos pliegues, donde fueron medidos sus flancos, localizados en la coordenada UTM 14R 460110.805 E 2758990.259 N. Los diques del EDL son leucocráticos de textura microporfidica, es decir, están compuestos por aplitas.

En muestra de mano las aplitas son de color beige a blanco y son característicamente duras en comparación con las calizas, lutitas y margas de las rocas encajonantes (Fm. San Felipe; [Figura 3.9-3.13](#)). En ningún caso se observaron diques de otras coloraciones.

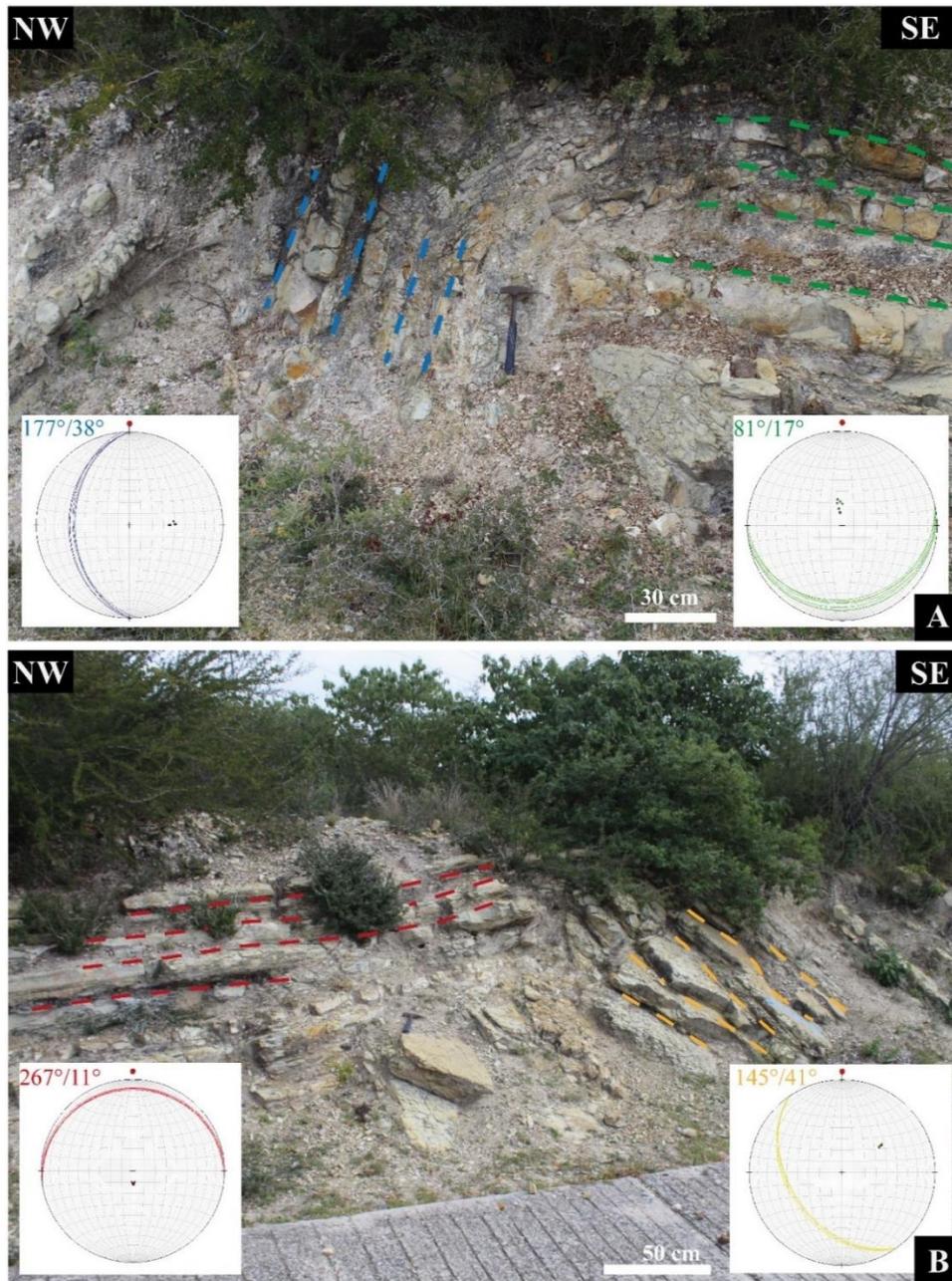


Figura 3.8. Pliegues de la Formación San Felipe. (A) Pliegue con un flanco de $177^{\circ}/38^{\circ}$ (4 mediciones) y el segundo de $81^{\circ}/17^{\circ}$ (cuatro mediciones), en promedio. (B) Pliegue con un flanco de $267^{\circ}/11^{\circ}$ (cuatro mediciones) y otro de $145^{\circ}/41^{\circ}$ (cinco mediciones), en promedio. Coordenadas UTM: 14R 460110.805 E 2758990.259 N. Las líneas punteadas significan los estratos que fueron medidos. El color de los estereogramas corresponde al color de cada conjunto de estratos.



Figura 3.9. Dique del Enjambre Linares y su contacto con la Formación San Felipe. (A) Dique emplazado en la Fm. San Felipe. (B) Detalle de la fig. 3.9 A, contacto de un dique con la Fm. San Felipe. Coordenadas del afloramiento = UTM: 14R 458611.299 E 2759622.03 N.

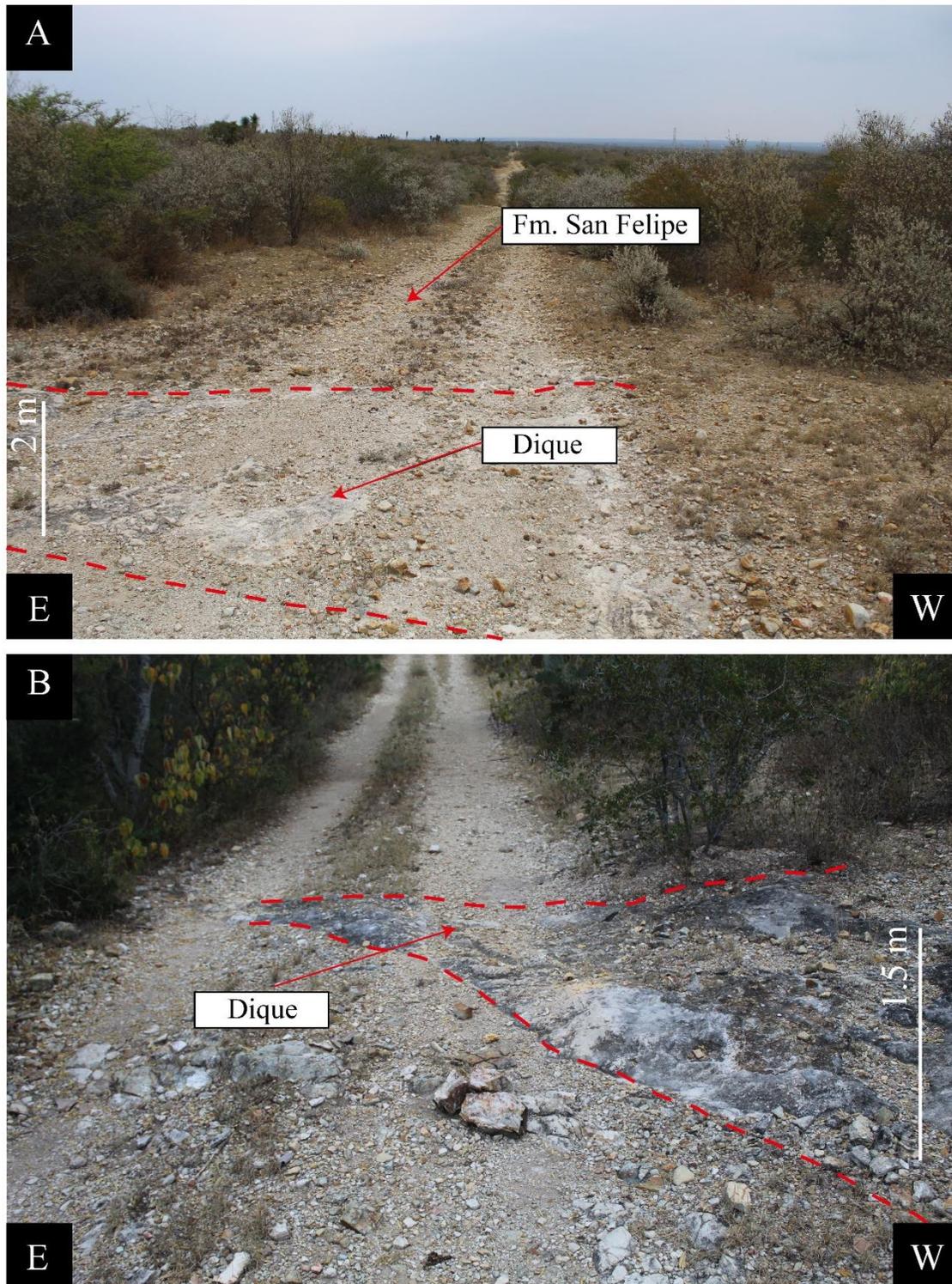


Figura 3.10. Diques del Enjambre Linares en la Fm. San Felipe (A; Coordenadas UTM: 14 R 472859.26 E 2754886.42 N) y Fm. Méndez (B; Coordenadas UTM: 14 R 458594.43 E 2758738.62 N).

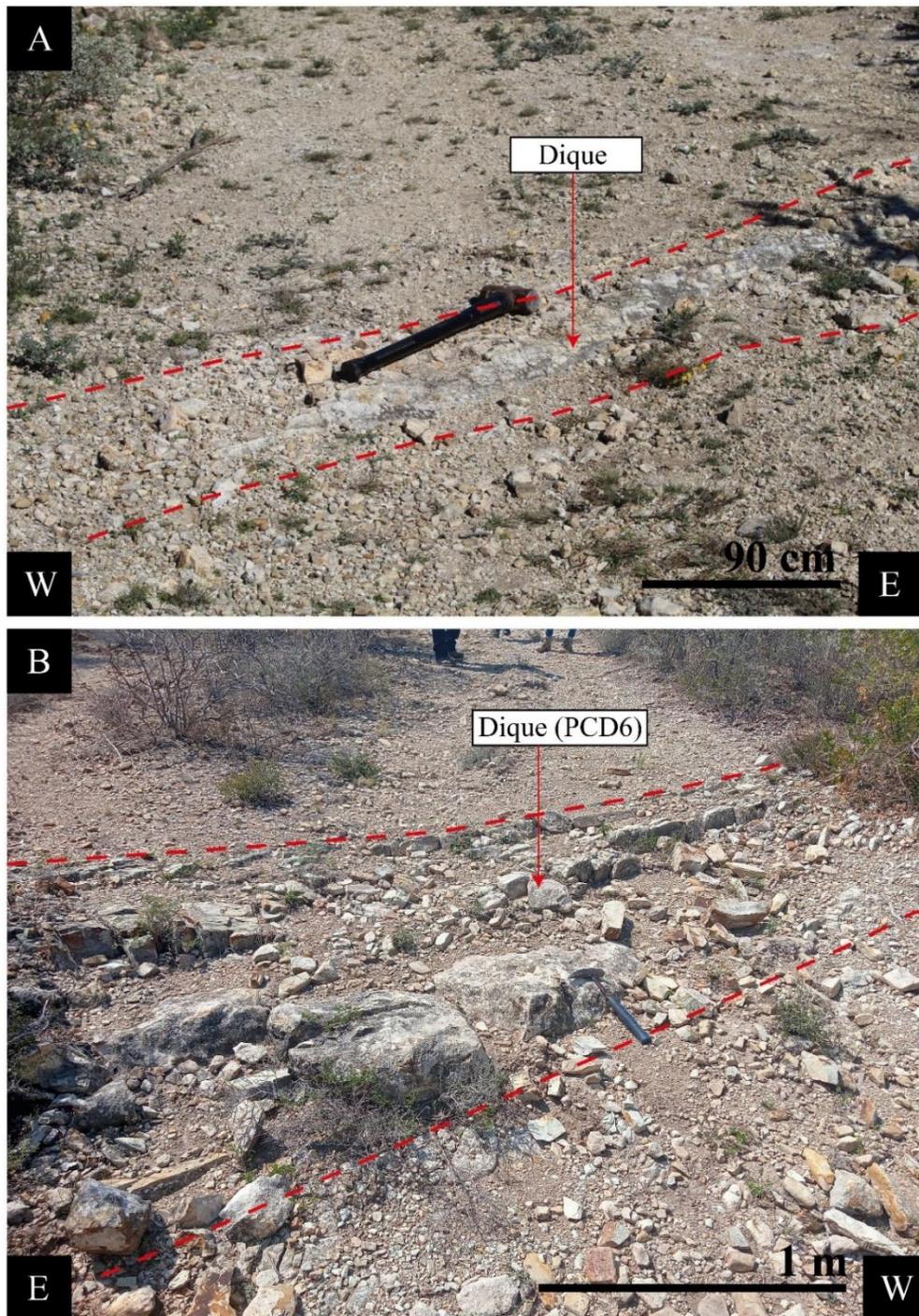


Figura 3.11. Dique del Enjambre Linares en la Fm. San Felipe. Coordenadas UTM: 14 R 474766.77 E 2754351.43 N. (A) y (B) Dique de la muestra PCD6. Coordenadas UTM: 14R 474535.59 E 2753572.68 N.

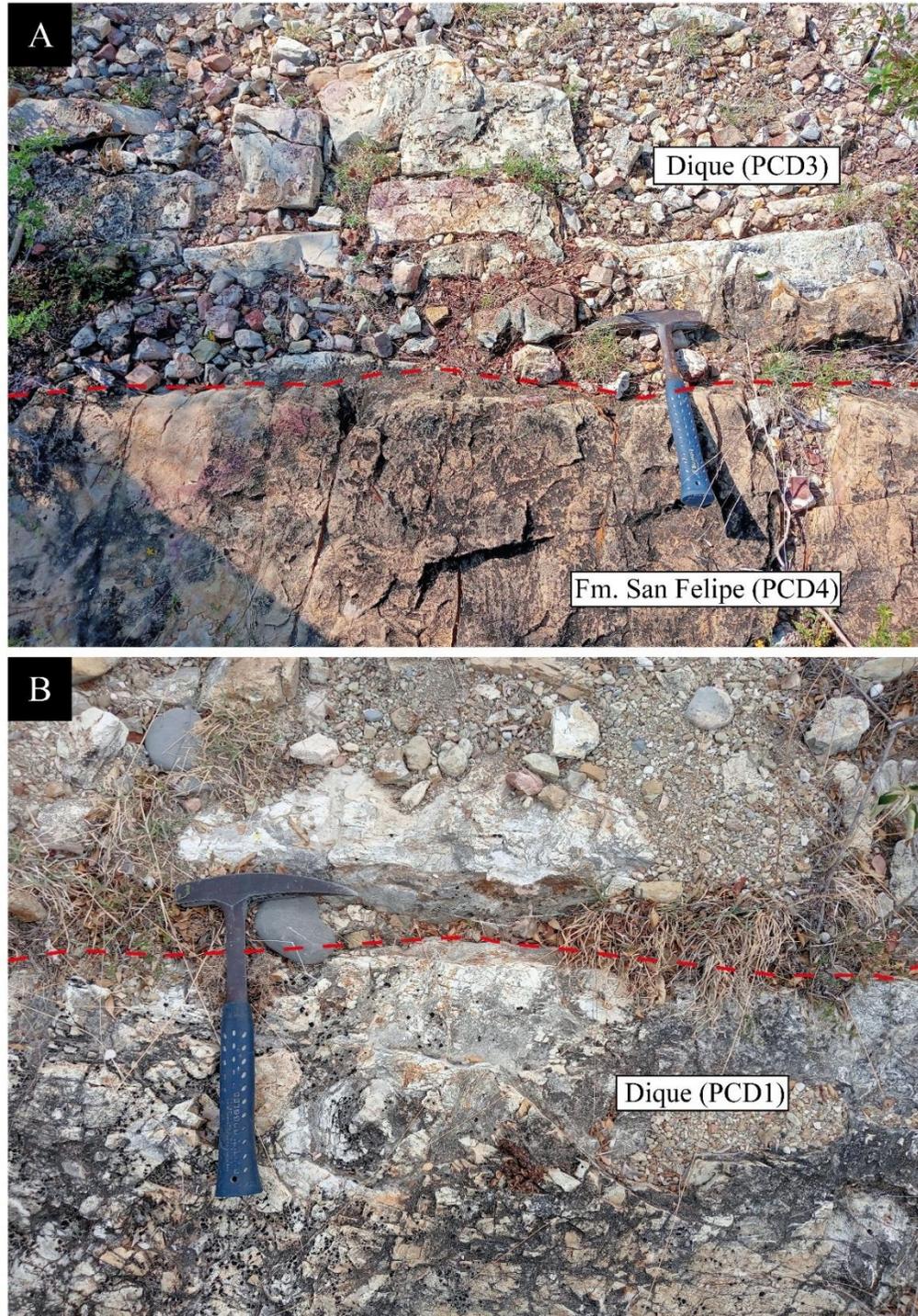


Figura 3.12. Contactos de diques con la Fm. San Felipe. (A) Muestras PCD3 y PCD4, respectivamente. Coordenadas UTM: 14R 474350.19 E 2754167.6 N. (B) Dique de la muestra PCD1. Coordenadas UTM: 14R 474352.211 E 2754445.404 N.

En campo, fue posible medir la dirección de algunos de estos diques. En el dique PCD5 (Figura 3.13; Coordenadas UTM: 14R 474376.48 E 2754112.19 N) tiene una dirección de $254^{\circ}/81^{\circ}$.

Adicionalmente, se observaron diques en direcciones oblicuas. En la Figura 3.14 se observan direcciones de dos diques en esta situación y la fotografía de uno de ellos.

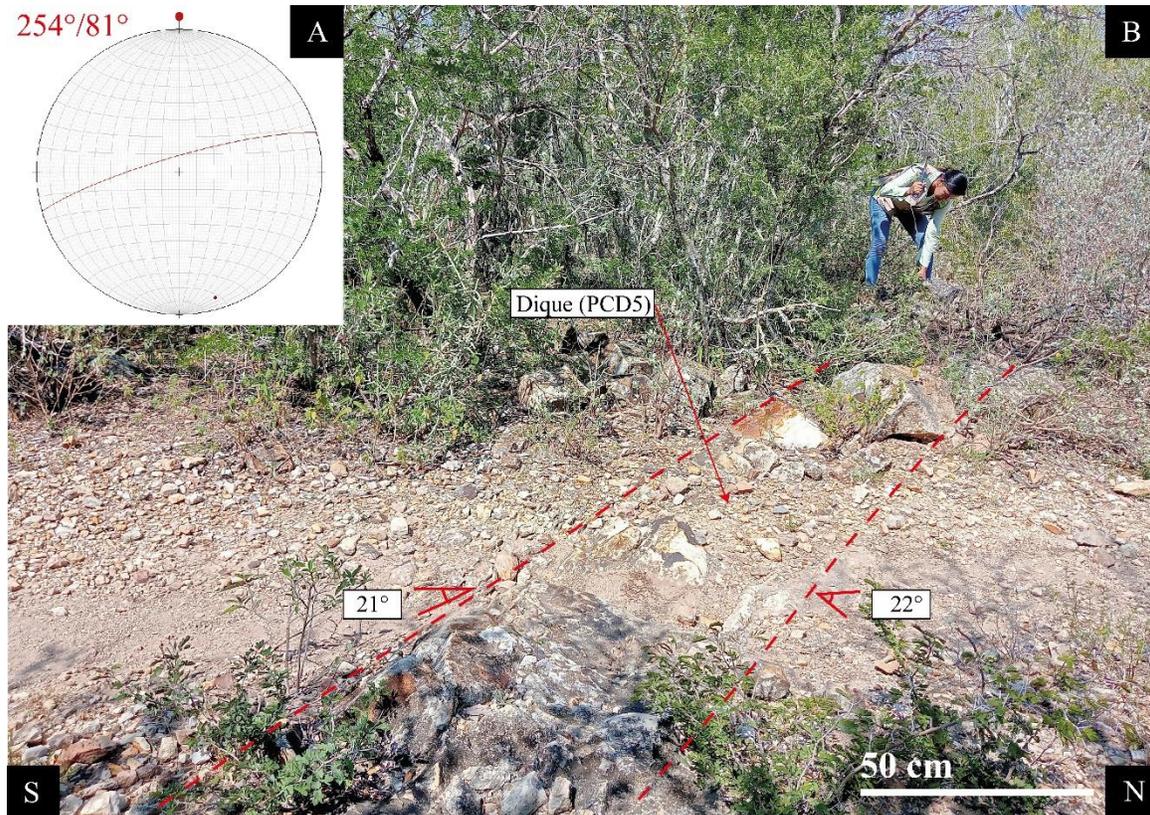


Figura 3.13. Dique de la muestra PCD5, emplazado en la Fm. San Felipe. (A) Afloramiento del dique PCD5. En los laterales del dique se puede observar un ligero levantamiento de los estratos que oscilan los 20° de buzamiento. (B) Dirección del dique = $254^{\circ}/81^{\circ}$. Coordenadas UTM: 14R 474376.48 E 2754112.19 N.

Anteriormente también se observó un sill (coordenadas UTM: 14R 469734 E 2755070 N.) emplazado de manera concordante con los planos de estratificación de la Fm. Méndez (Figura 3.15; Antonio-Durán, 2022). El sill es de color blanco a beige, de aparente composición leucocrática y tiene un espesor de ~ 20 cm.

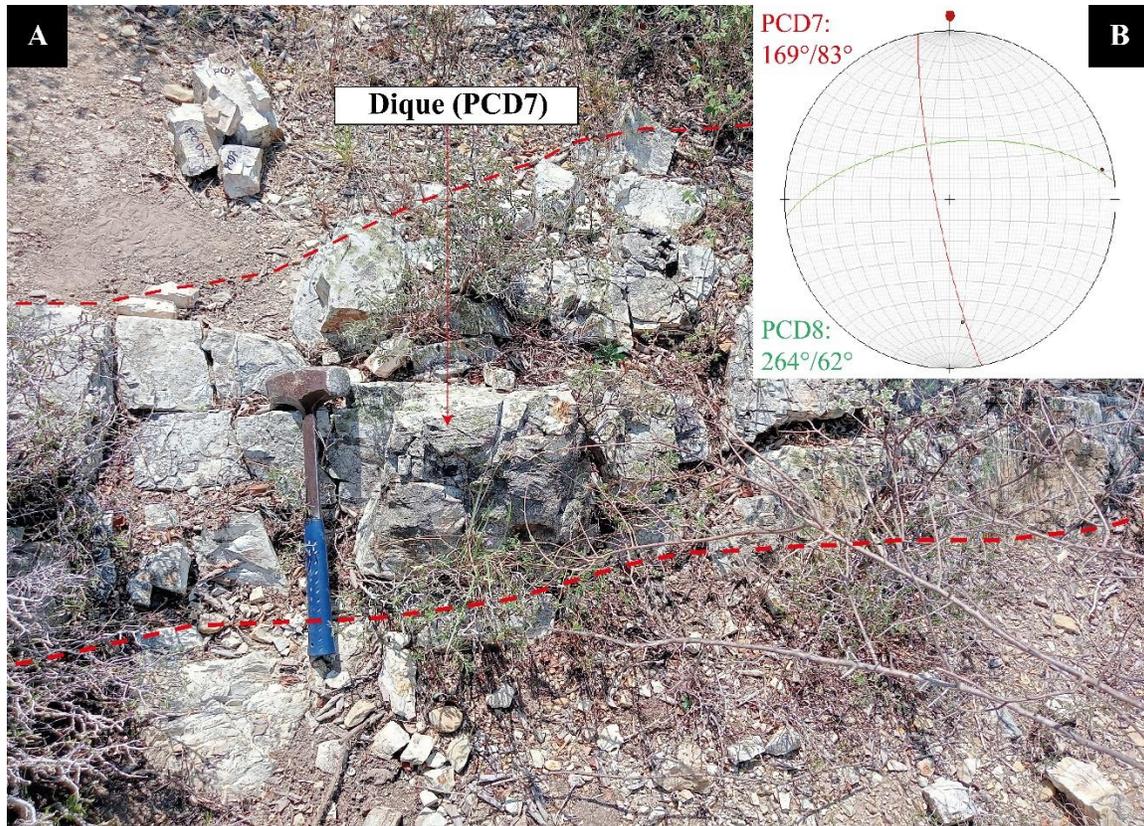


Figura 3.14. Dirección de diques oblicuos del EDL. (A) Dique PCD7 con dirección $169^{\circ}/83^{\circ}$. (D) Estereograma con la dirección de ambos diques: **PCD7**= $169^{\circ}/83^{\circ}$ y **PCD8**= $264^{\circ}/62^{\circ}$. Coordenadas UTM: 14R 474886.949 E 2752882.723 N.

En la carretera Mulato al Gavilán, en la parte norte de la SSCC, se encuentra un dique emplazado en la Fm. San Felipe (coordenadas UTM: 14R 502387.08 E 2739554.79 N. En este dique es posible observar la geometría de estos cuerpos hipabisales respecto a la interacción de los estratos que fungen como roca encajonante. En este afloramiento se observa cómo los estratos que se encuentran en los laterales del dique son ligeramente levantados por la intrusión (Figura 3.16).

En la interacción dique—roca encajonante no se observaron *chilled margins*, comúnmente relacionados con los diques. Sin embargo, el emplazamiento de los diques causó un ligero levantamiento que las paredes laterales de la roca encajonante (estratos), que en superficie se observa un prisma trapezoidal a modo de badén, donde los “flancos” tienen un buzamiento de $\sim 20^{\circ}$ (Figura 3.17).

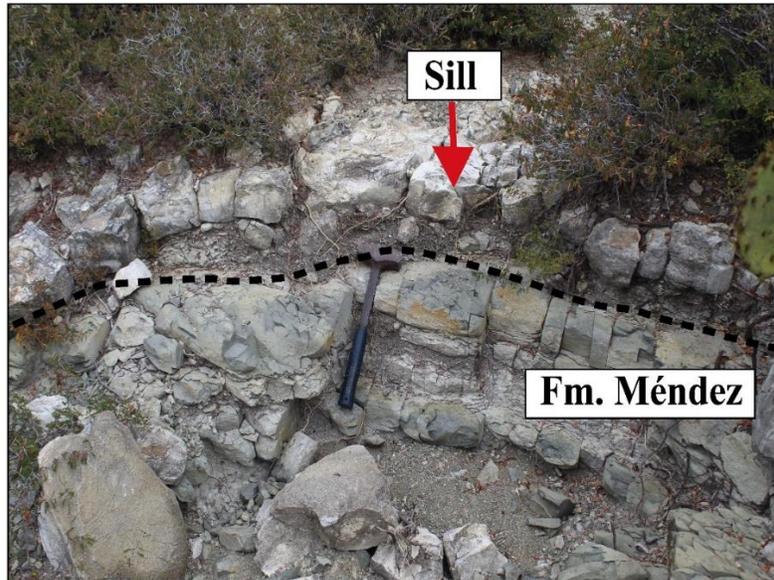


Figura 3.15. Sill emplazado en la Fm. Méndez. Coordenadas UTM: 14R 469734 E 2755070 N.

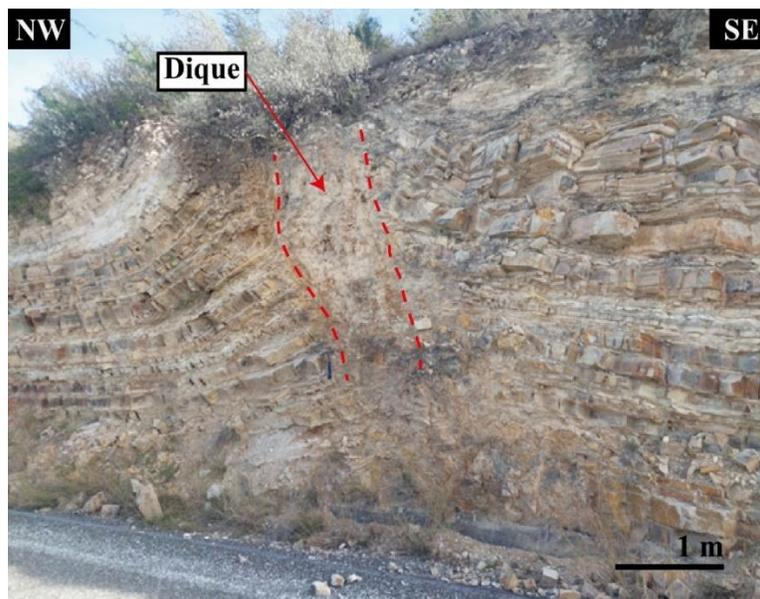


Figura 3.16. Dique emplazado en Fm. San Felipe, perteneciente a la SSCC. Esta estructura ejemplifica la intrusión de un dique en una secuencia sedimentaria, se observa que los laterales del dique se encuentran ligeramente levantados por la intrusión. Coordenadas UTM: 14R 502387.08 E 2739554.79 N.

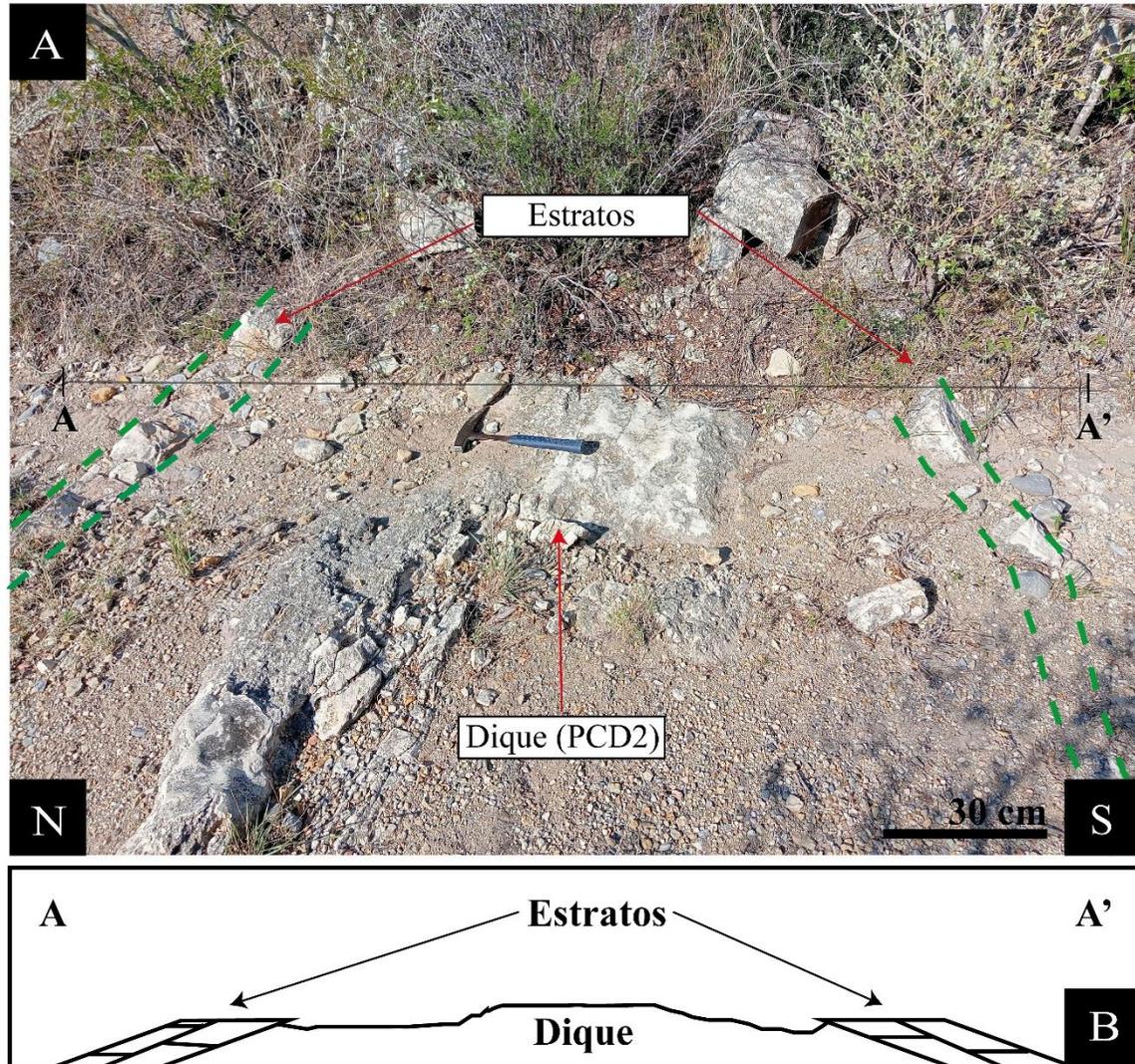


Figura 3.17. Relación de los diques con la roca encajonante. (A) Se muestra la forma de badén y el ligero levantamiento ($\sim 20^\circ$) de las paredes de la fractura. (B) Esquema (sin escala) del emplazamiento del dique respecto al estrato. Coordenadas UTM: 14R 474320.1 E 2754274.4 N.

Se obtuvieron 34 muestras del EDL. En la [Figura 3.18](#) se presentan algunas muestras que se colectaron para su posterior análisis. En los paneles A al G se muestran aplitas mientras que en el panel H se observa una toba alterada. En la [Tabla 3.1](#) y [Figuras 3.19-3.25](#) se muestra la ubicación de las aplitas, tobas alteradas y rocas sedimentarias correspondientes a rocas encajonantes.

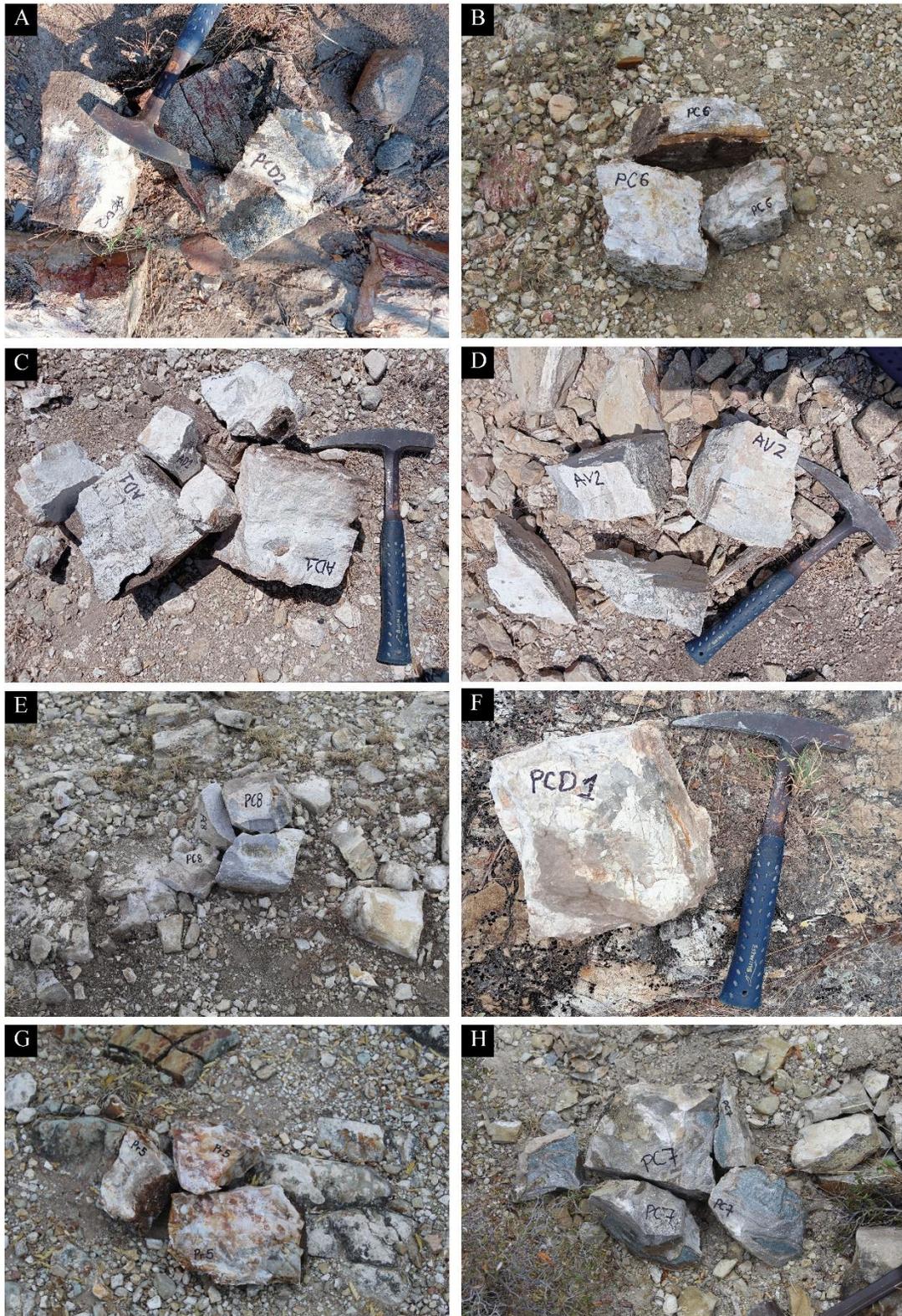
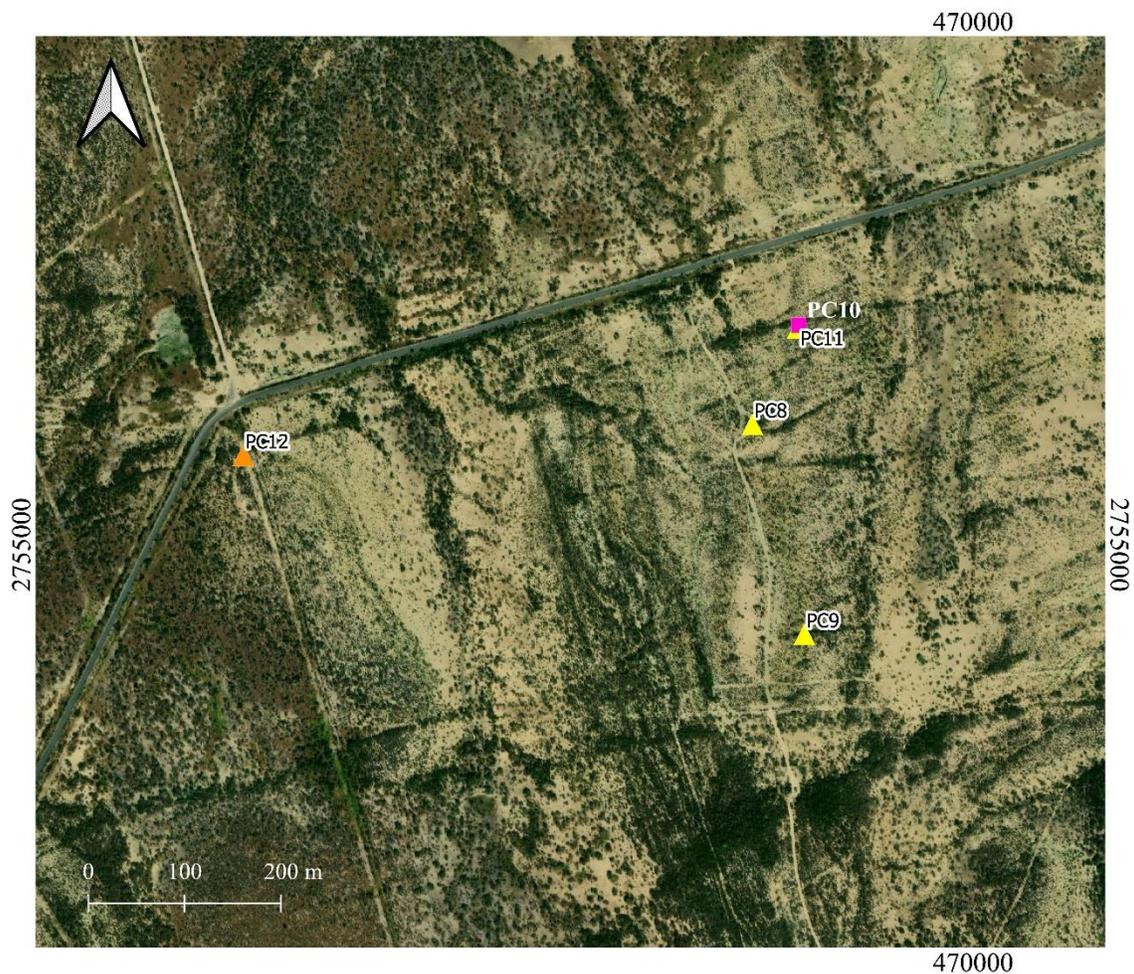


Figura 3.18. Muestras del área del Enjambre de Diques Lineares. (A) PCD2, (B) PC6, (C) AD1, (D) AV2, (E) PC8, (F) PCD1, (G) Pr5 y (H) PC7.

Tabla 3.1. Muestras del Enjambre de Diques Linares.

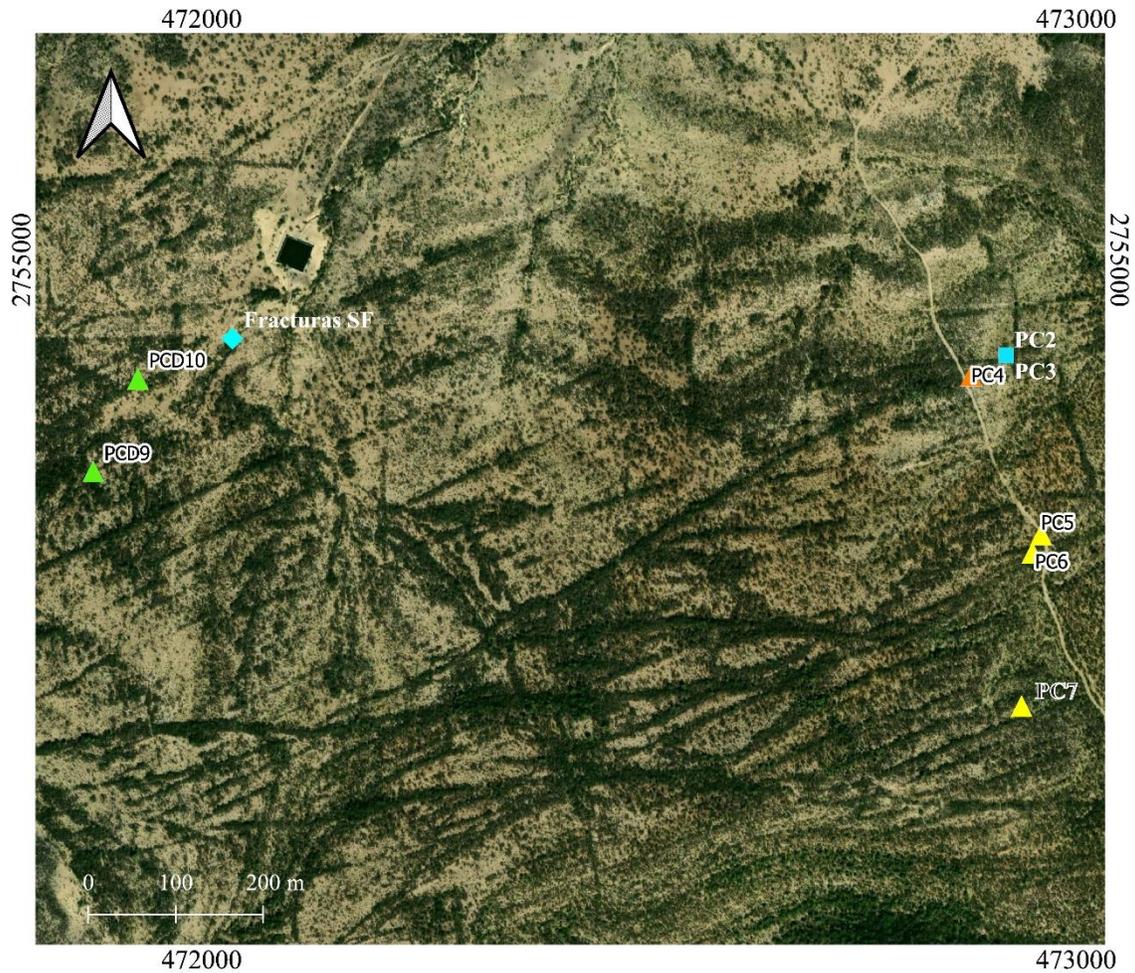
Muestra	Localidad	Estructura	Roca	Coordenadas UTM (14 R)		Descripción	Petrografía	Geoquímica	Geocronología	
				Este	Norte					
PC2	Purísima de Conchos	Estrato	Grauvaca feldespática	472920	2754891	x	x			
PC3		Estrato	Litoarenita	472920	2754891	x	x			
PC4		Dique	Aplita	472880	2754868	x	x	x	x	
PC5		Dique	Aplita	472960	2754686	x	x			
PC6		Dique	Aplita	472950	2754665	x	x			
PC7		Estrato	Toba alterada	472944	2754489	x	x			
PC8		Dique	Aplita	469771	2755125	x	x			
PC9		Dique	Aplita	469825	2754907	x	x			
PC10		Estrato	Arcosa	469819	2755228	x	x			
PC11		Dique	Aplita	469818	2755225	x	x			
PC12		Dique	Aplita	469243	2755093	x	x	x	x	
PCD1		Dique	Aplita	474352	2754445	x				
PCD2		Dique	Aplita	474320	2754274	x				
PCD3		Dique	Aplita	474350	2754167	x	x			
PCD4		Estrato	Toba alterada	474350	2754167	x	x			
PCD5		Dique	Aplita	474376	2754112	x				
PCD6		Dique	Aplita	474536	2753572	x	x	x		
PCD7		Dique Enrejado 1	Aplita	474886	2752882	x	x			
PCD8		Dique Enrejado 2	Aplita	474878	2752878	x	x			
PCD9		Dique	Aplita	471876	2754758	x				
PCD10	Dique	Aplita	471927	2754864	x					
Pr3	Presa Cerro Prieto	Estrato	Marga	458553	2758719	x	x			
Pr4		Estrato	Marga	458571	2758686	x	x			
Pr5		Dique	Aplita	457688	2758351	x	x	x	x	
Pr6		Dique	Aplita	454594	2761380	x	x	x	x	
Pr7		Dique	Aplita	458636	2760190	x	x			
Pr8		Dique	Aplita	458644	2760481	x	x	x		
Pr9		Dique	Aplita	456753	2759648	x	x	x		
Pr10		Dique	Aplita	460720	2759137	x	x			
PD1		Providencia	Dique	Aplita	471549	2749899	x	x		
PD2			Dique	Aplita	472059	2750262	x			
AD1	Avileño	Dique	Aplita	475665	2748363	x				
AV2		Dique	Aplita	476656	2748860	x	x	x		
SF1	Mulato	Estrato	Toba alterada	502387	2739555	x	x		x	



Leyenda

Muestras	<i>Petrografía</i>	} Aplitas	<i>Petrografía-Geoquímica-Geocronología</i>
	▲ PC8		▲ PC12 (Aplita)
	▲ PC9		<i>Sedimentarias</i>
	▲ PC11		■ PC10 (Arcosa)

Figura 3.19. Muestras al oeste de la localidad Purísima de Conchos. Se enfatiza el tipo de litología (aplititas y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Así mismo se señalan los tipos de análisis a las que fueron expuestas (petrografía, geoquímica y/o geocronología). Imagen satelital de *Bing Maps*.



Leyenda

Muestras

Petrografía-Geoquímica-Geocronología

▲ PC4 (Aplita)

Petrografía

▲ PC5 (Aplitas)

▲ PC6 (Aplitas)

▲ PC7 (Toba alterada)

Descripción de campo

▲ PCD9 (Aplitas)

▲ PCD10 (Aplitas)

Sedimentarias

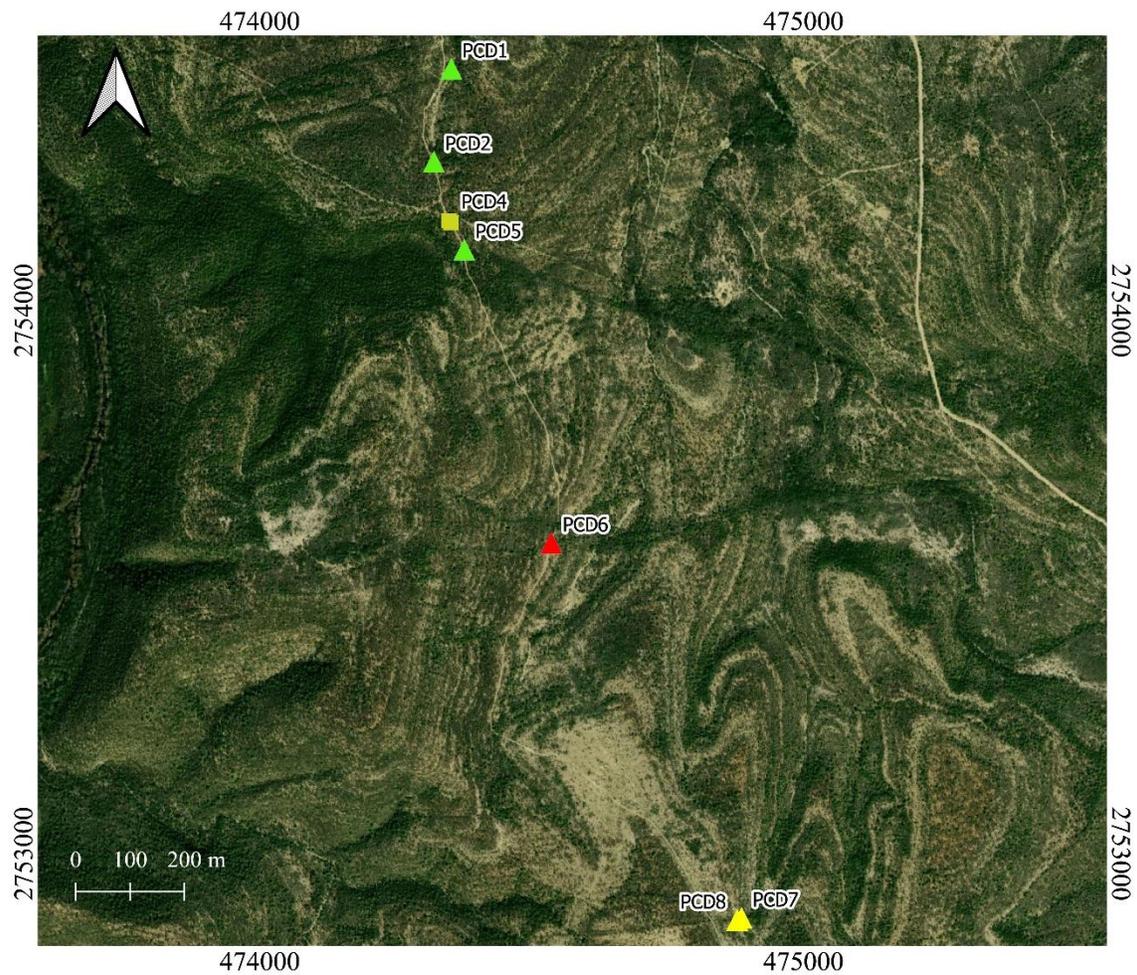
■ PC2 (Grauvaca feldespática)

■ PC3 (Litoarenita)

Datos estructurales

◆ Fracturas
Fm. San Felipe

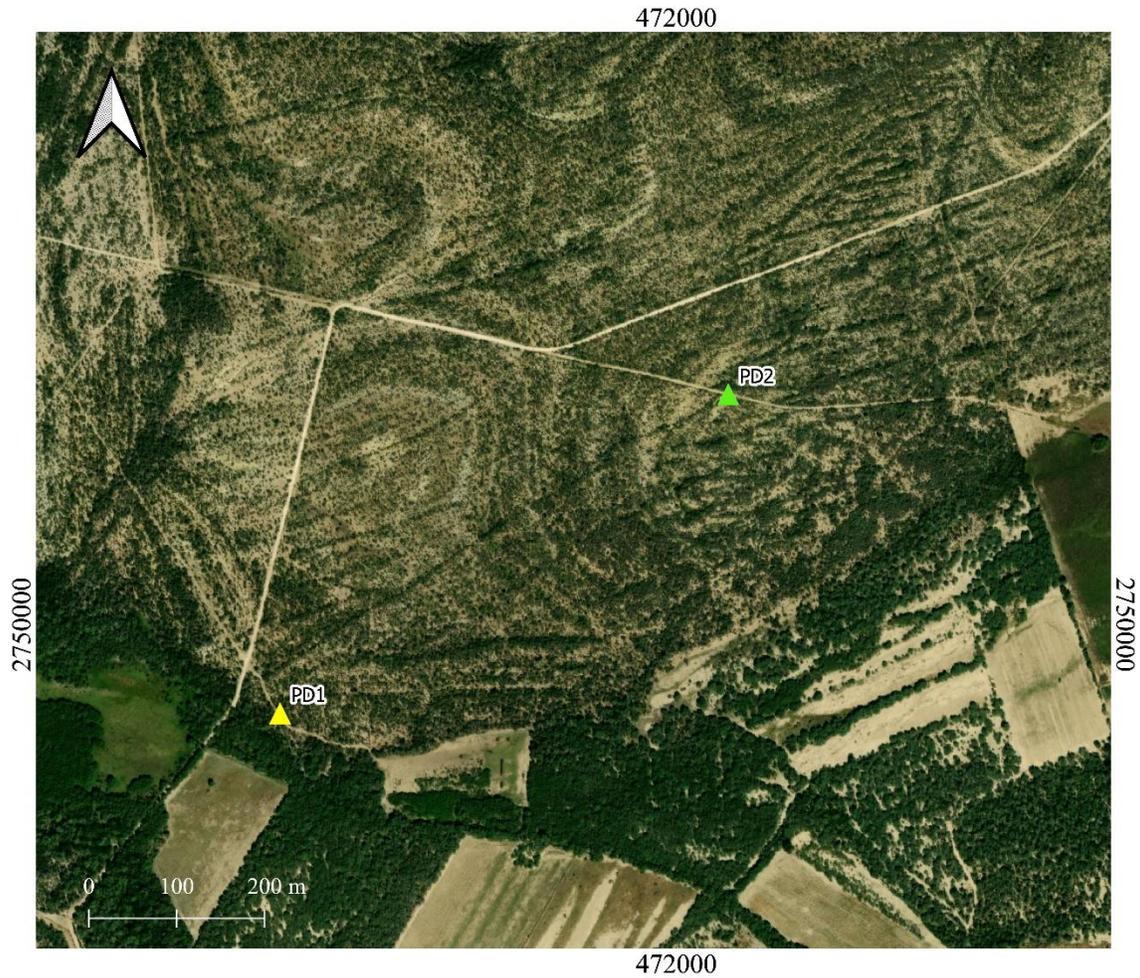
Figura 3.20. Muestras al oeste de Purísima de Conchos, lado oeste del Río San Fernando. Se enfatiza el tipo de litología (aplitas, tobas alteradas de la Fm. San Felipe y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y/o descripción de campo. Se observa el lugar de donde fueron tomados los datos de fracturas en la Fm. San Felipe de la Figura 7. Imagen satelital de *Bing Maps*. Nota: Las muestras PC2 y PC3 se sobreponen en vista satelital por la escala de la imagen.



Leyenda

Muestras	<i>Petrografía-Geoquímica</i>	
	▲ PCD6 (Aplita)	
	<i>Descripción de campo</i>	
	▲ PCD1	Aplitas
	▲ PCD2	
	▲ PCD5	
	<i>Petrografía</i>	
	▲ PCD7	Aplitas
	▲ PCD8	
	▲ PCD3	
	<i>Sedimentarias</i>	
	■ PCD4 (Marga)	

Figura 3.21. Muestras al este de Purísima de Conchos, lado este del Río San Fernando. Se enfatiza el tipo de litología (aplitas, tobas alteradas de la Fm. San Felipe y rocas sedimentarias de la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de *Bing Maps*.



Leyenda

Muestras

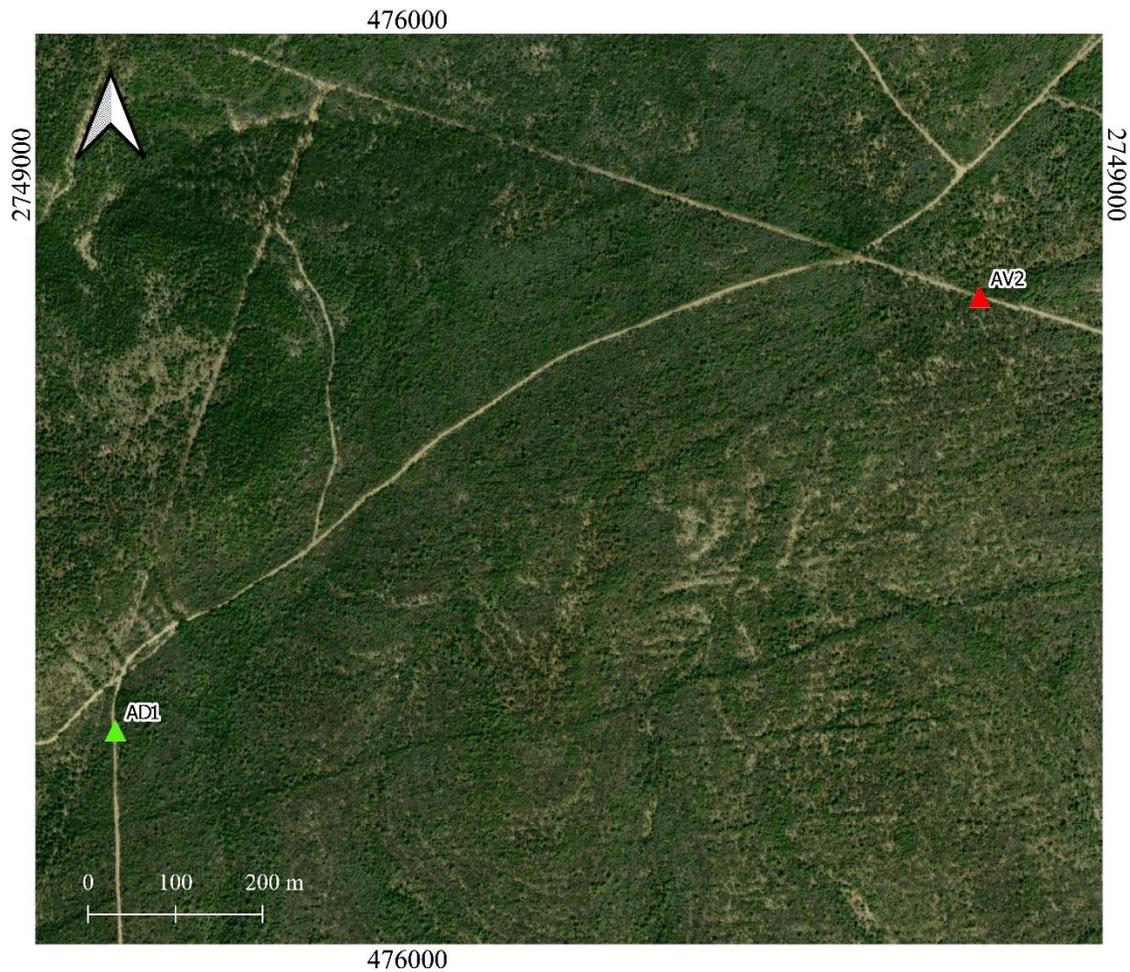
Petrografía

▲ PD1 (Aplita)

Descripción de campo

▲ PD2 (Aplita)

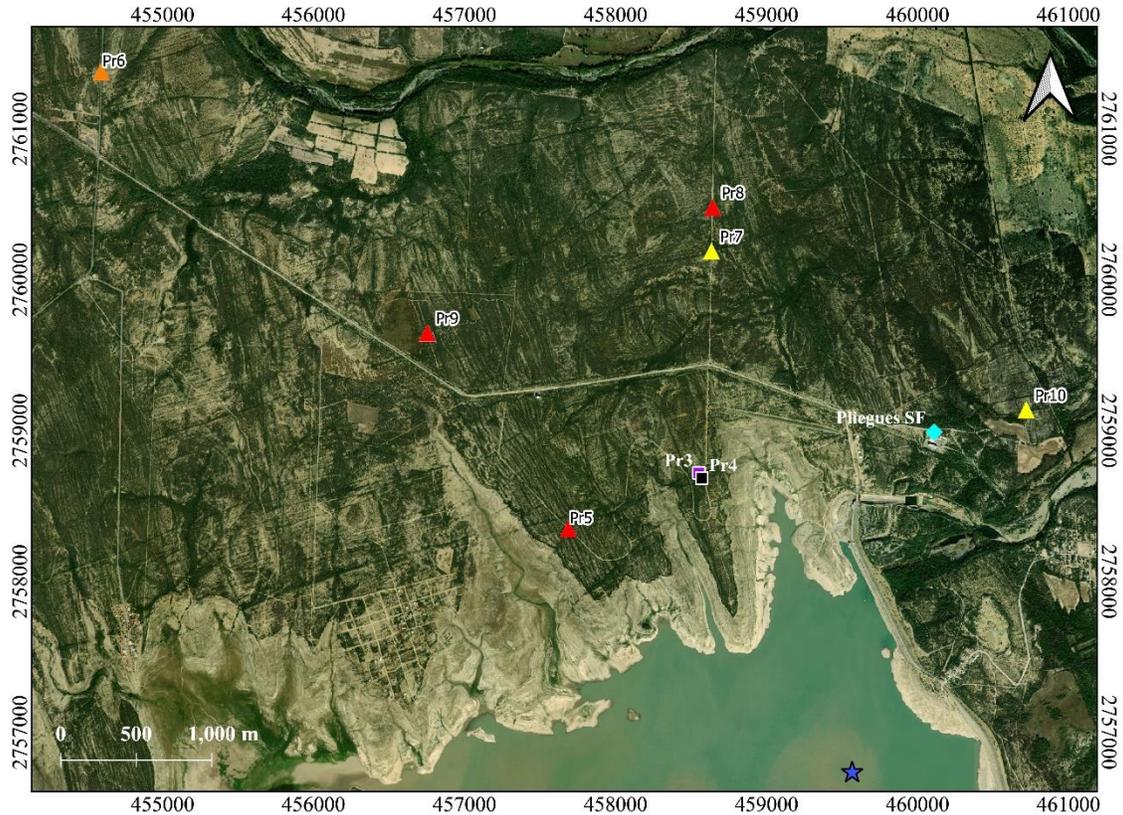
Figura 3.22. Muestras en la localidad Providencia, al sur de las mesetas conformadas por calizas de la Fm. Providencia. Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de *Bing Maps*.



Leyenda

Muestras	<i>Petrografía-Geoquímica</i>	<i>Descripción de campo</i>
▲ AV2 (Aplita)		▲ AD1 (Aplita)

Figura 3.23. Muestras en la localidad El Avileño, al sureste de Purísima de Conchos. Tipos de análisis a los que las aplitas fueron expuestas: petrografía, geoquímica y descripción de campo. Imagen satelital de *Bing Maps*.



Leyenda

Muestras	<i>Petrografía-Geoquímica-Geocronología</i>	<i>Petrografía-Geoquímica</i>	Datos estructurales
	▲ Pr6 (Aplita)	▲ Pr5 ——— Aplitas	
	<i>Petrografía</i>	▲ Pr8 ———	Localidades
	▲ Pr7 ——— Aplitas	▲ Pr9 ———	
▲ Pr10 ———	<i>Sedimentarias</i>		
	■ Pr4 (Marga)		
	■ Pr3 (Marga)		

Figura 3.24. Muestras tomadas al norte de la Presa Cerro Prieto. Se presenta el tipo de litología (aplitas y rocas sedimentarias correspondientes a la roca encajonante). Tipos de análisis a los que las muestras fueron expuestas: petrografía, geoquímica, geocronología y/o descripción de campo. Así mismo se observa el lugar de donde fueron tomados los datos de pliegues en la Fm. San Felipe de la Figura 8. Imagen satelital de *Bing Maps*.



Leyenda

Muestras

Petrografía-Geocronología

▲ SF1 (Toba alterada- Fm. San Felipe)

Figura 3.25. Localización de la muestra SF1, en el límite septentrional de la Sierra de San Carlos-Cruillas. Tipos de análisis a los que la muestra fue expuesta: petrografía, geocronología y descripción de campo. Imagen satelital de *Bing Maps*

4. ANÁLISIS GEOESPACIAL

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados del análisis geoespacial de los lineamientos del CLB, las distintas estructuras de los diques de acuerdo con [Hoek \(1991\)](#) y análisis estructural del EDL en *Wintensor* ([Delvaux, 2006](#)).

4.2 Lineamientos

El modelo digital de elevación (MDE) fue el principal insumo para identificar los diques y otros lineamientos del CLB. Así mismo, se utilizaron imágenes satelitales de *Google Earth Pro* para complementar este análisis.

En el [Anexo 1](#) se presentan las longitudes y direcciones obtenidas para los diques, fracturas, fallas y las relaciones de cuellos volcánicos, que se distribuyen dentro de CLB, aunque más adelante en este apartado se muestran los resultados a manera de estereogramas.

Anteriormente, [Antonio-Durán \(2022\)](#) reportó 378 lineamientos correspondientes a diques, pero con un análisis más fino se detectaron 194 estructuras adicionales, correspondientes al EDL, ubicados inmediatamente al sur de las calizas de la Fm. La Providencia, esta zona no fue descrita en el trabajo anterior. En total se asignaron 572 lineamientos asignados como diques.

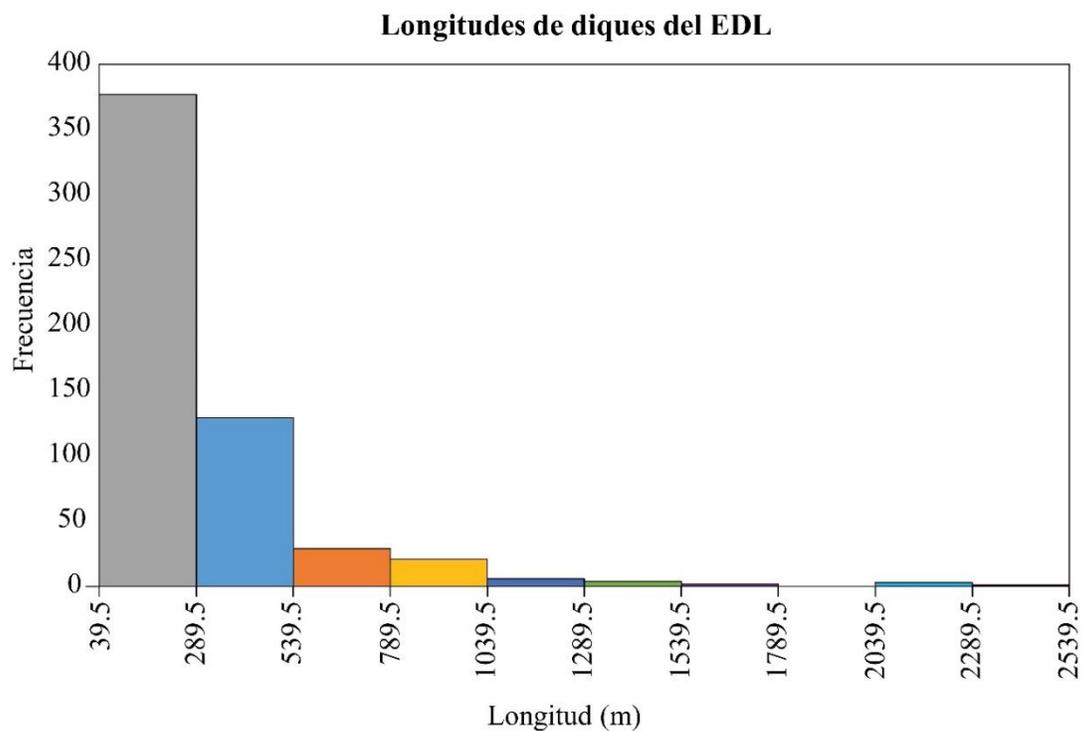
El área del EDL abarca aproximadamente ~ 300 km². De acuerdo con el análisis geoestadístico que se realizó ([Tablas 4.1 y 4.2](#)), los diques que con mayor frecuencia ocurren tienen una longitud de entre 40 y 288.7 m. Los de menor frecuencia tienen longitudes entre 1035.2 y 2527.9 m ([Figura 4.1](#)).

En las fracturas correspondientes del EDL ([Figura 4.2](#)) se observa una familia principal con orientación NE-SW.

En campo y en percepción remota fue posible identificar una familia secundaria que es menos abundante que la familia principal, cuya orientación oblicua a la familia principal, NW-SE, en campo se midieron hasta de $\sim 170^\circ$, por esta razón es que en algunas ocasiones se observan diques enrejados.

Tabla 4.1. Datos estadísticos y tabla de frecuencias de longitudes del EDL.

Datos					
N			572		
Xi			40		
Xn			2527		
Número de clases			10		
Anchura de clase			248.7 (Redondeado a 249)		
Tabla de frecuencias					
No. de clase	Frontera de clases	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia	Marca de clase
1	39.5	40	289	377	164.5
2	289.5	290	539	129	414.5
3	539.5	540	789	29	664.5
4	789.5	790	1039	21	914.5
5	1039.5	1040	1289	6	1164.5
6	1289.5	1290	1539	4	1414.5
7	1539.5	1540	1789	2	1664.5
8	1789.5	1790	2039	0	1914.5
9	2039.5	2040	2289	3	2164.5
10	2289.5	2290	2539	1	2414.5
	2539.5				

**Figura 4.2.** Histograma vs. longitud (m) de diques del EDL.

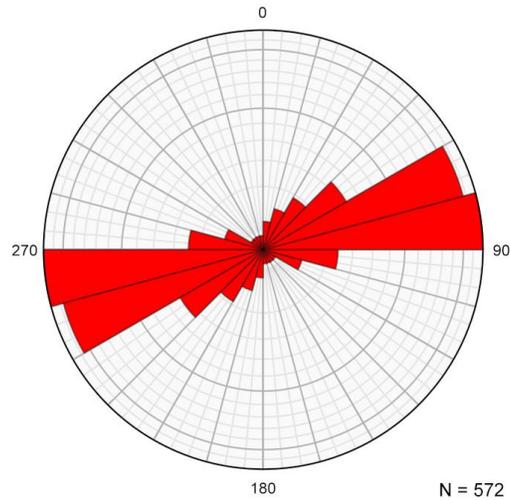


Figura 4.2. Clasificación de familias de fracturas para el Enjambre de Diques Lineares. N= número de diques.

En cuanto a estructuras que no corresponden a diques, en la parte norte del CLB (Figura 4.3) se identificaron 5 lineamientos que en su mayoría son NE-SW, se registraron debido a que las estructuras tienen similitudes geoespaciales a los diques. Sin embargo, no se obtuvo una descripción geológica sensu estricto, así que se marcaron como fracturas.

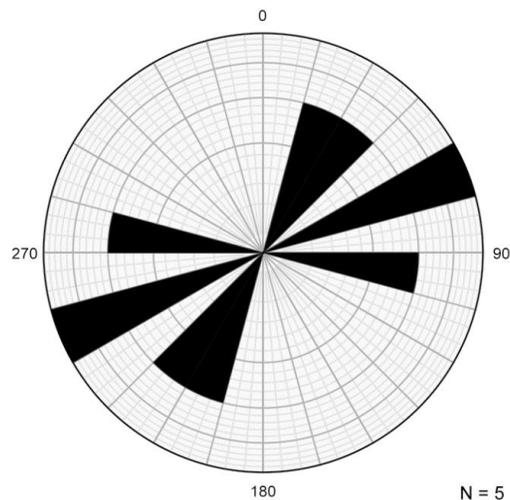


Figura 4.3. Fracturas en la parte norte del CLB. N= número de fracturas.

En el caso de la SSCC se registraron el número de estructuras geológicas vistas en el análisis geoespacial (57 fracturas) en conjunto con los datos proporcionados por el INEGI (2003a; 2003b) 142 fracturas, ejes estructurales, estructuras tabulares y fallas, además de las 2 fallas normales Palos Blancos y El Mulato. La orientación preferencial de las estructuras geológicas es NW-SE, aunque hay fracturas en direcciones oblicuas y perpendiculares a esta orientación principal (Figura 4.4).

La falla Palos Blancos tiene una orientación NW-SE y una longitud de ~50 km. La falla El Mulato tiene una orientación general NW-SE y una longitud de ~ 35 km.

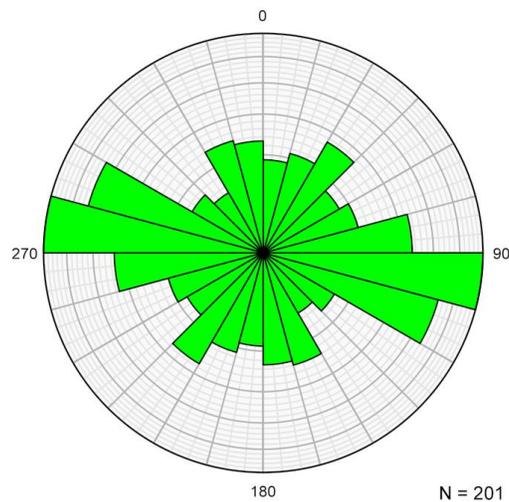


Figura 4.4. Fracturas y fallas en la parte septentrional de la SSCC. N=número de estructuras geológicas mencionadas en el texto que refiere a esta imagen.

En cuanto a los cuellos volcánicos (Figura 4.5), los lineamientos inferidos tienen orientación principal NW-SE. Una de estas alineaciones tiene una dirección de 145°.

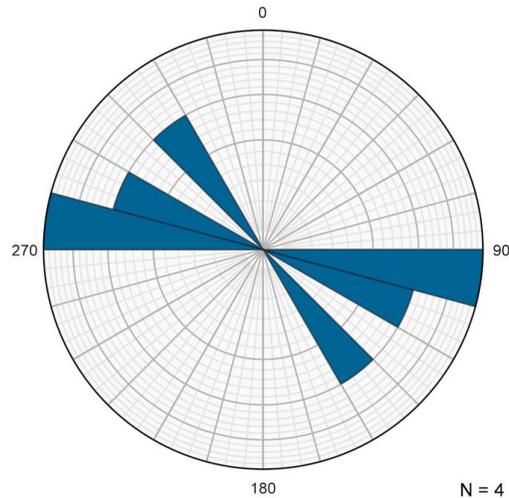


Figura 4.5. Lineamientos inferidos de los cuellos volcánicos de Burgos. N= número de alineaciones inferidas de cuellos volcánicos.

En la [Figura 4.6](#) se presenta el mapa que resume las orientaciones de las estructuras geológicas anteriormente descritas. Estas estructuras (diques, fallas, fracturas y alineación de cuellos volcánicos) se encuentran visibles sobre el modelo digital de elevación donde se distinguen por ser de color gris oscuro debido a la generación del mapa de sombras.

Cabe resaltar, como se explicó en la parte metodológica, que las estructuras antropogénicas (carreteras y propiedades) y los afluentes de ríos pueden causar confusión en la percepción remota de los lineamientos.

Para solucionar lo anterior se trasladaron otros archivos vectoriales como redes hidrográficas y de carreteras ([Antonio-Durán, 2022](#)), además del trabajo de campo y exploración geológica para corroborar la existencia de las estructuras y un mejor control de los datos. En este mapa también se indica la posición geográfica (flechas) de cada conjunto de datos definidos los estereogramas.

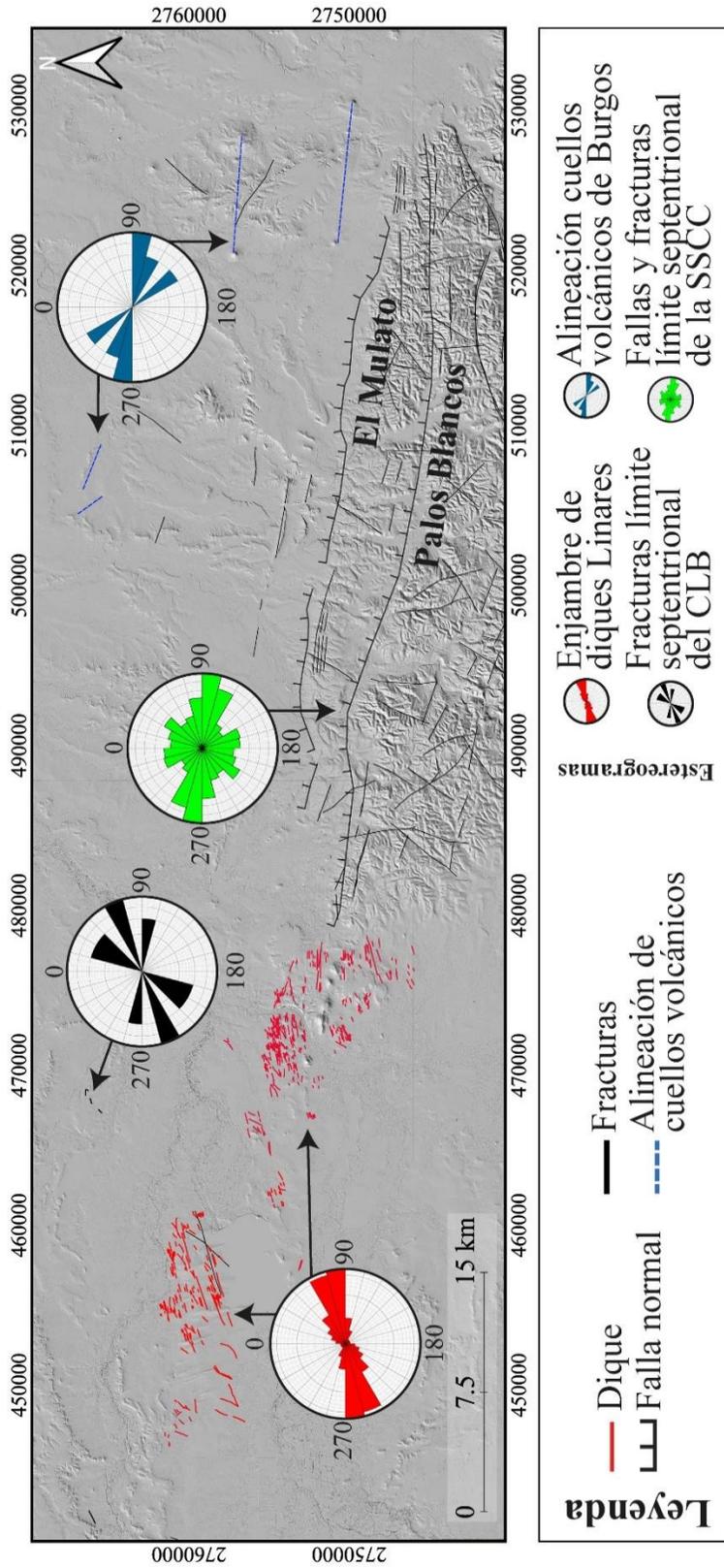


Figura 4.6. Lineamientos del Corredor Linares-Burgos. Se incluyen los estereogramas con las orientaciones de los diques, fracturas y fallas de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC), la alineación de cuellos volcánicos de Burgos y otras fracturas ubicadas en el límite norte del Corredor Linares-Burgos (CLB).

4.3 Clasificación geoespacial de diques

Se identificaron 572 lineamientos correspondientes a los diques. Estas estructuras se encuentran alineadas, aunque presentan distintos arreglos. De acuerdo con la clasificación de [Hoek \(1991\)](#) es posible observar arreglos de diques irregulares ([Figura 4.7](#)), *en echelon* ([Figura 4.8](#)), anastomosados ([Figura 4.9](#)) y en *zigzag* ([Figura 4.10](#)), estos últimos acuñados a las estructuras planares previas.

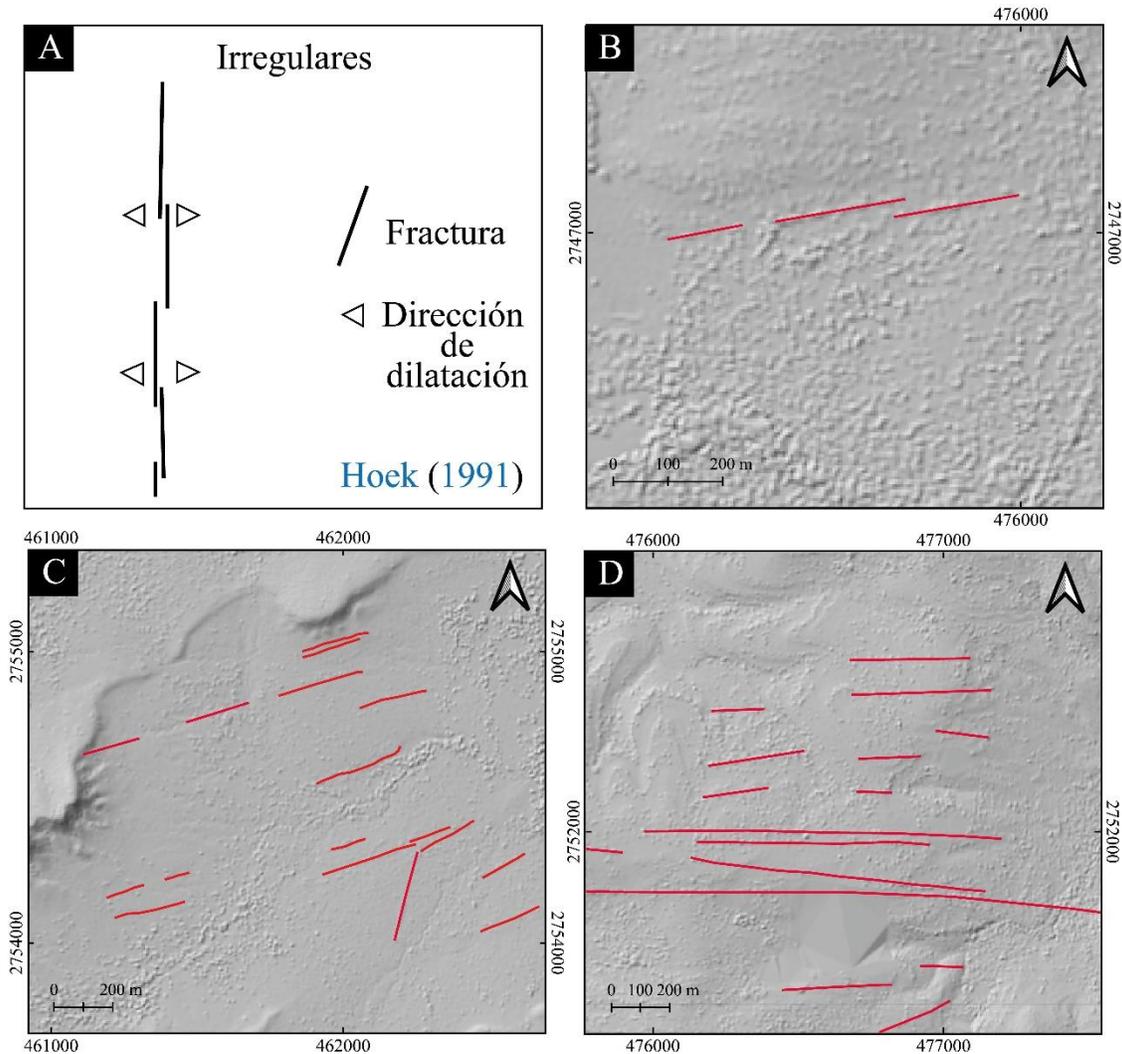


Figura 4.7. Diques irregulares (A) de acuerdo con la clasificación de [Hoek \(1991\)](#), en el Enjambre de Diques Lineares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.

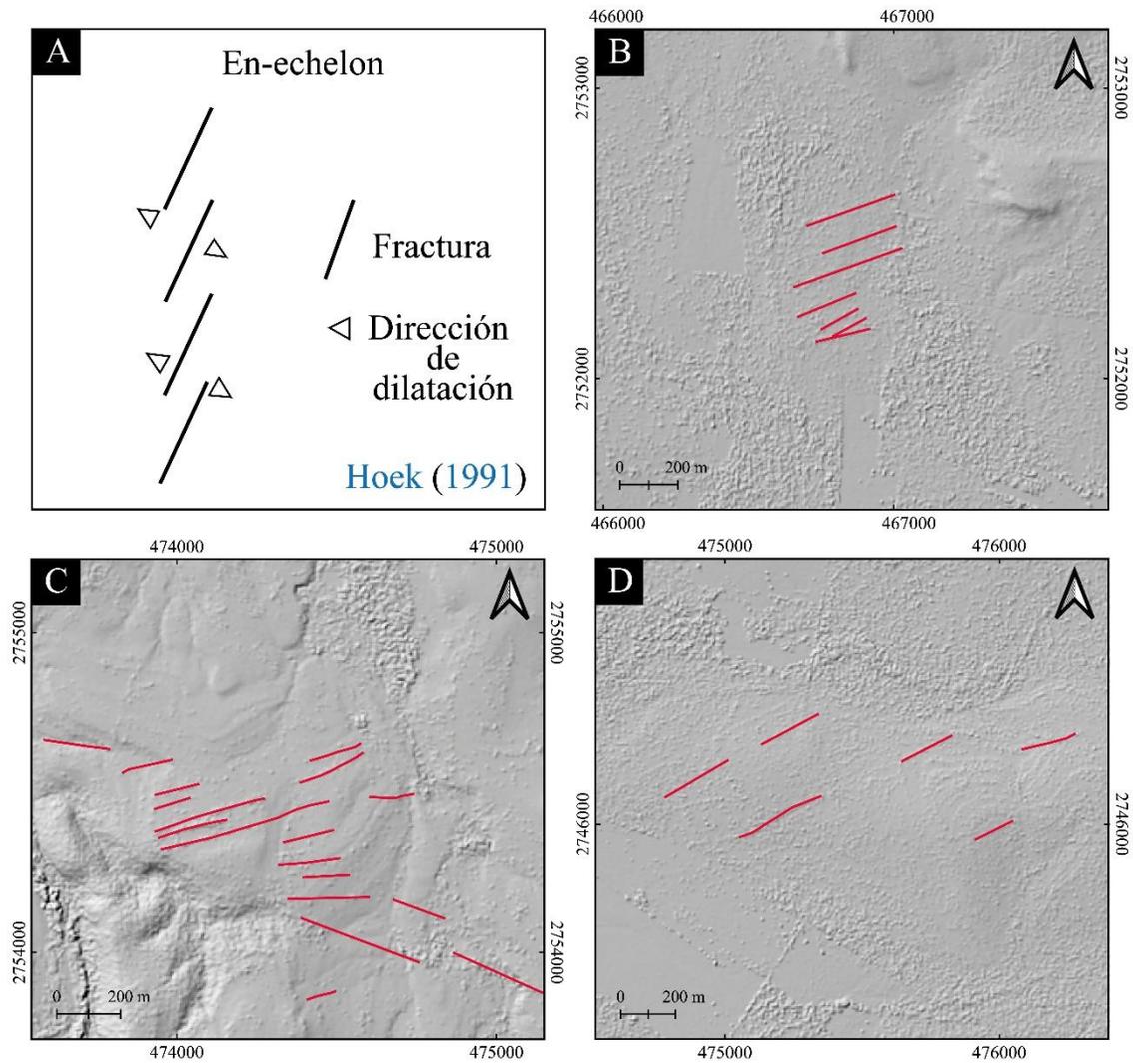


Figura 4.8. Diques *en echelon* (A) de acuerdo con la clasificación de [Hoek \(1991\)](#), en el Enjambre de Diques Lineares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.

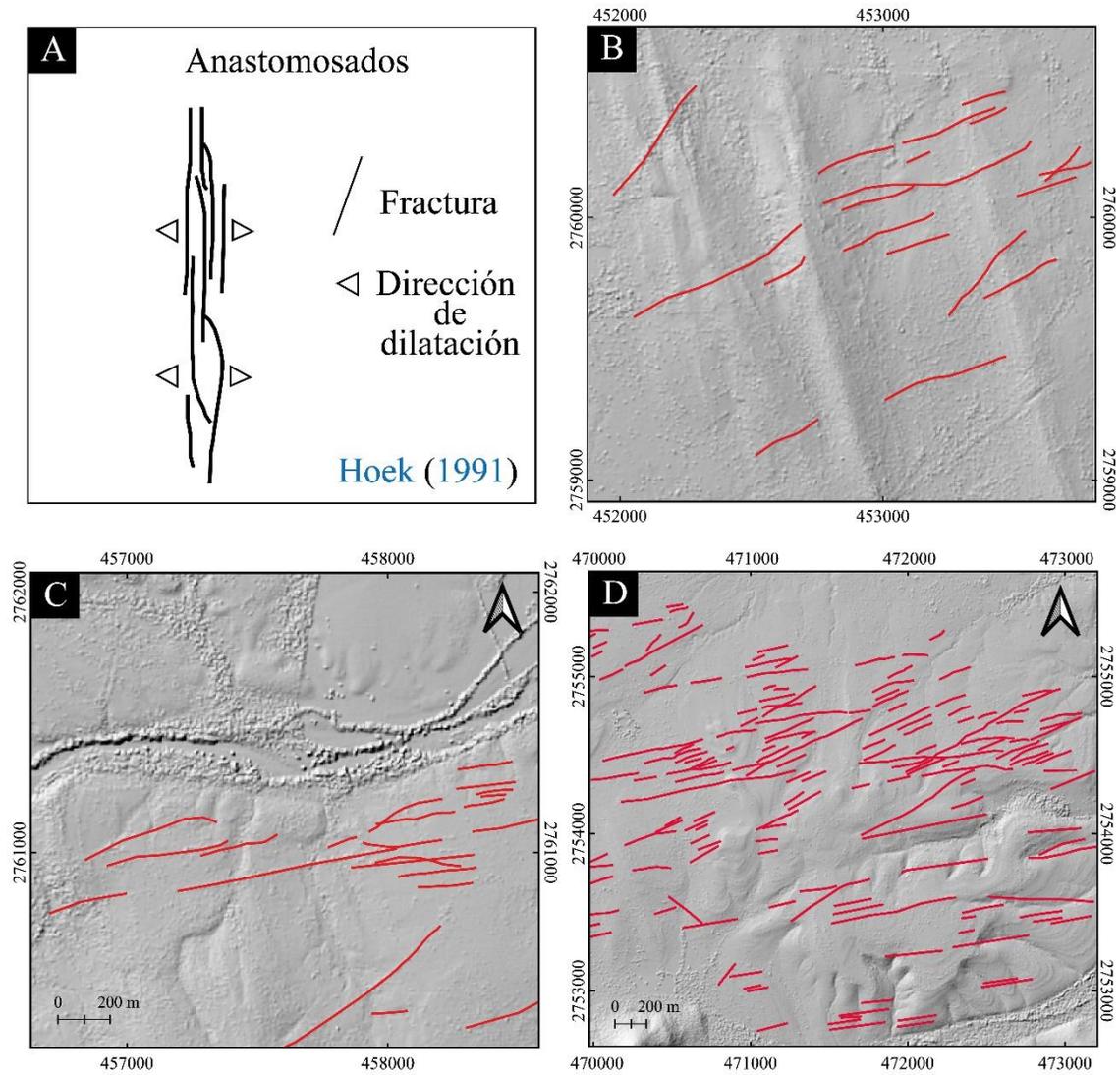


Figura 4.9. Diques anastomosados (A) de acuerdo con la clasificación de [Hoek \(1991\)](#), en el Enjambre de Diques Lineares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.

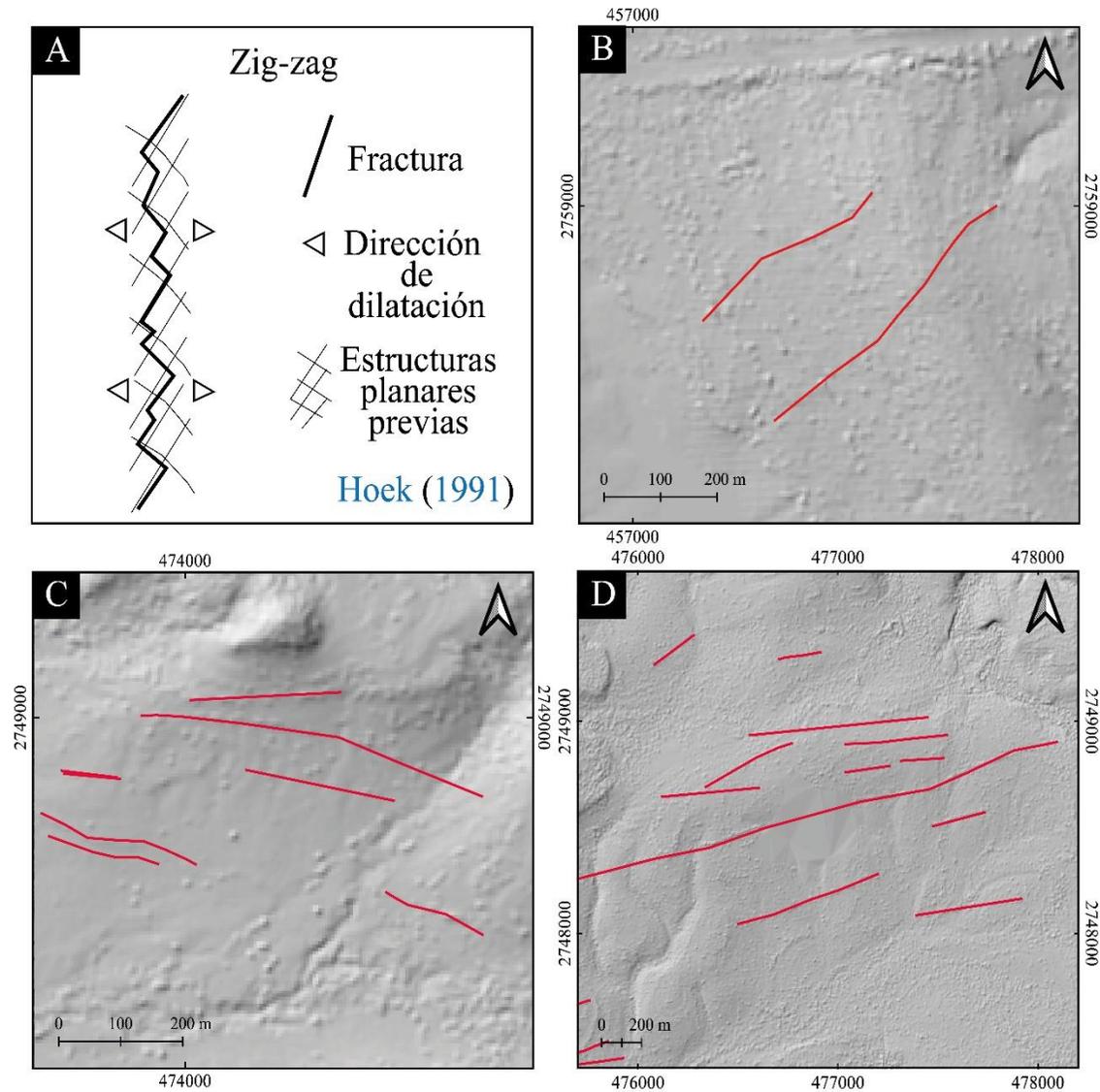


Figura 4.10. Diques zigzag (A) de acuerdo con la clasificación de Hoek (1991), en el Enjambre de Diques Linares (B, C y D). Las líneas rojas corresponden a los diques.

Adicionalmente, se detectaron fracturas conjugadas donde se emplazaron los diques, algunas de ellas forman ángulos de $<60^\circ$ entre cada par de fracturas (Figuras 4.11 – 4.14). También se detectaron ángulos entre 60° y 90° (Figura 4.15).

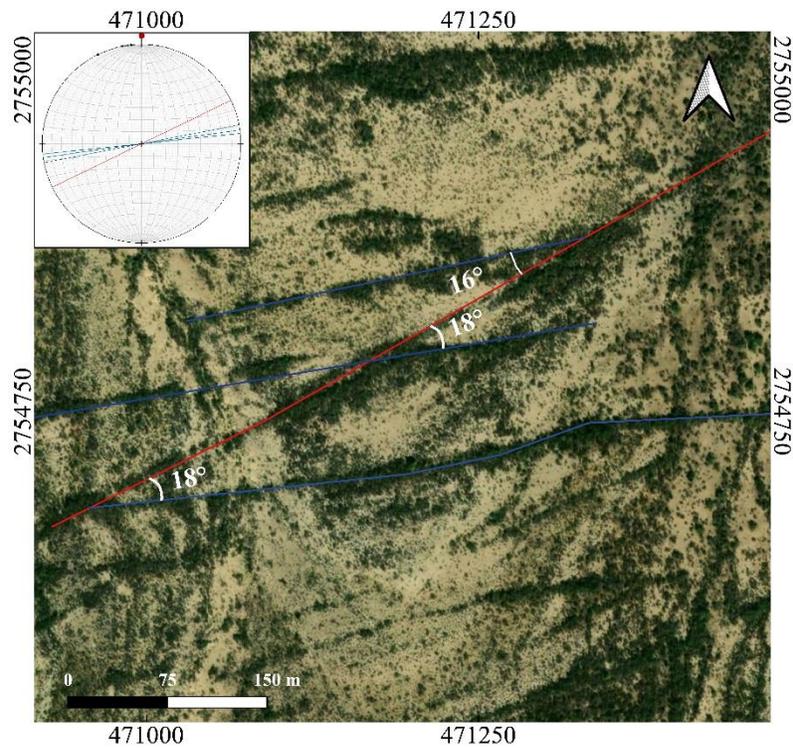


Figura 4.11. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a diques.

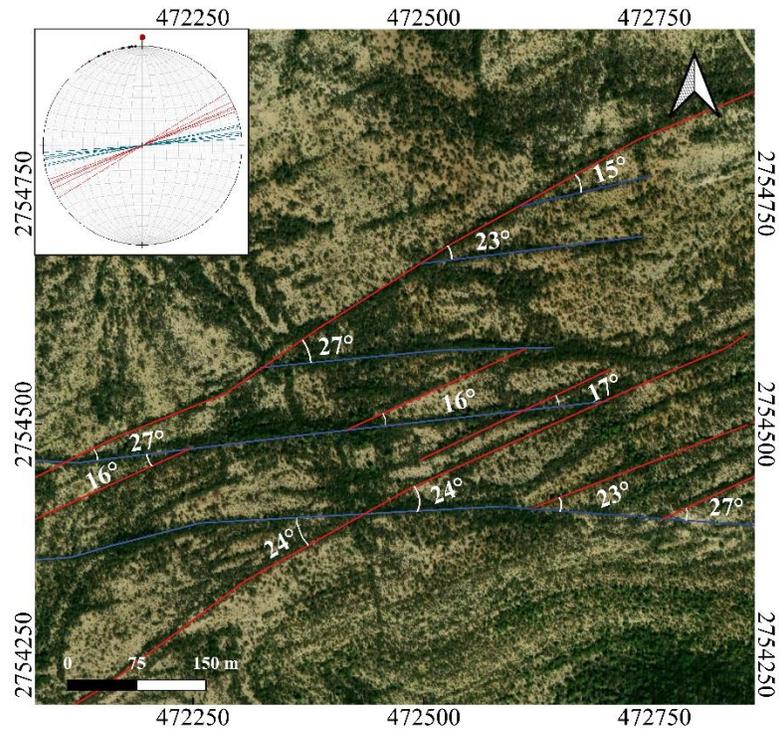


Figura 4.12. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.

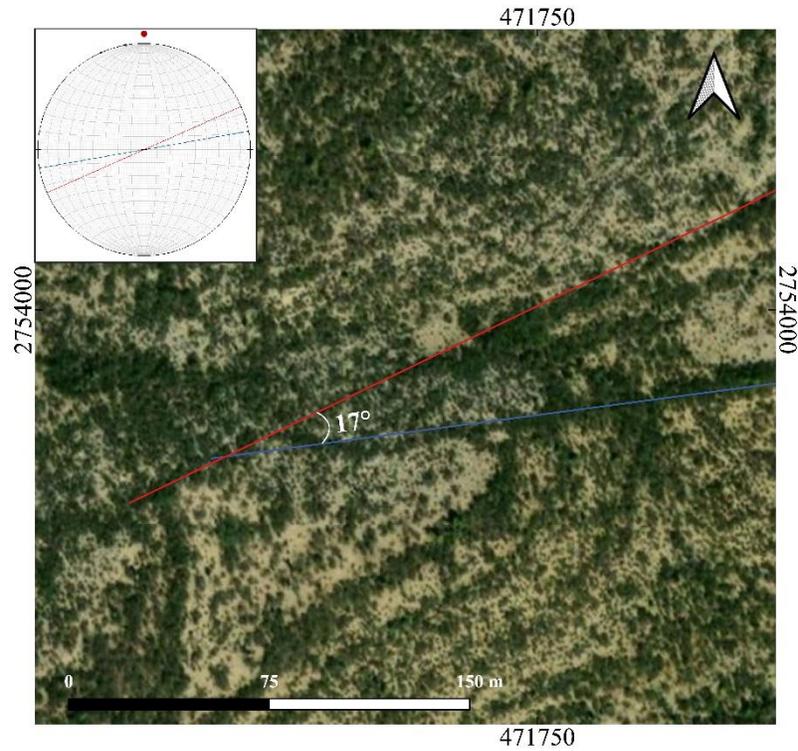


Figura 4.13. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.

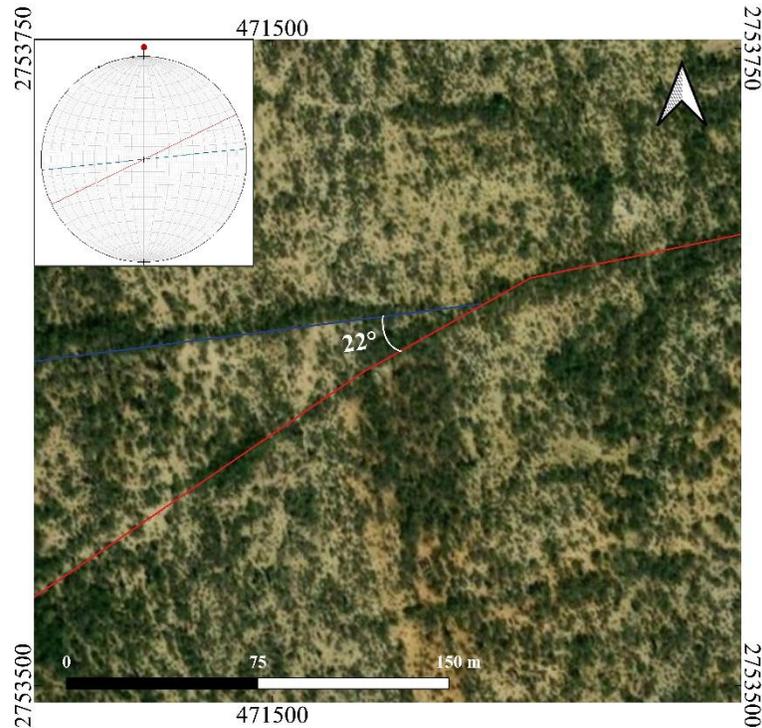


Figura 4.14. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques.

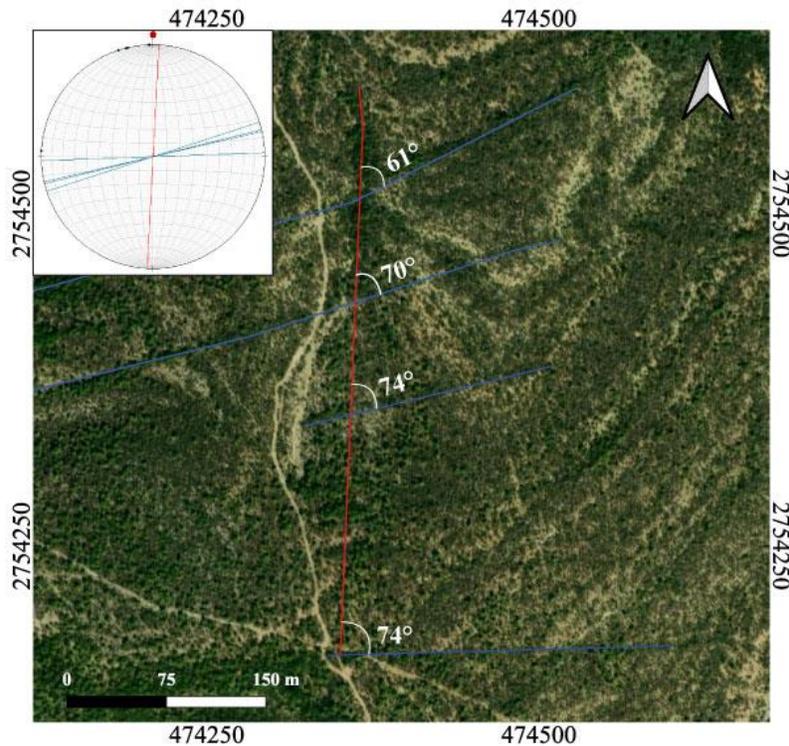


Figura 4.15. Ángulos de fracturas conjugadas con diques emplazados y estereograma de las fracturas. Las líneas rojas y azules corresponden a los diques. Los diques tienen ángulos $> 60^\circ$ y $< 90^\circ$.

4.4 Análisis estructural en *Wintensor*

Con la información obtenida del análisis geoespacial, datos corroborados en campo y la representación estereográfica de los diques, se realizó un análisis de paleoesfuerzos mediante el software *Wintensor* (Delvaux, 2006; Figura 4.16).

El tensor de esfuerzos calculado para las fracturas que fueron aprovechadas por los diques, indica un régimen de esfuerzos extensionales con un valor de R de 0.9, donde $\sigma_3 = S_{\text{hmin}}$ ($00^\circ/119^\circ$) y $\sigma_2 = S_{\text{Hmax}}$ ($00^\circ/257^\circ$). La dirección vertical $\sigma_1 = S_v$ es ($90^\circ/119^\circ$).

El procesamiento y análisis revela que la orientación del paleoesfuerzo del sistema de fracturas principal es NW-SE. Este tensor de esfuerzos corresponde al paleoesfuerzo al que fueron estratos de la Fm. San Felipe para generar las fracturas que posteriormente fueron ocupadas por los diques. A continuación se muestran otros regímenes estructurales

geológicos conocidos la región para comparar con el paleoesfuerzo aquí calculado y alguna posible relación tectónica.

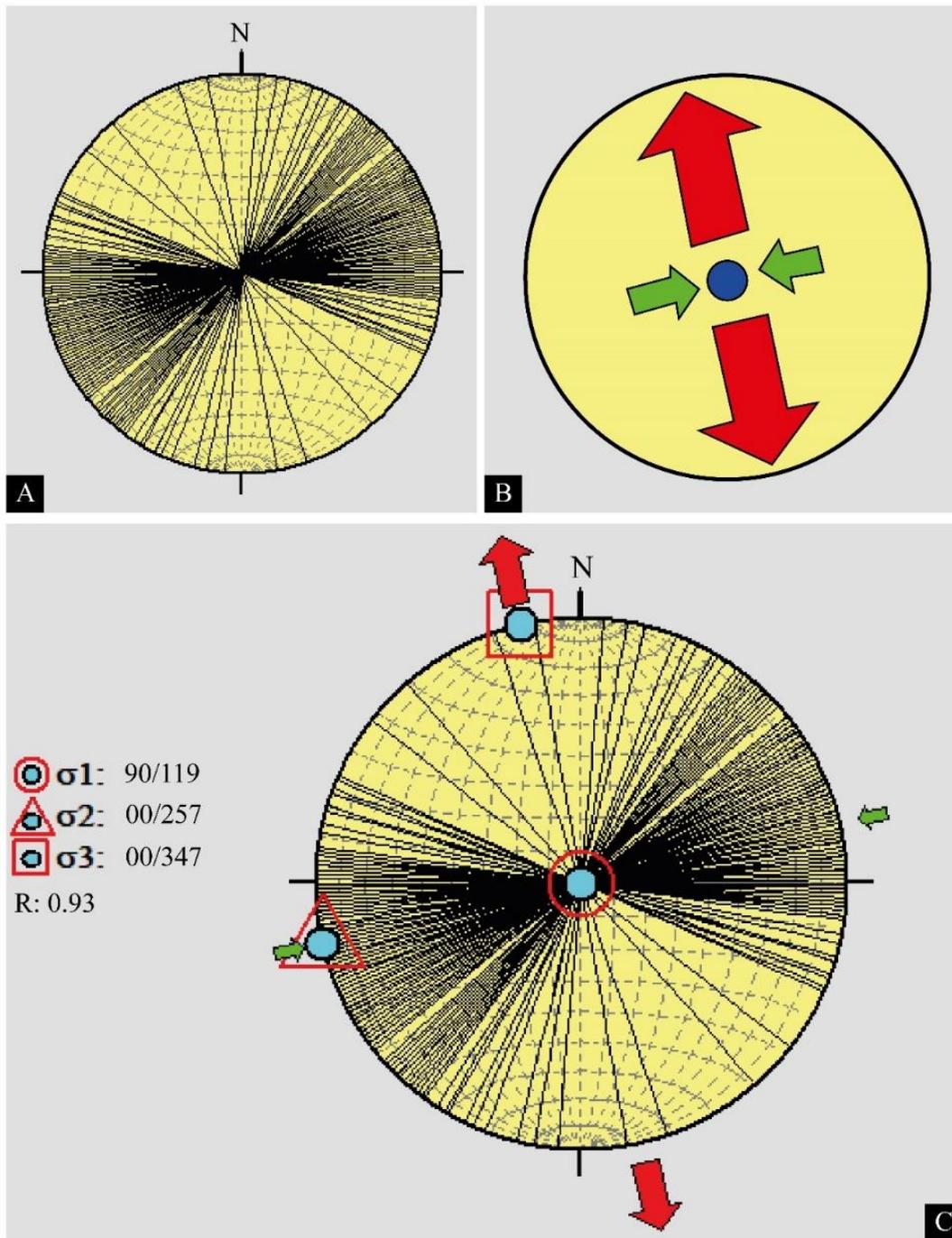


Figura 4.16. Análisis estructural en *Wintensor* (Delvaux, 2006). (A) Estereograma de los planos de los diques del EDL. (B) Dirección de σ_3 ($00^\circ/347^\circ$). (C) Planos de los diques y direcciones de σ_1 , σ_2 y σ_3 .

4.4.1 *Basin and Range*

Aunque se han propuesto diversos modelos e hipótesis para la provincia *Basin and Range* (BS) la más aceptada corresponde a los procesos de intraplaca, estos relacionados a la velocidad y dirección de las placas Pacífico-Norteamérica (Zoback *et al.*, 1981; Sonder y Jones, 1999).

Además, Jones *et al.* (1996) indican que en un entorno intraplaca, la deformación puede ser impulsada por la flotabilidad debido a las diferencias en la energía potencial gravitacional. Este mecanismo puede provocar una extensión cortical en la parte superior de la corteza. En la provincia BS, se han identificado fallas normales que evidencian la influencia de esfuerzos tensionales resultantes de la flotabilidad y la baja densidad del manto.

Según Wernicke *et al.* (1987), la extensión comenzó en el Eoceno Temprano al sur de Columbia Británica en Canadá, así como en el noreste de Washington, Idaho y Montana en Estados Unidos de Norteamérica. Posteriormente migró a la región de la Gran Cuenca.

Durante el Mioceno Medio, los patrones de extensión estaban presente en el norte y sur, sin embargo los patrones de propagación no fueron evidentes. A pesar de esto, la dirección del esfuerzo principal mínimo se mantuvo orientada de NE a SW a lo largo de toda la provincia (Wernicke, 1992).

En el Mioceno Tardío el esfuerzo principal rotó 45° en sentido horario, cambiando hacia el NW- SE (Zoback, 1981; Wernicke, 1992).

Algunas regiones del norte de México pertenecen al sur de esta provincia, recibiendo el nombre de Cuencas y Sierras. Esta se caracteriza por cuencas elongadas en dirección NNW y sierras con elevación de ~2 km (Herny y Aranda-Gómez, 1992).

Henry y Aranda-Gómez (2000) mencionan la extensión del norte de México entre los 13 a 5.5 Ma como resultado del movimiento de placas Pacífico-Norteamericana, con dirección ENE.

Con datos de mecanismos focales, direcciones de elongación en barrenos, diques y fallas, Suter (1991) concluyó que el N-NE de México actualmente se encuentra en un régimen de extensión ($S_V > S_{NNW} > S_{ENE}$). Además, los registros de sismicidad de esta región sostienen

que el N-NE de México es una zona tectónicamente activa ([Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008](#)).

Aunque la provincia BR, o provincia Cuencas y Sierras, corresponde a un régimen extensional registrado en el noreste de México, el tensor del paleoesfuerzo no coincide, ya que el del EDL es NW-SE. También es importante resaltar que las principales estructuras correspondientes a esta provincia tienen una orientación NNW, mientras que el EDL tiene estructuras con orientación preferencial NE-SW.

4.4.2 Sierra Madre Oriental

De acuerdo con [Fitz-Díaz *et al.* \(2018\)](#) el Orogeno Mexicano, nombre que se le asignó al complejo de la Sierra Madre Oriental, registra por lo menos tres etapas geotectónicas importantes que se describen a continuación.

Los autores señalan que la primera etapa geotectónica se caracteriza por una cuenca oceánica acrecionada y rocas de arco magmático en el basamento. Posteriormente, se forma una cuenca orogénica de antepaís, conocida como el Cinturón Plegado y Cabalgado Mexicano (MFTB), compuesta por rocas carbonatadas imbricadas y plegadas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior y estratos de cuenca de antepaís del Cretácico Superior. Finalmente, describen la presencia de un conjunto de cuencas de antepaís del Cretácico Superior al Eoceno, que están plegadas e invertidas y se encuentran al noreste y este del MFTB ([Fitz-Díaz *et al.*, 2018](#)).

[Padilla y Sánchez \(1985\)](#) reporta que la SMO fue plegada durante un empuje tectónico del Cretácico Tardío al Paleógeno con dirección ENE, generando diferentes patrones de pliegues y fallas.

Por otra parte, [Fitz-Díaz *et al.* \(2018\)](#) mencionan que la subducción de la placa de Farallón desde principios del Cretácico Tardío hasta el Eoceno fue el principal mecanismo impulsor del acortamiento en el Orogeno Mexicano. Además, los autores reportan que hubo tres etapas de deformación entre 93-80 Ma, 57-64 Ma y 55-43 Ma.

Estructuralmente, Sierra Madre Oriental (SMO) se conforma por pliegues de distintas longitudes y amplitudes. El rumbo de las estructuras mantienen una orientación preferencial

NNW, cambiando a E-W en la saliente de Monterrey, hasta a una NE entre Saltillo y Monterrey (Padilla y Sánchez, 1985; Fitz-Díaz *et al.*, 2018).

En la Curvatura de Monterrey, la distribución de las evaporitas de la Fm. Minas Viejas además de la ubicación de las paleoislas Bloque de Coahuila y Tamaulipas, condicionaron un empuje dirección ENE, controlando la geometría y el estilo de deformación. Lo anterior provocó un cambio de rumbo de las estructuras geológicas del NNW-SSE a E-W en esta área (Padilla y Sánchez, 1985; Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000).

La SMO, a diferencia del EDL, fue tectónicamente generada por un empuje con dirección preferencial ENE. En el caso del EDL se trata de un evento de extensión con dirección NW-SE. Cabe resaltar que las estructuras geológicas generadas en ambos eventos son distintas entre sí. Mientras que en la SMO se generaron pliegues, fallas y cabalgaduras como evidencias de eventos compresionales, el EDL se caracteriza por tener fracturas como evidencia de un evento extensional.

5. ANÁLISIS PETROGRÁFICO

5.1 Introducción

En este capítulo se describen las láminas delgadas de las muestras que se recolectaron en el EDL. Las muestras colectadas son tanto ígneas como sedimentarias. A continuación, se presentan las características para las diferentes secciones delgadas. El tamaño original de todas las fotomicrografías es de 3.77 x 2.83 mm.

5.2 Muestras en Presa Cerro Prieto

5.2.1 Aplitas – muestras Pr7, Pr8, Pr9 y Pr10

La aplita Pr7 (Figura 5.1) tiene una textura microporfirítica, con una matriz fina compuesta por microcristales de cuarzo y feldespatos. Contiene fenocristales de cuarzo y feldespato alcalino. Los feldespatos alcalinos tienen formas prismáticas subhedrales, relieve bajo, son incoloros a turbios y en algunos casos se encuentran intemperizados. El cuarzo se distingue por su forma granular anhedral, con bordes irregulares, es incoloro, relieve bajo y extinción ondulosa. La distribución de los cristales es aleatoria y no miden más de 100 μm .

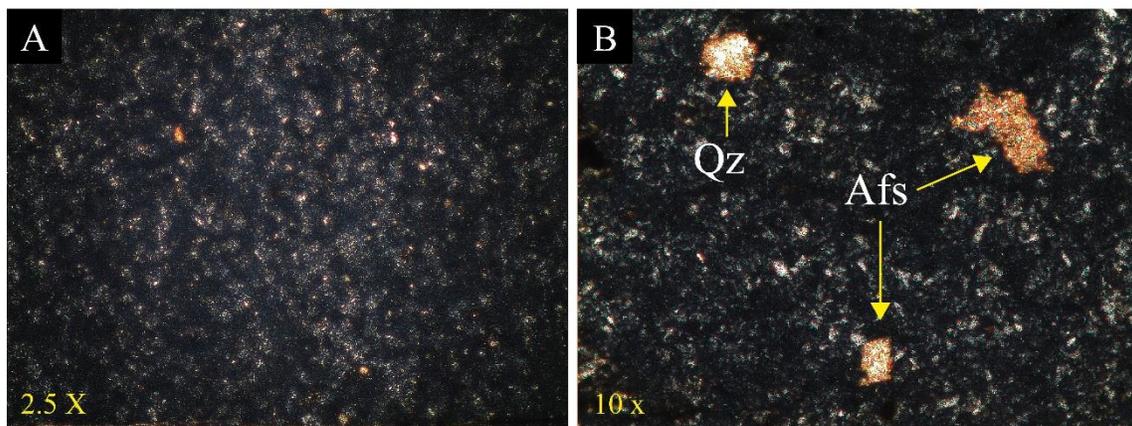


Figura 5.1. Microfotografías de aplita, muestra Pr7. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La aplita Pr8 (Figura 5.2) presenta una textura microporfirítica con una matriz compuesta primordialmente por microcristales de cuarzo. Se observan fenocristales de cuarzo y feldespatos alcalinos. A pesar de que la muestra está intemperizada, se distinguen estos minerales por sus características ópticas. Los cristales de feldespatos alcalinos son

prismáticos subhedrales y con colores de interferencia del primer orden. Los cristales de cuarzo se distinguen por tener formas granulares y con bordes irregulares.

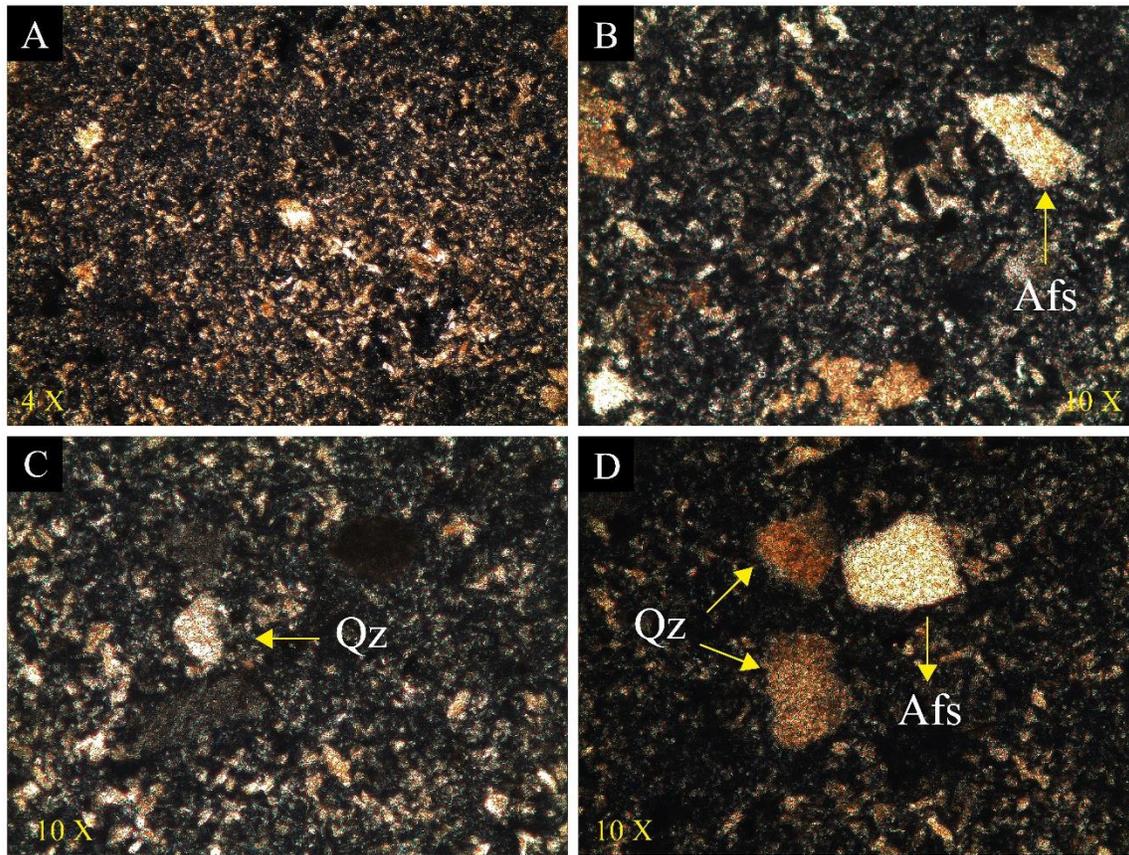


Figura 5.2. Microfotografías de aplita, muestra Pr8. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Objetivo 10x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La muestra de la aplita Pr9 ([Figura 5.3](#)) presenta una textura porfirítica. Contiene fenocristales de feldespatos alcalinos, cuarzo y biotita, embebidos en una matriz compuesta principalmente por microcristales de cuarzo y feldespato alcalino. Los feldespatos alcalinos tienen formas prismáticas, euhedrales y son incoloros. El cuarzo tiene forma granular, incoloro y con bordes irregulares. La biotita ocurre de forma fibrosa y tabular, subhedral, color marrón rojizo, pleocroísmo de color crema al marrón rojizo, tiene relieve medio, color de interferencia del segundo orden y ángulo de extinción recto.

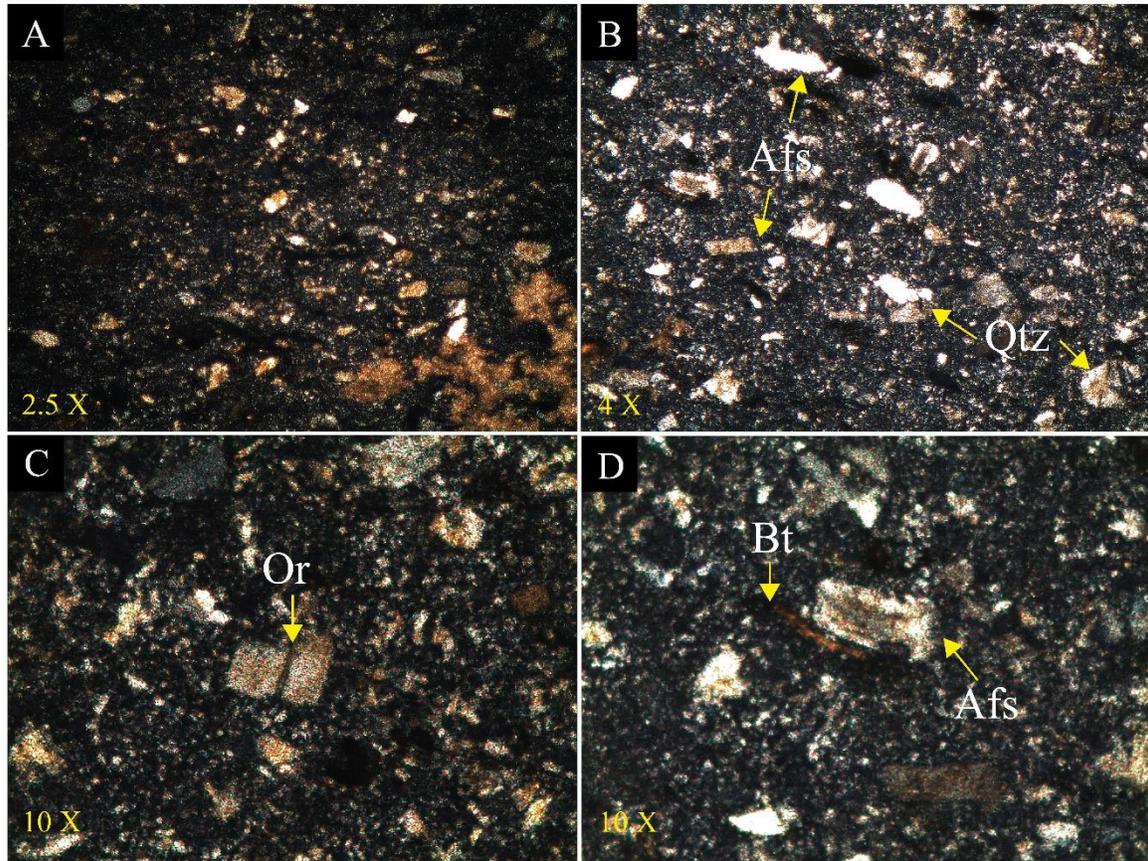


Figura 5.3. Microfotografías de aplita, muestra Pr9. A. Textura microporfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B. Cristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos. C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespatos alcalinos (Afs) y biotita (Bt). Objetivo 10x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La aplita Pr10 (Figura 5.4) tiene una textura microporfirítica con una matriz compuesta por microcristales de cuarzo y feldespato alcalino. El feldespato alcalino es prismático, euhedral e incoloro.

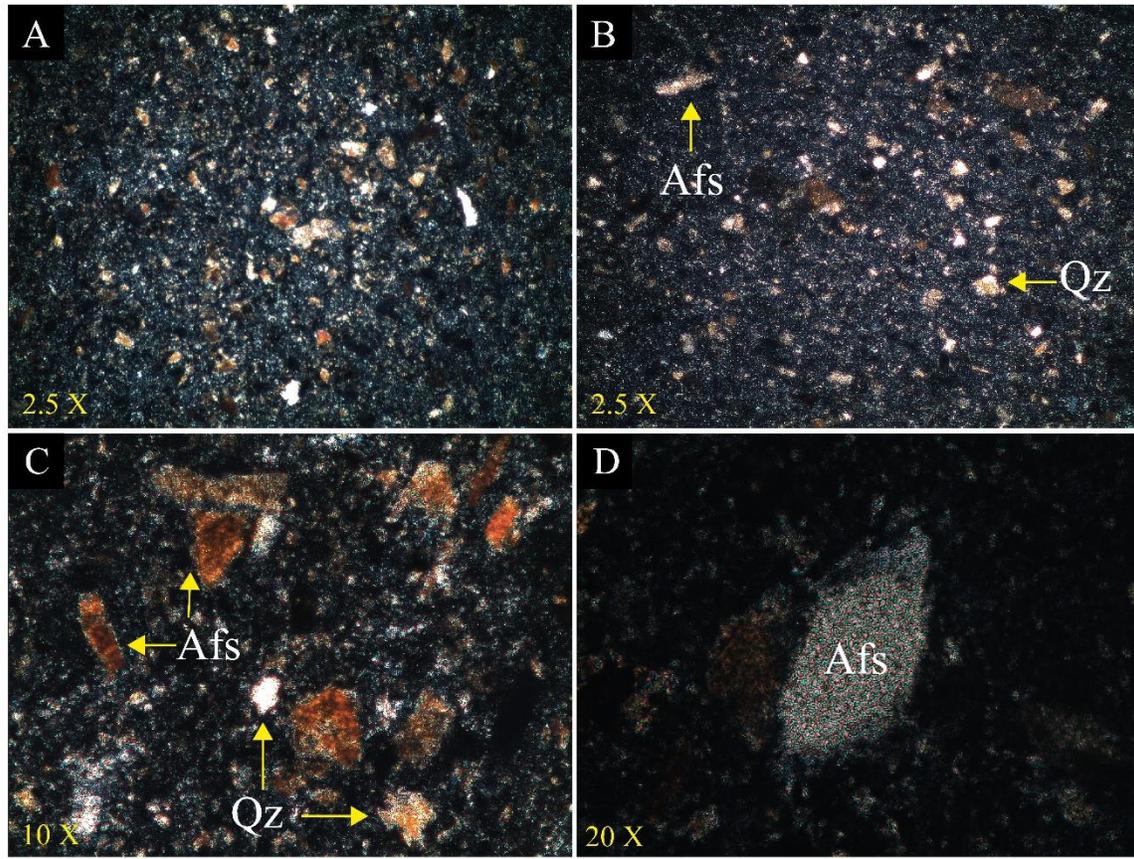


Figura 5.4. Microfotografías de aplita, muestra Pr10. A y B. Textura microporfirítica de la aplita Pr10, con fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos. Objetivo 2.5x. C. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespatos alcalinos (Afs). Objetivo 10x. D. Cristal de feldespato alcalino. Objetivo 20x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

5.3 Muestras en Purísima de Conchos

5.3.1 Aplitas - muestras PD1, AV2, PCD3, PCD7 y PCD8.

La muestra correspondiente a la aplita PD1 (Figura 5.5), se encuentra evidentemente intemperizada y tiene parches de calcita secundaria. Sin embargo, es posible observar su matriz microporfirítica compuesta por microcristales de cuarzo y feldespato alcalino. Los primeramente mencionados se distinguen por su extinción ondulosa y sus formas granulares anhedrales.

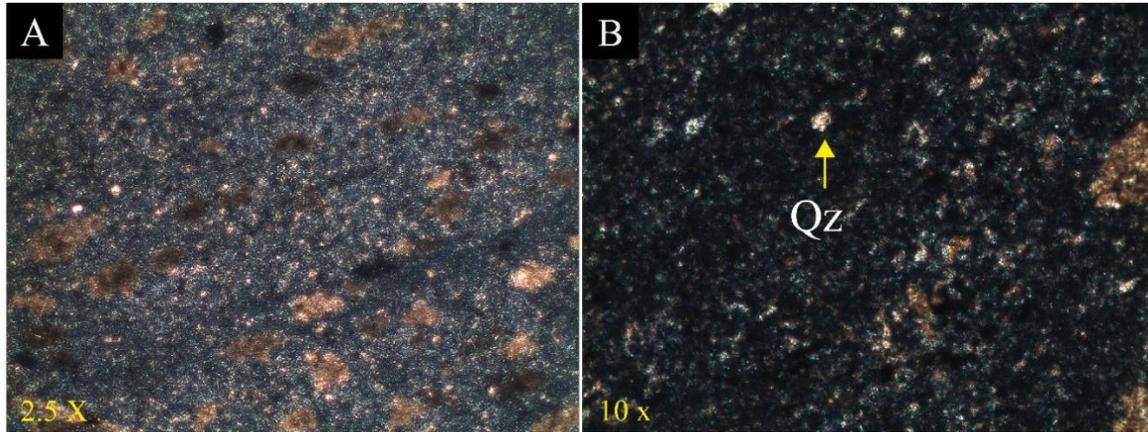


Figura 5.5. Microfotografías de aplita, muestra **PD1**. A. Textura microporfirítica de la aplita PD1. Objetivo 2.5x. B. Fenocristales de cuarzo (Qz). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La aplita AV2 (Figura 5.6) muestra una textura porfirítica. La matriz está compuesta por cuarzo y feldespatos alcalinos. Presenta una variedad de cristales como feldespato alcalino, plagioclasa, cuarzo, biotita y circón. El feldespato alcalino es prismático, euhedral, relieve bajo e incoloro. La plagioclasa tiene formas con hábito tabular, es incoloro, no presenta pleocorismo, tienen maclas polisintéticas, relieve bajo, los colores de interferencia del primer orden y el ángulo de extinción es de $\sim 45^\circ$.

La biotita tiene forma tabular, subhedral, con relieve medio, pleocroísmo de crema a marrón, color de interferencia del segundo orden y ángulo de extinción recto. El circón tiene un color de interferencia del tercer orden, con una forma prismática anhedral con terminación piramidal, relieve alto, incoloro y ángulo de extinción recto.

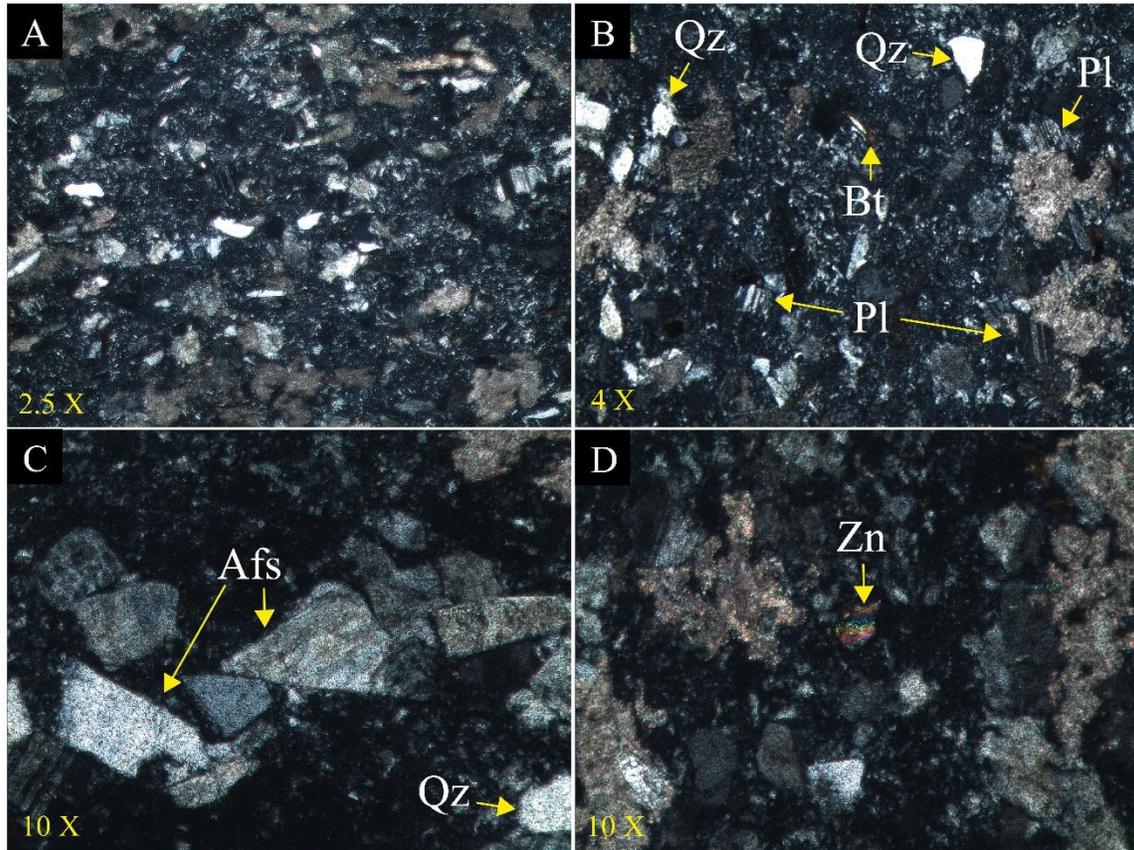


Figura 5.6. Microfotografías de aplita, muestra AV2. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 2.5x. B y C. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl) y biotita (Bt). Objetivos 4 x y 10x, correspondientemente. D. Cristal de circón. Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La muestra correspondiente a la aplita PCD3 (Figura 5.7) tiene una textura porfirítica. La matriz de esta aplita corresponde a microcristales de cuarzo y feldespato alcalino. Aunque la muestra tiene parches de calcita secundaria, es posible observar cristales de cuarzo, feldespatos alcalinos y algunos minerales opacos.

Los feldespatos alcalinos tienen formas de prismas, subhedrales, es incoloro, tiene relieve bajo, con un color de interferencia de blanco a beige, del primer orden. El cuarzo se distingue por su forma granular y muestra extinción ondulosa. Como accesorios se muestran minerales opacos dispersos en la lámina.

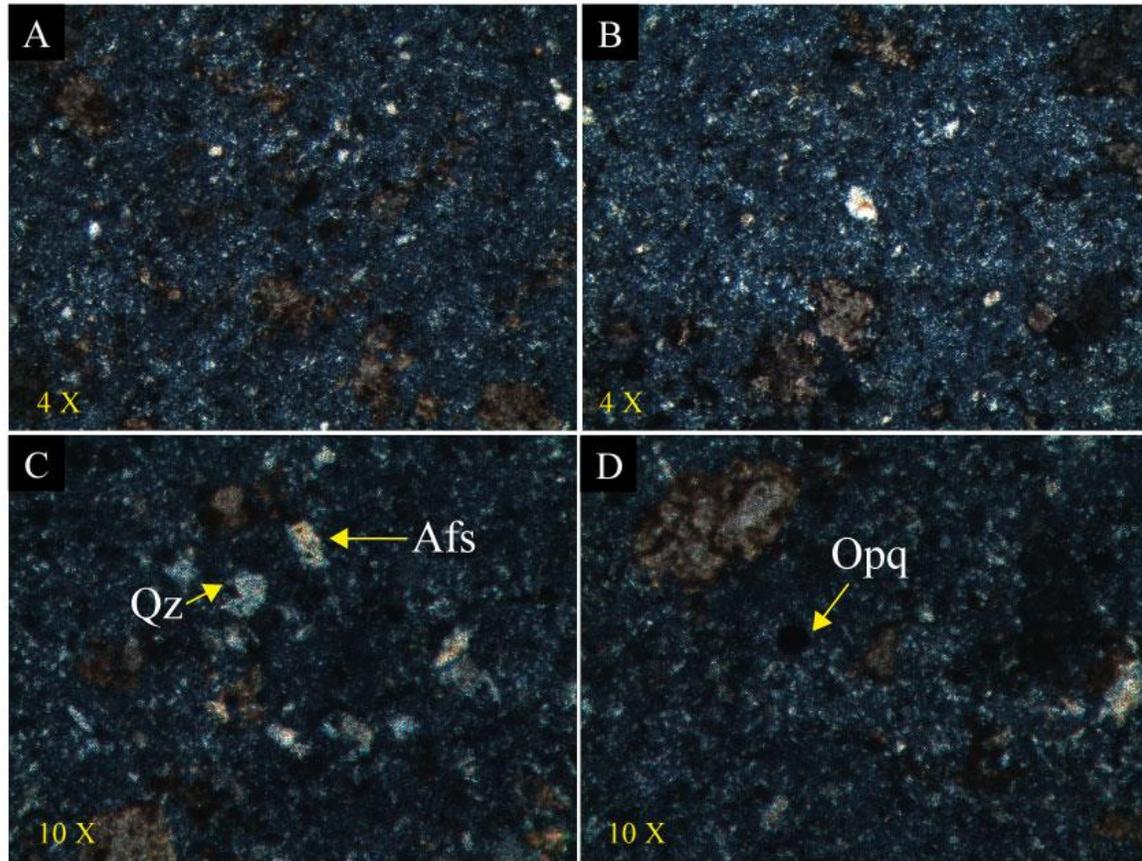


Figura 5.7. Microfotografías de aplita, muestra **PCD3**. A. Textura porfirítica de la aplita PCD3. Objetivo 4x. B y C. Fenocristales de cuarzo (Qz) y feldespato alcalino (Afs). Objetivos 4 x y 10x, correspondientemente. D. Mineral opaco. Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La aplita PCD7 (Figura 5.8) tiene una textura porfirítica. Consta de una matriz compuesta por microcristales de cuarzo y feldespatos alcalinos. Presenta una variedad de cristales como feldespato alcalino, cuarzo, plagioclasa y biotita. Los feldespatos alcalinos se muestran de formas prismáticas.

El cuarzo se presenta en forma granular anhedral. La plagioclasa tiene formas prismáticas, es incolora y relieve bajo. La biotita tiene forma fibrosa, muestra pleocroísmo de crema a marrón rojizo, color de interferencia del segundo orden y ángulo de extinción recto.

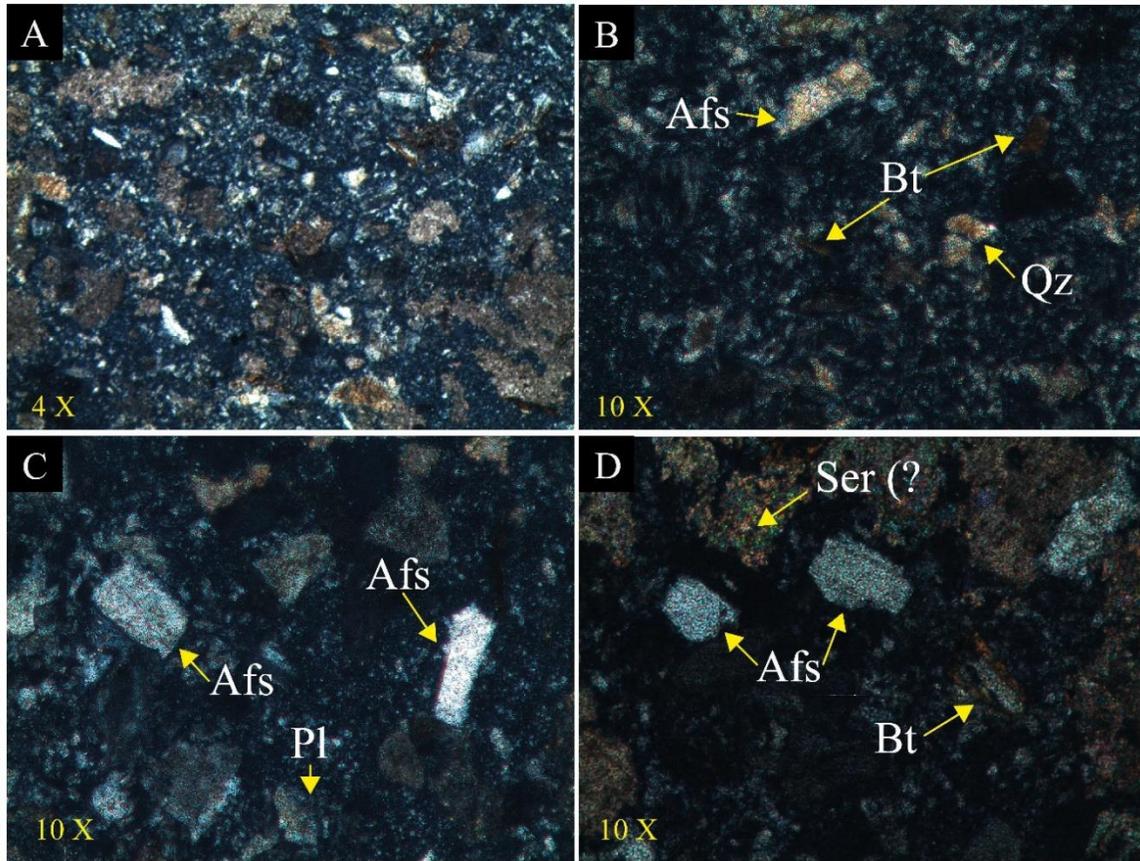


Figura 5.8. Microfotografías de aplita, muestra **PCD7**. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl), biotita (Bt) y una posible alteración de sericita (Ser(?)). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

La aplita PCD8 (Figura 5.9) muestra una textura porfirítica. La matriz está compuesta por microcristales de cuarzo y feldespatos alcalinos. Presenta una variedad de cristales como cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita y circón. El cuarzo se presenta en forma granular. La ortoclasa se muestra como un cristal alargado, principalmente; son incoloros, muestra la macla de Carlsbad, relieve bajo y color de interferencia del primer orden. La plagioclasa tiene forma prismática, es incoloro, macla polisintética y colores de interferencia del primer orden. La biotita tiene forma tabular, con relieve medio, el color de interferencia es del segundo orden y ángulo de extinción recto. El circón tiene forma prismática anhedral, es incoloro, se distingue por su relieve alto y color de interferencia del tercer orden.

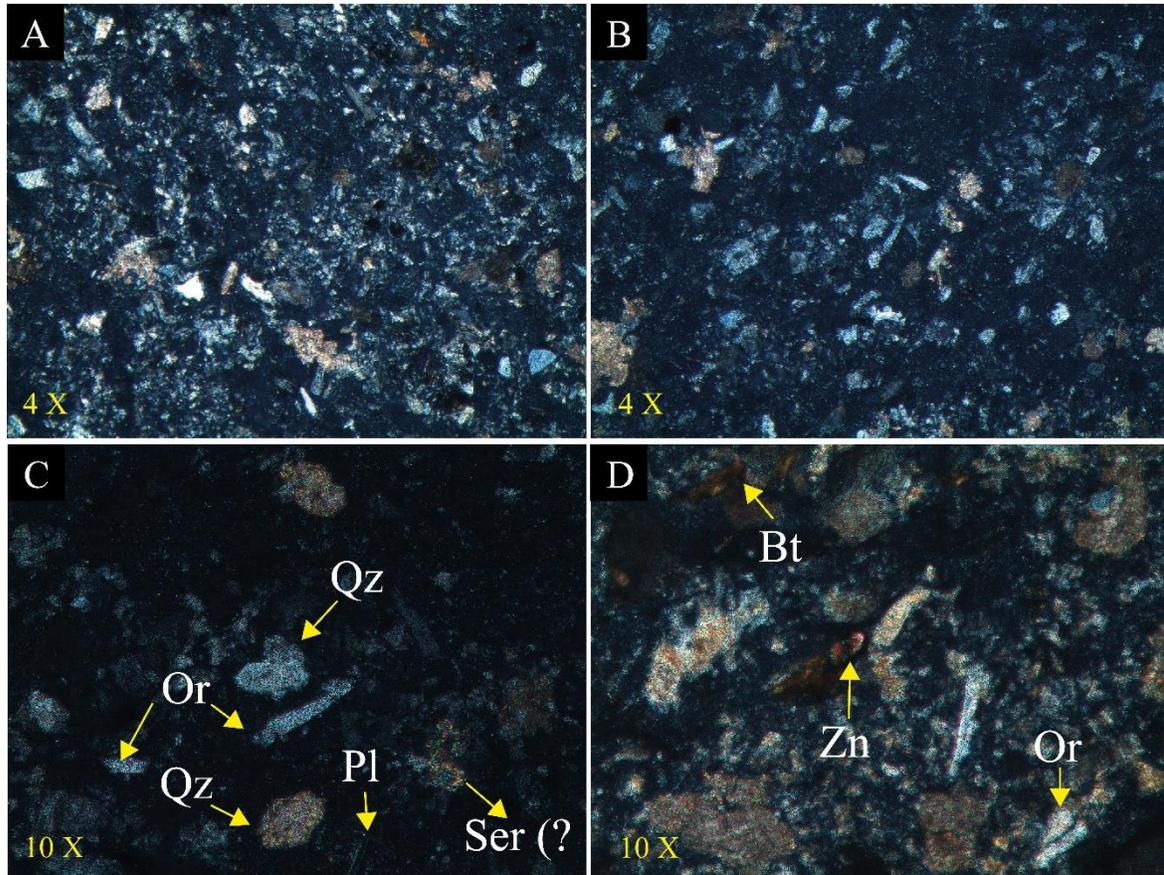


Figura 5.9. Microfotografías de aplita, muestra **PCD8**. A. Textura porfirítica de la aplita. Objetivo 4x. B, C y D. Fenocristales de cuarzo (Qz), feldespato alcalino (Afs), plagioclasa (Pl), biotita (Bt) y una posible alteración de sericita (Ser(?)). Objetivo 10x. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

5.3.2 Marga – muestra PCD4

La muestra PCD4 (Figura 5.10) corresponde a una marga de la Fm. San Felipe que se encontró en contacto con un dique del EDL. La matriz micrítica cubre más de 2/3 de la lámina y tiene menos del 1% de aloquímicos, por lo que en la clasificación de Folk (1959) es una textura micrítica.

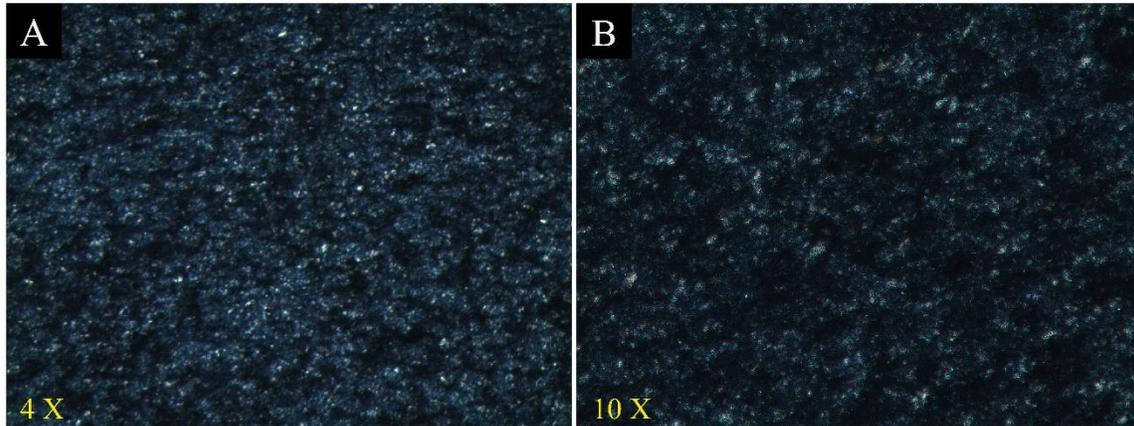


Figura 5.10. Microfotografías de marga, muestra **PCD4**. A y B. Textura de mudstone. Objetivos 4x y 10x, correspondientemente. Las microfotografías se encuentran bajo NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

5.3.3 Toba alterada (embebida en resina) – muestra SF1

La muestra SF1 ([Figura 5.11](#)) corresponde a una toba alterada que fue pulverizada y posteriormente embebida en resina. Lo anterior se realizó para poder observar la composición mineralógica de la roca, debido a que la muestra de mano es deleznable al tacto. Sin embargo, en la lámina predominan los clastos amorfos de la muestra pulverizada y la matriz de resina ([Figura 5.11 a y b](#)). En la [Figura 5.11c](#) se observan algunos minerales, como posibles feldespatos alcalinos y calcita secundaria.

Anteriormente [Antonio-Durán \(2022\)](#) analizó una lámina petrográfica correspondiente a una toba alterada que, aunque también muestra intemperismo, es más compacta y representa mejor la variedad de minerales en la roca. En esta muestra PC7 ([Figura 5.12](#)) se observó una matriz vítreo-arcillosa. La variedad de cristales son cuarzo, plagioclasa, clorita y apatito. Aquí resaltan los cristales de clorita que se presentan en formas fibrosas y como prismas alargados, subhedrales, con un color de interferencia del segundo orden.

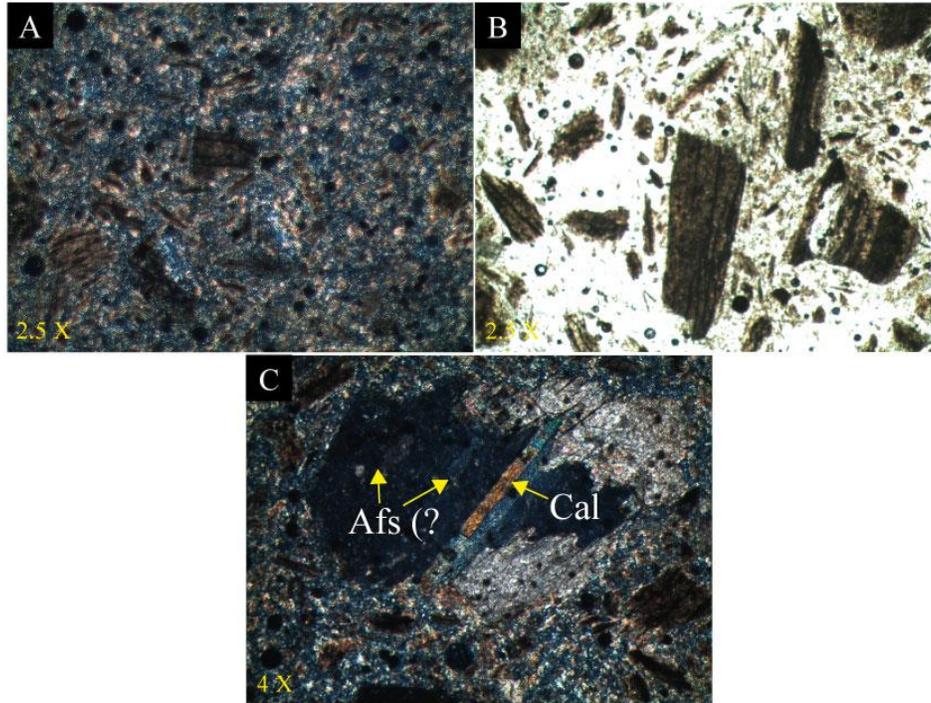


Figura 5.11. Microfotografías muestra **SF1**. A y B. Clastos de la muestra pulverizada embebidos en la resina. En NX y NII, respectivamente. Objetivo 2.5 x. C. Cristales de feldespatos alcalinos (Afs(?)) y calcita secundaria (Cal). Objetivo 4x, NX. Tamaño de microfotografías: 3.77 x 2.83 mm.

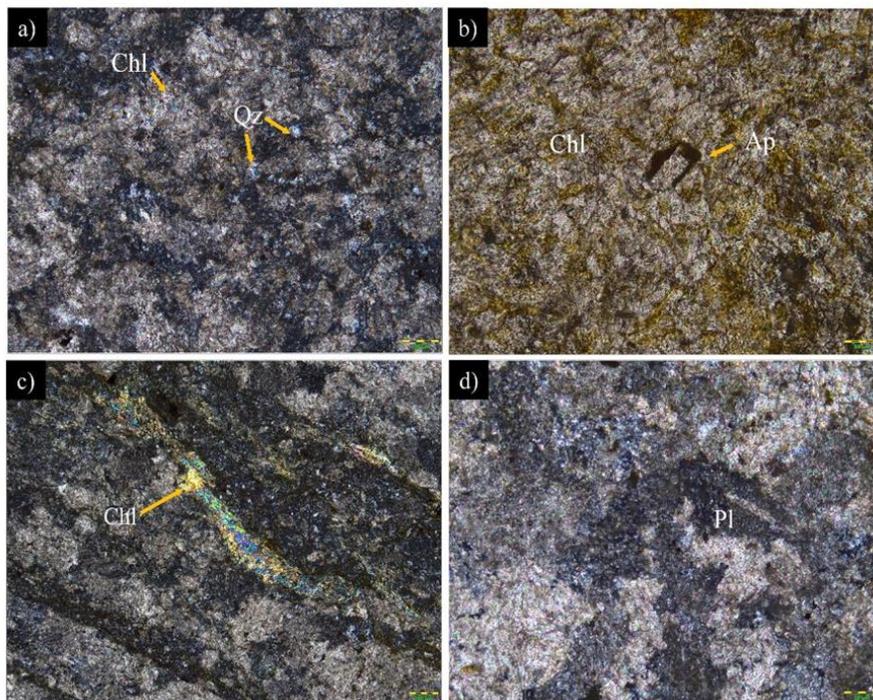


Figura 5.12. Microfotografías de la toba alterada, muestra **PC7**. a) Textura de la toba. Cristales de clorita (Chl) y cuarzo (Qz), con abundantes sectores de calcita secundaria. Objetivo 10x. b) Cristal de apatito (Ap) asociado a la clorita. Objetivo 4x. c) Cristal de clorita asociado a la matriz. Objetivo 20x. d) Cristal de plagioclasa con macla polisintética. Objetivo 4x. Todas las microfotografías se encuentran bajo NX. Tomada de [Antonio-Durán \(2022\)](#).

6. ANÁLISIS GEOQUÍMICO

6.1 Introducción

En este capítulo se presenta la descripción de las características geoquímicas de las muestras del EDL. Debido a que as muestras Pr2, AV2, PCD6 y Pr9 se distribuyen ampliamente en el EDL y fueron las muestras menos intemperizadas que se recolectaron, se seleccionaron para su análisis geoquímico. Adicionalmente, también se toman en cuenta para el análisis las muestras Pr5, Pr6, PC4 y PC2, anteriormente analizadas por [Antonio-Durán \(2022\)](#).

Con la finalidad de comparar datos se seleccionaron muestras correspondientes a rocas ígneas presentados por otros autores ([Tabla 6.1](#)). Estas muestras corresponden a diques sieníticos localizados en la SSCC y su periferia ([Elizondo-Pacheco 2017, 2019; Elizondo-Pacheco et al., 2021](#)). Además, se seleccionaron tres muestras de tobas alteradas de la Formación San Felipe ([Ortega-Torres, 2021](#)), de un afloramiento localizado en la parte oriental de la Presa Cerro Prieto.

En la [Tabla 6.2](#) se muestran los resultados de la determinación de elementos mayores y traza. Los valores de elementos mayores ajustados al 100% en base seca y la norma CIPW, se muestran en la [Tabla 6.3](#).

Tabla 6.1 Muestras correspondientes a la Sierra de San Carlos-Cruillas* por [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#) y muestras de la Presa Cerro Prieto por [Ortega-Torres \(2021\)](#).

Muestra	Localidad	Estructura	Roca
TRAV2	Río Travesaño*	Dique	Pórfido de sienita nefelínica
SLZ5	San Lázaro*	Dique	Pórfido de sienita nefelínica
BEA3	Boca de Álamos*	Dique	Pórfido sienítico
EPD1	Boca de Álamos*	Dique	Sienita
CD4	Carricitos*	Dique	Sienita
BAD5	Boca de Álamos*	Dique	Sienita foidítica
CPOT02	Cerro Prieto	Estrato	Toba
CPOT06	Cerro Prieto	Estrato	Toba
CPOT07	Cerro Prieto	Estrato	Toba

Tabla 6.2. Datos de elementos mayores (% en peso) y elementos traza (ppm) de las muestras selectas de los diques en el Corredor Linares-Burgos. LOI: Pérdida por ignición. Mg#: Número de magnesio ($100 \text{ Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$). Valor inferior al límite de detección (-).

Muestra	PC4	PCD6	PC12	Pr5	Pr6	Pr8	Pr9	AV2
Litología	aplita							
Estructura	Dique							
SiO ₂	71.57	67.84	45.34	56.89	65.12	64.06	66.08	72.31
Al ₂ O ₃	13.41	10.64	8.75	13.2	13.11	13.54	11.95	9.98
Fe ₂ O ₃ T	0.15	0.31	0.25	0.13	0.2	0.28	0.43	0.34
MnO	0.01	0.02	0.07	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	0.07	0.06	0.18	0.03	0.07	0.09	0.16	0.07
CaO	3.25	10	22.02	12.06	7.18	7.76	6.67	6.72
Na ₂ O	7.01	0.04	3.85	7.58	7.39	7.78	5.63	5.61
K ₂ O	0.24	0.11	0.58	0.06	0.08	0.06	0.79	0.16
TiO ₂	0.09	0.07	0.13	0.11	0.17	0.10	0.20	0.07
P ₂ O ₅	-	-	0.04	0.03	0.04	-	0.05	0.01
LOI	3.12	11.68	18.3	9.67	6.00	6.40	6.62	5.66
Total	98.94	100.80	99.51	99.78	99.38	100.10	99.6	101.00
La	34.2	13.9	26.3	22.5	20	30.7	20.8	13.6
Ce	65.5	28.2	50.5	43.1	41.3	59.1	42	26.2
Pr	7.06	2.94	6.19	4.85	4.81	6.33	4.58	2.71
Nd	24.8	11.9	24.1	17.4	18.7	24.6	18.7	9.9
Sm	3.7	2.4	5.3	3.3	3.6	4.1	2.9	1.9
Eu	0.25	0.33	0.69	0.53	0.42	0.28	0.26	0.17
Gd	2.4	2.1	4.7	2.8	3.2	2.9	2.5	1.7
Tb	0.4	0.4	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3
Dy	2.3	2.4	4.7	3	3.4	2.8	3	1.8
Ho	0.4	0.4	1	0.6	0.7	0.5	0.6	0.3
Er	1.2	1.2	2.7	1.8	2.2	1.4	2	1
Tm	0.17	0.17	0.38	0.24	0.32	0.19	0.31	0.16
Yb	1.1	1.2	2.6	1.6	2	1.1	2.1	1
Lu	0.17	0.18	0.37	0.24	0.31	0.18	0.33	0.16
Rb	7	4	14	-	-	-	24	3
Cs	0.5	0.5	0.8	-	0.5	-	1.6	-
Ba	204	62	214	78	126	63	367	177
Sr	838	219	860	650	973	582	1015	644
Y	11	11	27	16	19	15	18	10
Zr	123	111	90	102	133	140	177	117
Nb	5	8	3	3	4	14	15	10
Hf	3.7	3.8	2.9	3.1	4.1	4.4	4.9	3.7
Ta	0.9	0.8	0.5	0.7	0.8	0.9	0.7	0.9
Th	13.8	14	7.9	11.9	11.6	14.9	9.4	13.8
U	1.5	3.9	3.4	4.3	4.1	4.6	3.7	4.5
Sc	3	2	4	2	3	4	3	2
Ga	4	4	4	5	3	6	5	3
Sn	2	2	2	2	2	1	1	2
Pb	9	12	12	13	14	8	6	11
Mg#	57.27	34.27	64.43	39.86	5.13	48.00	51.66	37.16

Tabla 6.3. Datos de elementos mayores ajustados al 100% en base seca y norma CIPW para la selección de diques del Corredor Linares-Burgos. Abreviaciones: Q=Cuarzo; Or=Ortoclasa; Ab=Albita; An=Anortita; Ne=Nefelina; Zrn=Circón; Di=Diópsido; Wo=Wollastonita; Mt=Magnetita; Il=Ilmenita. Los datos con el símbolo (-) significan que están por debajo del límite de detección.

Muestra	PC4	PCD6	PC12	Pr5	Pr6	Pr8	Pr9	AV2
Litología	aplita							
Estructura	Dique							
SiO ₂ adj	74.71	76.15	55.85	63.14	69.75	68.38	71.10	75.91
TiO ₂ adj	0.09	0.08	0.16	0.12	0.18	0.11	0.21	0.07
Al ₂ O ₃ adj	14.00	11.94	10.78	14.65	14.04	14.45	12.86	10.48
Fe ₂ O ₃ adj	0.05	0.09	0.07	0.05	0.07	0.09	0.14	0.11
FeOadj	0.10	0.23	0.22	0.09	0.13	0.19	0.29	0.22
MnOadj	0.01	0.03	0.09	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
MgOadj	0.07	0.07	0.22	0.03	0.08	0.10	0.17	0.07
CaOadj	3.39	11.23	27.12	13.39	7.69	8.28	8.25	7.06
Na ₂ Oadj	7.32	0.05	4.74	8.41	7.92	8.31	6.06	5.89
K ₂ Oadj	0.25	0.12	0.71	0.07	0.09	0.06	0.85	0.17
P ₂ O ₅ adj	0.01	0.01	0.05	0.03	0.04	0.01	0.05	0.01
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Q	26.35	56.22	-	-	14.44	10.28	22.24	32.80
Or	1.48	0.73	4.22	0.40	0.51	0.38	5.02	0.99
Ab	61.84	0.38	28.55	69.19	66.88	70.21	51.16	49.78
An	4.62	32.02	6.01	2.01	2.53	1.97	5.38	1.66
Ap	0.02	0.03	0.11	0.08	0.10	0.03	0.13	0.02
Ne	-	-	6.24	1.05	-	-	-	-
Zrn	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02
Di	0.39	0.85	1.68	0.18	0.40	0.75	1.11	0.82
Wo	5.03	9.47	52.79	26.81	14.71	16.02	14.33	13.61
Mt	0.07	0.13	0.09	0.04	-	0.14	0.21	0.16
Il	0.18	0.16	0.29	0.22	0.32	0.20	0.40	0.14
Hm	-	-	-	0.02	0.07	-	-	-
Tn	-	-	-	-	0.02	-	-	-
Sum (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Las aplitas del EDL presentan altas concentraciones de SiO₂, con valores de 45.34 a 72.31 % en peso. Por otra parte, el MgO se encuentra en menor proporción con valores de 0.03 a 0.18 % en peso. Así mismo, para Al₂O₃ los valores van de 8.75 a 13.54 % en peso, y Fe₂O₃ de 0.15 a 0.43% en peso. Contienen CaO de 3.25 a 22.02 % en peso y Na₂O de 0.04 a 7.78 % en peso. En cuanto a elementos traza, las aplitas presentan valores altos de La (13.6 – 34.2 ppm), Ce (26.2 – 65.5 ppm), Ba (62 – 214 ppm), Sr (219 – 1015 ppm) y Zr (90 – 177 ppm).

6.2 Diagramas de variación para elementos mayores

Los diagramas de variación tipo Harker se graficaron con las características mencionadas por Rollinson y Pearce (2021), para los elementos mayores (Figuras 6.1 y 6.2) y elementos traza (Figuras 6.3 y 6.4).

Aquí se presentan de manera gráfica las concentraciones de elementos mayores para las muestras del EDL (Figuras 6.1 y 6.2). En estos diagramas el contenido de SiO₂ se

encuentra en el eje de las abscisas y en las ordenadas la concentración del óxido de cada elemento (% en peso), recalculados en base anhidra.

En los diagramas de Harker para elementos mayores, las aplitas se observa con tendencias negativas durante el aumento del SiO_2 , es decir las aplitas se fraccionan conforme aumenta el grado de diferenciación, esto ocurre para CaO , P_2O_5 , MgO y K_2O . Por el contrario, se observan tendencias negativas para Al_2O_3 y Na_2O . Algunos elementos mayores como el TiO_2 y FeO_T , no varían en porcentaje en peso al incrementar el SiO_2 . Todas las aplitas están enriquecidas en SiO_2 .

Las muestras de diques sieníticos de la SSCC contienen entre 55 y 66.38% en peso de SiO_2 , este porcentaje es mejor que el que contienen las muestras de los diques apliticos. De acuerdo con los resultados presentados por [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#) y [Elizondo-Pacheco et al., \(2022\)](#) las sienitas contienen los siguientes elementos mayores: TiO_2 (0.30 a 1.51 % en peso), Al_2O_3 (18.54 a 21.47% en peso), MgO (0.11 a 1.14% en peso), CaO (0.34 a 3.78 % en peso), Na_2O (5.80 a 11.27 % en peso), K_2O (0.41 a 6.26% en peso), P_2O_5 (0.04 a 0.24% en peso) y FeO_T (1.23 a 21.50 % en peso).

En los diagramas de Harker para elementos mayores, las sienitas de la SSCC muestran tendencias positivas de P_2O_5 , MgO y TiO_2 . Los óxidos Al_2O_3 , FeO_T , Na_2O y K_2O , muestran tendencias negativas.

En comparación con las aplitas, las sienitas son distintas en el porcentaje en peso de Al_2O_3 , CaO y FeO_T . El porcentaje en peso de TiO_2 , MgO , Na_2O , K_2O y P_2O_5 en las sienitas coinciden ocasionalmente con los valores de las sienitas, pero no siguen las mismas tendencias.

Las tobas alteradas de la Fm. San Felipe tienen un porcentaje en peso de SiO_2 entre 51.96 hasta 59.54%. Este porcentaje coincide con algunas muestras (PC12) de las aplitas del EDL.

Las tobas alteradas, de acuerdo con los datos de [Ortega-Torres \(2021\)](#), contienen los siguientes elementos mayores: TiO_2 (0.37% a 0.54% en peso), Al_2O_3 (14.16 a 18.64% en peso), MgO (0.68 a 1.33% en peso), CaO (5.84 a 11.56% en peso), Na_2O (1.92 a 5.92% en peso), K_2O (2.03 a 4.83% en peso), P_2O_5 (0.13 a 0.28% en peso) y FeO_T (4.58 hasta 5.68% en peso).

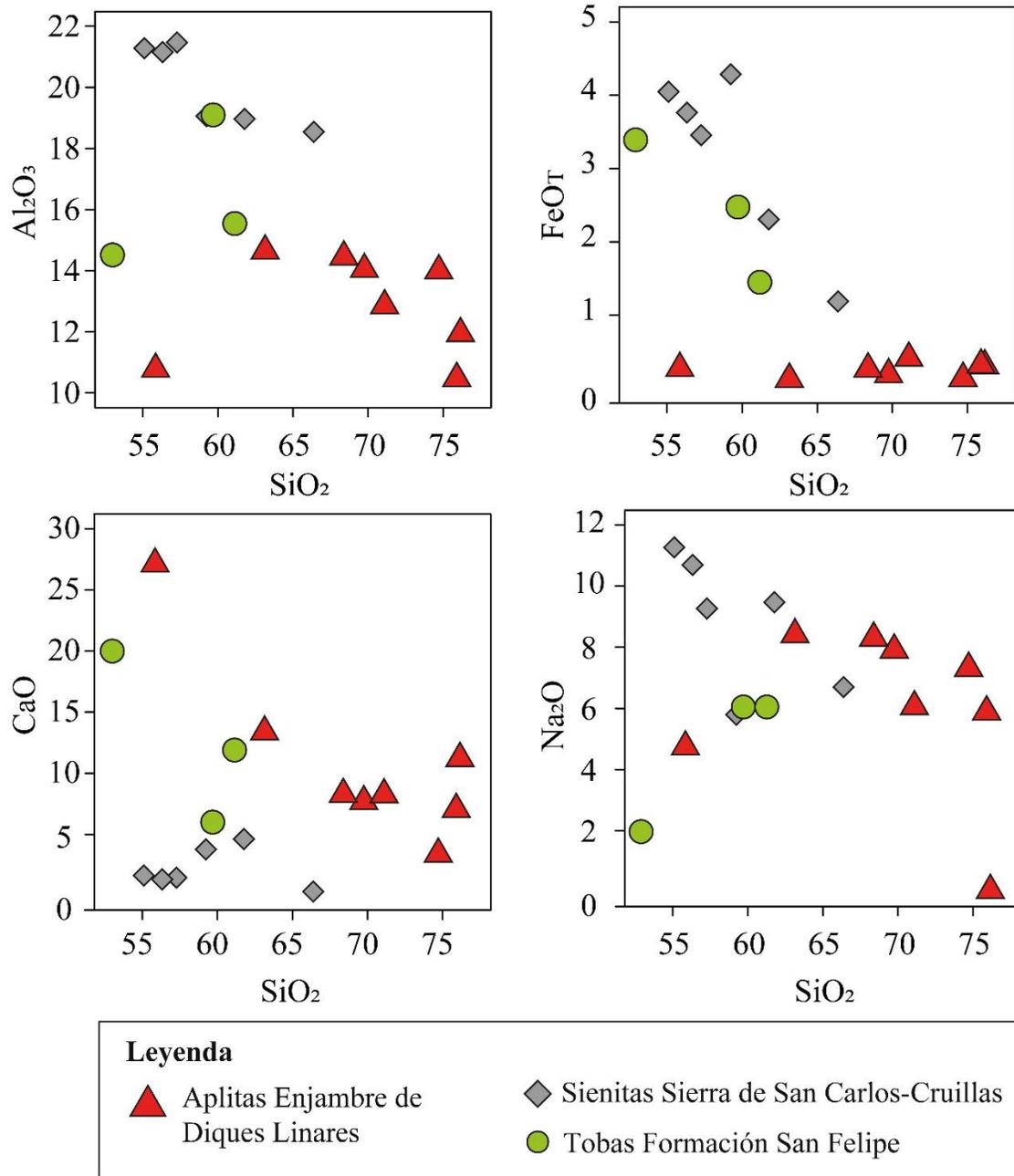


Figura 6.1. Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ vs. Óxidos de elementos mayores (Al₂O₃, FeO_T, CaO, y Na₂O). Los datos de la SSCC tomados de [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#). Los datos de las tobas son de [Ortega-Torres \(2021\)](#). Todos los valores de óxidos de elementos mayores están en unidades de % en peso, ajustados en base anhidra.

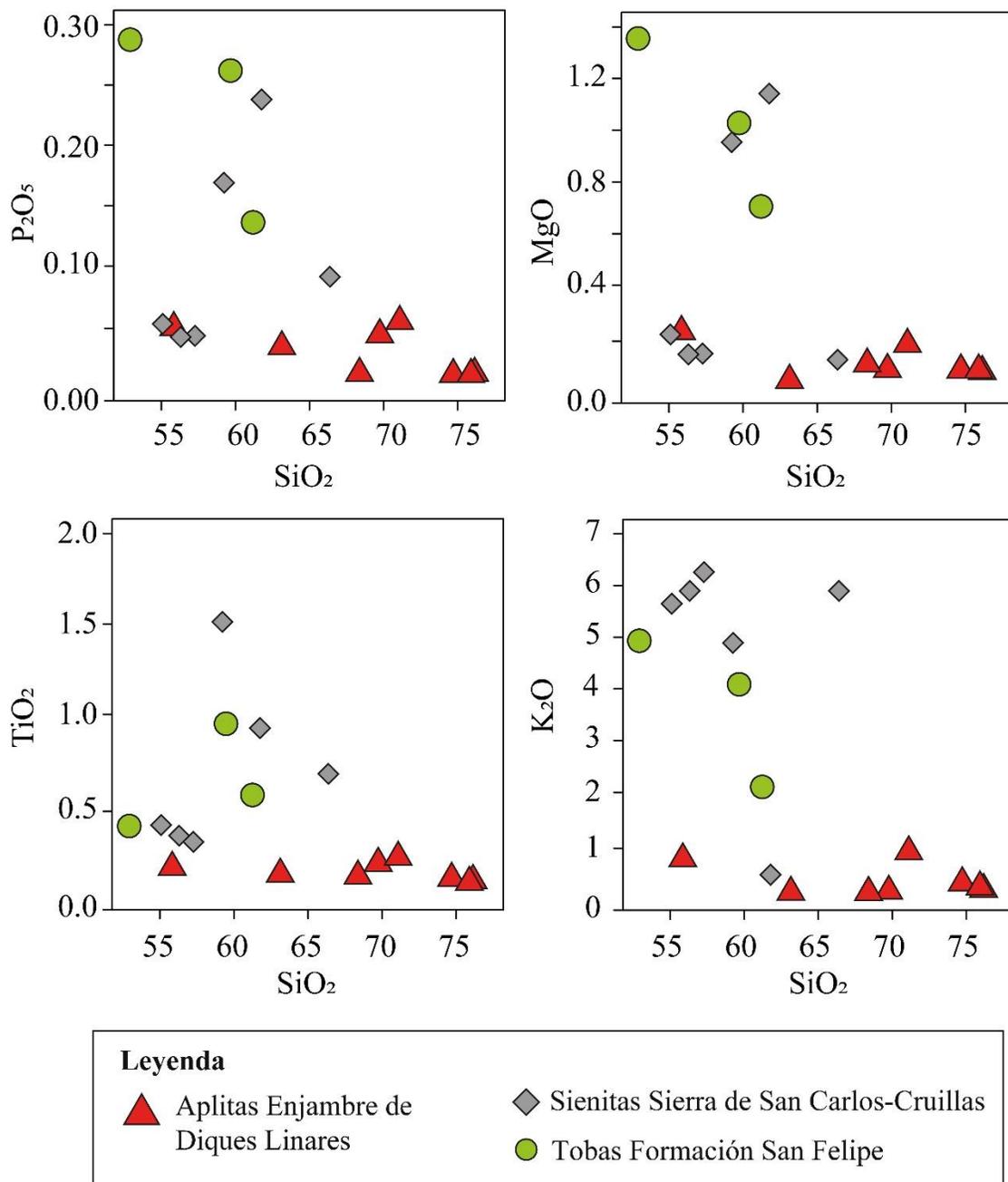


Figura 6.2. Diagramas de variación tipo Harker de SiO_2 vs. Óxidos de elementos mayores (P_2O_5 , MgO , TiO_2 y K_2O). Los datos de la SSCC tomados de [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#). Los datos de las tobas son de [Ortega-Torres \(2021\)](#). Todos los valores de óxidos de elementos mayores están en unidades de % en peso, ajustados en base anhidra.

Las tobas alteradas muestran tendencias positivas en Al_2O_3 , TiO_2 y Na_2O . Tendencias negativas se muestran principalmente en los óxidos MgO , CaO y K_2O . En comparación con las aplitas del EDL, ambos grupos de muestras tienen tendencias y concentraciones similares

de Al_2O_3 , Na_2O y CaO . Entre las tobas alteradas y las sienitas de la SSCC se observan algunas coincidencias en porcentajes en peso de algunos elementos mayores (TiO_2 , MgO , K_2O y P_2O_5).

6.3 Diagramas de variación para elementos traza

Para realizar los diagramas de variación tipo Harker para elementos traza se seleccionaron Ba, Sr, Ce, La (Figura 6.3), Y, Zr y Rb (Figura 6.4) en ppm.

En las aplitas del EDL el Ba varía de 62 a 367 ppm, el Sr varía de 219 a 1015 ppm, el Ce varía de 26.2 a 65.5 ppm y La varía de 13.6 a 34.2 ppm. El Ba, Ce y La mantienen una tendencia constante conforme aumenta el SiO_2 . El elemento traza La muestra una tendencia positiva conforme aumenta el SiO_2 (Figura 6.3).

Además, en las aplitas del EDL, el Y varía de 10 a 27 ppm, Zr varía de 90 a 177 ppm y el Rb varía de 0.5 a 1.6 ppm. Y muestra una pendiente negativa conforme aumenta el SiO_2 , mientras que el Zr y el Rb se mantienen constantes conforme aumenta el SiO_2 (Figura 6.4).

De acuerdo con los datos de Elizondo-Pacheco (2017, 2019) en los diques sieníticos de la SSCC el Ba varía de 134 a 4176 ppm, el Sr varía de 96 a 1562.6 ppm, el Ce varía de 99.5 a 255.8 ppm, y La varía de 55.9 a 137.4 ppm. El Ba se mantiene constante conforme aumenta el SiO_2 , el Sr, Ce y La muestran tendencias positivas (Figura 6.3).

En las sienitas de la SSCC, el Y varía de 23.2 a 39.3 ppm y el Zr varía de 347.4 a 674.8 ppm. El Y y el Zr muestra una tendencia negativa conforme aumenta el SiO_2 y en el Rb se mantiene constante conforme aumenta. Las concentraciones de elementos trazas de las sienitas y las aplitas son distintas en cantidades y tendencias (Figura 6.4).

En las tobas alteradas de la Fm. San Felipe, de acuerdo con los datos de Ortega Torres (2021), el Ba varía de 914 a 2360 ppm, el Sr varía de 740 a 973 ppm, el Ce varía de 38.1 a 62.7 ppm y La varía de 18.6 a 30.7 ppm. La concentración de Ba en las tobas alteradas es mayor que en las sienitas y aplitas. El Sr tiene una tendencia positiva que es similar a las aplitas (Figura 6.3).

Además, en las tobas de la Fm. San Felipe, el Y varía de 25 a 33 ppm, el Zr varía de 193 a 264 ppm y el Rb varía de 57 a 108 ppm. El Y tiene una tendencia positiva y similar a las aplitas. El Zr tiene una tendencia positiva, también similar a las aplitas. La concentración

de Rb es mayor que en las aplitas. Las tendencias y concentraciones de los elementos trazas Sr, Zr, Ce y La son similares en las tobas alteradas y en las aplitas (Figura 6.4).

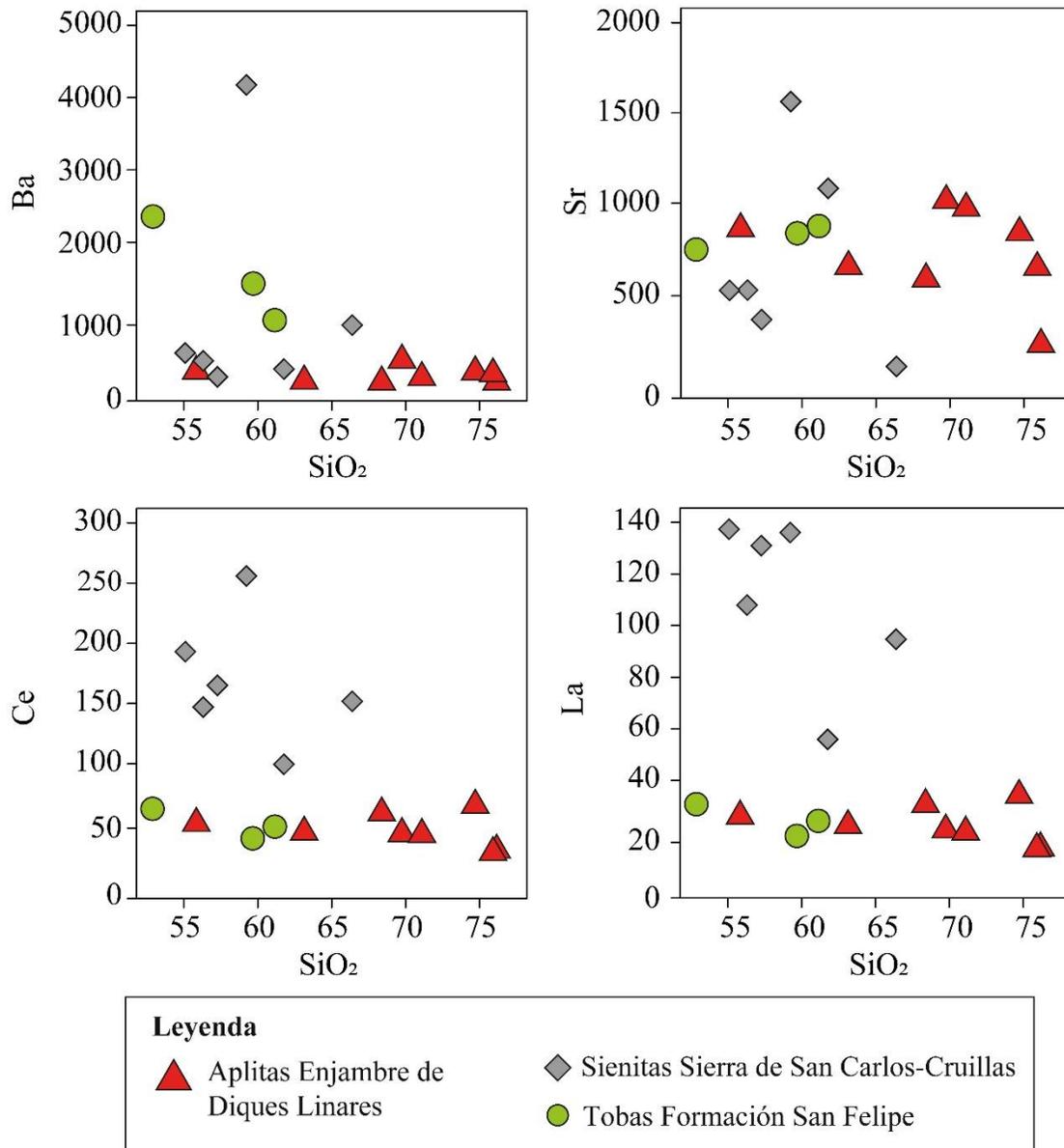


Figura 6.3. Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ (% p. aj.) vs. Elementos traza Ba, Sr, Ce y La (ppm). Los datos de la SSCC tomados de [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#). Los datos de las tobas son de [Ortega-Torres \(2021\)](#).

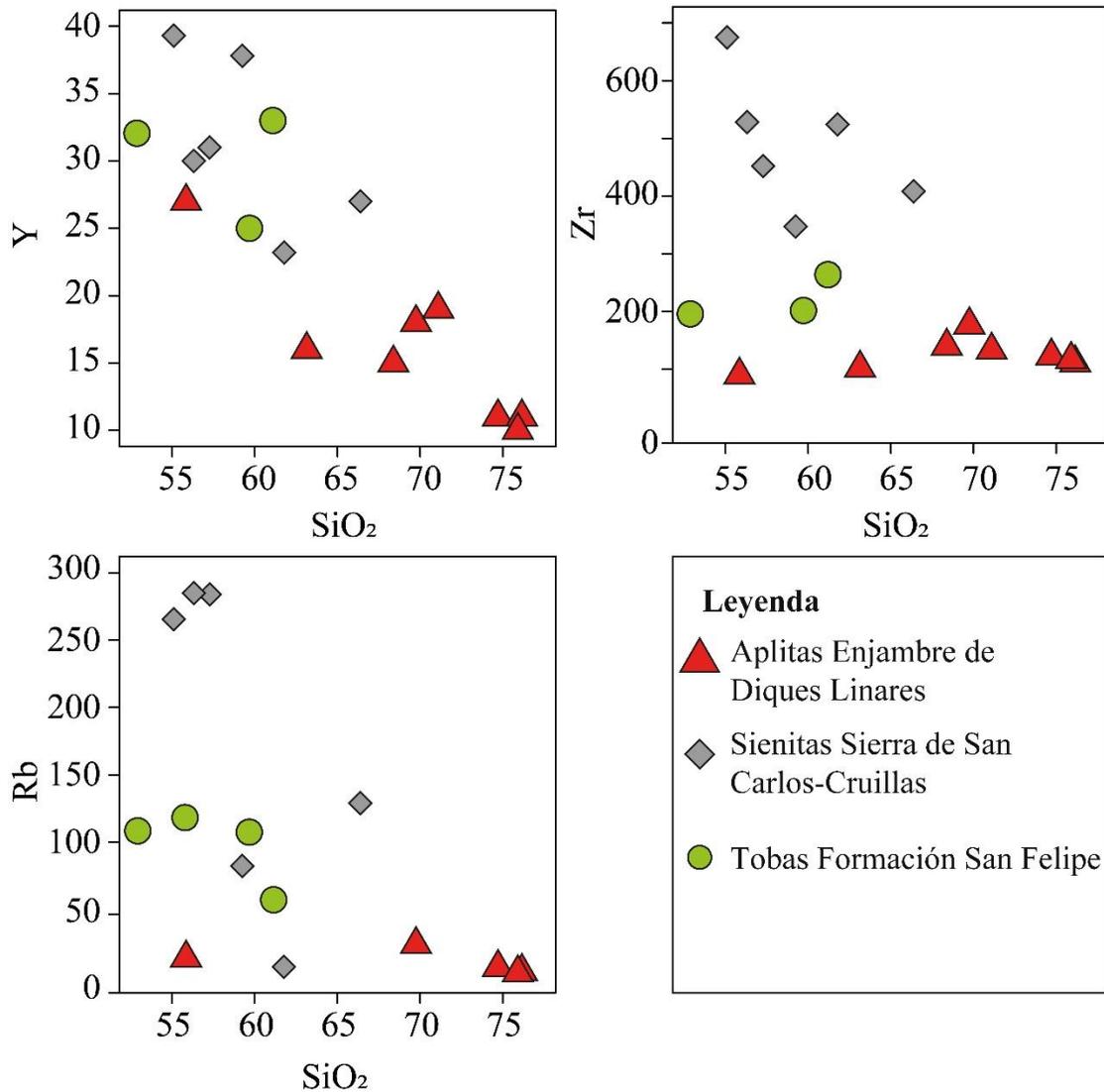


Figura 6.4. Diagramas de variación tipo Harker de SiO₂ (%p. aj.) vs. Elementos traza Y, Zr y Rb (ppm). Los datos de la SSCC tomados de [Elizondo-Pacheco \(2017, 2019\)](#). Los datos de las tobas son de [Ortega-Torres \(2021\)](#).

6.4 Diagrama de clasificación de rocas alteradas

Para la clasificación geoquímica de las rocas ígneas del EDL se utilizó el diagrama que toma como criterio los elementos traza inmóviles que han sido sometidos a procesos como alteración hidrotermal, metamorfismo o como lo es en este trabajo, rocas meteorizadas. [Winchester y Floyd \(1977\)](#) mencionan que los resultados de la aplicación de este tipo de diagramas para rocas alteradas son considerados más confiables que los diagramas de elementos móviles.

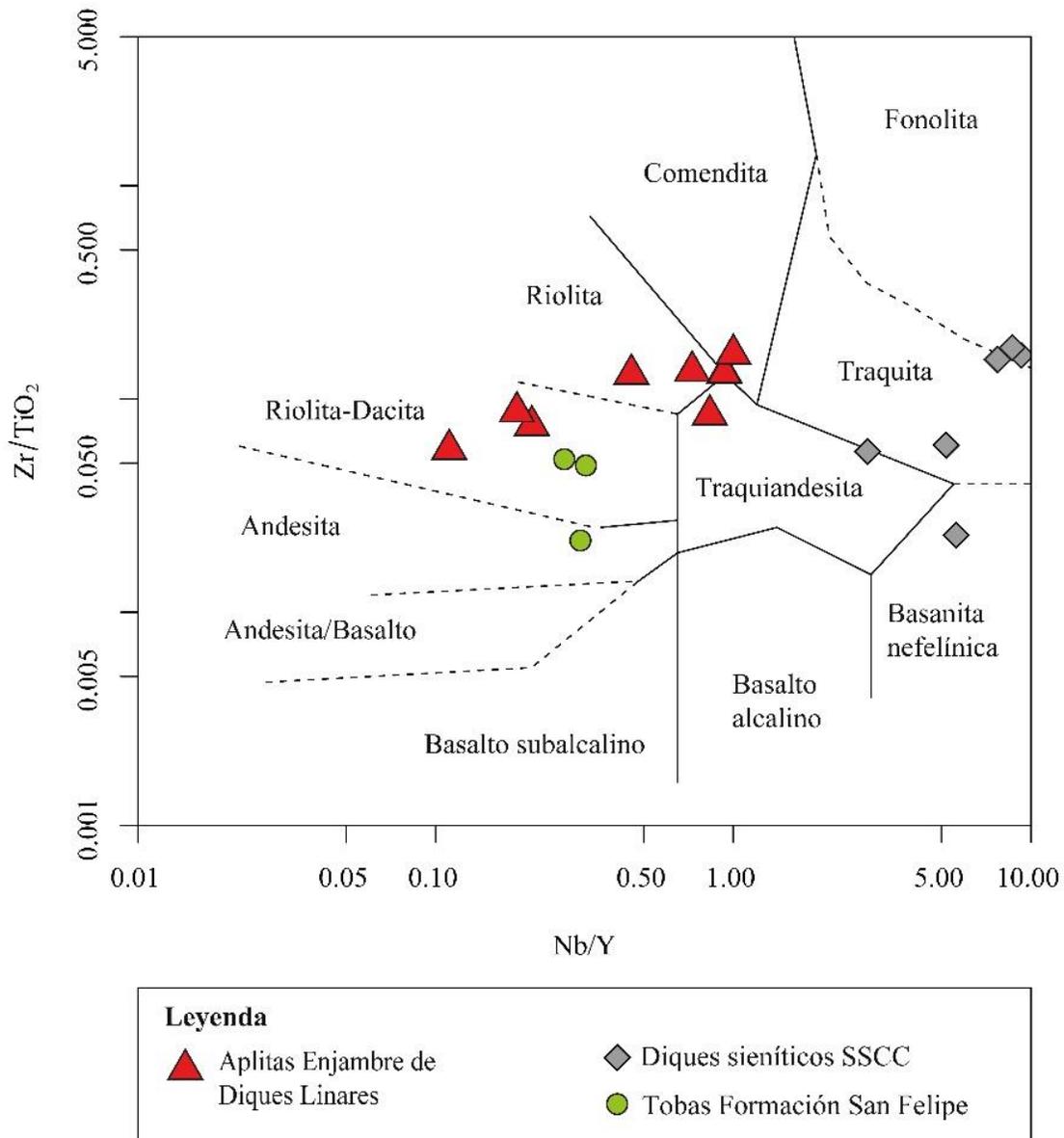


Figura 6.5. Diagrama Zr/TiO_2 vs. Nb/Y de Winchester y Floyd (1977). Diagrama de rocas volcánicas alteradas aplicado al Enjambre de Diques Linares, las rocas hipabisales de la SSCC y tobas de la Formación San Felipe. Los datos de SSCC fueron tomados de Elizondo-Pacheco (2017, 2019; Tabla 6.1). Los datos de las tobas son de Ortega-Torres (2021; Tabla 6.1).

El diagrama de Winchester y Floyd (1977) se construyó en base a la relación de Zr/TiO_2 y de Nb/Y (Figura 6.5), ambos son índices de alcalinidad donde el Zr/TiO_2 indica grado de diferenciación. Los autores mencionan que los basaltos subalcalinos están caracterizados por una relación baja de Zr/TiO_2 y Nb/Y , mientras que las riolitas y dacitas,

subalcalinas, contienen una alta relación de Zr/TiO_2 , baja relación de Nb/Y . También mencionan que las rocas básicas alcalinas se caracterizan por tener una relación baja de Zr/TiO_2 pero alta en Nb/Y , por otro lado las rocas de composición alcalina y diferenciadas presentan valores altos de ambos, Zr/TiO_2 y de Nb/Y .

Las aplitas del Enjambre de Diques Linares se clasifican en el diagrama de [Winchester y Floyd \(1977; Figura 6.5\)](#) principalmente como riolita y riolita-dacita, aunque las muestras AV2 y PCD6, se encuentran en los campos de comendita y traquiandesita, respectivamente. La mayoría de las muestras son subalcalinas con alta relación de Zr/TiO_2 y baja de Nb/Y .

Las tobas de la Formación San Felipe se clasifican en este mismo diagrama como riolita-dacita (subalcalinas) y una de las muestras se encuentra en el campo de andesita.

Los diques sieníticos de la Sierra de San Carlos-Cruillas, se encuentran en el campo de traquitas (fuertemente alcalinas), fonolitas (fuertemente alcalinas), basanita nefelínica (fuertemente alcalinas) y traquiandesita (medianamente alcalina).

De acuerdo con los datos graficados, las aplitas y las tobas coinciden en ser principalmente riolitas, mientras que las sienitas corresponden a una variedad que incluye traquitas, fonolitas, basanita nefelínica y traquiandesitas.

6.5 Diagrama de Tierras Raras

El diagrama de tierras raras donde se graficaron los resultados para las aplitas del EDL, las sienitas de la SSCC y las tobas de la Fm. San Felipe se presentan en la [Figura 6.6](#). Los datos analíticos han sido normalizados a condritas utilizando los valores de [Boynton \(1984\)](#).

En las aplitas del EDL se observa un enriquecimiento para las LREE (La_N 43.847 – 110.32) que disminuye en dirección de la HREE (Lu_N 4.97 – 11.49), representando una suave pendiente. Las LREE se encuentran en una pendiente negativa con $(La/Sm)_N$ que varía de 3.11 a 5.81. La relación $(La/Yb)_N$ varía de 6.68 a 20.96. La relación Eu/Eu^* es de entre 0.25 a 0.53. Las muestras del Enjambre de Diques presentan una fuerte anomalía negativa de Eu_N entre 2.31 y 9.39.

Los diques sieníticos de la SSCC, muestran un enriquecimiento de LREE (La_N 180.32 – 443.23) que disminuye en dirección de la HREE (Lu_N 11.18 – 20.5). Las LREE tienen una pendiente negativa de $(La/Sm)_N$ que varía de 5.29 a 15.54. La relación $(La/Yb)_N$ varía de

15.07 a 28.76. No se observa una anomalía negativa de Eu. Estas sienitas están más enriquecidas en REE respecto a las aplitas del EDL y tobas de San Felipe.

En las tobas de la Fm. San Felipe se muestra un enriquecimiento de LREE (La_N 60 - 99.03), que disminuye en dirección de la HREE (Lu_N 11.80 - 19.88). Las LREE se observa una suave pendiente negativa con $(La/Sm)_N$ que varía de 2.79 a 3.16. La relación $(La/Yb)_N$ varía de 4.82 a 5.45. Estas tobas muestran una fuerte anomalía negativa de Eu_N entre 11.97 y 14.01, menos pronunciada que en las aplitas.

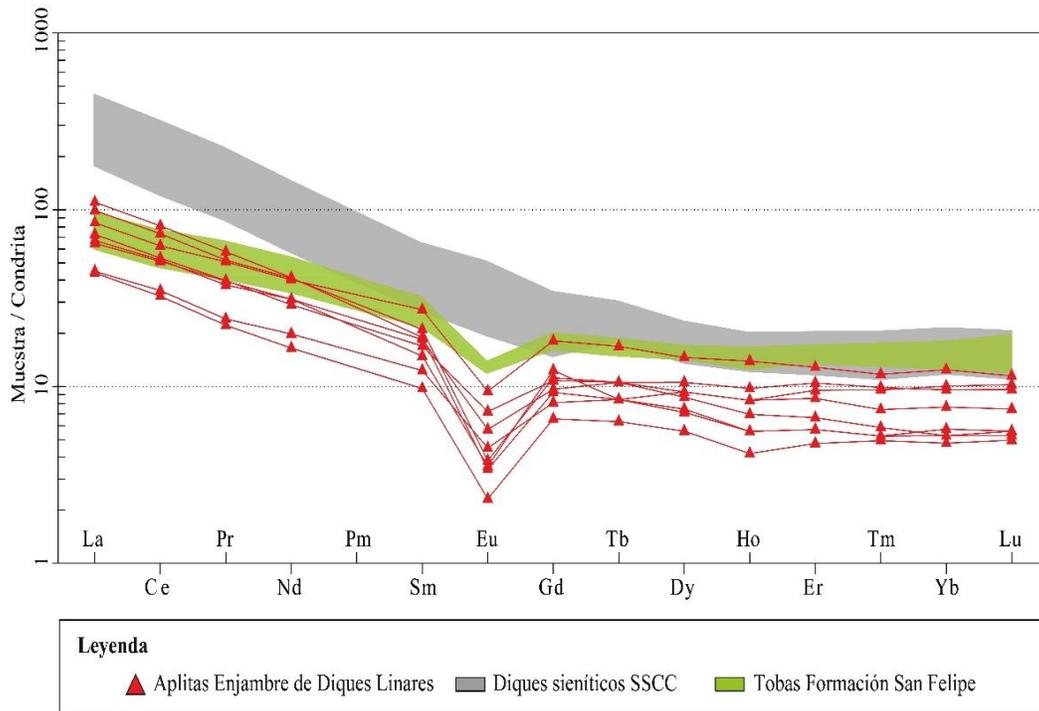


Figura 6.6. Patrones de elementos de tierras raras. Los datos analíticos fueron normalizados a condrita según Boynton (1984). Se presentan las aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021).

La relación $(La/Yb)_N$ de las sienitas de la SSCC, muestran mayor grado de fraccionamiento de las REE que las aplitas del EDL. Las tobas de la Fm. San Felipe muestran una anomalía negativa de Eu_N al igual que las aplitas del EDL. Así mismo, el patrón de REE de las tobas alteradas es cuasi paralelo al de las aplitas. Aunque las aplitas son más ricas en SiO_2 que las sienitas y las tobas, las REE están menos enriquecidas.

6.6 Diagrama multielementos

En este apartado se muestra el diagrama multielementos normalizados a manto primitivo de los autores [McDonough y Sun \(1995; Figura 6.7\)](#). Se graficaron las muestras de las aplitas del EDL, las sienitas de la SSCC y las tobas de la Fm. San Felipe.

En los patrones de multielementos de las muestras del EDL ([Figura 6.7](#)) se observan anomalías negativas de Rb, Nb, Ta, P y Ti. En cuanto a las anomalías positivas es posible observar enriquecimiento en Th, U y P. Las relaciones de los elementos reducen conforme se acercan a ser compatibles con el Manto.

Las sienitas de la SSCC presentan relaciones de multielementos que se distinguen de las aplitas del EDL. Las sienitas tienen anomalías negativas de Ba, P y Ti y positivas de Th y U.

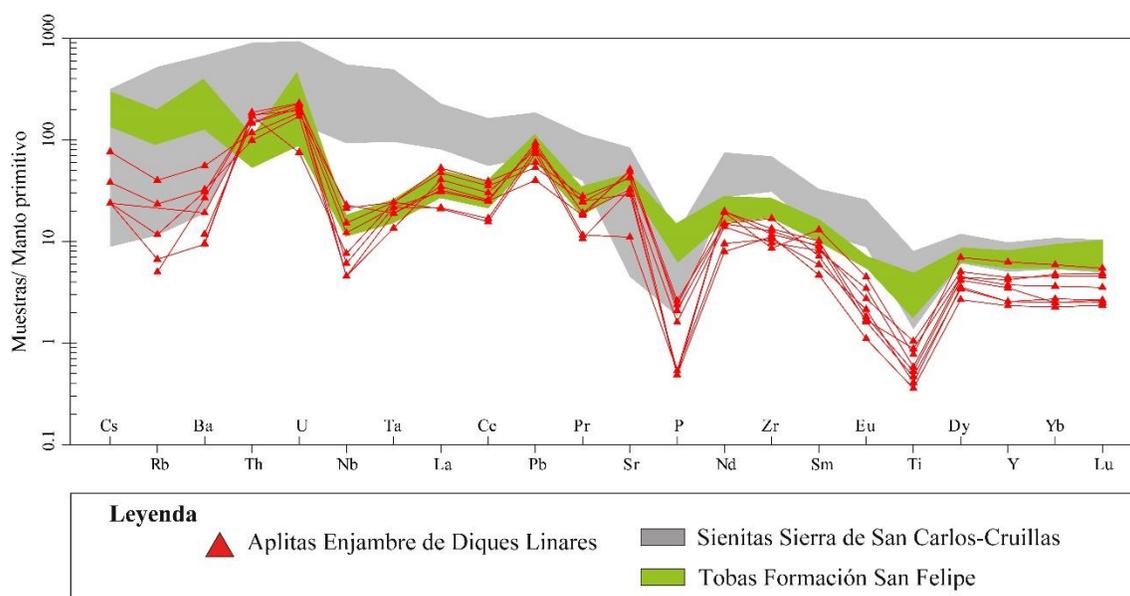


Figura 6.7. Diagrama multielementos para las aplitas del Enjambre de Diques Linares, las sienitas de la SSCC ([Elizondo-Pacheco, 2017, 2019](#)) y tobas de la Fm. San Felipe ([Ortega-Torres, 2021](#)). Los datos se encuentran normalizados con los valores del Manto Primitivo de los autores [McDonough y Sun \(1995\)](#).

Las tobas de la Fm. San Felipe muestran anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti. Además, tienen anomalías positivas de Ba y Th. Las relaciones de los elementos se reducen conforme se vuelven compatibles con el Manto.

Aunque algunas anomalías negativas de las sienitas de la SSCC coinciden (p.e. P y Ti) con las de las aplitas del EDL, sus magnitudes son diferentes.

Es posible observar que los patrones multielementos de las tobas y de las aplitas son paralelos entre sí, coincidiendo en diversas ocasiones en anomalías positivas y negativas. Sin embargo, las relaciones multielementos de las tobas son mayores que las aplitas.

Las anomalías negativas que coinciden entre las aplitas y las tobas son Nb, Ta, P y Ti, y las anomalías positivas son de U y Pb, principalmente.

6.7 Diagrama de discriminación tectonomagmática

Entre los diagramas binarios de discriminación para granitoides basados en elementos traza de [Pearce et al. \(1984\)](#) se encuentra el diagrama de Yb vs. Ta.

En este trabajo se utilizaron diagramas de este tipo para clasificar y sugerir un ambiente tectonomagmático para las aplitas del EDL, así como contrastarlos con los de las sienitas de la SSCC y las tobas de la Fm. San Felipe ([Figura 6.8](#)).

Los ambientes para granitoides que se encuentran en el diagrama son: granitoide sincolisional (*Syn-COLG*), granitoide intraplaca (*WPG*), granitoide de arco volcánico (*VAG*) y granito de dorsal oceánica (*ORG*).

En el diagrama de discriminación ([Figura 6.8](#)) las aplitas del Enjambre de Diques Linares se ubican en el campo de granitoides de arco volcánico.

En el campo de granitoides de arco volcánico también se encuentran las tobas de la Fm. San Felipe. Por otra parte, las sienitas de la Sierra de San Carlos-Cruillas se colocan en el campo de granitoides de intraplaca.

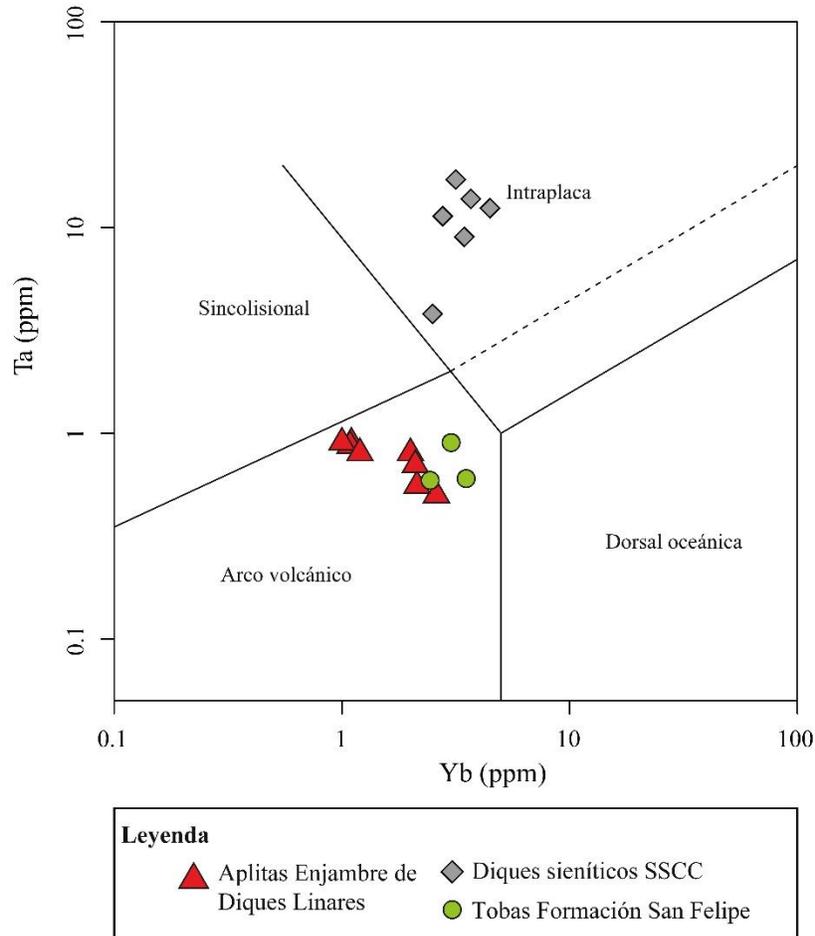


Figura 6.8. Diagramas de discriminación tectónica de granitoides, Yb vs. Ta (Pearce *et al.*, 1984), para aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021).

6.8 Diagramas para granitoides

A continuación, se muestra el diagrama de índice de Fe (Figura 6.9a) de acuerdo con la relación Fe y Mg. Así mismo se muestra el diagrama MALI (*Modified alkali-lime index*) vs. SiO₂ (Figura 6.9b). La Figura 6.9c representa el diagrama de *Aluminum Saturation Index* (ASI) vs. SiO₂. La Figura 6.9d muestra el índice de saturación en sílice Feldespatódico (FSSI: *Feldspathoid Silica Saturation Index*) por sus siglas en inglés, que determina el balance entre el aluminio y los álcalis. Estos diagramas proceden de Frost y Frost (2008).

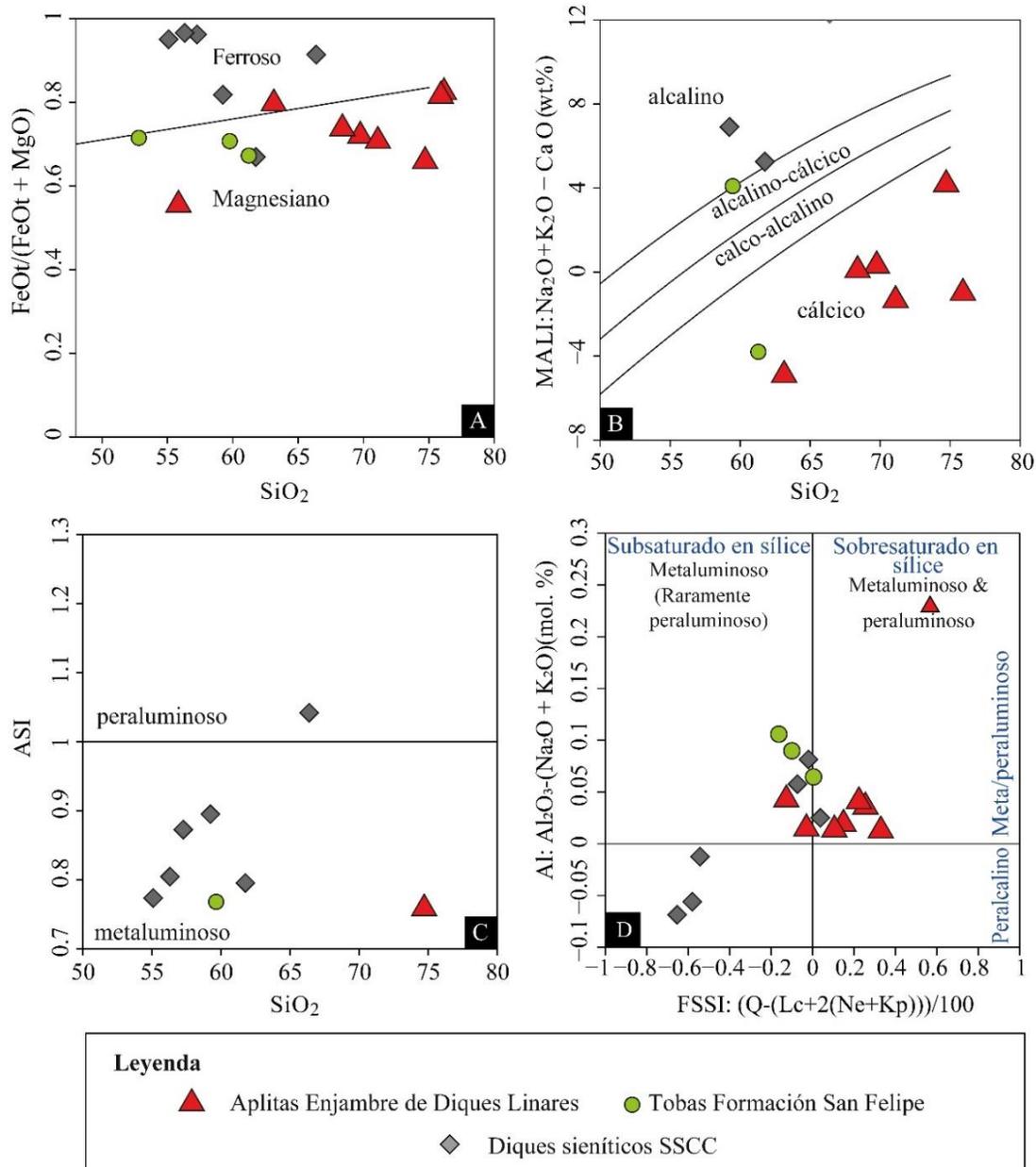


Figura 6.9. Diagramas para granitoides. (A) Diagrama de índice de Fe: $(\text{FeO}+0.9*\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{FeO}+0.9*\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$. (B) Diagrama MALI $(\text{NaO}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ vs SiO_2 . (C) Diagrama ASI vs. SiO_2 . (D) Diagrama de índice de alcalinidad (AI) (molecular Al - Na + K) vs. índice de saturación en sílice Feldespatódico (*Feldspathoid Silica Saturation Index*, $\text{FSSI} = (\text{Q} - (\text{Lct}+2\text{Nph}))/100$). Se grafican aplitas del EDL, sienitas de la SSCC (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019) y tobas de la Fm. San Felipe (Ortega-Torres, 2021). Estos diagramas preceden a los autores Frost y Frost (2008).

En el diagrama de índice de Fe ([Figura 6.9a](#)) la composición de las aplitas del EDL y tobas de la Fm. San Felipe se encuentran en el campo de lo magnesiano.

Las muestras que siguen una tendencia ferrosa se enriquecen con hierro antes de enriquecerse en álcalis, a excepción de una muestra de la SSCC. Mientras que aquellas que siguen una tendencia magnesiana muestran un enriquecimiento mínimo de hierro refiriéndose a una muestra del EDL.

En el diagrama MALI vs. SiO₂ ([Figura 6.9b](#)) las aplitas del EDL se encuentran en el campo cálcico, así mismo con una muestra de toba de la Fm. San Felipe. Una muestra de toba se encuentra en el límite de alcalino-cálcico a alcalino, como una muestra de dique sienítico de la SSCC.

De acuerdo con los datos graficados en el ASI vs. SiO₂, la [Figura 6.9c](#), las aplitas del EDL y las tobas de la Fm. San Felipe son metaluminosas, al igual que los diques sieníticos de la SSCC.

Los datos graficados en el diagrama de FSSI ([Figura 6.9d](#)) indican que la mayoría de aplitas del EDL se encuentran en el rango de meta/peraluminosas, además de ser sobresaturadas en sílice, aunque hay una muestra que se encuentran en el límite de lo sobresaturado y otra completamente sobresaturada.

En cuanto a las sienitas, muestran su peculiaridad peralcalina y subsaturadas en sílice, aunque existen tres muestras que son principalmente metaluminosas. Las tobas de la Fm. San Felipe son subsaturadas en sílice y metaluminosas.

7. ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO

Los resultados completos del estudio de geocronología U-Pb para cada muestra se encuentran listados en el [Anexo 2](#).

7.1 Muestra Pr5 – Aplita (Presa Cerro Prieto)

De la muestra Pr5 se analizaron 27 circones, de los cuales 19 son concordantes y 8 discordantes. La edad de concordia de este evento es de 79.26 ± 0.50 [MSWD=1.9, $p(x^2)=0.0011$] ([Figura 7.1a](#)).

La edad promedio ponderada ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) de los 19 cristales analizados es de 78.9 ± 0.5 [MSWD=2, $p(x^2)=0.002$] ([Figura 7.1b](#)). El histograma KDE (*Kernel Density Estimation*) arroja un único pico máximo de 80 Ma ([Figura 7.2a](#)).

En los circones de la aplita Pr5 se observa un enriquecimiento para las LREE (La_N de 0.32 hasta 83.55) que aumenta exponencialmente en dirección de la HREE (Lu_N 1378.88 a 5083.85), representando una pendiente pronunciada.

La relación de $(\text{La}/\text{Sm})_N$ alcanza 2.27. La relación $(\text{La}/\text{Yb})_N$ llega hasta 0.04. La relación Eu/Eu^* va de 0.09 a 0.32. Se presenta una pronunciada anomalía negativa de Eu_N entre 2.72 hasta 28.57 ([Figura 7.2b](#)).

En la aplita Pr5 se observan dos circones más enriquecidos que el resto: (1) Pr5_Zr02a con una mejor edad de 82.1 Ma y (2) Pr5_Zr10 con una mejor edad de 83.1 Ma. Sin embargo, las edades de estas dos muestras se encuentran en el rango de las mejores edades de la población de circones 75.7-83.2 Ma.

7.2 Muestra Pr6 – Aplita (Presa Cerro Prieto)

Se analizaron 25 cristales, de los cuales 22 son concordantes y 3 discordantes. La edad de concordia es de 78.4 ± 0.6 [MSWD=2.4, $p(x^2)=5.4 \times 10^{-07}$] ([Figura 7.3a](#)).

La edad promedio ponderada ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) de los circones analizados es de 78.4 ± 0.6 [MSWD=4, $p(x^2)=3 \times 10^{-10}$] ([Figura 7.3b](#)). El histograma KDE muestra un pico máximo de 79 Ma ([Figura 7.4a](#)).

En los circones de la aplita Pr6 se observa un enriquecimiento de las LREE (La_N de 0.32 hasta 975.48) que aumenta en dirección de la HREE (Lu_N 2313.66 a 12527.95),

representando una pendiente pronunciada. La relación de $(La/Sm)_N$ alcanza 1.34. La relación $(La/Yb)_N$ alcanza 0.17.

La relación Eu/Eu^* va de 0.02 a 0.33. Se observa una anomalía negativa de Eu_N entre 2.72 y 727.69 (Figura 7.4b).

En la muestra Pr6 se observa un circón más enriquecido respecto los otros de esta misma muestra, es el Pr6_Zrn-19 cuya mejor edad es de 76.9 Ma. La edad del circón se encuentra dentro del rango de 72.1 y 84.2 Ma., correspondiente a toda la población de circones.

7.3 Muestra PC4 – Aplita (Purísima de Conchos)

Se analizaron 29 circones, de los cuales 27 son concordantes y 2 discordantes. La edad de concordia es de 80.9 ± 0.5 [MSWD=1.7, $p(x^2)=0.0021$] (Figura 7.5a).

La edad promedio ponderada ($^{207}Pb/^{206}Pb$) de los circones analizados es de 80.7 ± 0.5 [MSWD=2, $p(x^2)=0.001$] (Figura 7.5b). El histograma KDE muestra un único pico máximo de 81 Ma (Figura 7.6a).

En los circones de la aplita PC4 se observa un enriquecimiento de las LREE (La_N de 0.32 hasta 1023.87) que aumenta en dirección de las HREE (Lu_N 2116.15 a 8696.89), representando una pendiente pronunciada.

La relación $(La/Sm)_N$ alcanza 1.47. La relación $(La/Yb)_N$ alcanza 0.22. La relación Eu/Eu^* va de 0.04 a 0.43. Se observa una anomalía negativa de Eu_N entre 2.72 y 165.99 (Figura 7.6b).

En la aplita PC4, se encontraron seis circones enriquecidos en REE: (1) PC4_Zrn-03 con una edad mejorada de 79.2 Ma.; (2) PC4_Zrn-20 con una mejor edad de 77.8 Ma.; (3) PC4_Srn-21 con una edad mejorada de 81.1 Ma.; (4) PC4_Zrn-05 con una mejor edad de 78.2 Ma.; (5) PC4_Zrn-04 con una mejor edad de 78.6 Ma. y (6) PC4_Zrn-28 con una mejor edad de 79.1 Ma. Las edades de estos circones se encuentran dentro del rango de edades de la población 77.78 a 85.8 Ma.

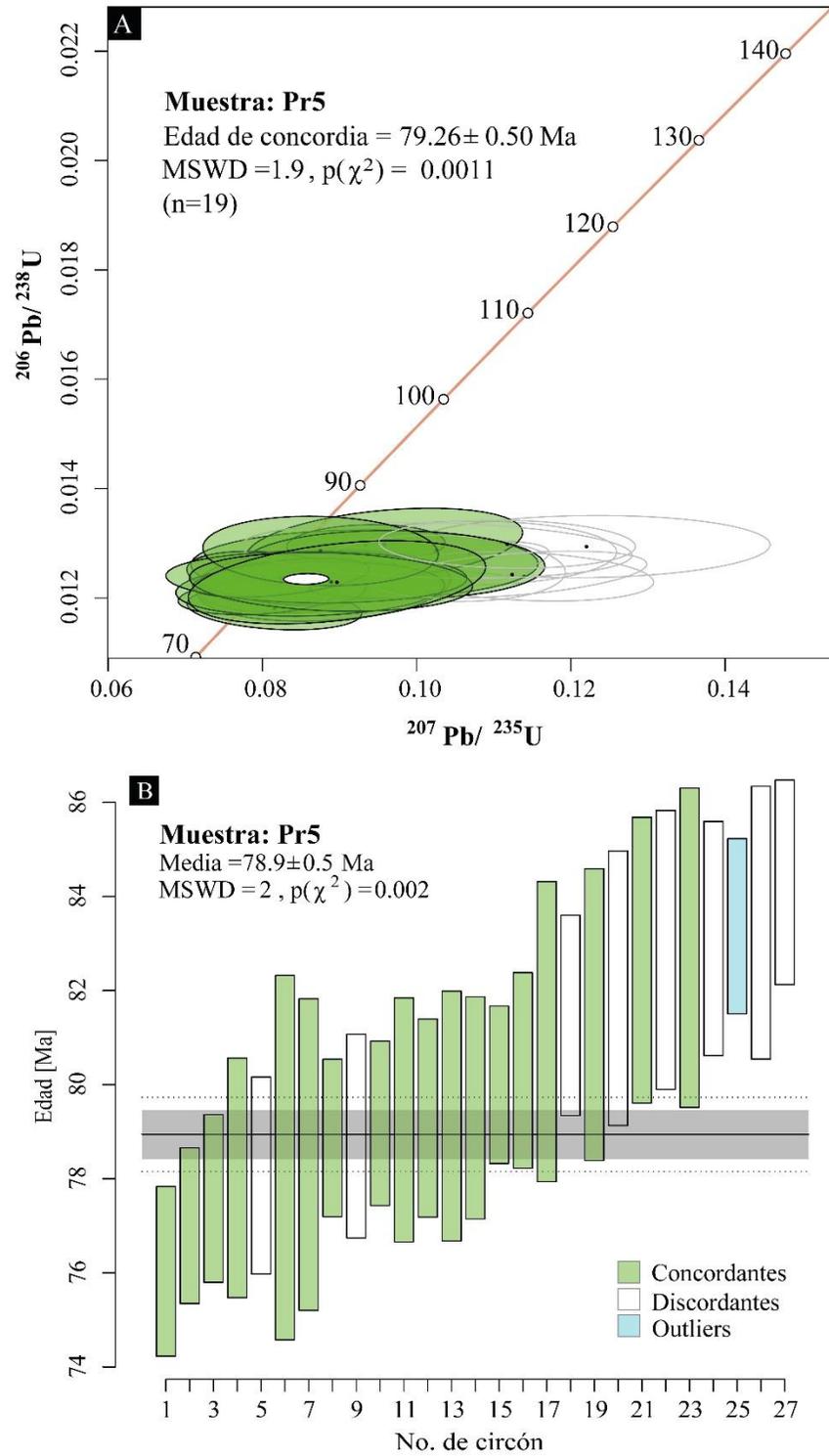


Figura 7.1. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **Pr5**. A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb. Las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

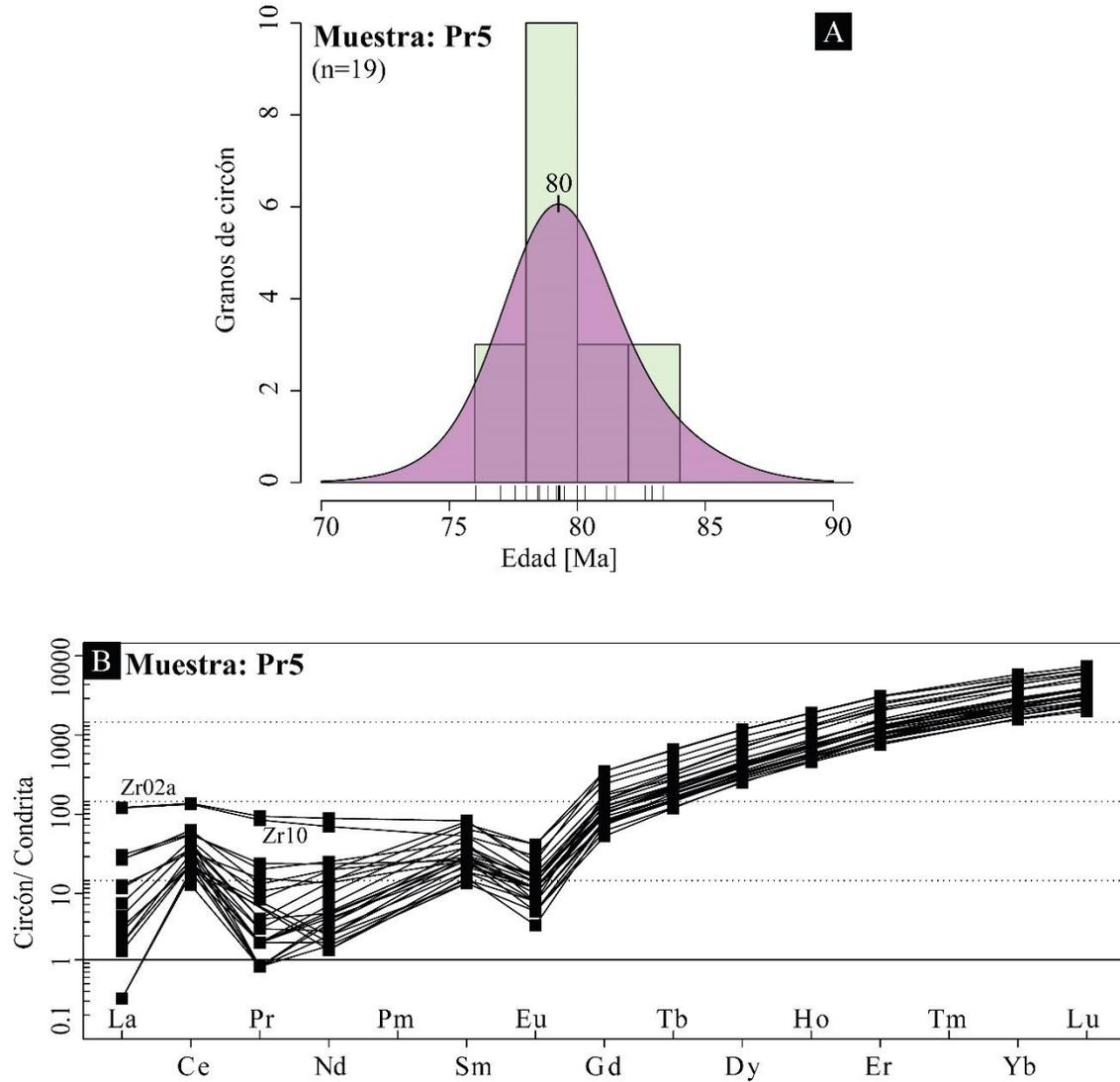


Figura 7.2. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **Pr5**. A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (*Kernel density estimates*). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de [Boynton \(1984\)](#).

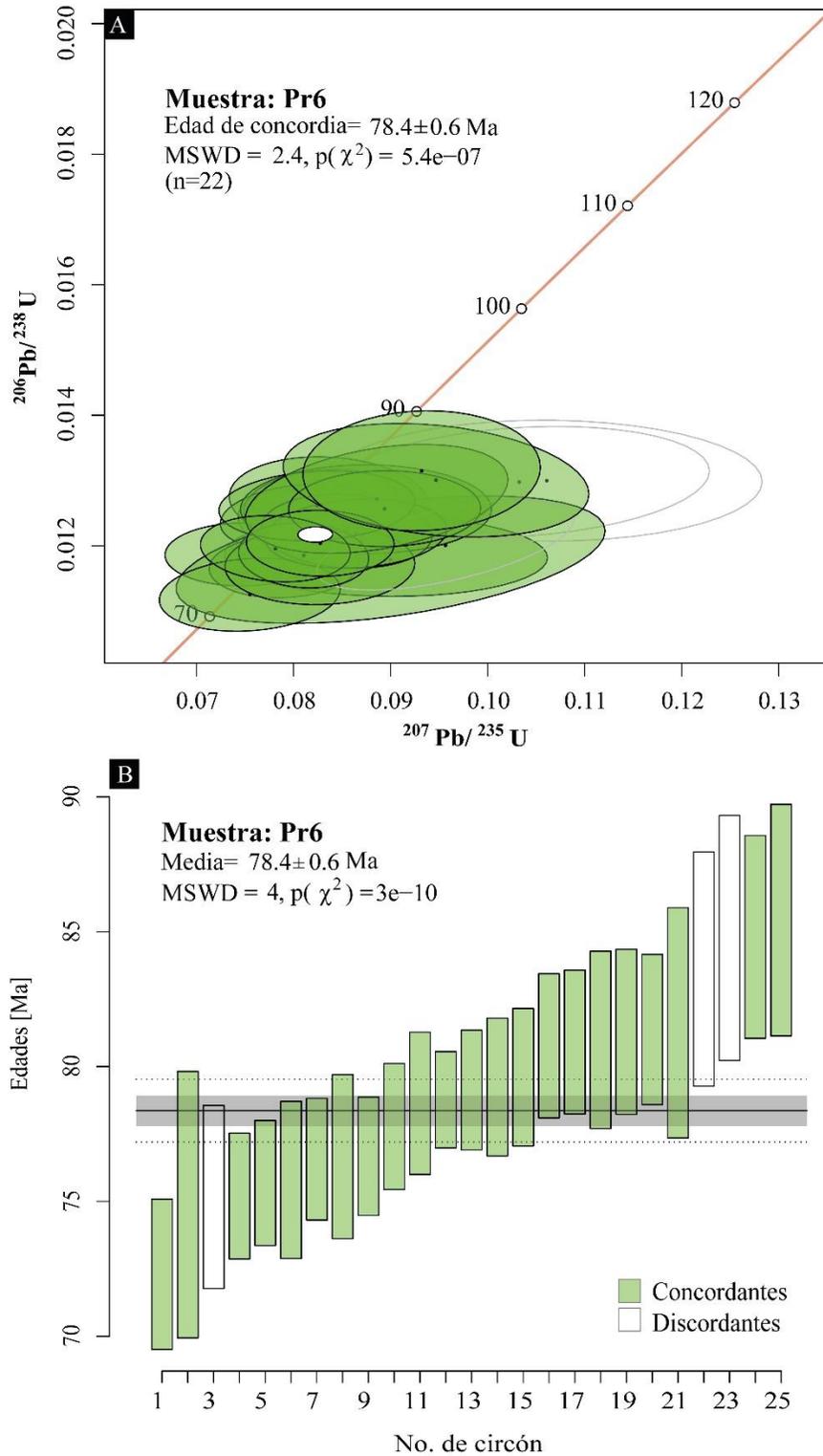


Figura 7.3. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **Pr6**. A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

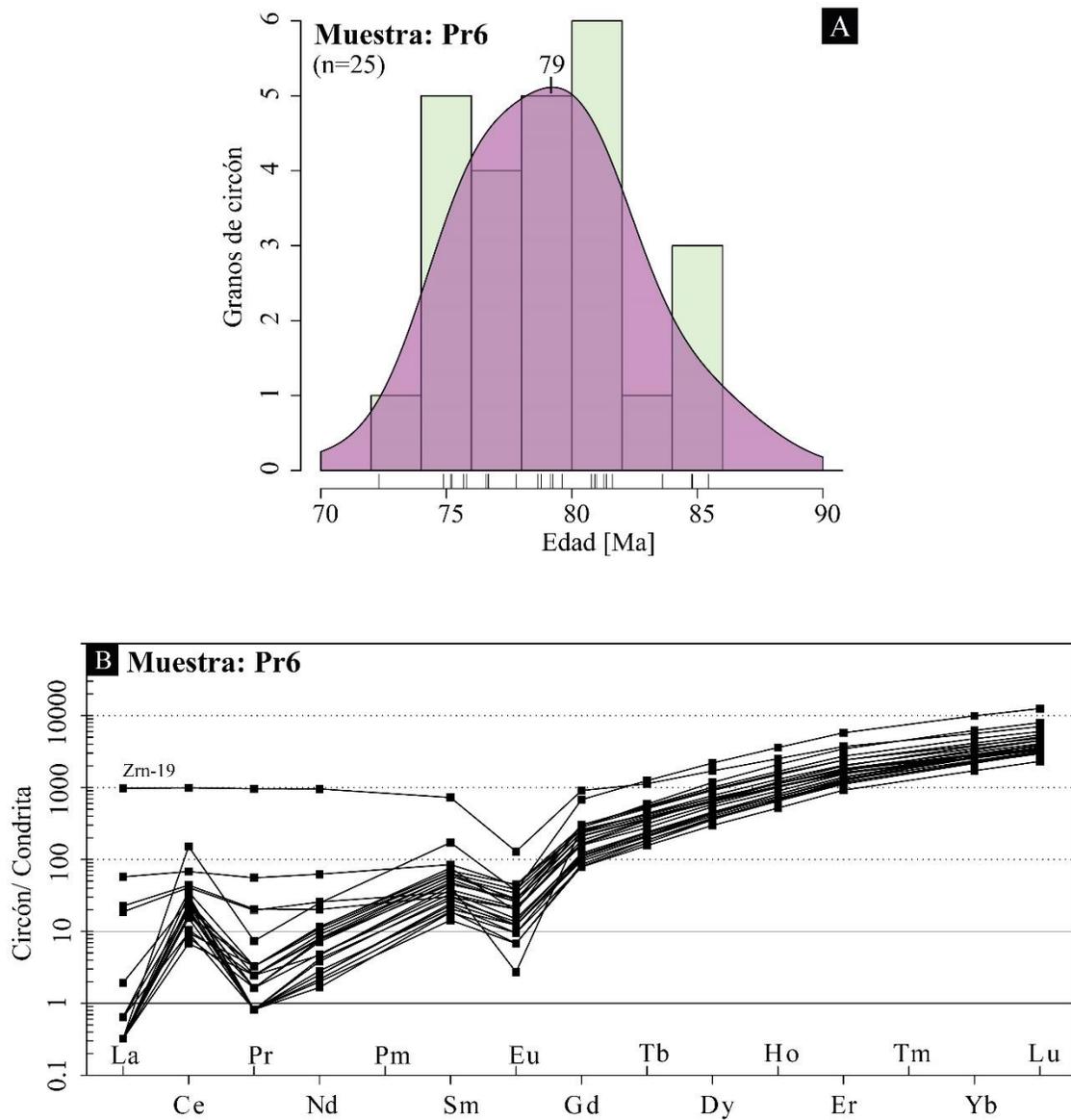


Figura 7.4. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **Pr6**. A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (*Kernel density estimates*). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de [Boynton \(1984\)](#).

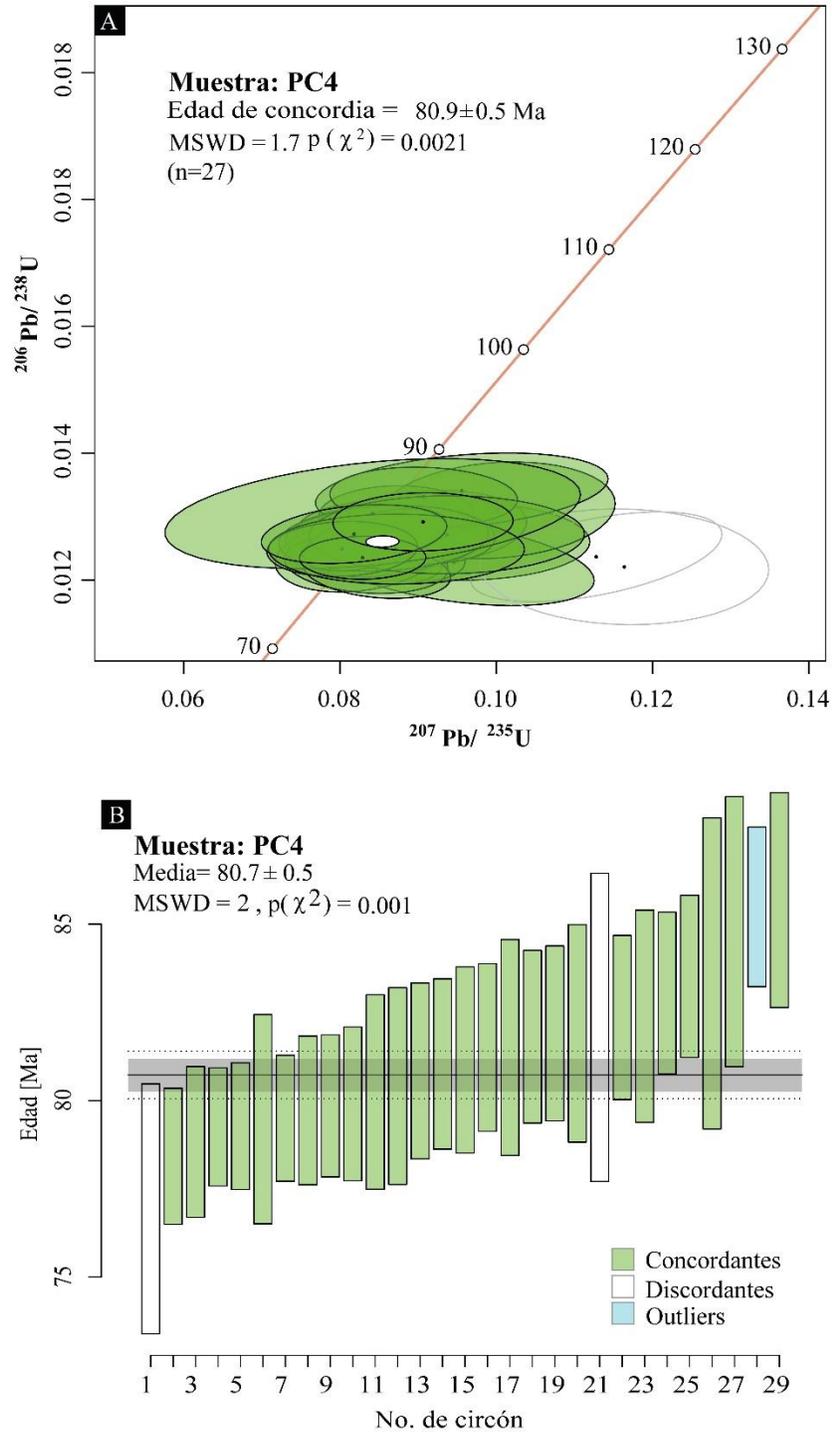


Figura 7.5. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **PC4**. A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

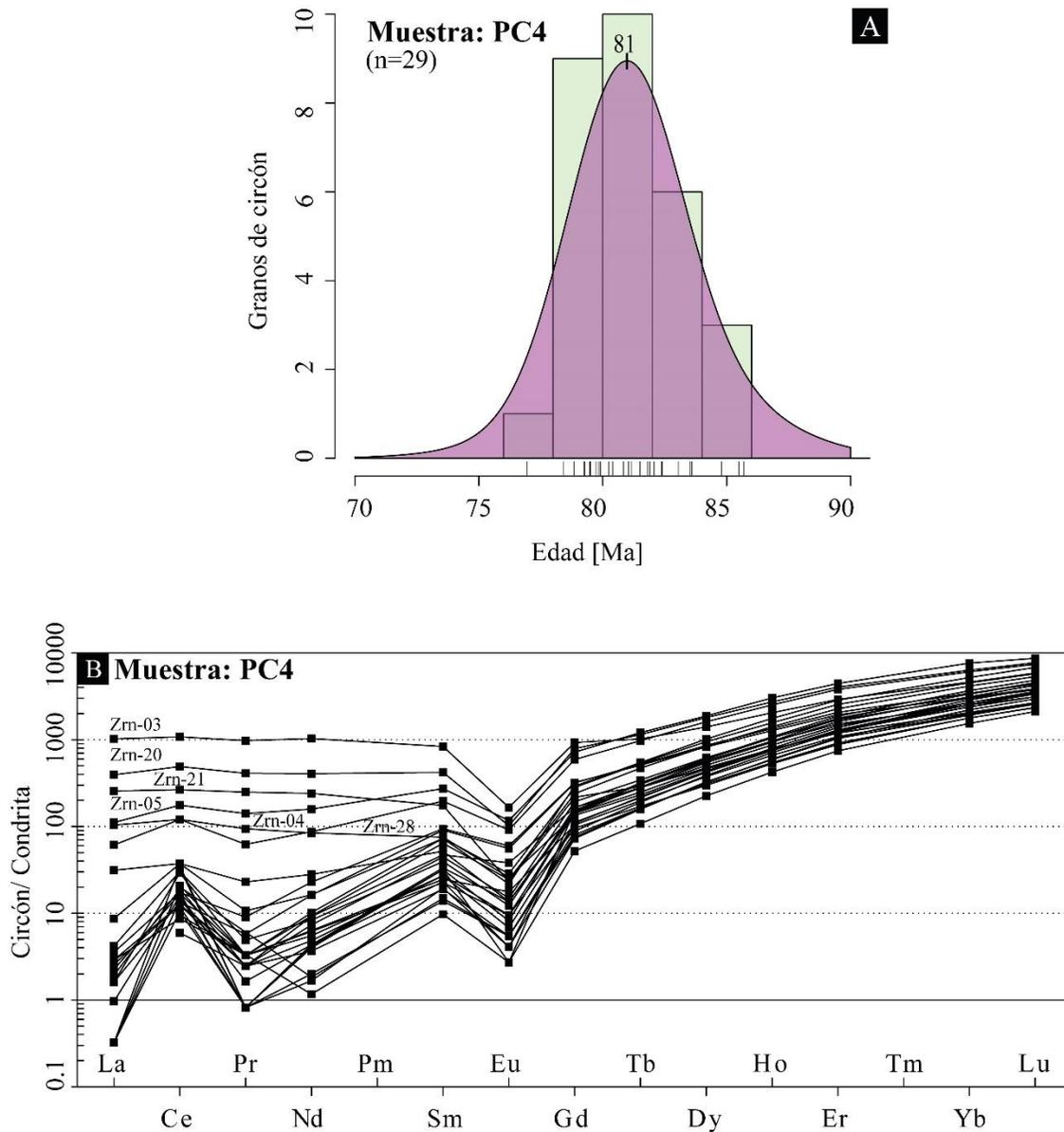


Figura 7.6. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **PC4**. A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (*Kernel density estimates*). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de [Boynton \(1984\)](#).

7.4 Muestra PC12 – Aplita (Purísima de Conchos)

Se analizaron un total de 26 circones, de los cuales 16 son concordantes y 10 discordantes.

La edad de concordia es de 79.51 ± 0.68 [MSWD=1.6, $p(x^2)=0.017$] ([Figura 7.7a](#)).

La edad promedio ponderada ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) de los circones analizados es de 79.51 ± 0.68 [MSWD=2.8, $p(x^2)=0.00021$] (Figura 7.7b). El histograma KDE muestra un único pico máximo de 79 Ma. (Figura 7.8a).

En los circones de la aplita PC12 se observa un enriquecimiento para las LREE (La_N de 0.32 hasta 129.03) que aumenta en dirección de las HREE (Lu_N 1621.12 a 6357.14), representando una pendiente pronunciada. Las LREE se encuentran en una pendiente negativa. La relación $(\text{La}/\text{Sm})_N$ alcanza 1.22. La relación $(\text{La}/\text{Yb})_N$ alcanza 0.03. La relación Eu/Eu^* va de 0.04 a 0.6. Se muestra una anomalía negativa de Eu_N entre 1.36 y 34.01 (Figura 7.8b).

La aplita PC12 se contiene dos circones que se encuentran enriquecidos en REE: (1) PC12_Zr17 cuya mejor edad es de 76.6 Ma. y (2) PC12_Zr24 tiene una mejor edad de 78.2 Ma. Las edades de estos dos circones se encuentran dentro del rango de edades de la población de la muestra PC12: de 75.1 a 87.4 Ma.

7.5 Muestra SF1 – Toba alterada de la Fm. San Felipe (El Mulato)

En esta muestra se analizaron un total de 24 circones, de los cuales 20 son concordantes y 4 discordantes. La edad de concordia es de 86.2 ± 0.5 [MSWD=1.7, $p(x^2)=0.004$] (Figura 7.9a). La edad promedio ponderada ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) de los circones analizados es de 86.4 ± 0.6 [MSWD=2, $p(x^2)=0.01$] (Figura 7.9b). El histograma KDE muestra un único pico máximo de 79 Ma. (Figura 7.10a).

En los circones de la toba alterada SF1 se observa un enriquecimiento para las LREE (La_N de 0 hasta 103.87) que aumenta en dirección de las HREE (Lu_N 2074.53 hasta 10077.64), generando una pendiente pronunciada. La relación $(\text{La}/\text{Sm})_N$ alcanza 0.66. La relación $(\text{La}/\text{Yb})_N$ alcanza 0.02. La relación Eu/Eu^* va de 0.04 a 0.36. Se observa una anomalía negativa de Eu_N entre 4.08 hasta 93.88 (Figura 7.10b).

En la toba de la Fm. San Felipe (SF1) se muestran tres circones más enriquecidos en REE respecto a otros de esta misma: (1) SF1_Zr12 con una mejor edad de 85.5 Ma.; (2) SF1_Zr14 con una edad mejorada de 84.0 Ma.; (3) SF1_Zr16 con una edad mejorada de 86.7 Ma. Estas edades se encuentran dentro del rango de edades mejoradas de la población de la muestra SF1: 80.2 a 90.4 Ma.

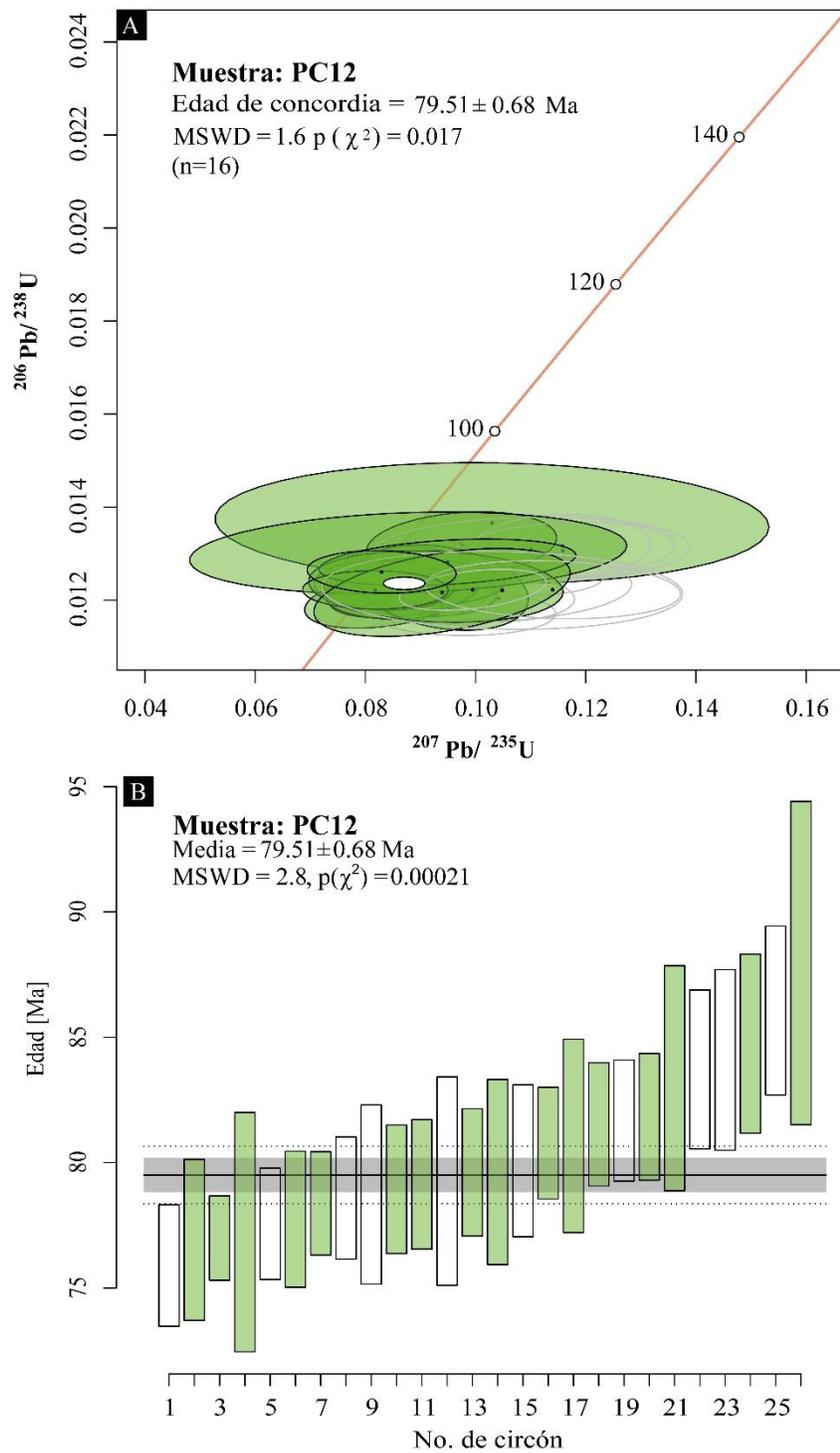


Figura 7.7. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **PC12**. A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

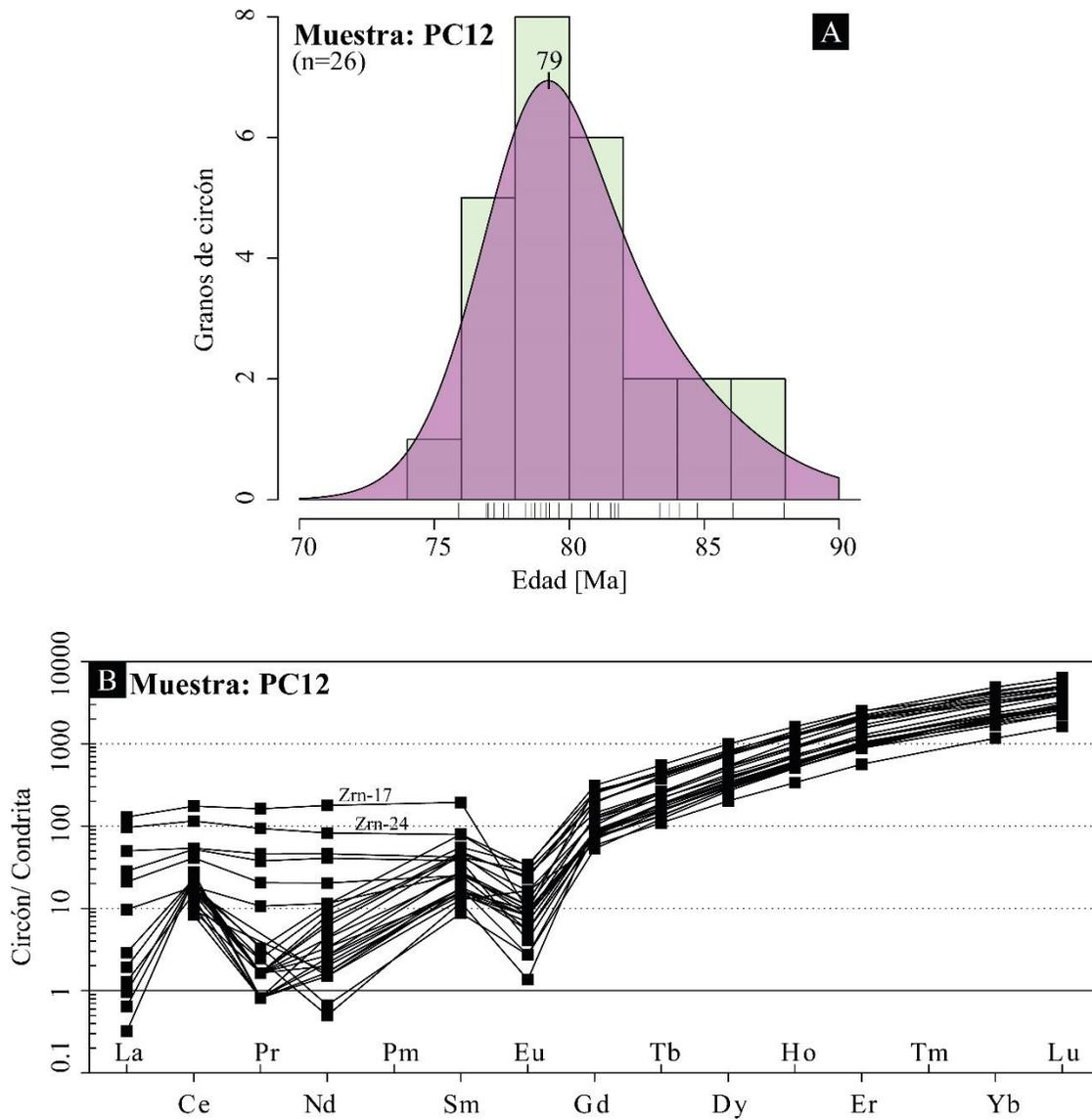


Figura 7.8. Datación U-Pb en circones del dique aplítico **PC12** A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (*Kernel density estimates*). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de [Boynton \(1984\)](#).

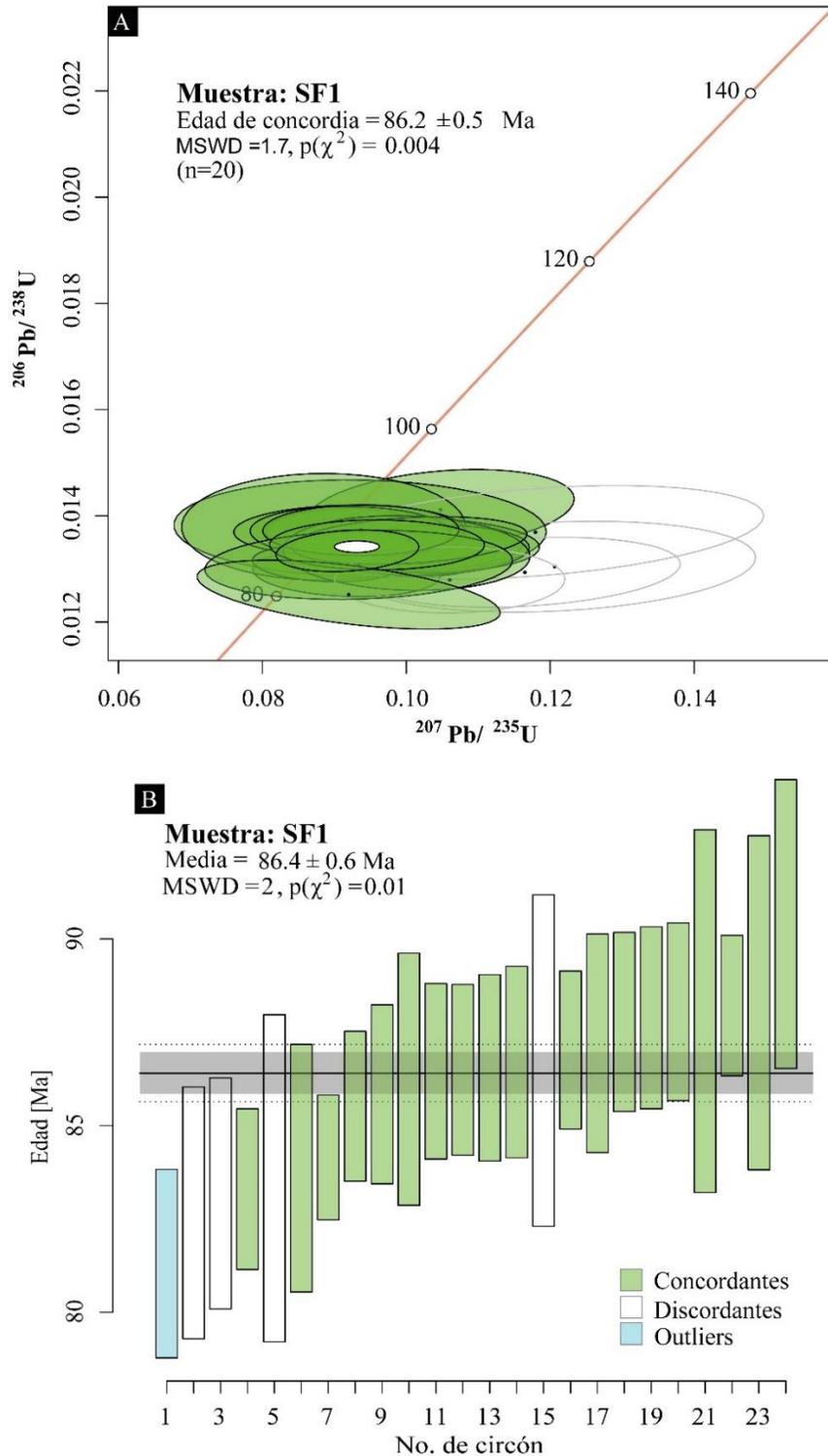


Figura 7.9. Datación U-Pb en circones de la toba alterada de la Fm. San Felipe **SF1**. A. Diagrama Wetherill de concordia U-Pb, las elipses verdes representan edades de cristales con pérdida de Pb, así mismo representan el rango de incertidumbre ($\pm 2\sigma$). B. Diagrama de edad promedio ponderada $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

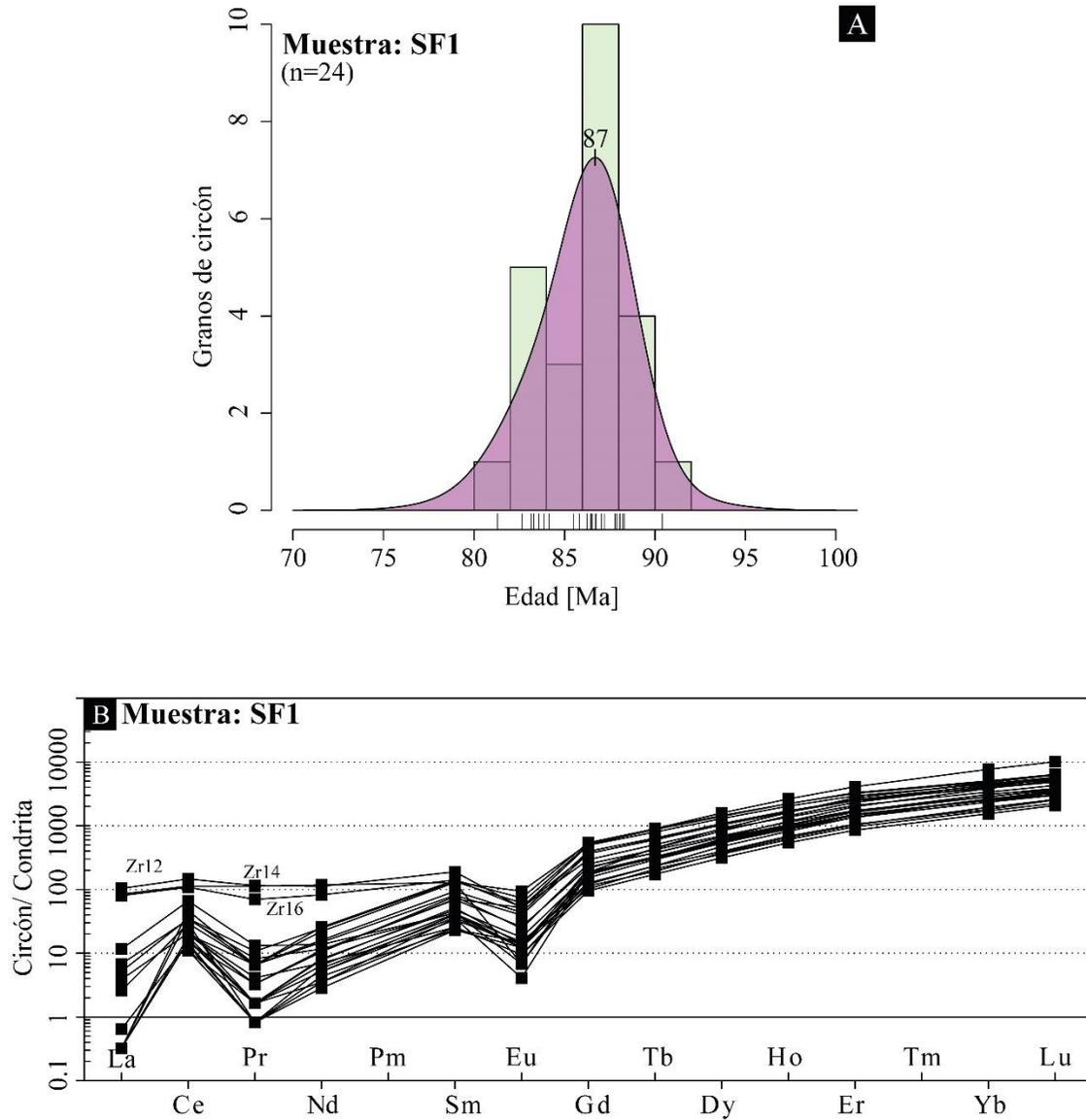


Figura 7.10. Datación U-Pb en circones de la toba alterada de la Fm. San Felipe SF1. A. Histograma y diagrama de probabilidad relativa de edades aparentes $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ KDE (*Kernel density estimates*). B. Patrones normalizados de condrita vs. REE. Datos normalizados de [Boynton \(1984\)](#).

7.6 Relación Th-U

Uno de los criterios para determinar la procedencia de los circones es a partir de la concentración, y relación, de Th y U (Wang *et al.*, 2011; Kirkland *et al.*, 2014).

Los circones en la muestra Pr5 presentan una relación Th/U de entre 0.36 y 0.86 ppm. Los circones de la muestra Pr6 tienen una relación Th/U de 0.55 a 1.94 ppm. La muestra PC4 tiene una relación U/Th de 0.31 a 1.39. La muestra PC12 tiene una relación Th/U de entre 0.24 y 0.98. Este conjunto de muestras son las aplitas del ED. La muestra SF1, que corresponde a una toba alterada de la Fm. San Felipe, presenta en los circones una relación Th/U de 0.34 a 1.06

De acuerdo con Rubatto (2017) la relación Th/U en zircones metamórficos suele ser <0.1 . En cuanto a la relación de circones magmáticos, suele ser >0.1 o >0.5 (Kirkland *et al.*, 2014; Grimes *et al.*, 2015).

En el diagrama bivariado de edad aparente respecto a la relación Th/U, se observa que los circones de las muestras de aplitas son de origen ígneo, al igual que los de la toba alterada (Figura 7.11).

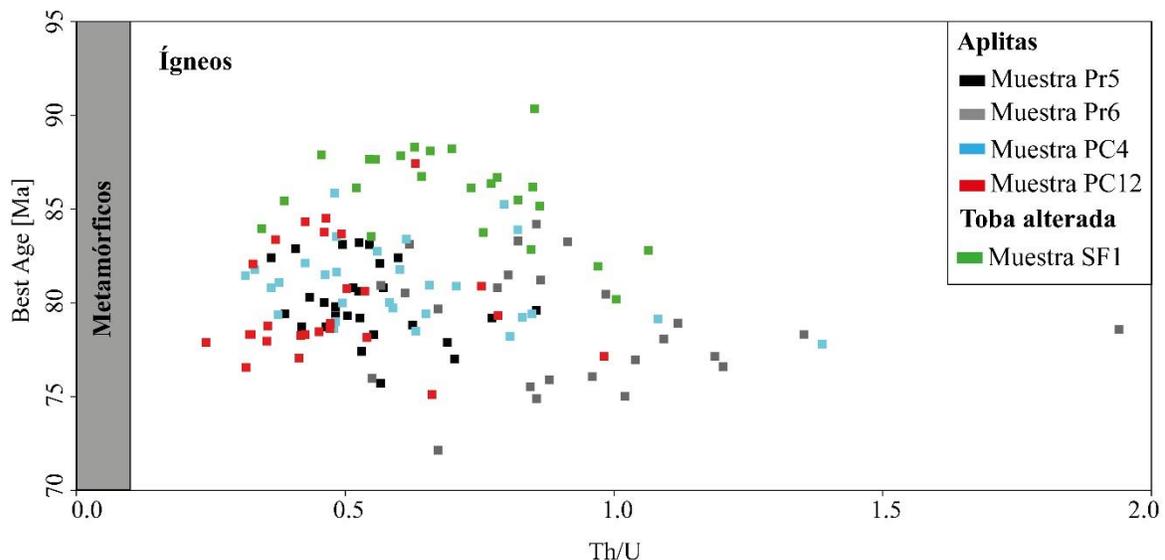


Figura 7.11. Diagrama bivariado de la mejor edad aparente con respecto a la relación Th/U (Adaptado de Martens *et al.*, 2012).

8. ANÁLISIS GEOFÍSICO

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) se utilizó para determinar la geometría del dique a una profundidad somera. El tendido de la conexión fue 240 m, el cual se colocó oblicuo a la estructura del dique como se muestra en la [Figura 8.1](#).

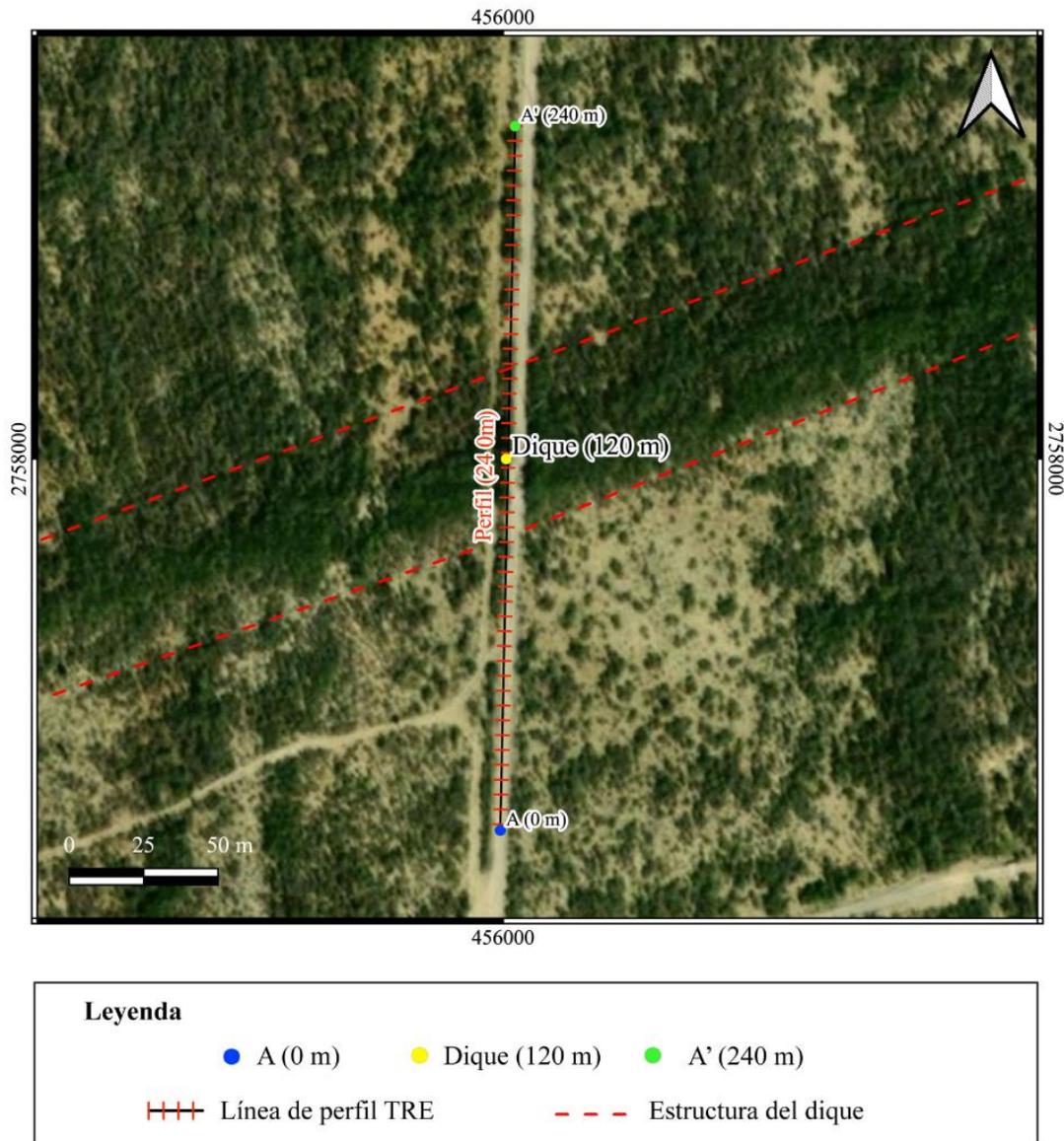


Figura 8.1. Ubicación de la línea de tomografía de resistividad eléctrica. El punto A es el principio de la sección. El punto medio (en el metro 120 del tendido) marcado como “Dique” es donde se distingue la estructura en superficie. A’ es el final de la sección. La estructura del dique, marcada con líneas punteadas rojas, se logra identificar por la densidad de vegetación.

8.1 Resultados

Para tener una mejor visión de la topografía respecto al tendido del TRE se realizó un perfil de elevación sobre el nivel del mar en *Google Earth Pro* (Figura 8.2), colocándose la coordenada inicial de la línea a 296 m.s.n.m. y la coordenada final a 300 m.s.n.m., teniendo una diferencia de elevación de 4 metros entre el inicio y el final del trazo.

Para comenzar el análisis, en el software RES2DINV se revisaron el total de datos tomados en campo, que fueron 1030. Estos datos se observaron en la malla de espaciamiento ente electrodos y longitud de dipolo generada por el programa, donde se descartaron datos anómalos a la tendencia de los datos originales medidos, restando un total de 963 datos para trabajar con ellos en la inversión (Figura 8.3).

En la Figura 8.4a se observa el histograma del porcentaje del total de datos vs. Porcentaje de error, donde el error máximo es 156.8%. En el panel B se observan los datos de resistividad aparente calculada vs. Resistividad aparente medida en Ωm , aquí se aprecian los puntos desviados de la tendencia.

En la Figura 8.4c se muestran los datos que se mantuvieron después de depurar los datos desviados, restaron un total de 963 datos con un error máximo de 30.5%. Así mismo se observa en el panel D como los datos ya se encuentran dentro del mismo rango.

En la Figura 8.5 se observan los 963 datos a manera de un modelo de bloques. En este modelo, que muestra los bloques de sensibilidad relativa, se ilustra cómo RES2DINV tiene la capacidad de crear datos en los costados de la sección interpolando los datos medidos. Estos datos seleccionados por el programa también fueron descartados en la inversión.

El modelo inverso resultante (Figura 8.6) muestra que la profundidad total alcanzada durante la medición por la tomografía de resistividad eléctrica fue de 46.6 m. Así mismo se muestran las diferentes secciones de resistividad.

Al centro del perfil A-A' se localiza la estructura del dique que se distingue de los elementos que la rodean. Para este perfil se realizaron 5 iteraciones y una vez descartados los datos desviados el error permaneció en 8.6%.

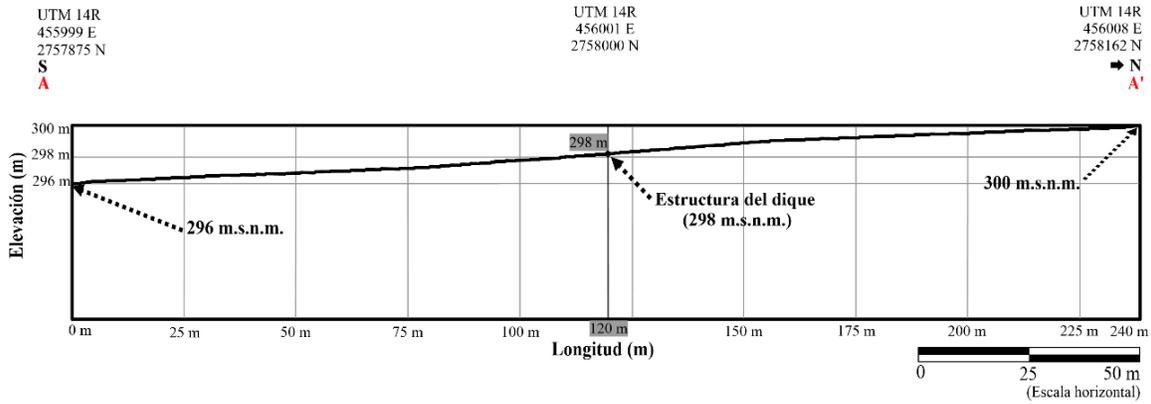
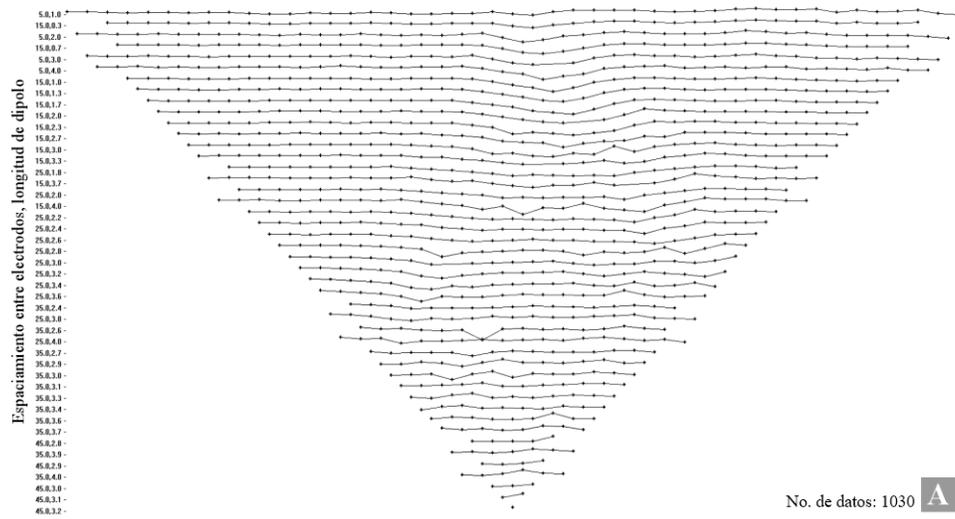


Figura 8.2. Perfil topográfico correspondiente a la línea de TRE.
Malla con datos originales medidos



Malla con datos anómalos descartados

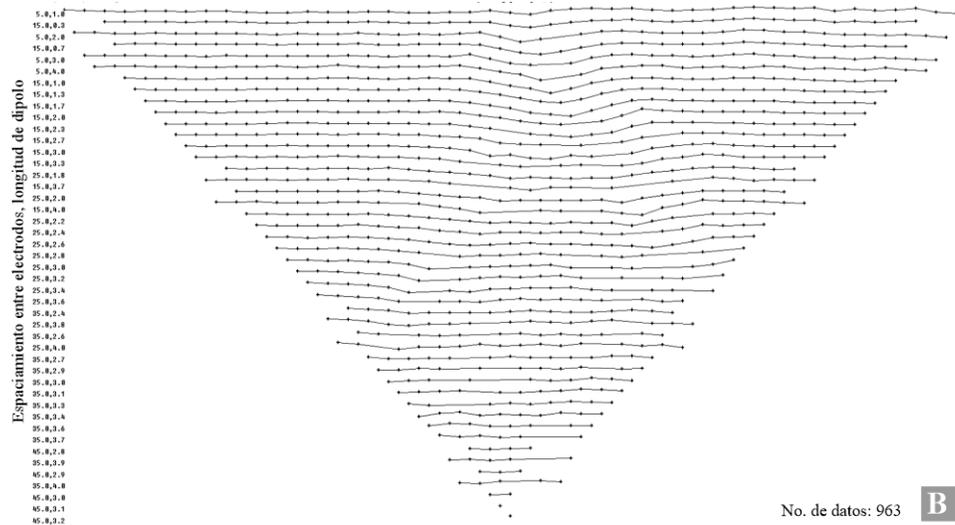


Figura 8.3. Malla de datos de resistividad. (A) Malla con datos originales medidos. (B) Malla con datos descartados.

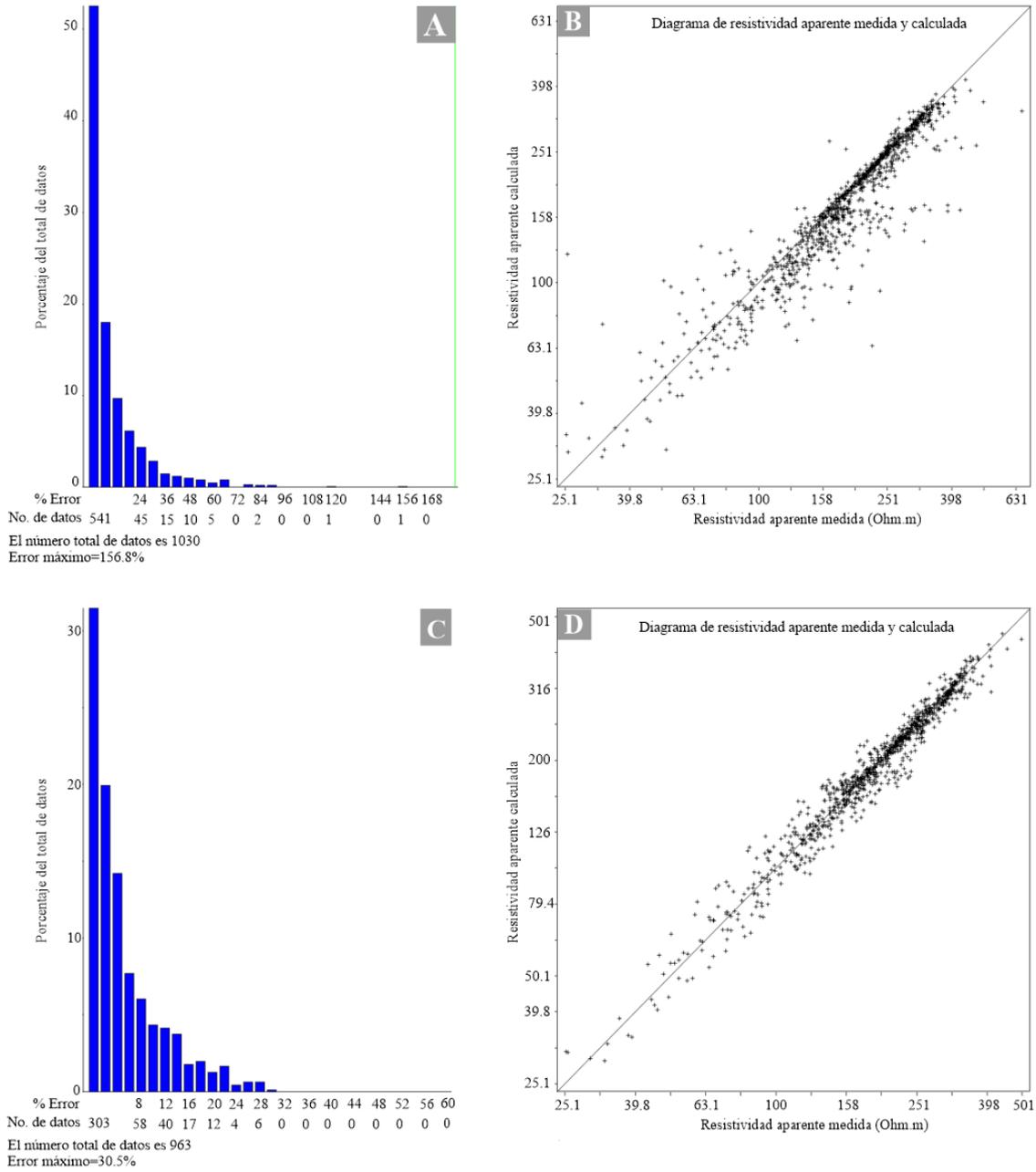


Figura 8.4. Histogramas de datos de resistividad. (A) Histograma con datos originales medidos. (B) Diagrama con datos originales medidos. (C) Histograma con datos después de la depuración de datos con errores del más del 30%. (D) Histograma con datos sin errores mayores a 30%.

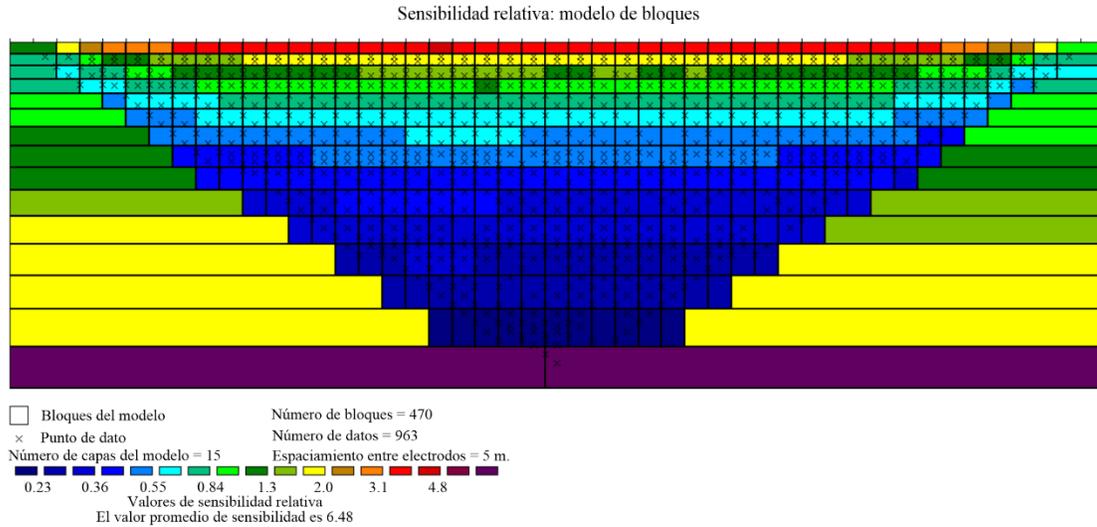


Figura 8.5. Modelo de bloques de sensibilidad relativa.

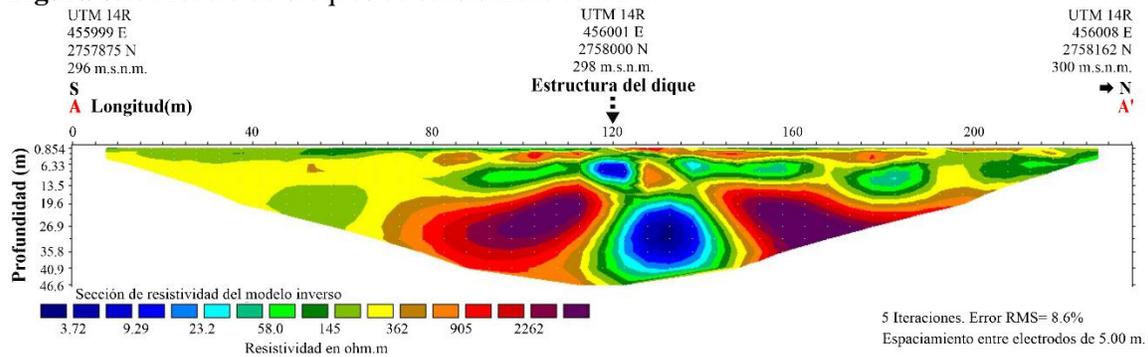


Figura 8.6. Modelo inverso de la TRE.

8.2 Interpretación

En la Figura 8.7 se hace un análisis más detallado de las secciones de resistividad del modelo inverso. Para este análisis se consultaron diversos valores de resistividad reportados para cada tipo de roca, aunque esto se complementó con el análisis de campo. Así mismo se conoce que en el área donde está emplazado el dique aflora la Formación San Felipe, conformada en su mayoría por caliza arcillosa, lutita y tobas (PEMEX, 1962; Ortega-Torres, 2022).

La Zona 1 se interpreta como una zona de conglomerado (100 – 145 Ωm; Palacky, 1987; Rolland, 2011). La Zona 2 puede corresponder a un sill de composición granítica (57 – 120 Ωm; Palacky, 1987), que es también un cuerpo hipabisal y se compara en resistividad con la Zona 5 del dique al probablemente ser de la misma composición mineralógica.

La Zona 3, que se encuentra en los extremos de la estructura del dique, parece estar compuesta de rocas arcillosas (p.e. lutita y/o caliza arcillosa) que se encuentran ligeramente levantadas o fracturadas ($362 - 2262 \Omega\text{m}$; Palacky, 1987; Khalil *et al.*, 2013).

La alta resistividad suele presentarse en cuerpos heterogéneos en composición o estructura, a tal grado que la conductividad es muy baja. Aunque este método no se utiliza precisamente para reconocer la geometría a detalle de las estructuras, se han observado diques que al emplazarse en estratos cuasihorizontales, tienden a levantar ligeramente la roca encajonante en el proceso de buscar una zona de debilidad para su emplazamiento. En cualquier posibilidad, esta zona representa el contacto entre los cuerpos hipabisales y la roca encajonante.

La Zona 4 se caracteriza por tener conductividades correspondientes a rocas arcillosas. Esta zona podría ser la que mejor represente la conductividad de la Formación San Felipe, ya que no se encuentra directamente en contacto con los cuerpos hipabisales ($145 - 362 \Omega\text{m}$) (Palacky, 1987; Khalil *et al.*, 2013).

La Zona 5 corresponde a la estructura misma del dique. Para caracterizar su resistividad se buscaron en la literatura datos de rocas de composición granítica. El dique aplítico presenta con una resistividad de 40 a $140 \Omega\text{m}$ (Palacky 1987; Ravindran, 2012).

Al centro de la estructura del dique se encuentra un sitio que evidentemente es menos resistivo ($6- 30 \Omega\text{m}$), esto puede ser causado por filtración de agua que aprovecha esta estructura para su paso, dejando humedad impregnada o siendo almacenada allí (Palacky, 1987; Rolland, 2011; Ravindran, 2012).

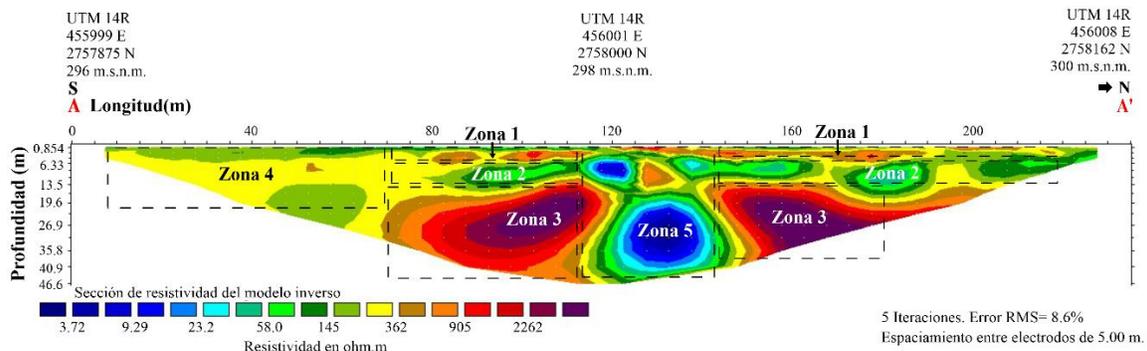


Figura 8.7. Modelo inverso de la TRE con zonas de análisis. Explicación de la figura en el texto que la refiere.

9. DISCUSIÓN

9.1 Análisis geoespacial

Anteriormente [Antonio-Durán \(2022\)](#) reportó un total de 378 lineamientos correspondientes a diques. Sin embargo, al realizar una exploración más detallada en campo y con el apoyo del análisis espacial, se detectaron 572 en total, aunque en algunos casos estos podrían tratarse de diques segmentados. Los diques del EDL que con mayor frecuencia ocurren tienen una longitud de entre 40 y 288.7 metros. En cuanto a la orientación de los diques se observa una familia principal NE-SW.

Se observaron otras orientaciones resultando en diques oblicuos a la familia principal, con una dirección promedio de NW-SE, en campo se llegó a medir un dique de hasta 170° . Petrográficamente se compararon diques oblicuos entre sí, de dos orientaciones (**PCD7**= $169^\circ/83^\circ$ y **PCD8**= $264^\circ/62^\circ$), teniendo la misma composición. Estas dos orientaciones son la evidencia de la relación con las fracturas preexistentes de la Fm. San Felipe.

Comparando los datos de fracturas de la Fm. San Felipe (**SF1**: $250^\circ/78^\circ$; **SF2**: $179^\circ/86^\circ$) y las orientaciones de los diques se concluye que estas fracturas fueron aprovechadas como planos de debilidad para el emplazamiento de los diques. La familia de fracturas SF1, correspondería a la familia de diques principal y la familia de fracturas SF2 con la familia secundaria, que son oblicuos respecto a la principal.

Otra evidencia que relaciona el emplazamiento de los diques con las fracturas preexistentes de la Fm. San Felipe es el arreglo que se tiene entre ambos sistemas y que puede ser fundamentada con la clasificación de [Hoek \(1991\)](#). El EDL muestra arreglos de diques irregulares, *en echelon*, anastomosados y en *zigzag*. Estos últimos se caracterizan por emplazarse en estructuras planares con dos orientaciones. Así mismo, se detectaron fracturas conjugadas donde se emplazaron diques, que tienen $<60^\circ$ entre cada par.

Además de los diques se identificaron otras 210 estructuras geológicas que coinciden con las orientaciones de la familia principal de diques.

En la parte norte del CLB se identificaron 5 fracturas con orientación preferencial NE-SW. En la SSCC se identificaron un total de 201 estructuras como fracturas, ejes

estructurales y fallas que tienen diversas orientaciones. Sin embargo, la orientación preferencial es NW-SE.

Las orientaciones de las fallas El Mulato y Palos Blancos también es preferencialmente hacia el NW-SE. Las alineaciones inferidas de cuellos volcánicos de Burgos tienen una dirección preferencial NW-SE.

9.2 Corredor Linares-Burgos

Con el análisis geoespacial y la integración de la información reportada en trabajos previos se identificaron lineamientos con orientaciones NW-SE que incluyen diques, fallas, fracturas y la alineación de otros cuerpos subvolcánicos. A este conjunto de estructuras geológicas se les denominó Corredor Linares-Burgos.

Los cuellos subvolcánicos de Burgos, que forman parte de los lineamientos del CLB, fueron estudiados por [Leal-Cuéllar \(2024\)](#) quien reporta que son de composición basanítica/basáltica alcalinas pertenecientes a la SSCC.

[Eichekberger et al. \(2006\)](#) menciona que la formación de diques aplíticos en una cámara magmática de composición félsica, mayormente cristalizada, ocurre cuando esta tiene suficiente resistencia para soportar la tensión del campo anisotrópico externo. Así mismo, el autor indica que la presión del fundido excede la mínima tensión principal ($P_m > \sigma_3$), resultando en la propagación de una fractura como un dique perpendicular a la mínima tensión principal.

Las fallas normales y fracturas del límite septentrional de la SSCC, así como los lineamientos de los cuellos volcánicos, no se tomaron en cuenta en el análisis de tensores pues el mayor control metodológico se centró en los diques. Se especula que estas estructuras son más jóvenes que las fracturas y diques, posterior a la orogénesis Laramide. Las estructuras alineadas en la parte septentrional de la SSCC podrían ser producto de su levantamiento y/o de la subsidencia de la cuenca de Burgos.

Los lineamientos del CLB son oblicuos a los elementos tectónicos del Orógeno Mexicano o SMO ya que estos tienen una orientación general NW-SE y cambia su orientación a E-W en la saliente de Monterrey ([Fitz-Díaz et al., 2018](#)).

Así mismo, la orientación de los lineamientos también es oblicua a las estructuras de la Sierra de San Carlos-Cruillas (a excepción de las Fallas El Mulato y Palos Blancos).

La orientación del tensor de esfuerzos calculado para los diques es de SW-NE, el régimen de esfuerzos es extensional donde $\sigma_3 = S_{\text{hmin}}$ ($00^\circ/119^\circ$) $\sigma_2 = S_{\text{Hmax}}$ ($00^\circ/257^\circ$) y $\sigma_1 = S_v$ es ($90^\circ/119^\circ$). Cabe mencionar que este es un paleoesfuerzo vigente durante la formación del sistema de fracturamiento en el cual se emplazaron los diques.

Un evento de extensión predominante en el norte de México es el BS. Sin embargo, este es reciente en comparación con el EDL cuyo tensor de paleoesfuerzo es NW-SE y la edad relativa de fracturamiento es durante el Cretácico Superior. [Wernicke \(1992\)](#) menciona que durante el Mioceno Medio el BS tuvo una orientación NE-SW y en el Mioceno Tardío la dirección de esfuerzo principal rotó $\sim 45^\circ$, cambiando a NW-SE ([Zoback, 1981](#)).

La SMO fue tectónicamente generada por un empuje con dirección preferencial ENE ([Padilla y Sánchez, 1985](#)). De acuerdo con [Fitz-Díaz et al. \(2018\)](#) hubieron por lo menos tres etapas de deformación: 93-80 Ma, 57-64 Ma y 55-43 Ma. Por el contrario, el EDL fue generado de un evento de extensión con dirección NW-SE. Además, en la SMO se generaron pliegues, fallas y cabalgaduras como evidencias de eventos compresionales, mientras que el EDL se caracteriza por tener fracturas como evidencia de extensión.

9.3 Petrología de diques aplíticos

Los diques aplíticos analizados son microporfiríticos a porfiríticos, con una matriz de microcristales de cuarzo y feldspatos. Además, contienen cristales de biotita, ortoclasa, circón y minerales opacos.

Las aplitas tienen más del 50 % en peso de SiO_2 (56.89 a 72.31%), a excepción de la muestra PC12 (45.34%), cuyo valor puede deberse a alteración secundaria. Los valores de MgO son muy bajos variando de 0.03 a 0.18% en peso. Los elementos traza enriquecidos en las aplitas son: La (13.6 – 34.2 ppm), Ce (26.2 – 65.5 ppm), Ba (62 – 214 ppm), Sr (219 – 1015 ppm) y Zr (90 – 177 ppm).

A continuación, se presentan algunos datos registrados en la literatura que muestran los valores de % en peso de SiO_2 y Mg en aplitas ([Tabla 9.1](#)).

Tabla 9.1. Composiciones de diques aplíticos en otras localidades (SiO₂ y MgO % en peso).

Autor (es)	Lugar	Localidad	SiO ₂ % en peso	MgO % en peso
Frost y Mahood (1987)	Sierra Nevada	John Muir	77.19 – 72.62	0.04 - 0.27
Moore y Sisson (1987)	Sierra Nevada	Tuolumne	75.56 – 79.27	0.02 – 0.12
Johnson <i>et al.</i> (1989)	Nuevo México	Questa	77.6 – 77.7	0.12
Bateman (1992)	Sierra Nevada	Whitney	74.26 – 77.18	0.05 – 0.32
Tepper <i>et al.</i> (1993)	Washington	Cascades	76.3 – 77.45	0.01 - 0.03
Glazner <i>et al.</i> (2008)	Sierra Nevada	Wasatch y Tinemaha	75.73 – 78.05	0.03 – 0.1
Glazner <i>et al.</i> (2020)	California	Parque Nacional Yosemite	74.13 – 76.01	0.05 – 0.34

Los valores que se presentan en la tabla anterior muestran que las aplitas suelen tener más de 50% en peso de SiO₂ y por el contrario, los valores del MgO% en peso son muy bajos, como es el caso de los diques aplíticos del EDL.

En el diagrama de clasificación de rocas alteradas de Winchester y Floyd (1977) las aplitas se encuentran en los campos de riolita-dacita, riolita, traquiandesita y comendita. Las aplitas son subcalinas con alta relación de Zr/TiO₂ y baja de Nb/Y. Debido a que las aplitas coinciden con los campos de dacita y riolita, éstas pueden relacionadas a un magma granítico o granodiorítico.

En el diagrama de tierras raras de Boynton (1984), los diques aplíticos muestran un enriquecimiento en las LREE (La_N 43.847 – 110.32) que disminuye en dirección de la HREE (Lu_N 4.97 – 11.49). Además, muestra una anomalía negativa de Eu_N (2.31 y 9.39).

Las anomalías negativas de Eu en los patrones de REE de rocas graníticas generalmente se interpretan como evidencia de una separación de fase mineral como la plagioclasa, esto indica que la roca ha evolucionado mediante diferenciación magmática (Fowler y Ronald, 1983).

Todos los lantánidos forman iones trivalentes (3+), pero el Eu tiene una valencia adicional y forma iones de 2+. El Eu²⁺ es similar en tamaño y tiene la misma carga que Ca²⁺, que se encuentra en minerales como la plagioclasa. El Eu en su forma trivalente (Eu³⁺) es incompatible en un magma oxidante, en su forma divalente (Eu²⁺) y en un magma reductor, el Eu²⁺ se incorpora a la plagioclasa sustituyendo al calcio Ca²⁺ (Fowler y Ronald, 1983; Rollinson, 1993; Hall, 1996).

Diversos autores (Koljonen y Rosenberg, 1974; McCarthy y Kable, 1978) mencionan que esta anomalía negativa de Eu también puede presentarse en granitos derivados de rocas metasedimentarias por anatexis.

En el pozo Trincheras-1 (PEMEX, 1962) se registró un sill compuesto de granito de biotita que está emplazado sobre la Fm. Olvido y debajo de la Fm. La Casita, pero no se registró una edad absoluta.

Se conoce por información recopilada de este mismo pozo que el basamento del área es granito de biotita (PEMEX, 1962). En cuanto a las características geoquímicas del basamento, reportadas por Coombs *et al.* (2022), contiene 68.78 % porcentaje en peso de SiO₂ y 1.07 % en peso de MgO. En comparación con las aplitas, este granito de biotita se encuentra más enriquecido con TiO₂, Al₂O₃, MgO, P₂O₅ y FeO_T. Se encuentra enriquecido en Ba, Rb, La y Ce, presenta un decremento el Sr y Zr respecto a las aplitas. Al igual que las aplitas es de un ambiente geotectónico de arco volcánico.

La edad U-Pb en circones del basamento en el pozo Trincheras-1 es de 254.6 ± 3.4 Ma, aunque los autores también encontraron núcleos heredados del Proterozoico (1018 ± 82 Ma y 755 ± 8 Ma) y del Pérmico Temprano (288 ± 5 Ma y 289 ± 4 Ma) (Coombs *et al.*, 2022).

De existir una relación de generación de los diques aplíticos con el basamento y probablemente también el sill reportado en este pozo, pudo haber ocurrido un evento magmático impulsando un fenómeno de anatexis. Sin embargo, en las aplitas no se encontraron circones o núcleos heredados con edades que se correlacionen con la edad del basamento para sustentar esta hipótesis.

En el diagrama de multielementos (McDonough y Sun, 1995) con datos de las aplitas se observan anomalías negativas de Rb, Nb, Ta, P y Ti, además de anomalías positivas de Th, U y Pb. Los elementos trazas incompatibles que se encuentran en rocas derivadas de arcos volcánicos suelen tener patrones característicos, como enriquecimiento de Cs, Rb, K, Ba, Th, U, Pb y Sr, y en contraste, el decremento de Nb y Ta (Johnson y Plank, 2000; Hermann y Rubatto, 2009).

Se considera que rocas con anomalías negativas de Nb y Ta son generadas en un ambiente geotectónico de subducción (Pearce, 1982). Estos dos elementos pertenecen al

grupo de los *High Field Strength Elements* (HFSE; Zr, Hf, Nb, Ta, Th y U), que son insolubles en los fluidos producidos durante la deshidratación de los minerales presentes en la placa subducida (Rollinson, 1993). Las anomalías negativas de P y Ti, indican el fraccionamiento de minerales como el apatito y óxidos de titanio, producto del progreso del grado de diferenciación de las rocas (Rollinson, 1993).

En el diagrama de discriminación tectonomagmática (Pearce *et al.*, 1984) las aplitas se encuentran en el campo de arco volcánico, por lo que se propone que las aplitas se relacionan a un arco volcánico o son derivadas de una fuente cortical con firma de arco.

A continuación, se analiza la distribución de las aplitas en los diagramas de clasificación para granitoides de Frost y Frost (2008).

En el diagrama de índice de Fe vs. SiO₂, las aplitas se encuentran en el campo de lo magnesiano. Este índice mide el grado en que el hierro total se enriqueció, respecto al magnesio, durante la diferenciación de un magma. Las rocas que siguen una tendencia magnesia muestran sólo un enriquecimiento mínimo de hierro. La cristalización fraccionada de magnetita suele causar el decremento del Fe y el enriquecimiento del sílice (Frost y Frost, 2014).

En el diagrama de MALI vs. SiO₂ las aplitas se encuentran en el campo cálcico. Este diagrama indica que para que cuando SiO₂ wt% > 61%, donde CaO = Na₂O + K₂O, la roca se considera cálcica. Las diferencias en el índice calco-alcalino se reflejan mineralógicamente en las composiciones de los feldespatos. En rocas cálcicas, la primera plagioclasa que cristaliza suele ser relativamente cálcica (por ejemplo, An₈₀). Un conjunto plutónico que sigue tendencias de diferenciación cálcica tiende a abarcar composiciones de gabro-dacita-cuarzo diorita-granodiorita (Frost y Frost, 2014).

En el diagrama ASI vs. SiO₂, las aplitas son metaluminosas. Las rocas graníticas pueden ser metaluminosas, peraluminosas o peralcalinas. Los minerales ferromagnesianos que se encuentran en un granito reflejan la saturación de aluminio de esa roca, las rocas metaluminosas contienen minerales con bajo ASI, como la augita y la hornblenda (Frost y Frost, 2014). En las aplitas los minerales ferromagnesianos que se presentan son la biotita y,

en muy baja cantidad, magnetita (0.04 – 0.21 ppm) e ilmenita (0.14 – 0.40 ppm), por lo que sólo una muestra pudo ser graficada en este diagrama.

En el diagrama de índice de alcalinidad vs. FSSI, la mayoría de aplitas se encuentran en el rango de meta/peraluminosas y son sobresaturadas en sílice, en este cuadrante se ubican los granitos que contienen cuarzo y biotita. El índice FSSI es conveniente para rocas saturadas de cuarzo, debido a que expresa la cantidad de sílice (Frost y Frost, 2014).

Con la metodología U-Pb fueron analizadas cuatro muestras de aplitas (Pr5, Pr6, PC4 y PC12) para obtener se edad y las características geoquímicas de los circones.

La aplita Pr5 tiene una edad de concordia de 79.26 ± 0.50 Ma [MSWD=1.9, $p(x^2)=0.0011$]. En el diagrama de Boynton (1984) se observa que las LREE (La_N de 0.32 hasta 83.55) aumenta exponencialmente en dirección de la HREE (Lu_N 1378.88 a 5083.85), tienen anomalías negativas de Eu_N (entre 2.72 hasta 28.57) y Pr_N (entre 0.82 hasta 64.75). Además, muestran anomalías positivas de Ce_N (8.79 – 94.43) y Sm_N (9.23 – 59.92). Aunque presenta dos circones ligeramente más enriquecidos en REE (Pr5_Zr02a y Pr5_Zr10), estos están dentro del rango de las mejores edades de la población (75.7 – 83.2 Ma).

La aplita Pr6 tiene una edad de concordia de 78.4 ± 0.6 Ma [MSWD=2.4, $p(x^2)=5.4 \times 10^{-07}$]. En el diagrama de REE (Boynton, 1984) se observa que los circones muestran LREE (La_N de 0.32 hasta 975.48) que aumenta en dirección de la HREE (Lu_N 2313.66 a 12527.95), tienen anomalías negativas de Eu_N (2.72 – 129.25) y Pr_N (0.82 – 963.11). Muestran anomalías positivas de Ce_N (6.81 – 992.82) y Sm_N (14.36 – 727.69). Se observa un circón ligeramente más enriquecido en REE (Pr6_Zrn-19) de edad de 76.9 Ma. Sin embargo se encuentra en el rango de las mejores edades de la población (72.1 – 84.2 Ma).

La aplita PC4 tiene una edad de concordia de 80.9 ± 0.5 Ma [MSWD=1.7, $p(x^2)=0.0021$]. En el diagrama de Boynton (1984) se observa en los circones que las LREE (La_N de 0.32 hasta 1023.87) aumentan en dirección de las HREE (Lu_N 2116.15 a 8696.89). Los circones muestran anomalías negativas de Eu_N (2.72 – 165.99) y Pr_N (0.82 – 976.23). Muestran anomalías positivas de Ce_N (5.94 – 1079.58) y Sm_N (9.74 – 835.9). Esta muestra tiene seis circones ligeramente más enriquecidos en REE (PC4_Zrn-03 de 79.2 Ma; PC4_Zrn-20 de 77.8 Ma; PC4_Srn-21 de 81.1 Ma; PC4_Zrn-05 de 78.2 Ma; PC4_Zrn-04 de

78.6 Ma; PC4_Zrn-28 de 79.1 Ma), las edades de estos circones se encuentran dentro del rango de las mejores edades de la población (77.78 - 85.8 Ma).

La aplita PC12 tiene una edad de concordia de 79.51 ± 0.68 Ma [MSWD=1.6, $p(x^2)=0.017$]. En el diagrama de [Boynton \(1984\)](#) se observa en los circones que las LREE (La_N de 0.32 hasta 129.03) aumentan en dirección de las HREE (Lu_N 1621.12 a 6357.14). Los circones muestran anomalías negativas de Eu_N (1.36 – 34.01) y Pr_N (0.82 – 162.3). Muestran anomalías positivas de Ce_N (8.29 – 174.63), Nd_N (0.5 – 178.17) y Sm_N (8.72 – 194.36). Esta aplita tiene dos circones ligeramente más enriquecidos en REE (PC12_Zr17 de 76.6 Ma y PC12_Zr24 de 78.2 Ma), pero las edades de estos circones se encuentran dentro del rango de las mejores edades de los circones de la muestra (75.1 – 87.4 Ma).

En los diagramas normalizados de condritas para representar las REE de los circones ([Boynton, 1984](#)) correspondientes a las aplitas, se muestra que los circones se encuentran enriquecidos en HREE con respecto a las LREE, de acuerdo a [Hoskin e Ireland \(2000\)](#) este patrón es característico en circones de origen ígneo.

La anomalía negativa de Eu es una característica de los circones de origen ígneo ([Hoskin y Schaltegger, 2003](#)). La anomalía negativa de Eu también suele indicar condiciones reductoras durante la cristalización del circón ([Nallusamy, 2015](#)).

Además, la anomalía negativa de Eu y la anomalía positiva de Ce, en circones, son comunes para granitoides ígneos de Tipo I, A y S ([Wang *et al.*, 2012](#)).

Por otra parte, la anomalía positiva de Ce, en circones, también está relacionada con la propiedad del Ce^{4+} para incorporarse a la estructura del circón, indicando condiciones oxidantes durante la cristalización ([Belousova *et al.*, 2002](#)).

De acuerdo con la Tabla Cronoestratigráfica Internacional ([Cohen *et al.*, 2023](#)) la edad de las aplitas del EDL (79.26 ± 0.50 Ma, 79.51 ± 0.68 Ma, 78.04 ± 0.60 Ma y 80.9 ± 0.50 Ma) es Campaniano ($83.6 \pm 0.2 - 72.1 \pm 0.2$ Ma), de la época Cretácico Superior.

Las relaciones de Th/U en los circones correspondientes a las aplitas son de 0.1 a 2, que de acuerdo con diversos autores ([Kirkland *et al.*, 2014](#); [Grimes *et al.*, 2015](#)), corresponde a circones de origen magmático, diferente de la relación de Th/U para circones metamórficos que es <0.1 ([Rubatto, 2017](#)).

9.4 Relación genética de las aplitas con sienitas de la SSCC

Las características geoquímicas de las aplitas no permitieron la comprobación de la hipótesis de que estas se encuentren petrogenéticamente relacionadas con las sienitas de la SSCC. Las sienitas tienen concentraciones más altas de elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , P_2O_5 y FeO_T), en comparación con las aplitas.

En el diagrama de Winchester y Floyd (1977), las sienitas tienen relaciones altas de Zr/TiO_2 y Nb/Y , coincidiendo con los campos de traquiandesita, traquita y fonolita, es decir de composición alcalina. Por el contrario, las aplitas son subalcalinas.

En el diagrama de discriminación tectonomagmática (Pearce *et al.*, 1984), las sienitas se ubican en el campo de intraplaca, que difiere del ambiente tectonomagmático de las aplitas, que es de arco volcánico.

En comparación con el patrón de aplitas, las sienitas están más enriquecidas en REE y no coinciden con la característica anomalía negativa de Eu_N . Las relaciones multielementos de las sienitas son distintas que las de las aplitas, que, aunque coinciden anomalías negativas como P y Ti, las magnitudes de los elementos son exponencialmente mayores respecto a las aplitas.

Las sienitas también fueron graficadas en los diagramas para granitoides (Frost y Frost, 2008) con la finalidad de seguir comparándolas con las aplitas del EDL. En el diagrama de índice de Fe *vs.* SiO_2 , las sienitas se ubican en el campo de lo ferroso, al contrario de las aplitas que son magnesianas.

En el diagrama de MALI *vs.* SiO_2 , las sienitas se ubican en el campo de lo alcalino, al contrario de las aplitas que son cálcicas. En el diagrama de ASI *vs.* SiO_2 , las sienitas se ubican en el campo de lo metaluminoso. En el diagrama de AI *vs.* FSSI las sienitas están en el cuadrante de lo peralcalino subsaturado en sílice, al contrario de las aplitas que son meta/peraluminosas sobresaturadas en sílice.

Adicionalmente, las edades reportadas para las rocas de la SSCC son del Oligoceno-Mioceno (Elizondo-Pacheco, 2017, 2019; Leal-Cuéllar, 2020; Elizondo-Pacheco *et al.*, 2022). Estos mismos autores se han encargado de darle un contexto geológico regional a los

diques sieníticos y a todo el complejo geológico de la SSCC, explicado ya en el apartado de Geología Regional.

9.5 Relación genética con tobas alteradas de la Fm. San Felipe

La textura de las tobas alteradas es distinta a la de las aplitas, ya que suele tener matriz vítreo-arcillosa y la variedad de minerales son cuarzo, plagioclasa, clorita y en ocasiones apatito. Una característica importante es la forma fibrosa de los cristales de clorita y su color de interferencia verde lima.

La composición geoquímica de las tobas alteradas es semejante a las aplitas del EDL. El contenido de SiO₂ en las tobas alteradas es de 53.17 a 61.461 % en peso y de MgO es de 0.703 a 1.36 % en peso, el SiO₂ es menor que en las aplitas y el MgO es mayor. En cuanto a las relaciones de SiO₂ vs. Elementos mayores se encontraron similitudes en Al₂O₃ y Na₂O, aunque las tobas tienen mayor concentración de MgO, K₂O, P₂O₅ y FeO_T. En los elementos traza se encontraron similitudes en Sr, Zr, Ce, La, Nd y Th. Sin embargo, la concentración de Rb e Y es mayor que en las aplitas.

En el diagrama de REE, las tobas muestran una fuerte anomalía negativa de E_{UN} como en las aplitas. En las tobas esta anomalía fue atribuida a su afinidad con la corteza continental (Ortega-Torres, 2022). Las tobas están más enriquecidas en REE. Sin embargo, tienen un patrón paralelo al de las aplitas, que podría indicar una relación petrogenética.

En el diagrama multielementos, los patrones de las tobas alteradas también son paralelos al de las aplitas y coinciden en anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti. Ortega-Torres (2022) menciona que estas anomalías son heredadas de su fuente, probablemente ubicada en la corteza superior.

En el diagrama de Winchester y Floyd (1977), las tobas también coinciden con la relación Zr/TiO₂ vs. Nb/Y con las aplitas, ambas tienen una alta relación de Zr/TiO₂ y baja relación de Nb/Y, colocándolas en los campos de andesita, riolita-dacita y riolita.

En el diagrama de discriminación tectonomagmática (Pearce *et al.*, 1984) las aplitas y las tobas se colocan dentro del campo de arco volcánico.

Con la metodología U-Pb fue analizada una muestra de toba alterada de la Fm. San Felipe (SF1) para obtener la edad y geoquímica de los circones. La edad de concordia de la muestra SF1 es de 86.2 ± 0.5 Ma.

En el diagrama de [Boynton \(1984\)](#) se observa que las LREE (La_N de 0 hasta 103.87) aumentan en dirección de las HREE (Lu_N 2074.53 hasta 10077.64). Al igual que en las aplitas, los circones de la toba alterada muestran anomalías negativas de Eu_N (2.72 – 28.57) y Pr_N (0.82 – 64.75). Muestran anomalías positivas de Ce_N (8.79 – 94.43) y Sm_N (9.23 – 56.92).

La toba alterada tiene tres circones ligeramente más enriquecidos en REE (SF1_Zr12 de 85.5 Ma; SF1_Zr14 de 84.0 Ma; SF1_Zr16 de 86.7 Ma). Sin embargo, las edades de estos circones se encuentran en el rango de las mejores edades de los circones de la toba (80.2 – 90.4 Ma).

En la Tabla Cronoestratigráfica Internacional ([Cohen et al., 2023](#)) la edad de la toba alterada de la Fm. San Felipe (86.2 ± 0.5) es Santoniano ($86.3 \pm 0.5 - 83.6 \pm 0.2$ Ma), también de la época Cretácico Superior y teniendo una diferencia de edad con las aplitas de ~6 Ma.

Otras edades para las tobas alteradas reportadas por [Velasco-Tapia et al. \(2016\)](#) en distintas localidades son: 73.0 ± 0.2 Ma (La Fábrica), 77 ± 1 Ma (La Fábrica), 80 ± 0.4 (Pedro Carrizales), 82 ± 1 (Cerro Labradores), 83 ± 0.4 (Pedro Carrizales), 83 ± 1 (Cerro Labradores) y 75.9 ± 0.6 en la Saliente de Monterrey. [Juárez-Arriaga et al. \(2019\)](#) reportaron las siguientes edades para las tobas en distintas localidades: 77 ± 1 (Jalpa-Concá), 77.9 ± 0.5 (Agua Zarca), 78.7 ± 0.5 (Jalpan-Concá), 79.2 ± 1 (Cañón El Alamar), 81.6 ± 0.6 (Saliente de Monterrey) y 84 ± 0.6 (Tepoztla).

Algunos autores ([Martínez-Paco, 2012](#); [Velasco Tapia et al., 2016](#), [Juárez-Arriaga et al., 2019](#)) han identificado, en las Formaciones San Felipe y Caracol, al menos cuatro eventos magmáticos de corta duración que ocurrieron con picos a los 84, 81, 77 y 73 Ma.

Las relaciones de Th/U en circones de la toba alterada son de 0.2 a 1.2. Al igual que los circones de las aplitas, los circones de las tobas son de origen magmático ([Kirkland et al., 2014](#); [Grimes et al., 2015](#)).

La fuente de las capas de cenizas ha sido discutida por diversos autores (Martínez-Paco, 2012; Velasco-Tapia *et al.*, 2016; Juárez-Arriaga *et al.*, 2019; Martínez-Paco *et al.*, 2022).

Se ha sugerido que las Formaciones San Felipe y Caracol comparten una fuente en común relacionada con el arco continental ubicado en el margen occidental de México (Martínez-Paco *et al.*, 2022), estos autores sugieren que la actividad volcánica explosiva de estos arcos continentales y sus productos piroclásticos ocurrieron en la zona del cinturón orogénico.

Para el noreste de México se propuso que las capas volcanosedimentarias de la Fm. San Felipe tienen un vínculo potencial con estructuras volcánicas de complejos intrusivos postorogénicos intermedios a félsicos Laramídicos ubicados al borde occidental de Galeana (p.e. El Peñuelo; Velasco-Tapia *et al.*, 2016).

Posteriormente, se especuló que las tobas alteradas tenían relación con el granitoide La Pólvara, pero con una edad de apatito U-Pb de 71.4 ± 4.3 Ma (Díaz-Bravo *et al.*, 2021), se confirmó que la exhumación fue posterior al depósito de las Formaciones San Felipe y Caracol (Martínez-Paco *et al.*, 2022).

Estos mismos autores mencionan que las tobas de las Fms. San Felipe y Caracol son el producto de la erosión de centros volcánicos relacionados con rocas plutónicas del Cretácico Superior similares a las documentadas en Concepción del Oro (Zacatecas) y La Pólvara (San Luis Potosí; Martínez-Paco *et al.*, 2022).

Las similitudes geoquímicas de las aplitas y las tobas alteradas de la Fm. San Felipe sugieren una relación petrogenética. Cabe mencionar que geográfica y geológicamente no fue posible relacionar el EDL con otras estructuras volcánicas aledañas, a excepción de los estratos volcanosedimentarios de la Fm. San Felipe.

Las edades de las aplitas (79.26 ± 0.50 - 80.9 ± 0.50 Ma) son ligeramente más recientes (~ 6 Ma) que la edad de la toba alterada la Fm. San Felipe (86.2 ± 0.5 Ma, este trabajo). Esta diferencia de edad podría significar el plazo de tiempo suficiente para el depósito de las tobas y rocas sedimentarias de la Fm. San Felipe, fracturamiento de los estratos y el posterior emplazamiento de los diques.

Para que en el curso de este tiempo se hayan podido emplazar los diques se especula que la Fm. San Felipe se encontraba en una etapa temprana de la diagénesis, incluso pudo haber experimentado superficies tipo *hardgrounds* o fondos duros. Sedimentológicamente, los *hardgrounds* son superficies de capas cementadas sinsedimentariamente que han quedado expuestas en el fondo marino; los carbonatos como cementantes son más comunes que los siliciclastos (Taylor y Wilson, 2003).

La cementación sinsedimentaria ocurre a centímetros por debajo de la interfaz sedimento-agua, proporcionando un sustrato extenso para cementar y perforar organismos (Pandey *et al.*, 2018). Palmer y Wilson (2004) mencionan que los *hardgrounds* se formaron principalmente durante los intervalos marinos de calcita en el registro geológico, caracterizados por la disolución de aragonito y una alta precipitación de calcita baja en magnesio.

Velasco-Tapia *et al.* (2016) sugieren que el periodo de depósito para las capas de ceniza de la Fm. San Felipe es del Santoniano al Campaniano (84.5-73.7 Ma) en aguas poco profundas, este dato basado en la geocronología U-Pb en datos de circones de las capas superior e inferior de secciones analizadas por estos autores.

Además, sugieren que el intervalo de depósito corresponde con el pulso regresivo del ciclotema Niobara (87.75 - 78.5 Ma) y la fase de transgresión del ciclotema Clagget (77.0 – 72.75 Ma), reportados para el Mar Interior del Cretácico Occidental durante el Cretácico Superior (Hancock y Kauffman, 1979; Velasco-Tapia *et al.*, 2016).

9.6 Tomografía de Resistividad Eléctrica

Como se mencionó anteriormente, el perfil de tomografía de resistividad eléctrica se dividió por zonas consultando la bibliografía correspondiente (Tabla 9.2).

Además se consideraron las características vistas en campo para su interpretación como: (1) la geometría de emplazamiento de los diques en una secuencia sedimentaria observada, (2) la existencia de sills en otros afloramientos del EDL, y (3) se conoce la composición litológica de los diques del EDL (Figura 9.1).

En el perfil de interpretación fue posible observar la estructura correspondiente a un dique y un sill ambos con resistividades características de rocas graníticas (40 Ωm – 140 Ωm ; Palacky, 1987; Ravindran, 2012).

En campo se identificaron sills en el área de Purísima de Conchos. La misma situación es reconocida en el pozo Trincheras-1. Aunado a que las resistividades del sill y el dique son similares, el sill identificado en esta TRE es factible de existir, hecho que se puede comprobar con una perforación.

El sill tiene un espesor aproximado de 5 metros y la zona afectada por la fractura que aprovechó el dique, tiene un espesor aproximado de 20 metros.

En la zona, la profundidad del agua oscila entre 5 y 40 m en promedio (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2006; Dávila-Pórcel *et al.*, 2013; CONAGUA, 2021), con un flujo preferencial SW-NE.

Sin embargo, con las resistividades que se presentan en la estructura del sill (40 Ωm - 149 Ωm), se descarta que sea parte del almacenamiento de agua subterránea, debido a que la resistividad del agua es menor que la anteriormente mencionada.

En la zona centro del dique, en el perfil tomográfico, se muestran resistividades muy bajas en comparación con las resistividades aledañas. Esta resistividad es de 6 - 30 Ωm , lo que sugiere que la zona del dique no está completamente cementada, no se encuentra sellada y no es impermeable, lo que permite la filtración de agua y humedece y/o almacena agua de lluvia.

Este hecho también puede validarse por el crecimiento de vegetación a lo largo de las fracturas que fueron aprovechadas por los diques, evidencia que en campo se volvió esencial para rastrear los diques.

Además, se identificó una posible unidad arcillosa con resistividades de 145 a 362 Ωm (Palacky, 1987; Khalil *et al.*, 2013) que corresponde a la Formación San Felipe.

Aunque con este ensayo no fue posible distinguir las fronteras de los estratos de la Formación, en columnas reportadas (Ortega-Torres, 2022) y la información del pozo exploratorio Trincheras-1 (PEMEX, 1962), se sabe que su composición consta de estratos

cuasihorizontales de caliza arcillosa, lutita y tobas, principalmente. Es por lo anterior que se puede inferir que el dique corta perpendicularmente a la estratificación, siendo casi completamente vertical y el sill es paralelo a la estratificación.

Tabla 9.2. Resistividades de materiales (rocas, sedimentos y agua) reportadas por diversos autores.

Autor (es)	Material	Resistividad (Ωm)
Telford <i>et al.</i> (1976)	Suelo	1 - 67
	Suelo arcilloso	100 - 133
	Caliza	67 - 1000
	Arenisca	33 - 6700
	Granito	25 - 1500
	Agua superficial en rocas ígneas	30 - 500
	Agua subterránea en rocas ígneas	30 - 150
Palacky (1987)	Rocas félsicas	15 - 100
	Arcillas	5 - 100
	Lutitas	1 - 15
	Dolomita-Caliza	1000 - 100000
	Agua	2 - 100
Rolland (2011)	Granitos	$5 \times 10^2 - 10^3$
	Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
	Lutita	$20 - 2 \times 10^3$
	Caliza	$50 - 4 \times 10^2$
	Arcilla	1 - 100
	Aluvi3n	10 - 800
	Agua	10 - 100
Ravindran (2012)	Suelo	3.5 - 16
	Granito	34 - 159
	Masa granítica plegada	159 - 731
Loke (2022)	Granito	$10^4 - 10^5$
	Conglomerado	$1000 - 10^4$
	Arenisca	10 - 1000
	Lutita	10 - 1000
	Caliza	$10 - 10^4$
	Arcilla	1 - 100
	Aluvi3n	10 - 1000
Agua fresca subterránea	10 - 100	

Cabe mencionar que en los flancos de los diques del EDL es posible observar un ligero levantamiento de los estratos. En la Zona 3 del dique aquí observado se presentan resistividades de 362 a 2262 Ωm . Esto se ha interpretado como el área donde están ligeramente levantados los estratos de la Fm. San Felipe alrededor del dique.

Se llega a esta conclusión debido a observaciones de campo, que se encuentran en el apartado de geología local, donde los estratos localizados en los extremos de los diques se encuentran con un buzamiento $\sim 20^\circ$.

Así mismo, en otros afloramientos, como en la carretera al Mulato, se ha observado que los diques suelen modificar ligeramente la estructura de los estratos colindantes, levantándolos a su paso.

Además, se reporta una zona de conglomerado que también es posible ver en superficie con valores de resistividad de 100 a 145 Ωm (Palacky, 1987; Rolland, 2011).

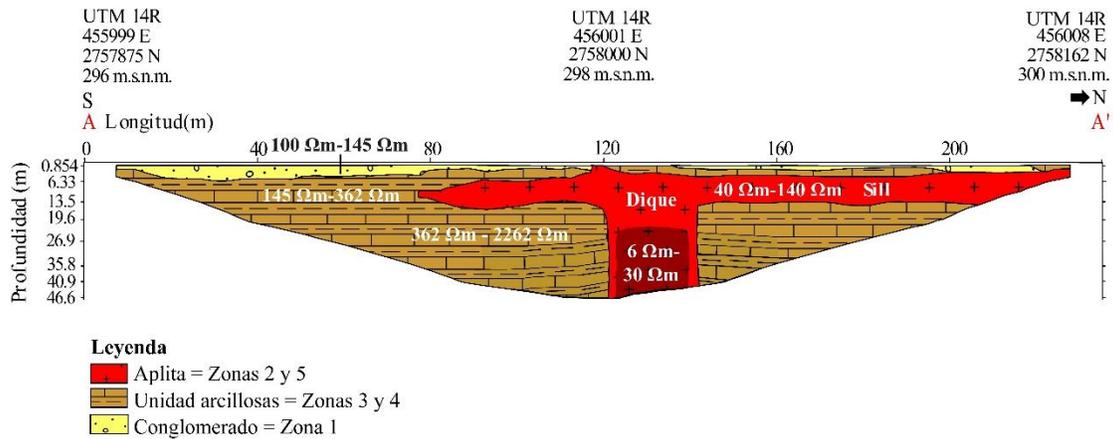


Figura 9.1. Perfil geológico de la interpretación del TRE. Explicación en el texto que refiere a esta figura.

10. CONCLUSIONES

- El CLB limita la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) al sur y la Cuenca de Burgos al norte. Tiene una orientación general E-W y una longitud de aproximadamente 100 km. Inicia en la ciudad de Linares, Nuevo León (14R 442569.36 E 2749518.53 N) y termina en el municipio de Burgos, Tamaulipas (14R 520024.33 E 2759392.15 N).
- Se detectó un grupo de lineamientos con orientaciones preferenciales NE-SW Este corredor incluye diques, fallas, fracturas y cuerpos subvolcánicos alineados.
- Al norte del CLB se identificaron fracturas como posibles diques con orientación preferencial NE-SW. Las alineaciones inferidas de los cuellos volcánicos de Burgos tienen una orientación preferencial NW-SE.
- En el límite septentrional de la SSCC se identificaron fracturas, ejes estructurales y fallas que cuya orientación preferencial es NW-SE. Las fallas El Mulato y Palos Blancos también tienen esta orientación preferencial.
- El EDL, que forma parte del CLB, está compuesto por al menos 572 lineamientos identificados como tales. Tiene una familia principal con orientación NE-SW. También se detectó una familia secundaria con una dirección oblicua a la principal. Esta segunda familia tiene orientación NW-SE.
- La interacción entre los diques identificados en el área de estudio y las fracturas preexistentes de la Formación San Felipe ha sido un aspecto destacado del estudio. La orientación de las dos familias de diques coincide con las dos familias de fracturas identificadas en esta Formación. La interacción de estas dos familias ha resultado en diques enrejados, diques con arreglo de *zigzag* y diques emplazados en fracturas conjugadas. Aunque también se observan arreglos irregulares, *en echelon* y anastomosados. Adicionalmente, debido a que los diques cortan perpendicularmente a la estratificación, se observó un ligero levantamiento de los estratos en los flancos de los diques.
- El paleotensor de esfuerzos calculado para el EDL tiene una orientación NW-SE, el régimen de esfuerzos es extensional donde $\sigma_3 = S_{\text{hmin}}$ ($00^\circ/119^\circ$) $\sigma_2 = S_{\text{Hmax}}$ ($00^\circ/257^\circ$) y $\sigma_1 = S_v$ es ($90^\circ/119^\circ$).

- El paleotensor del EDL no se relaciona con otros esfuerzos de eventos geológicos registrados en el área, en específico con la orogénesis de la SMO o la provincia extensional BS. En ambos casos la orientación de los esfuerzos, las estructuras generadas y el tiempo geológico son distintos al del EDL. Por lo anterior es probable que se trate de un nuevo registro de régimen extensional registrado para el Cretácico Superior.

- Los diques aplíticos muestran una textura microporfirítica a porfirítica con una composición modal dominada por cuarzo y feldespatos, además de biotita, ortoclasa, circón y minerales opacos. Las aplitas presentan un contenido de SiO₂ de 56.89 a 72.31% en peso y MgO de 0.03 a 0.18% en peso. Estos valores coinciden con el rango composicional de aplitas descritas en la literatura.

- La composición de las aplitas corresponde a riolita-dacita y riolita principalmente, siendo subalcalinas, probablemente relacionadas a un magma granítico o granodiorítico. La distribución de REE y la fuerte anomalía negativa de Eu_N sugieren una afinidad con la corteza continental, una evolución mediante diferenciación magmática o bien una probable anatexis. El contenido de elementos traza sugiere un ambiente de arco volcánico, pero esta afinidad tectonomagmática puede estar adjudicada a que la fuente de magmática sea una fuente cortical con afinidad de arco. En cuanto a las características granitoides de las aplitas son cálcicas, metaluminosas y sobresaturadas en sílice.

- Las edades U-Pb en circones de los diques aplíticos (79.26 ± 0.50 Ma, 79.51 ± 0.68 Ma, 78.04 ± 0.60 Ma y 80.9 ± 0.50 Ma) corresponden al Campaniano. La relación Th/U y las REE sugieren que son circones son de origen ígneo.

- Las características geoquímicas de las sienitas de la SSCC difieren a las de las aplitas del EDL. Las sienitas tienen concentraciones más altas de elementos mayores, Zr/TiO₂ y Nb/Y. Las sienitas son de composición alcalina y tienen un ambiente tectonomagmático de intraplaca. Además, se encuentran enriquecidas en REE y no tienen anomalía negativa de Eu_N.

- En comparación, las tobas alteradas de la Fm. San Felipe presentan una matriz vítreo-arcillosa y contienen cuarzo, plagioclasa y clorita con su característica forma fibrosa de color de interferencia verde lima. En cuanto a sus características geoquímicas, son similares a las

de las aplitas del EDL. El contenido de SiO_2 es de 53.17 a 61.461 % en peso y de MgO es de 0.70 a 1.36 % en peso. En los elementos traza muestra similitudes en las concentraciones de Sr, Zr, Ce, La, Nd y Th. El patrón de REE de las tobas alteradas es paralelo al de las aplitas y también tiene una fuerte anomalía negativa de Eu_N . El patrón de multielementos de las tobas alteradas también es paralelo al de las aplitas, con anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti. Las tobas se ubican en el campo de andesita, riolita-dacita y riolita. Al igual que las aplitas, las tobas alteradas se relacionan a un ambiente tectonomagmático de arco volcánico.

- La edad de la toba alterada analizada en este trabajo es de 86.2 ± 0.5 Ma, correspondiente al Santoniano. El patrón de REE de la toba alterada y la relación Th/U, sugieren que los circones son de origen magmático.

- Las edades de las aplitas y la de la toba corresponden al Cretácico Superior, teniendo una diferencia de ~ 6 Ma. Esta diferencia de edades puede haber sido suficiente para que los depósitos de la Fm. San Felipe, aún sumergida en el Mar Interior del Cretácico, iniciaran su proceso de diagénesis o experimentar superficies tipo *hardgrounds*. Esta litificación sometida a un régimen extensional con un tensor de esfuerzos NW-SE, permitiría fracturar los estratos por lo menos en dos direcciones y posteriormente estas fracturas actuarían como planos de debilidad para que los diques aplíticos intruyeran esta Formación.

- La tomografía de resistividad eléctrica, proporcionó información sobre la estructura subsuperficial de la región. El dique se caracteriza por tener resistividades típicas de rocas graníticas, es perpendicular a la estratificación, por lo menos alcanza 50 m de profundidad y el espesor influenciado por este cuerpo oscila los ~ 20 m. La Fm. San Felipe registra resistividades desde 145 hasta 362 Ωm , estos valores de resistividad son consistentes con la naturaleza de los materiales la componen, que incluyen calizas arcillosas, lutitas y tobas principalmente. Además, se identificó un sill paralelo a la estratificación y con 5 m de espesor. El sill presenta resistividades características de rocas graníticas en un rango que va desde 40 hasta 149 Ωm .

- Este trabajo representa el primer registro de diques de edad cretácica que eventualmente se relacionan genéticamente con las tobas alteradas de la Fm. San Felipe.

11. RECOMENDACIONES

- Efectuar el análisis cinemático de las fallas El Mulato y Palos Blancos, para identificar su origen y correlación el levantamiento de la SSCC y subsidencia de la Cuenca de Burgos.
- Realizar un análisis más detallado de las fracturas de la Fm. San Felipe, así como un inventario de datos estructurales de esta Formación.
- Llevar a cabo el análisis del tensor de esfuerzos para el sector septentrional de la SSCC, que limita con la Cuenca de Burgos.
- La técnica TRE funcionó para determinar la estructura de un dique, esto se podría replicar para otros diques y sills del área. Así como utilizar otras herramientas geofísicas para determinar las estructuras regionales asociadas a estos cuerpos subvolcánicos.
- Realizar un modelo petrogenético detallado del EDL y el modelo geológico-estructural del CLB.
- Comprobar la relación petrogenética entre las aptitas del EDL y las tobas alteradas de la Fm. San Felipe.
- Documentar con mayor detalle evidencias del régimen extensional propuesto como causa.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Actlabs, 2019, Litho geochemistry for research and mineral exploration, Activation Laboratories Ltd., Lancaster, Ontario, Canada, < <https://actlabs.com> >, consulta: Agosto 2021.
- Actlabs, 2021, Geochemistry Schedule of services & fees, Euro <<https://actlabs.com/geochemistry/>>, consulta: Agosto 2021.
- Adams, A.E., MacKenzie, W.S., Guilford, C., 1984, Atlas of sedimentary rocks under the microscope: New York, Longman Group Limited, 104 pp.
- Al-jumaily, I., Al-khatoni, S. I., 2013, Fault slip analysis and paleostress reconstruction at Sara anticline-Dokan dam site northeastern Iraq: Iraqi National Journal of Earth Sciences, 13, 75-102.
- Anderson, T.L., 1995, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications: Texas, CRC Press.
- Andrade, R., 2011, Intervention of electrical resistance tomography (ERT) in resolving hydrological problems of a semiarid granite terrain of Southern India: Journal Geological Society of India, 78, 337-344.
- Antonio-Durán, Y. Z., 2022, Descripción petrológica, geoquímica y geoespacial de los enjambres de diques en la Presa Cerro Prieto y Purísima de Conchos del Corredor Linares-Burgos, NE de México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura, 140 pp.
- Antonio-Durán, Y. Z., Ramírez-Fernández, J. A., Salinas-Jasso, J. A., Montalvo-Arrieta, J. C., 2023, Descripción petrológica, geoquímica y geoespacial de los enjambres de diques del Corredor Linares-Burgos, NE de México, en XXXV Convención Internacional de Minería, AIMMGM, Acapulco, México, 262-270.
- Armenta, J., 2011, Interaction between magmatic and tectonic stress during dyke intrusion: Andean Geology, 38 (2), 393-413.
- Arredondo-Mendoza J.A., Loeza-García J. P., Zárate-Barradas R., Flores-Castillo C. M., 2004, Carta geológico-minera Linares G14-11 escala 1:250,000 estados de Nuevo León y Tamaulipas.
- Atwater T. M., stock, J. M., 1998, Pacific-north America plate tectonics of the Neogene Southwestern United States: An update: International Geology Review, 40, 375 – 402.
- Baer, G., 1995, Fracture propagation and magma flow in segmented dyke: field evidence and fabric analyses, Maktesh Ramon, Israel, en Baer, G., Heimann, A. (eds.), Physics and Chemistry of Dykes: Rotterdam, Balkema, 125-140.

- Bastin, 1937, Ore deposits of the San Carlos Mountains, en Kellum L.B. (ed.), *The Geology and Biology of the San Carlos mountains*, Tamaulipas, Mexico: University of Michigan Press, 12, 157-206.
- Bateman, P. C., 1992, Plutonism in the central part of the Sierra Nevada Batholith, California: *United States Geological Survey Professional Paper*, 1483, 186 pp.
- Belousova, E., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Fisher, N., 2022, Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5), 602 – 622.
- Bloomfield, K., Cepeda-Dávila, L., 1973, Oligocene alkaline igneous activity in NE Mexico: *Geological Magazine*, 110, 551 – 555.
- Boynton, W. V., 1984, Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, en Henderson, P. (ed.), *Rare earth elements geochemistry*: Amsterdam, Elsevier, 63-114.
- Caputo, R., 2005, Stress variability and brittle tectonic structures: *Earth-Science Reviews*, 70, 103-127.
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E., Pineda-Velázquez, A., 1990, Provincias Fisiográficas de México: Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2, *Atlas Nacional de México*. Vol. II, Escala 1:4000000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1974, Two contrasting granite types: *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Clark, K. F., Foster, C. T., Damon, P. E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 93 (6), 533-544.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X., 2023, *International Chronostratigraphic Chart*: International Union of Geological Sciences, International Commission on Stratigraphy, 36, 199-204.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), 2024a, Capas generales: Provincias geológicas, archivos vectoriales shape (en línea): Consultado el 3 de abril de 2024.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), 2024b, Pozos: Zona Burgos, archivos vectoriales shape (en línea): Consultado el 3 de abril de 2024.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), s.f., *Atlas geológico Cuenca Sabinas-Burgos*, 54 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2019, *Convenio de Coordinación Presa Libertad: Periódico Oficial*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 8-15.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2021, Mapa de pozos piezométricos (En Línea): GeoVisor de Pozos Piezométricos de Aguas Subterráneas, subdirección general técnica, gerencia de aguas subterráneas <<https://sigagis.conagua.gob.mx/rp20/>>, actualización 31 de Marzo de 2024.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2022, Monitoreo de las Principales Presas de México (En Línea): Sistema Nacional de Información del Agua, Sistema de Información Hidrológica <<https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>>, actualización 31 de Marzo de 2024.
- Coombs, H. E., Kerr, A. C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., Solari, L., 2022, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, *The Geological Society of America*, 546.
- Dahlin, T., 1996, 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications: *First Break*, 14, 275-284.
- Daily, W., Ramírez, A., Binley, A., Labrecque, D., 2004, Electrical resistance tomography: *The Leading Edge*, 438-442.
- Dávila-Porcel, R.A., 2011, Desarrollo sostenible de usos de suelo en ciudades en crecimiento, aplicando hidrogeología urbana como parámetro de planificación territorial: caso de estudio Linares, N.L.: Linares, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis doctoral, 244 pp.
- De la Fuente-García, J., 1976, Exploración geológica-geoquímica de la Sierra de San Carlos-Cruillas, Estado de Tamaulipas, Instituto Politécnico Nacional, Tesis Profesional, 64 pp.
- De la Garza-González, S.I., 2000, Estudio geológico/hidrogeológico de la región citrícola Linares-Hualahuises, Nuevo León, NE-México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de licenciatura.
- De León-Gómez, H., 1993, Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo / Cerro Prieto auf einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge bei Linares, Nuevo León, Mexiko: Aachen, *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie*, 53, 181 pp.
- De León-Gómez, H., Schetelig, K., Meiburg, P., 1994, Water supply in the northeast México. Example: Cerro Prieto Reservoir: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 1, 593-601.
- De León-Gómez, H., Schetelig, K., 1996, Fracturamiento hidráulico en presas: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil I, 1037-1043.
- De León-Gómez, H., Medina-Barrera, F., Lizárraga-Mendiola, L., 2006, Elaboración de la matriz de geoindicadores ambientales en la presa José López Portillo (Cerro Prieto), fuente superficial de abastecimiento de agua potable de Monterrey, N.L., México: *CIENCIA UANL*, 9, 65-72.

- Delvaux, D., 2006, *Wintensor*, Version 1.3, Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Belgium Dept. Geology-Mineralogy.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Melnikov, A., Ermikov, V., 1995, Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution: *Tectonophysics*, 252, 61-101.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzchich, V., San'kov, V., 1997, Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part II. Cenozoic rifting: *Tectonophysics*, 282, 1-38.
- Delvaux, D., Sperner, B., 2003, Stress Tensor Inversion from Fault Kinematic indicators and Focal Mechanism Data. The tensor Program, en: *New Insights into structural interpretation and modeling* (D. Nieuwland ed.): London, Geological Society of London, Special Publications, 212, 75-100.
- Demant, A., Robin, C., 1975, Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, (1), 4.
- Dentith, M., Mudge, S. T., 2014, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist: United Kingdom*, Cambridge University Press, 438 pp.
- Díaz-Bravo, B. A., Barboza-Gudiño, J. R., Ortega-Obregón, C., Morales-Gámez, M., 2021, Late cretaceous to oligocene overlapping plutonic magmatism episodes in Eastern mesa central province of Mexico: *International Geology Review*.
- Echánove, E. O., 1986a, Geología petrolera de la Cuenca de Burgos, Parte I, Consideraciones Geológico-Petroleras: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 38, No. 1, 3-39.
- Echánove E. O., 1986b, Geología petrolera de la Cuenca de Burgos, Parte II, Resultados de pozos exploratorios y antecedentes de campos y producción: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 38, 1, 41-74.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1-26.
- Eguiluz de Antuñano, S., 2011a, Sinopsis geológica de la Cuenca de Burgos, noreste de México: producción y recursos petroleros: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (2), 323-332.
- Eguiluz de Antuñano, S., 2011b, Estratigrafía, análisis de secuencias y control estructural en la Formación Yegua, Cuenca de Burgos, noreste de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (2), 345 – 359.
- Eichelderger, J. C., Izbekov, P. E., Browne, B. L., 2006, Bulk chemical trends at arc volcanoes are not liquid lines of descent: *LITHOS*, 87, 135 – 154.

- Elizondo-Pacheco, L. A., 2017, Magmatismo hipabisal periférico de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura, 79 pp.
- Elizondo-Pacheco, L.A., 2019, Análisis petrológico de las rocas subvolcánicas de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 205 pp.
- Elizondo-Pacheco, L.A., Ramírez-Fernández, J.A., De Ignacio, C., González-Guzmán, R., Rodríguez-Saavedra, P., Leal-Cuéllar, V. A., Velasco-Tapia, F., Montalvo-Arrieta, J.C., 2022, Generation of Arc-Like and OIB-Like Magmas Triggered by Slab Detachment in the Eastern Mexican Alkaline Province: Petrological Evidence from the Cenozoic Sierra de San Carlos-Cruillas Complex, Tamaulipas: *Journal of Petrology*, 63, 1-24.
- Escher, A., Jack, S., Watterson, J., 1976, Tectonics of the North Atlantic Proterozoic dyke swarm: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 529 – 539.
- Fideicomiso para el Desarrollo del Sur (FIDESUR), 2021, La región Sur Sureste y su contexto geográfico, Estrategia Nacional para el Desarrollo de la región sur Sureste (ENDIRSSE), 31 pp.
- Finlay, 1904, The Geology of the San José District, Tamaulipas, Mexico: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 14, 247 – 318.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T.F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G., 2018, The Cretaceous-Paleogene Mexican Orogen: structure, basin development, magmatism and tectonics: *Earth science reviews*, 183, 56 – 84.
- Folk, R.L., 1959, Practical Petrographic Classification of Limestones: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43, 1-38.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*: Cambridge, Cambridge University Press, 463 pp.
- Fowler, A. D., Ronald, D., 1983, The significance of europium anomalies in the REE spectra of granites and pegmatites, Mont Lauries, Quebec: *Geochimica et Cosmochimica*, 47, 1131-1137.
- Frost, B. R., Arculus, R. J., Barnes, C. G., Collins, W. J., Ellis, D. J., Frost, C. D., 2001, A geochemical classification of granitic rocks suites: *Journal of Petrology*, 73, 365-373.
- Frost, B. R., Frost, C. D., 2008, A geochemical classification for feldspathic rocks: *Journal of Petrology*, 49 (11), 1955-1969.
- Frost, B. R., Frost, C. D., 2014, *Essentials of igneous and metamorphic petrology*: New York, Cambridge University Press, 302 pp.

- Frost, T. P., Mahood, G. A., 1987, Field, chemical, and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorita, Sierra Nevada, California: *Geological Society of America Bulletin*, 99, 272 – 291.
- Galván-Ramírez, I. N., Montalvo-Arrieta, J. C., 2008, The historical seismicity and prediction of ground motion in Northeast Mexico, *Journal of South American Earth Sciences*, 25 (1), 37-48.
- Garza-Castillo, A. M., 2006, Estudio hidrogeoquímico de aguas subterráneas en el área del Baño de San Ignacio, NE de México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de licenciatura, 96 pp.
- Gill, R., 2010, *Igneous rocks and processes: A practical guide*: Oxford, Wiley-Blackwell, 428 pp.
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., Lindgren, K., 2020, Aplite diking and infiltration: a differentiation mechanism restricted to plutonic rocks: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175 (37).
- Glazner, A. F., Coleman, D. S., Bartley, J. M., 2008, The tenuous connection between high-silica rhyolites and granodiorite plutons: *Geology*, 36 (2), 183 – 186.
- Gobierno de Nuevo León, 2023, Encabeza Gobernador cierre hidráulico de la Presa La Libertad (en línea): Boletines, comunicados y avisos del Gobierno de Nuevo León <<https://www.nl.gob.mx/boletines-comunicados-y-avisos/encabeza-gobernador-cierre-hidraulico-de-la-presa-la-libertad>>, consulta: 1 de abril de 2024.
- González-Guzmán, E., Elizondo-Pacheco, L. A., Gonzáles-Roque, A., Sánchez-Torres, C. E., Cárdenas-Muñoz, K. S., 2023, shinyNORRRM: A cross-platform software to calculate the CIPW Norm: *Mathematical Geosciences*, 55, 563-577.
- Griffiths, D. H., Turnbull, J., 1985, A multi-electrode array for resistivity surveying: *First Break*, 3, 16-20.
- Grimes, C. B., Wooden, J. L., Chealde, M. J., John, B. E., 2015, “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170 (46), 1- 26.
- Groot-Hedlin, C., Constable, S., 1990, Occam’s Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models from Magnetotelluric Data: *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Guzmán-Villanueva, R., 1977, Fisiografía y geografía económica de la Llanura Costera del Golfo de México: *Anuario de Geografía, UNAM*, 155-171.
- Haldar, S., Tisljar, J., 2014, *Introduction to mineralogy and petrology*: Oxford, Elseiver, 338 pp.
- Hall, A., 1996, *Igneous Petrology*: Longman, 551 pp.

- Hancock, J. M., Kauffman, E. G., 1979, The great transgressions of the Late Cretaceous: *Journal of the Geological Society of London*, 136, 175 – 186.
- Hancock, R. L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice: *Journal of Structural Geology*, 7.
- Harker, A., 1909, *The Natural History of Igneous Rocks*: New York Macmillan, 384 pp.
- Heinrich, E. W., 1956, *Microscopic Petrography: USA*, McGraw-Hill Book Company, 296 pp.
- Heinrich, E. W., 1965, *Microscopic identification of minerals*, McGraw-Hill Company, 414 pp.
- Henry, C. D., Aranda-Gómez, J. J., 1992, The real southern Basin and Range: mid- to late-Cenozoic extension in Mexico, *Geology*, 20, 701-704.
- Henry, C. D., Aranda-Gómez, J. J., 2000, Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range, *Tectonophysics*, 318, 1-26.
- Hermann, J., Rubatto, D., 2009, Accessory plate control on the trace element signature of sediment melts in subduction zones: *Chemical Geology*, 265, 512 – 526.
- Hoek, J. D., 1991, A clarification of dike fracture geometry with examples from Precambrian dyke swarms in the Vestfold Hills, Antarctica: *Geologisches Rundschau*, 80, 233-248.
- Hoskin, P. W. O., Ireland, T. R., 2000, Rare earth chemistry of zircon and its use as a provenance indicator: *Geology*, 28, 627.
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003, The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 25 – 104.
- Hudec, M. R., Norton, I. O., Jackson, M. P. A. y Peel, F. J., 2013, Jurassic evolution of the Gulf of Mexico salt basin, *AAPG Bulletin*, 97(10), 1683-1710.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1978, *Carta Geológica El Porvenir G14C59*, escala 1: 50,000: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 map.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2001, *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias Fisiográficas*, escala 1: 1000000: México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003a, *Conjunto de datos geológicos vectoriales G1408*, escala 1:250,000: México, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003b, Conjunto de datos geológicos vectoriales G1411, escala 1:250,000: México, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2013, Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), 15m x 15m: México.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293-305.
- James, E. W., Henry, C. D., 1991, Compositional changes in Trans-Pecos Texas Magmatism Coincident with Cenozoic stress realignment: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96, 561-575.
- Janoušek, V., 2019. Geochemical data toolkit (GCDkit) written in R language.
- Johnson, C. M., Czamanske, G. K., Lipman, P. W., 1989, Geochemistry of intrusive rocks associated with the Latir volcanic field, New Mexico, and contrast between evolution of plutonic and volcanic rocks: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103, 90-109.
- Johnson, M. C., Planck, T., 2000, Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1.
- Jones, C. H., Unruh, J. R., Sonder, L. J., 1996, The role of gravitational potential energy in active deformation in the southwestern United States, *Nature*, 381, 37-41.
- Juárez-Arriaga, E., Lawton, F. T., Ocampo-Díaz, Y. Z. E. Stockli, D. F., Solari, L., 2019, Sediment provenance, sediment-dispersal systems, and major arc magmatic events recorded in the Mexican foreland basin, North-Central and Northeastern Mexico: *International Geology Review*, 61, 2118-2142.
- Keller, G. V., Frischknecht, F. C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*: Oxford, Pergamon Press Inc.
- Khalil, M. A., Santos, F. M., Cachao, Fonseca, P E., Mata, J., 2013, 2D and 3D resistivity tomography of the Suímo garnet-bearing dyke, Lisbon Volcanic Complex, Portugal: a case study: *Journal of Geophysics and Engineering*, 1-10.
- Khatib, N. A., Atallah, M., Diabat, A., 2010, Paleostress analysis of the Cretaceous rocks in Northern Jordan: *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 3, 25-36.
- Kirkland, C. L., Smithies, R. H., Taylor, R. J. M., Evans, N, McDonald, B., 2015, Zircon Th/U ratios in magmatic environs: *LITHOS*, 212-215.
- Koljonen, T., Rosenberg, R. J., 1974, Rare earth elements in granitic rocks: *LITHOS*, 7, 246 – 261.

- Leal-Cuéllar, V.A., 2018, Petrografía y estructuras sinmagmáticas de las rocas gabrómicas de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura, 90 pp.
- Leal-Cuéllar, V.A., 2020, Caracterización petrológica del Complejo Gabrómico Rincón Murillo de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 180 pp.
- Leal-Cuellar, V. A., 2024, Implicaciones geotectónicas a escala regional del magmatismo alcalino de la Sierra de San Carlos-Cruillas, NE de México: Linares, N. L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Doctorado, 160 pp.
- Lizárraga-Mendiola, L.G., 2003, Análisis y evaluación del agua subterránea del área del tiradero Municipal y La Petaca, Linares, N.L., México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 90 pp.
- Llambías, E. J., 2001, Geología de los cuerpos ígneos: Argentina, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), 232 pp.
- Loke, D. G., 2022, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys: Geotomo.
- Loke, M. H., 2017, RES2DINVx64 version 4.7 with multi-core and 64-bit support for Windows XP/Vista/7/8/10, Geotomo Software.
- Loke, M. H., Acworth, Dahlin, T., 2003, A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys: *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- López-Ramos, E., 1979, Geología General y México: México, Ediciones Escolares, 454 pp.
- Lytle, R. J., Dines, K. A., 1980, Iterative ray tracing between boreholes for underground image reconstruction, *IEEE Trans., Geoscience and remote sensing*, 18, 234-240.
- Madrid, S. A., 1976, Consideraciones geológico-económicas del Jurásico Superior, Noreste de México, PEMEX: III Simposium de Geología del Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas, 183-216 pp.
- Márquez-Domínguez, B. B., 1970, Geología de la Sierra de San Carlos-Cruillas: Universidad Autónoma Nacional de México, Tesis Profesional, 83 pp.
- Martens, U., Weber, B., Valencia, V. A., 2010, U/Pb geochronology of Devonian and older Paleozoic beds in the southeastern Maya block, Central America: Its affinity with peri-Gondwanan terranes: *Geological Society of America Bulletin*, 122, 815 – 829.
- Martínez-Paco, M., 2012, Análisis petrográfico, geoquímico y geocronológico U-Pb de cenizas volcánicas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico superior), en Cerro de Labradores: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 96 pp.

- Martínez-Paco, A., Velasco-Tapia, F., Santana-Salas, L. A., Juárez-Arriaga, E., Aceves de Alba, J., Ocampo-Díaz, Y, E., 2022, San Felipe and Caracol tuffaceous sandstones, NE Mexico-Late Cretaceous continental arc petrogenetic link: Petrographic, geochemical and geochronological evidence: *Journal of South American Earth Sciences*, 116.
- Martínez-Solís, A.M., 2016, Impacto de la sequía en el acuífero del centro de producción agropecuaria (COA)/UANL, Linares, N.L.: Linares, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de maestría, 105 pp.
- Martínez-Vallejo, F.S., 2007, Análisis de las Filtraciones Laterales de la Presa José López Portillo/Cerro Prieto; Linares, Nuevo León, México: Linares, N. L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura.
- McCarthy, T. S., Kable, E. J. D., 1978, On the behavior of rare-earth elements during partial melting of granitic rock: *Chemical Geology*, 22, 21 – 29.
- McDonough W., Sun S. S., 1995, The composition of the Earth: *Chemical Geology*, 120, 223-253.
- McKenzie, W. S., Donaldson, C.H., Guilford, C., 1982, *Atlas of Igneous Rocks and Their Textures*: U.K., Longman Group, 170 pp.
- Mendoza-Vargas, A., 2010, Relaciones entre el magmatismo terciario y la mineralización en el área de San José, sierra de San Carlos - Cruillas, Tamaulipas, México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura, 126 pp.
- Miranda-Huerta A., Ramírez-Gutiérrez J. G., Rodríguez-Rodríguez, J. S., 2001, Informe de la carta geológico-minera San Lázaro G14-C69, escala 1:50 000, estado de Tamaulipas: Servicio Geológico Mexicano.
- Miranda-Huerta, A, Ramírez-Gutiérrez, J.G., 2001, Informe de la carta geológico-minera San Carlos G14-D61, escala 1:50,000, estado de Tamaulipas: Servicio Geológico Mexicano.
- Montalvo-Arrieta, J. C., Quintanilla, Y., Tamez, A., Meneses, M., Ramos, L., Masuch, D., 005, Microzonation of the Linares, Northeast Mexico area, based on geology and shear-wave velocity measurements: *Geofísica Internacional*, 44, 331-340.
- Moore, J. G., Sisson, T. W., 1987, Geologic map of the triple divide peak quadrangle, Tulare County, California, U. S. Geological Survey Map GQ-1636, scale 1:62,500.
- Mulleried, F.K.G., 1944, *Geología del Estado de Nuevo León*: Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, 33 pp.
- Nallusamy, B., 2015, Morphology, trace and rare elements of detrital zircon of Kayamkulam, Thottappally Placers, South West India – Implications for provenance: *Marine Georesources and geotechnology*, 33 (5).

- Navarro-Galindo, A., 1959, Reconocimiento Geológico del área Montemorelos, Linares, General Terán, Edo. De N.L.: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Tesis Profesional, 36 pp.
- Navarro-Velasco, J. L., 2022, Declaratoria de emergencia por sequía en el estado de Nuevo León: Periódico Oficial, 18, 3-10.
- Nelson, R. A., 2001, Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Houston, Gulf Professional Publishing.
- Nick, K., 1988, Mineralogische, geochemische und petrographische Untersuchungen in der Sierra de San Carlos (Mexiko): Universidad de Karlsruhe, Tesis Doctoral, 167 pp.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, N., Morán-Zenteno, D. J., Solari, L., Luna-González, L., Schaaf, P., 2014, A review of batholiths and other plutonic intrusions of Mexico: Gondwana Research, 26, 834 – 868.
- Ortega-Torres, K. L., 2021, Mineralogía y geoquímica de tobas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico Tardío) en la localidad Cerro Prieto, Linares, N.L.: Linares, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de licenciatura, 84 pp.
- Ortiz-Ubilla, 2006, Evolución Geológica-Estructural de la Región Arcabuz-Culebra, oeste de la Cuenca de Burgos, Noreste de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Doctoral, 137 pp.
- Ortiz-Ubilla, A., Tolson, G., 2004, Interpretación estructural de una sección sísmica en la región Arcabuz-Culebra de la cuenca de Burgos, NW de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21, 226-235.
- Padilla y Sánchez, R. J., 1985, Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí, Revista del Instituto de Geología UNAM, 6, 1-20.
- Palacky, G. J., 1987, Resistivity characteristics of geologic targets, en M. N. Nabighian (ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists.
- Palmer, T. J., Wilson, M. A., 2004, calcite precipitation and dissolution of biogenic aragonite in shallow Ordovician calcite seas: *Lethaia*, 37 (4), 417 – 427.
- Pandey, D. K., Fürsich, F. T., Alberti, M., Sharma, J. K., Swami, N., 2018, Recurrent hardgrounds and their significance for intra-basinal correlations: a case study of upper Bathonian rocks from the western margin of the Indian craton: *Journal of Paleogeography*, 12 pp.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul B., Woodhead, J., Hergt, J., 2011, Iolite: Freeware for the visualization and processing of mass spectrometric data: *Journal atom spectrum*, 26.

- Pearce, J. A., 1982, Trace elements characteristics of lavas from destructive plate boundaries, en Thorpe R.S. (eds.), *Andesites*: New York, John Wiley and Sons, 525-548.
- Pearce, J.A., Harris, N. B., Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: *Journal of Petrology*, 225, 956-983.
- Pérez-Aguirre, X. J., 2017, Estudio geofísico para la determinación de la estructura geológica en los alrededores del Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 101 pp.
- Pérez-Cruz, G. A., 1992, Geologic evolution of the Burgos Basin, northeastern Mexico, Tesis doctoral, Rice University, Houston, Texas, 155 pp.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1962, Informe final del pozo Trincheras #1: Gerencia de Exploración, Supticia. General de Exploración en Monterrey, Brigada de subsuelo Reynosa No.3.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1987, *Sand and Sandstone*: Springer, 2, 572 pp.
- Philpott, A. R., Ague, J. J., 2009, *Principles of igneous and metamorphic petrology*: New York, Cambridge University Press.
- Poliquin, M. J., 2009, Geology, Geochemistry and age of intrusion-related mineralization in eastern Mexico: Universidad de Exter, Tesis Doctoral, 408 pp.
- Ramírez-Fernández, J. A., 1989, Geologische Neukartierung und petrographische untersuchung der kontaktmetamorphose des Bufa del Diente-intruve, Sierra de San Carlos, Tamaulipas, Nordost Mexiko: Un verdad de Hamburgo, Tesis de Maestría, 123 pp.
- Ramírez-Fernández, J. A., 1992, Sobre la geología de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas en Encuentro Hispano Mexicano sobre la Geología y Minería, Tema 4, México, D.F.: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 201-206.
- Ramírez-Fernández, J. A., Keller, J., Hubberten, H. W., 2000, Relaciones genéticas entre las carbonatitas y las rocas nefelínicas del complejo El Picacho, Sierra de Tamaulipas, NE de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17 (1), 45-65.
- Ravindran, A., 2012, Granite exploration study using 2D ERI en Malaipatti Hills, Thoothukudi, India: *The Pacific Journal of Science and Technology*, 13, 475-479.
- Rodríguez – Saavedra, P., 2003, Petrografía y geoquímica de las rocas magmáticas de la Sierra de San Carlos, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura, 134 pp.
- Rodríguez de Barbarín, C., Barbarín-Castillo, J. M., 1993, Influencia de la geología regional, los ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas

- superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México: *Geofísica Internacional*, 32 (2), 221-235.
- Rodríguez-Palacios, F., 1993, Mapeo geológico e investigaciones de la estructura tectónica en la región del Baño de San Ignacio, al este de la Ciudad de Linares, N.L., México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de licenciatura.
- Rolland, A., 2011, Intervention of Electrical Resistance Tomography (ERT) in resolving hydrological problems of a semiarid granite terrain of Southern India: *Journal geological society of India*, 78, 337-344.
- Rollinson, H., Pearce, V., 2021, Using geochemical data: to understand geological processes, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rollison, H. R., 1993, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Inglaterra, Taylor & Francis, 352 pp.
- Rosen, R. N., Bowen, B. E., Thies, K. J., 1994, Subsurface planktonic zonation of the Paleogene of Texas and Louisiana Gulf Coast and its relationship to relative changes of coastal on lap, en 44th annual convention of the Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions: Austin, Texas, 631-639.
- Rubatto, D., 2017, Zircon: The Metamorphic Mineral: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83, 261-296.
- Ruhland, M., 1973, Me'thode d'etude de la fracturation naturelle des roches associee'e a' divers mode 'les structureaux : *Bulletin des Sciences Ge'ologiques*, 26.
- Ruíz-Martínez, M. A. 1990, Zur Gliederung, Verbreitung und Ökologischen Bewertung der Böden in der Region von Linares, N.L. Mexiko.: Deutschland., Georg-August-Universität Göttingen, Diplomarbeit-Göttingen.
- Ruíz-Martínez, M.A., Werner, J., 1997, Research into Quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico: *Quaternary Research*, 43/44, 141-151.
- Salvador, A., 1991, Origin and development of the Gulf of Mexico basin, *Geological Society of America: The Geology of North America*, J, 389-444.
- Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation: *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Schmelkes, C., Elizondo Schmelkes, 2010, Manual para la presentación de anteproyectos e informes de investigación (tesis), 3ra edición, Oxford University Press.
- Sen, G., 2014, Petrology, principles and practice: Berlin, Springer, 368 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008. Carta geológico-minera Linares G14-11, Tamaulipas y Nuevo León, escala 1:250,000: México.

- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017, Atlas de riesgos del estado de Tamaulipas, 365 pp.
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), 2018, Construcción de la Presa Libertad para abastecimiento de agua potable al área conurbada de la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León: Evaluación socioeconómica del proyecto, 402 pp.
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), 2020, Construcción de la Presa Libertad para abastecimiento de agua en bloque al área conurbada de la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León, 150 pp.
- Severinghaus, J., Atwater, T. M., 1990, Cenozoic geometry and thermal condition of the subducting slabs beneath western North America: Geological Society of America, Memoria 176, 1- 22.
- Shand, S. J., 1951, Eruptive Rocks, 4ta ed.: John-wiley.
- Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P., 2010, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, 2nd Edition: London, Springer.
- Slama, J., Kosler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hachar, J. M. Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett M. N., Whittehouse, M. J., 2008, Plesovice zircon- A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis: Chemical Geology, 249, 1-35.
- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, A., 2009, U-Pb Zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical Workstation: achievements in precision and accuracy: Geostandards and geoanalytical research, 34 (1), 5-18.
- Sonder, L. J., Jones, C. H., 1999, Western United States extensión: How the west was widened, Annual Review of Earth and PLanetary Sciences, 27 (1), 417-462.
- Sturges, H., 1926, The choice of a class-interval: Journal of the American Statistical Association, 21, 65-66.
- Suter, M., 1991, State of stress and active deformation in Mexico and western Central America. En: Slemmons, D. B., Engdahl, E. R., Zoback, M. D., Blackwell, D. D. (eds.), Neotectonics of North America: Boulder, Colorado, Geological society of America, Decade Map, 1, 401-421.
- Taylor, P. D., Wilson, M. A., 2003, Paleoecology and evolution of marina hard substrate communities: Earth-Science Reviews, 62, 1 – 103.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A., 1976, Applied Geophysics: Cambridge, Cambridge University Press.
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W., Irving, A. J., 1993, Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington - generation of calc-alkaline granitoids by

- melting of mafic lower crust with variable water fugacity: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113, 333 – 351.
- Treviño-Cázares, A., Ramírez-Fernández, J. A., Velasco-Tapia, F., Rodríguez-Saavedra, P., 2005, Mantle xenoliths and their host magmas in the Eastern Alkaline Province, northeast Mexico: *International Geology Review*, 47, 1260-1286.
- Triola, M. F., 2014, *Estadística: Edo. De México*, Pearson Educación, 838.
- Twiss, R. J., Moores, E. M., 2007, *Structural Geology*, 2nd edition: New York, H. W. Freeman and Company.
- U.S. Geological Survey, 2006, FGDC digital cartographic standard for geologic map symbolization (PostScript Implementation): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 11-A2.
- Velasco-Tapia, F., Martínez-Paco, M. Iriondo, A., Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Cruz-Gámez, E. M., Ramos-Ledesma, A., Andaverde, J. A., Ostrooumov, M., Masuck, D., 2016, Altered volcanic ash layers of the Late Cretaceous San Felipe Formation, Sierra Madre Oriental (Northeastern Mexico): U - Pb geochronology, provenance and tectonic setting: *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 18 – 35.
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology: *Geoscience Frontiers*, 9, 1479-1493.
- Viera-Décida, F., 2006, *Relaciones Petrogenéticas del Magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría*, 262 pp.
- Viera-Décida, F., Ramírez Fernández, J. A., Velasco Tapia, F., Orozco Esquivel, M. T., 2009, *Relaciones petrogenéticas del magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana: Ciencia UANL*, 12 (1), 42-49.
- Villagómez, D., Pindell, J., Spikings, R., 2019, Thermal history of the crystalline basement from the western and southern Gulf of Mexico: Implications for rifting and later events: *The Geological Society of America*, 546 pp.
- Wang, W., Liu, S. W., Feng, Y. G., Li, Q. G., Wu, F. H., Wang, Z. Q., Wang, R. T., Yang, P. T., 2012, Chronology, petrogenesis and tectonic setting of the Neoproterozoic Tongchang dioritic pluton at the northwestern margin of the Yangtze Block: constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics: *Gondwana Research*, 22(2), 699 – 716.
- Wang, X., Griffin, W. L., Chen, J., Huang, P., Li, X., 2011, U and the contents and Th/U ratios of Zircon in Felsic and Mafic Magmatic rocks: improved zircon-melt distribution coefficients: *Acta Geologica Sinica*, 85 (1), 164-174.

- Watson, E. H., 1937, Igneous rocks of the San Carlos mountains, en Kellum, L. B. (Ed.), *The Geology and Biology of the San Carlos mountains*, Tamaulipas: México, University of Michigan Press, 12, 101-156.
- Wernicke, B.P., Christiansen, R. L., England, P. C., Sonder, L. J., 1987, Tectonomagmatic evolution of Cenozoic extension in the North American Cordillera, en Coward, M. P., Dewey, J. F., Hancock, P. L., (eds.): *Geological Society Special Publication*, 28, 155 – 176.
- Wernicke, B. P. , 1992, Cenozoic extensional tectonics of the U. S. Cordillera, in Burchfield, B. C., Lipman, P. W., Zoback, M. L. (eds.), *The Cordilleran Orogen: Conterminous U. S.: Boulder, Colorado, Geological Society of America. The Geology of North America*, 553-581.
- Wetherill, G., W., 1956, Discordant uranium-lead ages, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 37, 320-326.
- Whitney, D. L., Bernard, W.E., 2010, Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals: *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J. C., Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses: *Geostandards Newsletter*, 19, 1-23.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology: Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company*, 20, 325-343.
- Yutsis, V. V., Jenchen, U., De León-Gómez, H., Izaguirre-Váldez, F., Krivosheya, K., 2009, Paleogeographic development of the surroundings of Cerro Prieto water reservoir, Pablillo basin, NE Mexico, and geophysical modeling of the reservoir subsurface: *Stuttgart, Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 253, 41-59.
- Yutsis, V., Krivosheya, K., Levchenko, O., Lowag, J., De León-Gómez, H., Amez-Ponce, A., 2014, Bottom topography, recent sedimentation and water volume of the Cerro Prieto Dam, NE Mexico: *Geofísica Internacional*, 53, 27-38.
- Zoback, M. L., 1992, First- and second- order patterns of stress in the Lithosphere: The World Stress Map Project: *Journal of Geophysical Research*, 97, 703 – 728.

13. ANEXO I

Base de datos de orientaciones y longitudes de lineamientos del EDL

Anexo 1. Base de datos de orientaciones y longitudes de lineamientos del EDL. Datos obtenidos del análisis geoespacial. PCP=Presas Cerro Prieto. PC=Purísima de Conchos. SSCC= Sierra de San Carlos-Cruillas. LCV= Lineamiento de Cuellos Volcánicos. CLB= Corredor Linares-Burgos. *Datos obtenidos de INEGI (2003a; 2003b).

Estructura geológica	Localidad	Strike°	Longitud (m)
Dique	PCP	66	2104
Dique	PCP	69	717
Dique	PCP	252	898
Dique	PCP	76	827
Dique	PCP	72	2156
Dique	PCP	79	845
Dique	PCP	76	615
Dique	PCP	75	1682
Dique	PCP	78	932
Dique	PCP	231	294
Dique	PCP	82	1060
Dique	PCP	54	879
Dique	PCP	60	577
Dique	PCP	76	473
Dique	PCP	55	366
Dique	PCP	76	1048
Dique	PCP	74	530
Dique	PCP	264	463
Dique	PCP	81	301
Dique	PCP	84	218
Dique	PCP	75	300
Dique	PCP	79	467
Dique	PCP	250	455
Dique	PCP	75	447
Dique	PCP	76	293
Dique	PCP	252	473
Dique	PCP	73	250
Dique	PCP	76	251
Dique	PCP	75	417
Dique	PCP	252	259
Dique	PCP	71	197
Dique	PCP	67	56
Dique	PCP	53	99
Dique	PCP	256	569
Dique	PCP	69	115
Dique	PCP	61	730
Dique	PCP	73	840
Dique	PCP	252	230
Dique	PCP	67	369
Dique	PCP	56	183
Dique	PCP	73	166
Dique	PCP	69	374
Dique	PCP	77	195
Dique	PCP	45	181
Dique	PCP	70	292
Dique	PCP	62	308
Dique	PCP	70	487

Dique	PCP	222	433
Dique	PCP	60	270
Dique	PCP	70	299
Dique	PCP	66	145
Dique	PCP	65	92
Dique	PCP	72	243
Dique	PCP	44	433
Dique	PCP	60	593
Dique	PCP	73	299
Dique	PCP	71	225
Dique	PCP	75	489
Dique	PCP	62	176
Dique	PCP	65	506
Dique	PCP	67	1500
Dique	PCP	37	517
Dique	PCP	84	821
Dique	PCP	72	620
Dique	PCP	76	421
Dique	PCP	74	575
Dique	PCP	252	514
Dique	PCP	55	373
Dique	PCP	48	536
Dique	PCP	250	302
Dique	PCP	78	136
Dique	PCP	251	275
Dique	PCP	72	287
Dique	PCP	71	127
Dique	PCP	231	364
Dique	PCP	78	232
Dique	PCP	75	160
Dique	PCP	78	144
Dique	PCP	68	363
Dique	PCP	82	261
Dique	PCP	79	264
Dique	PCP	78	250
Dique	PCP	258	160
Dique	PCP	341	217
Dique	PCP	5	190
Dique	PCP	58	132
Dique	PCP	62	169
Dique	PCP	55	193
Dique	PCP	64	98
Dique	PCP	52	341
Dique	PCP	76	249
Dique	PCP	82	202
Dique	PCP	70	109
Dique	PCP	66	304
Dique	PCP	259	150
Dique	PCP	83	135
Dique	PCP	265	89
Dique	PCP	73	258
Dique	PCP	77	438
Dique	PCP	74	228
Dique	PCP	61	132

Dique	PCP	75	151
Dique	PCP	254	237
Dique	PCP	250	158
Dique	PCP	70	182
Dique	PCP	246	86
Dique	PCP	70	199
Dique	PCP	70	167
Dique	PCP	250	258
Dique	PCP	248	148
Dique	PCP	255	373
Dique	PCP	86	128
Dique	PCP	77	242
Dique	PCP	74	217
Dique	PCP	74	117
Dique	PCP	83	291
Dique	PCP	266	202
Dique	PCP	71	183
Dique	PCP	69	225
Dique	PCP	63	188
Dique	PCP	68	183
Dique	PCP	252	257
Dique	PCP	52	276
Dique	PCP	71	463
Dique	PCP	76	299
Dique	PCP	70	154
Dique	PCP	272	325
Dique	PCP	268	298
Dique	PCP	75	105
Dique	PCP	77	150
Dique	PCP	73	99
Dique	PCP	69	69
Dique	PCP	72	181
Dique	PCP	68	155
Dique	PCP	74	319
Dique	PCP	73	164
Dique	PCP	76	187
Dique	PCP	77	194
Dique	PCP	73	266
Dique	PCP	72	166
Dique	PCP	71	181
Dique	PCP	204	788
Dique	PCP	74	292
Dique	PCP	75	231
Dique	PCP	70	141
Dique	PCP	60	203
Dique	PCP	72	116
Dique	PCP	60	160
Dique	PCP	241	546
Dique	PCP	247	211
Dique	PCP	77	240
Dique	PCP	74	229
Dique	PCP	72	199
Dique	PCP	66	315
Dique	PCP	71	127

Dique	PCP	74	80
Dique	PCP	36	404
Dique	PCP	76	1311
Dique	PCP	252	244
Dique	PCP	73	243
Dique	PCP	223	755
Dique	PCP	70	443
Dique	PCP	248	373
Dique	PCP	72	1550
Dique	PCP	42	1415
Dique	PCP	24	1214
Dique	PCP	204	807
Dique	PCP	213	1360
Dique	PCP	236	473
Dique	PCP	206	742
Dique	PCP	226	508
Dique	PCP	205	388
Dique	PCP	223	189
Dique	PCP	221	159
Dique	PCP	239	272
Dique	PCP	58	268
Dique	PCP	72	330
Dique	PC	75	522
Dique	PC	47	452
Dique	PC	58	374
Dique	PC	72	272
Dique	PC	255	160
Dique	PC	254	172
Dique	PC	72	159
Dique	PC	77	125
Dique	PC	39	354
Dique	PC	73	214
Dique	PC	61	313
Dique	PC	60	182
Dique	PC	65	147
Dique	PC	242	385
Dique	PC	80	184
Dique	PC	81	92
Dique	PC	75	109
Dique	PC	60	103
Dique	PC	80	62
Dique	PC	69	65
Dique	PC	63	91
Dique	PC	64	150
Dique	PC	41	130
Dique	PC	224	128
Dique	PC	77	202
Dique	PC	81	188
Dique	PC	56	104
Dique	PC	83	380
Dique	PC	63	147
Dique	PC	79	279
Dique	PC	67	73
Dique	PC	75	69

Dique	PC	78	217
Dique	PC	64	111
Dique	PC	77	116
Dique	PC	83	244
Dique	PC	63	147
Dique	PC	61	329
Dique	PC	87	83
Dique	PC	83	578
Dique	PC	78	639
Dique	PC	64	120
Dique	PC	75	360
Dique	PC	71	205
Dique	PC	75	101
Dique	PC	259	247
Dique	PC	67	322
Dique	PC	78	313
Dique	PC	63	212
Dique	PC	66	40
Dique	PC	64	152
Dique	PC	76	233
Dique	PC	64	812
Dique	PC	82	128
Dique	PC	63	72
Dique	PC	69	75
Dique	PC	78	245
Dique	PC	90	153
Dique	PC	74	264
Dique	PC	63	162
Dique	PC	57	100
Dique	PC	66	149
Dique	PC	68	199
Dique	PC	65	415
Dique	PC	66	221
Dique	PC	67	143
Dique	PC	64	213
Dique	PC	66	140
Dique	PC	71	94
Dique	PC	72	115
Dique	PC	67	131
Dique	PC	68	185
Dique	PC	242	916
Dique	PC	80	178
Dique	PC	85	157
Dique	PC	77	82
Dique	PC	68	191
Dique	PC	70	248
Dique	PC	69	231
Dique	PC	68	205
Dique	PC	84	331
Dique	PC	84	109
Dique	PC	66	252
Dique	PC	68	287
Dique	PC	80	1113
Dique	PC	85	912

Dique	PC	86	576
Dique	PC	79	790
Dique	PC	261	544
Dique	PC	82	226
Dique	PC	86	325
Dique	PC	68	289
Dique	PC	78	562
Dique	PC	84	353
Dique	PC	81	478
Dique	PC	82	345
Dique	PC	82	235
Dique	PC	87	118
Dique	PC	75	187
Dique	PC	78	101
Dique	PC	76	229
Dique	PC	65	183
Dique	PC	68	176
Dique	PC	69	98
Dique	PC	68	86
Dique	PC	66	148
Dique	PC	65	281
Dique	PC	68	156
Dique	PC	66	153
Dique	PC	66	187
Dique	PC	66	73
Dique	PC	66	121
Dique	PC	80	114
Dique	PC	79	173
Dique	PC	82	207
Dique	PC	79	222
Dique	PC	81	343
Dique	PC	73	133
Dique	PC	75	330
Dique	PC	60	103
Dique	PC	73	89
Dique	PC	86	135
Dique	PC	65	215
Dique	PC	71	163
Dique	PC	81	327
Dique	PC	88	175
Dique	PC	88	208
Dique	PC	97	219
Dique	PC	89	406
Dique	PC	88	474
Dique	PC	277	175
Dique	PC	82	220
Dique	PC	92	117
Dique	PC	82	239
Dique	PC	275	1137
Dique	PC	274	458
Dique	PC	268	408
Dique	PC	92	2209
Dique	PC	91	1221
Dique	PC	91	794

Dique	PC	87	372
Dique	PC	66	259
Dique	PC	267	325
Dique	PC	258	241
Dique	PC	77	205
Dique	PC	87	185
Dique	PC	58	462
Dique	PC	62	156
Dique	PC	252	162
Dique	PC	255	106
Dique	PC	78	69
Dique	PC	83	245
Dique	PC	77	401
Dique	PC	241	167
Dique	PC	74	191
Dique	PC	259	179
Dique	PC	255	168
Dique	PC	265	210
Dique	PC	266	77
Dique	PC	261	282
Dique	PC	71	147
Dique	PC	255	117
Dique	PC	259	140
Dique	PC	70	316
Dique	PC	250	265
Dique	PC	70	392
Dique	PC	248	212
Dique	PC	241	142
Dique	PC	241	126
Dique	PC	257	186
Dique	PC	257	257
Dique	PC	251	89
Dique	PC	234	99
Dique	PC	255	178
Dique	PC	65	117
Dique	PC	66	117
Dique	PC	85	127
Dique	PC	75	68
Dique	PC	242	258
Dique	PC	89	709
Dique	PC	92	140
Dique	PC	75	2527
Dique	PC	61	269
Dique	PC	265	894
Dique	PC	256	265
Dique	PC	243	214
Dique	PC	258	219
Dique	PC	65	276
Dique	PC	85	487
Dique	PC	82	222
Dique	PC	87	211
Dique	PC	85	510
Dique	PC	74	154
Dique	PC	283	568

Dique	PC	73	217
Dique	PC	74	192
Dique	PC	256	497
Dique	PC	257	311
Dique	PC	255	379
Dique	PC	252	161
Dique	PC	66	230
Dique	PC	64	214
Dique	PC	87	241
Dique	PC	65	207
Dique	PC	255	181
Dique	PC	194	240
Dique	PC	52	116
Dique	PC	238	265
Dique	PC	74	118
Dique	PC	254	153
Dique	PC	59	82
Dique	PC	211	416
Dique	PC	72	131
Dique	PC	91	86
Dique	PC	75	156
Dique	PC	226	127
Dique	PC	238	225
Dique	PC	220	99
Dique	PC	10	265
Dique	PC	233	86
Dique	PC	78	413
Dique	PC	81	211
Dique	PC	90	392
Dique	PC	268	235
Dique	PC	258	201
Dique	PC	268	335
Dique	PC	277	263
Dique	PC	269	182
Dique	PC	265	403
Dique	PC	266	330
Dique	PC	91	382
Dique	PC	272	206
Dique	PC	81	261
Dique	PC	85	233
Dique	PC	81	154
Dique	PC	80	113
Dique	PC	87	96
Dique	PC	261	131
Dique	PC	80	86
Dique	PC	261	146
Dique	PC	235	239
Dique	PC	261	129
Dique	PC	261	207
Dique	PC	268	130
Dique	PC	267	175
Dique	PC	71	737
Dique	PC	262	530
Dique	PC	64	439

Dique	PC	258	478
Dique	PC	262	215
Dique	PC	260	237
Dique	PC	260	228
Dique	PC	90	146
Dique	PC	80	268
Dique	PC	259	135
Dique	PC	60	262
Dique	PC	62	230
Dique	PC	63	201
Dique	PC	74	198
Dique	PC	63	149
Dique	PC	243	330
Dique	PC	252	503
Dique	PC	36	225
Dique	PC	74	320
Dique	PC	110	674
Dique	PC	294	389
Dique	PC	111	391
Dique	PC	252	112
Dique	PC	110	168
Dique	PC	87	172
Dique	PC	273	655
Dique	PC	261	260
Dique	PC	82	506
Dique	PC	71	295
Dique	PC	98	204
Dique	PC	267	141
Dique	PC	76	157
Dique	PC	286	611
Dique	PC	287	508
Dique	PC	84	835
Dique	PC	84	667
Dique	PC	206	425
Dique	PC	264	209
Dique	PC	258	256
Dique	PC	293	169
Dique	PC	281	242
Dique	Pe	95	90
Dique	PC	92	200
Dique	PC	94	185
Dique	PC	103	182
Dique	PC	107	264
Dique	PC	96	89
Dique	PC	63	165
Dique	PC	246	160
Dique	PC	272	334
Dique	PC	258	254
Dique	PC	79	312
Dique	PC	78	241
Dique	PC	76	159
Dique	PC	62	562
Dique	PC	79	230
Dique	PC	79	247

Dique	PC	82	176
Dique	PC	262	210
Dique	PC	261	316
Dique	PC	82	226
Dique	PC	265	191
Dique	PC	82	311
Dique	PC	82	196
Dique	PC	259	126
Dique	PC	261	197
Dique	PC	218	164
Dique	PC	259	254
Dique	PC	82	78
Dique	PC	79	87
Dique	PC	83	127
Dique	PC	261	143
Dique	PC	56	134
Dique	PC	61	225
Dique	PC	257	106
Dique	PC	77	134
Dique	PC	64	85
Dique	PC	67	172
Dique	PC	269	197
Dique	PC	70	206
Dique	PC	72	378
Dique	PC	266	439
Dique	PC	65	136
Dique	PC	59	871
Dique	PC	260	572
Dique	PC	30	654
Dique	PC	82	241
Dique	PC	72	467
Dique	PC	82	97
Dique	PC	92	477
Dique	PC	264	241
Dique	PC	77	412
Dique	PC	81	292
Dique	PC	261	135
Dique	PC	78	303
Dique	PC	80	406
Dique	PC	70	117
Dique	PC	246	135
Dique	PC	65	177
Dique	PC	83	342
Dique	PC	266	233
Dique	PC	54	659
Dique	PC	60	198
Dique	PC	250	145
Dique	PC	72	210
Dique	PC	98	150
Dique	PC	269	193
Dique	PC	201	812
Dique	PC	52	166
Dique	PC	45	143
Dique	PC	51	162

Dique	PC	236	251
Dique	PC	62	267
Dique	PC	139	303
Dique	PC	88	180
Dique	PC	265	380
Dique	PC	89	252
Dique	PC	74	543
Dique	PC	84	296
Dique	PC	64	477
Dique	PC	245	112
Dique	PC	65	236
Dique	PC	60	817
Dique	PC	257	233
Dique	PC	80	465
Dique	PC	62	222
Dique	PC	245	124
Dique	PC	65	85
Dique	PC	242	63
Dique	PC	257	183
Dique	PC	84	190
Dique	PC	73	355
Dique	PC	75	216
Dique	PC	255	158
Dique	PC	256	138
Dique	PC	90	315
Dique	PC	82	962
Dique	PC	128	259
Dique	PC	76	179
Dique	PC	66	338
Dique	PC	79	257
Dique	PC	268	308
Dique	PC	249	170
Dique	PC	97	166
Dique	PC	97	1014
Dique	PC	87	335
Dique	PC	26	872
Dique	PC	14	307
Dique	PC	77	221
Dique	PC	350	151
Fractura	SSCC	77	1909
Fractura	SSCC	80	736
Fractura	SSCC	86	10992
Fractura	SSCC	88	1717
Fractura	SSCC	90	3402
Fractura	SSCC	91	537
Fractura	SSCC	92	1672
Fractura	SSCC	93	1422
Fractura	SSCC	93	1570
Fractura	SSCC	93	1669
Fractura	SSCC	93	2383
Fractura	SSCC	94	653
Fractura	SSCC	94	2253
Fractura	SSCC	95	2300
Fractura	SSCC	96	2141

Fractura	SSCC	97	925
Fractura	SSCC	97	1701
Fractura	SSCC	98	1115
Fractura	SSCC	99	1478
Fractura	SSCC	99	1799
Fractura	SSCC	100	3222
Fractura	SSCC	100	640
Fractura	SSCC	100	1193
Fractura	SSCC	101	1159
Fractura	SSCC	103	4221
Fractura	SSCC	103	1722
Fractura	SSCC	106	1460
Fractura	SSCC	109	1069
Fractura	SSCC	110	2410
Fractura	SSCC	110	1530
Fractura	SSCC	110	2031
Fractura	SSCC	113	1414
Fractura	SSCC	116	2990
Fractura	SSCC	117	1561
Fractura	SSCC	118	2249
Fractura	SSCC	118	1204
Fractura	SSCC	126	936
Fractura	SSCC	256	1750
Fractura	SSCC	266	1581
Fractura	SSCC	266	1284
Fractura	SSCC	269	5193
Fractura	SSCC	273	1293
Fractura	SSCC	276	1444
Fractura	SSCC	278	3475
Fractura	SSCC	281	6724
Fractura	SSCC	281	1609
Fractura	SSCC	281	2758
Fractura	SSCC	284	778
Fractura	SSCC	286	1311
Fractura	SSCC	289	2775
Fractura	SSCC	290	2901
Fractura	SSCC	291	1587
Fractura	SSCC	296	1640
Fractura	SSCC*	272	3081
Fractura	SSCC*	110	1725
Eje estructural	SSCC*	161	2088
Fractura	SSCC*	217	3312
Fractura	SSCC*	221	3376
Fractura	SSCC*	252	2167
Fractura	SSCC*	213	1490
Fractura	SSCC*	257	1
Eje estructural	SSCC*	153	3806
Eje estructural	SSCC*	165	1972
Eje estructural	SSCC*	169	2492
Fractura	SSCC*	253	3322
Eje estructural	SSCC*	162	2938
Fractura	SSCC*	224	2014
Eje estructural	SSCC*	174	2515
Eje estructural	SSCC*	165	2882

Fractura	SSCC*	231	2945
Fractura	SSCC*	120	4740
Fractura	SSCC*	202	5090
Estructura tabular	SSCC*	264	3070
Estructura tabular	SSCC*	260	2566
Estructura tabular	SSCC*	261	2565
Estructura tabular	SSCC*	110	3242
Estructura tabular	SSCC*	264	3056
Estructura tabular	SSCC*	258	3746
Estructura tabular	SSCC*	265	1910
Falla	SSCC*	91	10817
Falla	SSCC*	283	3123
Eje estructural	SSCC*	120	2719
Estructura tabular	SSCC*	96	448
Estructura tabular	SSCC*	83	1479
Fractura	SSCC*	246	355
Falla	SSCC*	280	3947
Fractura	SSCC*	209	2130
Estructura tabular	SSCC*	85	3759
Eje estructural	SSCC*	71	1260
Fractura	SSCC*	338	567
Falla	SSCC*	99	5824
Eje estructural	SSCC*	99	6501
Eje estructural	SSCC*	274	986
Fractura	SSCC*	215	1128
Fractura	SSCC*	141	2310
Falla	SSCC*	95	3037
Eje estructural	SSCC*	259	884
Dolina	SSCC*	288	1529
Eje estructural	SSCC*	288	564
Eje estructural	SSCC*	259	1021
Eje estructural	SSCC*	298	663
Estructura tabular	SSCC*	233	553
Eje estructural	SSCC*	128	3740
Eje estructural	SSCC*	299	632
Fractura	SSCC*	162	879
Fractura	SSCC*	279	1989
Fractura	SSCC*	278	1406
Fractura	SSCC*	348	1313
Fractura	SSCC*	284	3810
Fractura	SSCC*	290	265
Falla	SSCC*	279	18342
Falla	SSCC*	99	10747
Fractura	SSCC*	154	675
Fractura	SSCC*	196	3160
Fractura	SSCC*	215	3391
Falla	SSCC*	116	668
Eje estructural	SSCC*	292	4778
Estructura tabular	SSCC*	248	3796
Estructura tabular	SSCC*	245	2985
Eje estructural	SSCC*	303	3739
Fractura	SSCC*	246	2933
Estructura tabular	SSCC*	252	3480
Fractura	SSCC*	218	602

Fractura	SSCC*	352	1935
Fractura	SSCC*	190	2738
Eje estructural	SSCC*	168	2612
Fractura	SSCC*	222	961
Eje estructural	SSCC*	123	6296
Fractura	SSCC*	209	2750
Fractura	SSCC*	181	2295
Falla	SSCC*	103	10584
Fractura	SSCC*	350	1051
Fractura	SSCC*	25	207
Eje estructural	SSCC*	119	734
Fractura	SSCC*	234	3508
Fractura	SSCC*	341	557
Eje estructural	SSCC*	94	4684
Falla	SSCC*	85	4300
Fractura	SSCC*	171	237
Falla	SSCC*	92	3584
Falla	SSCC*	92	11795
Eje estructural	SSCC*	157	2554
Eje estructural	SSCC*	207	2906
Fractura	SSCC*	205	3476
Fractura	SSCC*	216	1699
Fractura	SSCC*	324	2695
Fractura	SSCC*	183	4142
Eje estructural	SSCC*	165	2226
Fractura	SSCC*	193	1247
Fractura	SSCC*	123	913
Fractura	SSCC*	218	708
Eje estructural	SSCC*	120	2792
Fractura	SSCC*	209	1346
Fractura	SSCC*	85	802
Fractura	SSCC*	88	2404
Fractura	SSCC*	328	1147
Eje estructural	SSCC*	112	1132
Fractura	SSCC*	181	1980
Fractura	SSCC*	41	1046
Fractura	SSCC*	137	1221
Fractura	SSCC*	227	1363
Fractura	SSCC*	154	3057
Fractura	SSCC*	212	1114
Fractura	SSCC*	153	2511
Eje estructural	SSCC*	110	2493
Fractura	SSCC*	350	2550
Fractura	SSCC*	218	3679
Fractura	SSCC*	213	1338
Fractura	SSCC*	208	1845
Fractura	SSCC*	138	2372
Fractura	SSCC*	168	4673
Fractura	SSCC*	240	739
Fractura	SSCC*	311	2312
Fractura	SSCC*	356	2483
Fractura	SSCC*	299	88
Fractura	SSCC*	15	3412
Fractura	SSCC*	41	1667

Fractura	SSCC*	240	2601
Fractura	SSCC*	356	376
Fractura	SSCC*	276	5810
Fractura	SSCC*	134	2281
Fractura	SSCC*	172	1275
Fractura	SSCC*	165	1655
Fractura	SSCC*	212	2548
Eje estructural	SSCC*	116	5049
Fractura	SSCC*	193	1278
Eje estructural	SSCC*	113	1543
Fractura	SSCC*	98	3458
Fractura	SSCC*	220	898
Fractura	SSCC*	197	1516
Eje estructural	SSCC*	111	1765
Fractura	SSCC*	228	2856
Fractura	SSCC*	230	4159
Fractura	SSCC*	250	14529
Fractura	SSCC*	250	8080
Fractura	SSCC*	199	1559
Fractura	SSCC*	180	2248
Fractura	SSCC*	191	3398
Fractura	SSCC*	192	3170
Falla	Palos Blancos	96	50495
Falla	El Mulato	98	35654
Fractura	Norte CLB	73	291
Fractura	Norte CLB	44	253
Fractura	Norte CLB	91	336
Fractura	Norte CLB	208	123
LCV	Burgos	96	8899
LCV	Burgos	94	7296
LCV	Burgos	112	2947
LCV	Burgos	144	1801
LCV	Burgos	118	2241

14. ANEXO II
Geocronología U-Pb y elementos traza de circones

Tabla 2. Datos de LA-ICP-MS de U-Th-Pb en circones de la muestra Pr5

Analysis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U/Th	Corrected isotopic ratios								Rho	Corrected ages (Ma)						Best ages (Ma)	±2σ	Disc %
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ abs		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ			
Pr5_Zr01	1077.1	518.8	0.48	2.08	0.05054	0.00431	0.08624	0.00886	0.01246	0.00027	0.00433	0.00026	-0.008	79.8	1.71	83.8	8.30	160.3	202.32	79.8	1.71	4.8
Pr5_Zr02a	460.8	260.3	0.57	1.77	0.06117	0.00837	0.10681	0.01539	0.01282	0.00047	0.00453	0.00055	0.034	82.1	3.01	102.6	14.17	558.9	290.06	82.1	3.01	19.9
Pr5_Zr02b	475.4	193.9	0.41	2.45	0.06931	0.01038	0.12202	0.01917	0.01294	0.00046	0.00553	0.00067	0.062	82.9	2.91	115.8	17.33	703.5	335.04	82.9	2.91	28.5
Pr5_Zr04	855.0	393.8	0.46	2.17	0.05198	0.00547	0.08829	0.01040	0.01248	0.00034	0.00426	0.00029	-0.041	80.0	2.15	85.7	9.69	162.5	258.00	80.0	2.15	6.7
Pr5_Zr05	699.0	370.8	0.53	1.89	0.04999	0.00428	0.08225	0.00830	0.01208	0.00029	0.00395	0.00025	-0.028	77.4	1.84	80.1	7.77	112.1	190.49	77.4	1.84	3.3
Pr5_Zr06	351.2	177.0	0.50	1.98	0.05307	0.00706	0.08678	0.01206	0.01237	0.00042	0.00395	0.00041	0.187	79.3	2.66	86.4	12.49	198.8	303.14	79.3	2.66	8.2
Pr5_Zr07	2062.4	863.7	0.42	2.39	0.05127	0.00352	0.08580	0.00771	0.01228	0.00027	0.00435	0.00025	0.092	78.7	1.69	83.5	7.21	206.3	165.36	78.7	1.69	5.7
Pr5_Zr08	341.1	175.7	0.52	1.94	0.05485	0.01058	0.09324	0.01812	0.01262	0.00051	0.00441	0.00054	0.018	80.8	3.23	89.6	16.88	50.1	573.67	80.8	3.23	9.8
Pr5_Zr09	846.9	444.5	0.52	1.91	0.05996	0.00484	0.10337	0.01111	0.01258	0.00036	0.00475	0.00044	0.542	80.6	2.31	99.7	10.16	558.6	172.39	80.6	2.31	19.2
Pr5_Zr10	924.1	457.3	0.49	2.02	0.05261	0.00352	0.09342	0.00826	0.01297	0.00030	0.00432	0.00030	0.095	83.1	1.88	90.6	7.66	255.0	159.15	83.1	1.88	8.3
Pr5_Zr11	240.0	132.6	0.55	1.81	0.05508	0.00839	0.08796	0.01322	0.01222	0.00052	0.00409	0.00037	0.170	78.3	3.33	85.0	12.26	-15.8	417.42	78.3	3.33	7.9
Pr5_Zr12	923.1	522.0	0.57	1.77	0.05035	0.00511	0.08155	0.00911	0.01181	0.00031	0.00407	0.00027	-0.231	75.7	2.00	79.4	8.50	90.9	237.04	75.7	2.00	4.7
Pr5_Zr13	531.4	289.7	0.55	1.83	0.05357	0.00672	0.09584	0.01442	0.01298	0.00053	0.00466	0.00055	0.329	83.1	3.40	92.4	13.42	282.9	289.67	83.1	3.40	10.1
Pr5_Zr14	528.7	204.9	0.39	2.58	0.06722	0.00753	0.11393	0.01352	0.01239	0.00036	0.00568	0.00043	-0.232	79.4	2.31	109.0	12.33	693.2	251.75	79.4	2.31	27.2
Pr5_Zr15	1086.8	765.1	0.70	1.42	0.04736	0.00410	0.07936	0.00828	0.01202	0.00026	0.00370	0.00031	0.218	77.0	1.65	77.4	7.83	-5.7	244.88	77.0	1.65	0.6
Pr5_Zr16a	308.6	134.0	0.43	2.30	0.06055	0.00714	0.10354	0.01268	0.01254	0.00049	0.00435	0.00044	-0.108	80.3	3.11	99.6	11.67	444.0	290.19	80.3	3.11	19.3
Pr5_Zr16b	381.7	217.9	0.57	1.75	0.05612	0.00872	0.09716	0.01568	0.01261	0.00050	0.00439	0.00061	-0.041	80.8	3.20	93.6	14.46	262.2	387.08	80.8	3.20	13.7
Pr5_Zr17	357.7	188.8	0.53	1.89	0.04925	0.00550	0.08181	0.00934	0.01236	0.00039	0.00377	0.00029	-0.328	79.2	2.51	81.1	9.59	-41.6	289.05	79.2	2.51	2.4
Pr5_Zr18	464.6	320.5	0.69	1.45	0.05020	0.00762	0.08622	0.01404	0.01217	0.00040	0.00397	0.00031	0.137	77.9	2.55	83.5	13.18	41.3	412.04	77.9	2.55	6.7
Pr5_Zr19a	716.3	553.7	0.77	1.29	0.04770	0.00445	0.08241	0.00922	0.01237	0.00028	0.00405	0.00021	0.457	79.2	1.81	80.1	8.59	-53.5	225.40	79.2	1.81	1.1
Pr5_Zr19b	760.9	651.3	0.86	1.17	0.06367	0.00667	0.11239	0.01405	0.01243	0.00034	0.00429	0.00027	0.450	79.6	2.20	107.6	12.91	556.0	287.05	79.6	2.20	26.0
Pr5_Zr20	433.9	157.2	0.36	2.76	0.05694	0.01113	0.10258	0.02041	0.01287	0.00041	0.00456	0.00108	-0.170	82.4	2.61	98.8	18.92	279.4	621.40	82.4	2.61	16.5
Pr5_Zr21	397.2	191.5	0.48	2.07	0.05017	0.00891	0.08702	0.01572	0.01238	0.00038	0.00363	0.00053	-0.053	79.3	2.42	84.4	14.75	-98.2	614.48	79.3	2.42	6.0
Pr5_Zr22a	297.2	177.8	0.60	1.67	0.04870	0.00651	0.08755	0.01229	0.01286	0.00051	0.00403	0.00031	-0.098	82.4	3.25	84.8	11.41	-71.4	365.36	82.4	3.25	2.8
Pr5_Zr22b	310.0	193.8	0.63	1.60	0.05239	0.00847	0.08891	0.01478	0.01229	0.00043	0.00417	0.00037	-0.148	78.8	2.75	85.7	13.71	143.6	366.57	78.8	2.75	8.1
Pr5_Zr23	378.5	175.6	0.46	2.16	0.05179	0.00804	0.08967	0.01553	0.01229	0.00061	0.00499	0.00065	0.373	78.7	3.90	86.8	14.38	122.9	362.28	78.7	3.90	9.3
Pr5_Zr26	515.4	271.2	0.53	1.90	0.06199	0.00673	0.11175	0.01338	0.01298	0.00035	0.00469	0.00042	-0.094	83.2	2.25	107.2	12.21	518.9	280.61	83.2	2.25	22.4

Tabla 3. Datos de LA-ICP-MS de U-Th-Pb en circones de la muestra Pr6

Analysis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U/Th	Corrected isotopic ratios								Rho	Corrected ages (Ma)						Best ages (Ma)	±2σ	Disc %
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ abs		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
Pr6_Zrn-01	564.9	497.1	0.88	1.14	0.05570	0.00864	0.08953	0.01340	0.01184	0.00050	0.00436	0.00053	-0.042	75.9	3.17	86.7	12.38	274.9	357.56	75.9	3.17	12.5
Pr6_Zrn-02	335.4	207.7	0.62	1.61	0.05857	0.00842	0.10326	0.01577	0.01298	0.00069	0.00455	0.00067	0.199	83.1	4.36	99.4	14.46	390.9	386.49	83.1	4.36	16.3
Pr6_Zrn-03	692.6	774.7	1.12	0.89	0.04933	0.00395	0.08173	0.00599	0.01232	0.00043	0.00387	0.00018	-0.230	78.9	2.77	79.6	5.62	33.1	203.75	78.9	2.77	0.9
Pr6_Zrn-05	221.1	202.1	0.91	1.09	0.06092	0.01025	0.10610	0.01786	0.01300	0.00075	0.00419	0.00041	-0.018	83.2	4.74	101.6	16.38	283.6	506.20	83.2	4.74	18.1
Pr6_Zrn-06	3095.4	6003.4	1.94	0.52	0.04914	0.00193	0.08114	0.00333	0.01227	0.00032	0.00368	0.00010	0.092	78.6	2.06	79.2	3.12	135.1	89.63	78.6	2.06	0.8
Pr6_Zrn-07	546.6	524.6	0.96	1.04	0.04670	0.00400	0.07484	0.00650	0.01187	0.00039	0.00370	0.00020	0.021	76.1	2.48	73.1	6.13	-89.7	220.80	76.1	2.48	-4.1
Pr6_Zrn-08	282.6	244.1	0.86	1.16	0.04943	0.00533	0.08370	0.00830	0.01268	0.00055	0.00435	0.00040	-0.112	81.2	3.52	81.3	7.77	-38.0	280.39	81.2	3.52	0.2
Pr6_Zrn-09	567.4	321.5	0.57	1.76	0.04820	0.00369	0.08285	0.00641	0.01263	0.00044	0.00418	0.00031	0.175	80.9	2.78	80.6	6.01	-7.0	195.33	80.9	2.78	-0.3
Pr6_Zrn-10	703.0	473.4	0.67	1.49	0.04745	0.00387	0.08086	0.00676	0.01244	0.00041	0.00430	0.00024	0.186	79.7	2.62	78.7	6.36	-25.8	207.61	79.7	2.62	-1.2
Pr6_Zrn-11	677.0	579.7	0.86	1.17	0.04872	0.00406	0.07899	0.00618	0.01169	0.00039	0.00390	0.00022	0.074	74.9	2.47	77.0	5.80	44.2	183.43	74.9	2.47	2.8
Pr6_Zrn-12	316.9	267.7	0.84	1.18	0.05339	0.00967	0.09000	0.01779	0.01179	0.00079	0.00435	0.00078	0.450	75.5	5.01	86.9	16.46	66.1	471.73	75.5	5.01	13.1
Pr6_Zrn-14	587.5	395.5	0.67	1.49	0.04865	0.00509	0.07550	0.00750	0.01125	0.00045	0.00426	0.00034	0.149	72.1	2.88	73.7	7.02	-68.4	257.28	72.1	2.88	2.1
Pr6_Zrn-15	667.2	657.0	0.98	1.02	0.04932	0.00622	0.08747	0.01041	0.01256	0.00055	0.00409	0.00036	0.001	80.5	3.49	84.9	9.74	84.4	270.96	80.5	3.49	5.2
Pr6_Zrn-16	613.9	626.1	1.02	0.98	0.05013	0.00501	0.08273	0.00787	0.01170	0.00049	0.00383	0.00026	0.044	75.0	3.11	80.5	7.35	58.4	247.01	75.0	3.11	6.8
Pr6_Zrn-17	922.1	1248.3	1.35	0.74	0.04970	0.00437	0.08550	0.00708	0.01222	0.00046	0.00380	0.00017	-0.104	78.3	2.91	83.1	6.62	70.3	216.51	78.3	2.91	5.8
Pr6_Zrn-18	1230.4	1343.9	1.09	0.92	0.04992	0.00434	0.08643	0.00755	0.01219	0.00043	0.00396	0.00024	0.133	78.1	2.72	84.0	7.05	72.5	223.29	78.1	2.72	7.0
Pr6_Zrn-19	1160.0	1206.2	1.04	0.96	0.05652	0.00534	0.09566	0.01066	0.01201	0.00055	0.00422	0.00037	0.579	76.9	3.52	92.6	9.90	419.2	227.69	76.9	3.52	16.9
Pr6_Zrn-20	3836.9	2110.9	0.55	1.82	0.04890	0.00338	0.08105	0.00540	0.01185	0.00040	0.00390	0.00028	-0.097	76.0	2.56	79.1	5.06	124.7	162.92	76.0	2.56	4.0
Pr6_Zrn-21	626.0	490.4	0.78	1.28	0.04806	0.00462	0.08242	0.00813	0.01261	0.00043	0.00395	0.00029	0.137	80.8	2.74	80.2	7.64	52.4	226.69	80.8	2.74	-0.7
Pr6_Zrn-22	1492.8	1198.7	0.80	1.25	0.05156	0.00595	0.08858	0.01088	0.01272	0.00067	0.00511	0.00074	0.356	81.5	4.28	86.1	10.16	249.2	271.16	81.5	4.28	5.4
Pr6_Zrn-23	422.8	258.7	0.61	1.63	0.05195	0.00442	0.08939	0.00797	0.01257	0.00047	0.00404	0.00035	0.017	80.5	2.98	86.6	7.41	136.2	264.28	80.5	2.98	7.1
Pr6_Zrn-27	894.0	1075.2	1.20	0.83	0.04892	0.00408	0.07813	0.00622	0.01195	0.00041	0.00354	0.00017	-0.128	76.6	2.60	76.2	5.86	49.9	208.88	76.6	2.60	-0.5
Pr6_Zrn-28	839.5	997.0	1.19	0.84	0.05125	0.00385	0.08276	0.00613	0.01204	0.00041	0.00376	0.00019	-0.030	77.1	2.59	80.6	5.76	171.8	185.55	77.1	2.59	4.3
Pr6_Zrn-29	305.2	250.6	0.82	1.22	0.05542	0.00878	0.09469	0.01268	0.01300	0.00070	0.00430	0.00046	-0.243	83.3	4.46	91.4	11.67	148.0	363.97	83.3	4.46	8.9
Pr6_Zrn-30	352.3	301.6	0.86	1.17	0.05331	0.00624	0.09321	0.00984	0.01315	0.00074	0.00379	0.00026	0.058	84.2	4.71	90.2	9.14	142.9	298.10	84.2	4.71	6.6

Tabla 4. Datos de LA-ICP-MS de U-Th-Pb en circones de la muestra PC4

Analysis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U/Th	Corrected isotopic ratios								Rho	Corrected ages (Ma)						Best ages (Ma)	±2σ	Disc %
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³² Th	±2σ abs		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
PC4_Zrn-01	586.1	194.7	0.33	3.01	0.04864	0.00452	0.08634	0.00971	0.01276	0.00039	0.00442	0.00053	0.197	81.8	2.45	83.9	9.03	6.9	232.91	81.8	2.45	2.5
PC4_Zrn-02	323.3	117.1	0.36	2.76	0.05453	0.00730	0.09517	0.01353	0.01261	0.00050	0.00494	0.00106	-0.012	80.8	3.16	92.0	12.44	339.9	249.29	80.8	3.16	12.1
PC4_Zrn-03	433.4	359.7	0.83	1.20	0.06487	0.00566	0.11280	0.01295	0.01237	0.00057	0.00486	0.00048	0.502	79.2	3.63	108.3	11.69	718.4	180.93	79.2	3.63	26.8
PC4_Zrn-04	657.2	314.6	0.48	2.09	0.05592	0.00893	0.09462	0.01442	0.01227	0.00054	0.00479	0.00065	-0.415	78.6	3.46	91.5	13.36	274.0	391.23	78.6	3.46	14.1
PC4_Zrn-05	1024.9	826.4	0.81	1.24	0.06875	0.00900	0.11639	0.01487	0.01221	0.00073	0.00442	0.00048	-0.051	78.2	4.68	111.7	13.46	854.6	261.76	78.2	4.68	30.0
PC4_Zrn-06	458.2	221.9	0.48	2.07	0.04776	0.00474	0.08694	0.01004	0.01275	0.00041	0.00415	0.00038	-0.048	81.7	2.61	84.3	9.34	-80.5	272.59	81.7	2.61	3.1
PC4_Zrn-07	289.4	123.2	0.43	2.35	0.05166	0.00573	0.09064	0.01069	0.01282	0.00048	0.00467	0.00051	0.159	82.1	3.04	87.7	9.88	50.4	264.50	82.1	3.04	6.4
PC4_Zrn-08	915.3	343.0	0.37	2.67	0.04950	0.00434	0.08547	0.00848	0.01239	0.00036	0.00408	0.00037	-0.236	79.4	2.28	83.1	7.92	68.2	214.58	79.4	2.28	4.5
PC4_Zrn-09	1214.9	714.9	0.59	1.70	0.04743	0.00304	0.08265	0.00730	0.01244	0.00033	0.00400	0.00032	0.300	79.7	2.11	80.5	6.84	41.4	143.22	79.7	2.11	1.0
PC4_Zrn-10	634.6	306.3	0.48	2.07	0.04891	0.00395	0.08324	0.00787	0.01233	0.00033	0.00423	0.00039	-0.275	79.0	2.07	81.0	7.37	23.4	210.44	79.0	2.07	2.5
PC4_Zrn-11	437.1	358.8	0.82	1.22	0.05879	0.00703	0.10013	0.01215	0.01310	0.00061	0.00416	0.00043	0.141	83.9	3.90	96.5	11.17	386.5	278.44	83.9	3.90	13.1
PC4_Zrn-12	1018.2	661.7	0.65	1.54	0.04845	0.00411	0.08232	0.00855	0.01240	0.00047	0.00455	0.00045	0.216	79.4	3.00	80.3	7.99	84.9	195.10	79.4	3.00	1.1
PC4_Zrn-13	444.9	314.6	0.71	1.41	0.04950	0.00512	0.08532	0.00990	0.01263	0.00039	0.00418	0.00036	-0.003	80.9	2.50	82.8	9.22	21.8	242.07	80.9	2.50	2.3
PC4_Zrn-14	1008.9	637.1	0.63	1.58	0.04918	0.00453	0.08337	0.00843	0.01225	0.00037	0.00351	0.00035	-0.173	78.5	2.37	81.2	7.89	91.2	208.02	78.5	2.37	3.4
PC4_Zrn-15	1686.7	1429.0	0.85	1.18	0.04875	0.00303	0.08462	0.00724	0.01240	0.00028	0.00386	0.00029	0.162	79.4	1.79	82.4	6.81	113.7	141.97	79.4	1.79	3.6
PC4_Zrn-16	784.4	472.1	0.60	1.66	0.04966	0.00474	0.08861	0.00905	0.01277	0.00041	0.00414	0.00041	-0.200	81.8	2.62	86.0	8.43	110.3	192.85	81.8	2.62	4.9
PC4_Zrn-17	876.3	537.8	0.61	1.63	0.04726	0.00348	0.08717	0.00797	0.01302	0.00038	0.00383	0.00034	0.043	83.4	2.39	84.7	7.43	-22.0	184.23	83.4	2.39	1.6
PC4_Zrn-18	733.7	352.1	0.48	2.08	0.05010	0.00689	0.09559	0.01508	0.01341	0.00048	0.00467	0.00059	0.315	85.8	3.06	92.4	13.88	76.7	358.98	85.8	3.06	7.1
PC4_Zrn-19	1375.9	1095.3	0.80	1.26	0.04806	0.00457	0.09071	0.00966	0.01331	0.00038	0.00460	0.00041	-0.090	85.2	2.40	88.0	8.97	29.9	220.09	85.2	2.40	3.2
PC4_Zrn-20	2344.4	3252.3	1.39	0.72	0.04937	0.00375	0.08472	0.00761	0.01214	0.00035	0.00382	0.00029	-0.228	77.8	2.20	82.5	7.09	136.9	165.31	77.8	2.20	5.8
PC4_Zrn-21	472.3	177.9	0.38	2.66	0.05042	0.00552	0.08559	0.01081	0.01266	0.00042	0.00441	0.00044	0.148	81.1	2.65	82.9	10.10	69.8	277.26	81.1	2.65	2.3
PC4_Zrn-23	1337.5	878.1	0.66	1.52	0.04964	0.00291	0.08452	0.00738	0.01263	0.00040	0.00431	0.00035	0.498	80.9	2.52	82.3	6.89	139.3	134.36	80.9	2.52	1.6
PC4_Zrn-24	264.7	83.3	0.31	3.18	0.05471	0.00797	0.09367	0.01418	0.01271	0.00049	0.00482	0.00087	0.021	81.4	3.15	90.3	13.08	190.4	339.16	81.4	3.15	9.9
PC4_Zrn-25	182.6	88.2	0.48	2.07	0.04706	0.01134	0.08419	0.02141	0.01305	0.00070	0.00563	0.00091	0.345	83.5	4.44	80.6	19.81	-152.5	551.89	83.5	4.44	-3.6
PC4_Zrn-26	754.8	439.8	0.58	1.72	0.04691	0.00363	0.08029	0.00775	0.01249	0.00035	0.00405	0.00033	0.100	80.0	2.23	78.3	7.27	-8.8	174.49	80.0	2.23	-2.2
PC4_Zrn-27	372.0	184.0	0.49	2.02	0.05060	0.00736	0.08723	0.01319	0.01249	0.00044	0.00416	0.00046	-0.004	80.0	2.83	84.4	12.31	113.6	308.39	80.0	2.83	5.2
PC4_Zrn-28	1261.9	1365.2	1.08	0.92	0.04813	0.00256	0.08291	0.00651	0.01235	0.00027	0.00391	0.00029	0.019	79.1	1.73	80.8	6.09	96.3	130.23	79.1	1.73	2.1
PC4_Zrn-29	526.4	243.8	0.46	2.16	0.04593	0.00453	0.08181	0.00956	0.01272	0.00037	0.00384	0.00033	0.268	81.5	2.38	79.6	9.02	-67.6	252.80	81.5	2.38	-2.4
PC4_Zrn-30	555.9	311.2	0.56	1.79	0.05086	0.00448	0.09063	0.00928	0.01292	0.00037	0.00434	0.00038	0.043	82.7	2.35	87.9	8.63	138.1	216.94	82.7	2.35	5.9

Tabla 5. Datos de LA-ICP-MS de U-Th-Pb en circones de la muestra PC12

Analysis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U/Th	Corrected isotopic ratios								Rho	Corrected ages (Ma)						Best ages (Ma)	±2σ	Disc %
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³² Th	±2σ abs		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
PC12_Zr02	48.8	30.7	0.63	1.59	0.05587	0.02308	0.10298	0.04044	0.01366	0.00104	0.00549	0.00120	-0.068	87.4	6.63	90.9	36.36	439.7	746.14	87.4	6.63	3.8
PC12_Zr03	511.4	276.5	0.54	1.85	0.05361	0.00703	0.08905	0.01190	0.01220	0.00044	0.00433	0.00032	-0.178	78.1	2.79	86.3	10.97	161.9	284.16	78.1	2.79	9.4
PC12_Zr04	609.6	459.0	0.75	1.33	0.05152	0.00564	0.08889	0.01022	0.01263	0.00043	0.00427	0.00039	-0.198	80.9	2.74	86.3	9.51	224.5	226.06	80.9	2.74	6.3
PC12_Zr05	646.6	267.9	0.41	2.41	0.04958	0.00642	0.08410	0.01216	0.01203	0.00051	0.00424	0.00037	0.373	77.1	3.22	81.7	11.40	23.7	333.13	77.1	3.22	5.7
PC12_Zr06	586.7	575.8	0.98	1.02	0.06327	0.00586	0.10426	0.01103	0.01204	0.00040	0.00463	0.00037	-0.025	77.1	2.52	100.4	10.12	606.6	213.76	77.1	2.52	23.2
PC12_Zr08a	431.3	231.4	0.54	1.86	0.06040	0.00924	0.10366	0.01577	0.01258	0.00040	0.00420	0.00052	-0.165	80.6	2.55	99.7	14.45	423.6	357.42	80.6	2.55	19.1
PC12_Zr09	279.9	126.4	0.45	2.21	0.06246	0.01071	0.10454	0.01914	0.01225	0.00056	0.00546	0.00079	0.142	78.5	3.58	100.3	17.52	401.5	467.74	78.5	3.58	21.7
PC12_Zr10	262.8	122.0	0.46	2.15	0.05413	0.00682	0.09747	0.01389	0.01320	0.00056	0.00524	0.00068	0.200	84.5	3.58	93.8	12.83	230.6	360.76	84.5	3.58	9.9
PC12_Zr11	1239.5	527.9	0.43	2.35	0.06463	0.00664	0.11576	0.01293	0.01317	0.00054	0.00618	0.00040	0.053	84.3	3.45	111.1	11.82	705.7	227.28	84.3	3.45	24.1
PC12_Zr12	337.0	222.8	0.66	1.51	0.06107	0.00815	0.09766	0.01360	0.01172	0.00039	0.00449	0.00038	-0.020	75.1	2.47	94.1	12.68	417.6	387.58	75.1	2.47	20.2
PC12_Zr13	258.4	119.1	0.46	2.17	0.06173	0.01259	0.11011	0.02322	0.01308	0.00057	0.00580	0.00085	0.084	83.8	3.61	104.9	20.97	485.8	384.37	83.8	3.61	20.1
PC12_Zr14	366.2	287.2	0.78	1.28	0.05257	0.00728	0.08864	0.01340	0.01238	0.00041	0.00389	0.00027	-0.010	79.3	2.61	85.7	12.56	285.4	287.39	79.3	2.61	7.4
PC12_Zr15	302.7	149.1	0.49	2.03	0.06497	0.00821	0.11584	0.01632	0.01306	0.00050	0.00528	0.00053	0.198	83.7	3.17	110.7	14.71	622.8	287.67	83.7	3.17	24.5
PC12_Zr16	1249.6	300.9	0.24	4.15	0.05236	0.00548	0.08702	0.01098	0.01215	0.00043	0.00432	0.00059	0.331	77.9	2.72	84.6	10.24	237.7	264.60	77.9	2.72	7.9
PC12_Zr17	1870.4	591.0	0.32	3.16	0.05130	0.00452	0.08342	0.00847	0.01195	0.00029	0.00404	0.00024	-0.214	76.6	1.85	81.3	7.96	250.3	184.81	76.6	1.85	5.8
PC12_Zr18	315.8	148.9	0.47	2.12	0.05771	0.00833	0.09390	0.01262	0.01227	0.00074	0.00477	0.00064	-0.275	78.6	4.71	90.8	11.69	321.8	356.38	78.6	4.71	13.5
PC12_Zr19	542.7	256.5	0.47	2.12	0.04998	0.00566	0.08339	0.01024	0.01232	0.00043	0.00433	0.00046	-0.057	78.9	2.73	81.1	9.65	142.6	265.85	78.9	2.73	2.7
PC12_Zr20	215.4	79.7	0.37	2.70	0.04930	0.01802	0.08778	0.03194	0.01302	0.00071	0.00435	0.00063	0.178	83.4	4.49	83.8	30.24	608.4	529.65	83.4	4.49	0.5
PC12_Zr21a	183.4	65.4	0.36	2.81	0.05757	0.01240	0.09279	0.01859	0.01229	0.00062	0.00447	0.00075	-0.147	78.7	3.95	88.6	17.08	-22.0	516.18	78.7	3.95	11.2
PC12_Zr22a	393.2	129.4	0.33	3.04	0.05374	0.00984	0.09491	0.01876	0.01281	0.00040	0.00388	0.00056	0.305	82.1	2.56	91.2	17.24	147.6	416.13	82.1	2.56	10.0
PC12_Zr22b	476.4	202.8	0.43	2.35	0.04941	0.00592	0.08183	0.01064	0.01222	0.00033	0.00424	0.00040	-0.017	78.3	2.12	79.4	10.01	-8.8	300.74	78.3	2.12	1.4
PC12_Zr23	430.6	152.4	0.35	2.82	0.05588	0.00928	0.09391	0.01874	0.01217	0.00076	0.00495	0.00064	0.443	78.0	4.86	90.7	17.34	481.2	251.21	78.0	4.86	14.0
PC12_Zr24	429.5	179.3	0.42	2.40	0.06338	0.01657	0.10485	0.02637	0.01221	0.00068	0.00491	0.00058	-0.094	78.2	4.30	100.4	24.19	358.4	692.12	78.2	4.30	22.1
PC12_Zr25	779.1	251.0	0.32	3.10	0.05879	0.00508	0.09949	0.01074	0.01222	0.00035	0.00489	0.00060	0.388	78.3	2.26	96.2	9.95	506.9	204.17	78.3	2.26	18.5
PC12_Zr26	196.3	63.8	0.33	3.08	0.06931	0.01132	0.11401	0.01867	0.01222	0.00050	0.00561	0.00086	-0.146	78.3	3.19	108.5	16.90	695.5	352.81	78.3	3.19	27.8
PC12_Zr27	442.0	222.5	0.50	1.99	0.04785	0.00585	0.08296	0.01089	0.01261	0.00037	0.00450	0.00031	-0.088	80.8	2.34	80.5	10.18	-118.6	346.03	80.8	2.34	-0.3

Tabla 6. Datos de LA-ICP-MS de U-Th-Pb en circones de la muestra SF1

Analysis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U/Th	Corrected isotopic ratios								Rho	Corrected ages (Ma)						Best ages (Ma)	±2σ	Disc %
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2σ abs		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁹ Pb	±2σ			
SF1_Zr01	530.4	409.5	0.77	1.30	0.05232	0.00660	0.09648	0.01288	0.01349	0.00052	0.00414	0.00031	-0.239	86.4	3.32	93.2	11.96	77.5	408.92	86.4	3.32	7.3
SF1_Zr02	431.1	367.4	0.85	1.17	0.05357	0.00680	0.10477	0.01494	0.01412	0.00061	0.00471	0.00045	0.268	90.4	3.87	100.8	13.68	233.4	300.42	90.4	3.87	10.4
SF1_Zr03	651.8	693.6	1.06	0.94	0.05156	0.00535	0.09169	0.01047	0.01293	0.00036	0.00397	0.00025	-0.139	82.8	2.30	88.8	9.71	126.6	267.56	82.8	2.30	6.8
SF1_Zr04	505.4	428.9	0.85	1.18	0.05323	0.00687	0.09907	0.01372	0.01346	0.00040	0.00409	0.00031	-0.001	86.2	2.55	95.6	12.63	202.3	307.79	86.2	2.55	9.9
SF1_Zr05b	182.2	100.0	0.55	1.82	0.06747	0.01157	0.12064	0.02246	0.01304	0.00069	0.00544	0.00078	0.201	83.5	4.38	114.3	20.17	439.0	468.46	83.5	4.38	26.9
SF1_Zr06	990.2	635.6	0.64	1.56	0.05055	0.00412	0.09375	0.00924	0.01355	0.00034	0.00444	0.00029	-0.015	86.8	2.19	90.9	8.60	146.5	216.00	86.8	2.19	4.5
SF1_Zr07	322.7	212.3	0.66	1.52	0.04993	0.01123	0.09358	0.02083	0.01376	0.00074	0.00421	0.00051	-0.068	88.1	4.69	90.3	19.35	-174.3	651.20	88.1	4.69	2.4
SF1_Zr08a	291.7	246.7	0.85	1.18	0.06538	0.00884	0.11647	0.01739	0.01294	0.00053	0.00380	0.00041	0.239	82.9	3.37	110.9	15.81	581.2	326.10	82.9	3.37	25.3
SF1_Zr08b	355.7	261.3	0.73	1.36	0.05508	0.00725	0.10073	0.01431	0.01345	0.00042	0.00480	0.00062	-0.075	86.1	2.66	96.8	13.16	74.0	394.20	86.1	2.66	11.0
SF1_Zr09	1472.0	1027.5	0.70	1.43	0.04700	0.00298	0.09039	0.00799	0.01378	0.00030	0.00434	0.00017	0.181	88.2	1.89	87.7	7.43	7.8	167.50	88.2	1.89	-0.6
SF1_Zr10a	179.2	112.7	0.63	1.59	0.05032	0.01055	0.08850	0.01588	0.01379	0.00081	0.00488	0.00051	0.003	88.3	5.14	85.4	14.70	-174.8	490.66	88.3	5.14	-3.3
SF1_Zr10b	218.4	121.5	0.56	1.80	0.06198	0.01208	0.11795	0.02552	0.01369	0.00071	0.00446	0.00077	0.355	87.6	4.51	112.3	23.26	608.1	417.41	87.6	4.51	22.0
SF1_Zr11	340.4	205.3	0.60	1.66	0.04955	0.00654	0.09202	0.01286	0.01372	0.00039	0.00486	0.00037	0.054	87.8	2.47	90.8	12.81	-141.6	345.43	87.8	2.47	3.2
SF1_Zr12	550.9	452.4	0.82	1.22	0.05527	0.00518	0.10282	0.01148	0.01335	0.00038	0.00475	0.00033	0.118	85.5	2.41	99.0	10.49	303.7	217.86	85.5	2.41	13.7
SF1_Zr13	409.3	222.9	0.54	1.84	0.04868	0.00542	0.09226	0.01124	0.01369	0.00039	0.00486	0.00033	-0.053	87.6	2.50	89.1	10.45	41.5	270.66	87.6	2.50	1.6
SF1_Zr14	1483.6	511.0	0.34	2.90	0.04887	0.00376	0.08884	0.00823	0.01311	0.00028	0.00463	0.00031	-0.149	84.0	1.79	86.3	7.69	79.8	194.02	84.0	1.79	2.8
SF1_Zr15	639.6	551.0	0.86	1.16	0.05416	0.00722	0.10004	0.01380	0.01330	0.00057	0.00430	0.00043	-0.089	85.2	3.60	96.5	12.74	245.2	343.19	85.2	3.60	11.8
SF1_Zr16	696.2	544.8	0.78	1.28	0.05251	0.00595	0.10042	0.01316	0.01354	0.00036	0.00441	0.00035	0.272	86.7	2.30	96.8	12.02	203.3	246.09	86.7	2.30	10.5
SF1_Zr17	594.3	576.5	0.97	1.03	0.05926	0.00643	0.10603	0.01288	0.01279	0.00050	0.00433	0.00033	0.023	81.9	3.18	102.1	11.85	488.3	283.58	81.9	3.18	19.8
SF1_Zr22	607.9	276.8	0.46	2.20	0.04927	0.00504	0.09369	0.01097	0.01373	0.00038	0.00455	0.00037	0.023	87.9	2.44	90.6	10.18	82.2	231.42	87.9	2.44	3.0
SF1_Zr23	294.7	223.0	0.76	1.32	0.05151	0.00870	0.09338	0.01721	0.01308	0.00052	0.00403	0.00054	0.133	83.7	3.33	90.2	16.03	210.1	383.76	83.7	3.33	7.1
SF1_Zr24b	411.2	214.0	0.52	1.92	0.05197	0.00587	0.09593	0.01201	0.01345	0.00038	0.00427	0.00036	-0.002	86.1	2.41	92.5	11.14	154.1	259.35	86.1	2.41	6.9
SF1_Zr25	374.6	376.3	1.00	1.00	0.05517	0.01099	0.09199	0.01696	0.01252	0.00052	0.00397	0.00038	-0.523	80.2	3.33	88.7	15.64	183.5	440.39	80.2	3.33	9.6
SF1_Zr26	2117.8	818.2	0.39	2.59	0.05024	0.00319	0.09183	0.00798	0.01334	0.00032	0.00419	0.00023	0.197	85.4	2.01	89.2	7.39	185.8	145.21	85.4	2.01	4.2

Tabla 7. Elementos traza (ppm) en circones de la muestra Pr5

Muestra	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
Pr5_Zr01	-6340.8	201.9	3.3	1376.8	3.6	5.7	35.1	1.1	8.2	3.8	0.6	18.2	7.1	98.1	40.7	227.4	542.3	118.5	10758.9	13.3	518.8	1077.1
Pr5_Zr02a	-1281.5	205.8	10.3	1346.2	1.6	25.9	76.3	7.9	36.7	11.1	1.1	31.0	9.0	112.2	42.5	212.3	400.6	82.4	10693.0	6.5	260.3	460.8
Pr5_Zr02b	-82.0	205.6	7.9	922.9	2.0	0.5	13.3	0.3	1.4	2.5	0.6	12.9	5.1	69.6	28.2	152.9	349.5	75.4	9947.5	6.4	193.9	475.4
Pr5_Zr04	-31.5	255.2	6.4	1768.1	3.7	0.0	17.9	0.1	1.7	5.3	0.8	26.6	10.1	136.0	55.1	291.9	625.7	133.9	9521.7	9.4	393.8	855.0
Pr5_Zr05	-41.3	210.1	5.2	1074.7	2.2	0.5	18.0	0.2	2.0	2.9	0.6	18.3	6.5	86.5	34.1	174.4	359.3	73.6	10793.8	8.7	370.8	699.0
Pr5_Zr06	-21.9	210.9	9.2	824.9	1.4	0.0	12.8	0.0	0.8	2.5	0.4	13.9	4.8	66.4	26.1	130.5	259.1	54.6	10584.1	4.3	177.0	351.2
Pr5_Zr07	-124.2	206.3	5.2	2010.0	3.9	6.5	31.7	1.7	10.4	5.9	0.4	32.3	11.2	158.8	62.6	316.3	632.9	130.7	12007.3	23.5	863.7	2062.4
Pr5_Zr08	-26.4	200.1	7.0	919.5	1.3	0.4	12.9	0.2	1.0	2.0	0.4	14.2	5.9	74.6	29.0	143.7	293.2	58.8	11111.8	3.8	175.7	341.1
Pr5_Zr09	-85.0	209.8	6.8	1171.3	2.7	1.1	21.7	0.4	2.3	3.8	0.5	18.0	6.8	88.6	35.8	183.7	406.6	85.0	11651.1	10.5	444.5	846.9
Pr5_Zr10	141.3	183.0	5.0	1082.1	3.4	25.6	74.3	7.1	28.9	7.1	0.8	19.0	6.1	78.1	32.3	175.2	386.2	84.4	10882.1	11.7	457.3	924.1
Pr5_Zr11	45.0	192.2	7.6	739.2	1.3	2.7	18.4	1.3	5.6	3.5	0.4	13.7	4.9	61.4	23.5	114.8	226.6	44.4	10046.0	3.7	132.6	240.0
Pr5_Zr12	22.1	274.5	4.5	2172.4	4.6	0.0	25.4	0.1	1.7	4.0	0.9	26.9	11.0	153.5	65.6	350.8	726.5	153.5	8849.8	12.1	522.0	923.1
Pr5_Zr13	27.4	226.2	6.2	1357.5	2.2	2.5	20.3	0.9	6.0	5.1	0.7	25.4	8.8	112.6	43.2	216.0	426.3	86.9	10354.6	6.0	289.7	531.4
Pr5_Zr14	10.2	179.1	5.1	814.4	1.9	0.0	10.8	0.1	0.9	1.8	0.3	11.0	4.0	55.5	23.7	133.5	329.0	75.6	10366.7	7.2	204.9	528.7
Pr5_Zr15	47.0	224.6	6.1	2811.5	2.6	1.6	26.2	0.7	8.0	10.8	1.3	62.2	21.0	257.7	93.0	438.8	769.8	150.0	9756.3	13.0	765.1	1086.8
Pr5_Zr16a	14.8	238.4	10.0	910.2	1.7	0.1	10.9	0.0	1.0	2.0	0.4	14.9	5.4	70.5	27.5	147.2	307.8	65.9	10108.9	3.9	134.0	308.6
Pr5_Zr16b	30.9	227.6	4.4	1177.3	1.2	0.7	14.5	0.2	2.2	3.8	0.5	20.1	7.2	94.2	37.8	183.2	353.1	71.3	10859.8	4.3	217.9	381.7
Pr5_Zr17	22.5	196.2	9.9	812.7	1.6	0.0	12.7	0.0	0.8	2.1	0.2	13.2	4.7	64.7	25.5	125.6	255.2	53.0	11121.6	5.0	188.8	357.7
Pr5_Zr18	38.0	231.1	10.3	1986.0	1.3	0.0	13.0	0.2	2.9	7.1	1.5	43.1	14.2	174.7	63.9	300.4	537.0	107.5	9534.6	6.3	320.5	464.6
Pr5_Zr19a	143.1	218.9	7.5	2431.2	1.8	0.0	18.7	0.3	4.1	8.7	2.1	50.1	16.9	212.1	77.6	372.9	685.3	137.6	9723.5	10.1	553.7	716.3
Pr5_Zr19b	230.2	229.5	11.1	2993.0	2.5	0.0	23.9	0.4	5.7	10.1	2.1	62.4	21.4	261.7	94.4	448.1	837.5	163.7	9798.4	12.9	651.3	760.9
Pr5_Zr20	91.9	172.2	31.6	686.9	2.1	0.8	12.7	0.1	1.2	1.8	0.3	9.4	3.9	57.0	22.4	109.0	232.8	47.5	13569.1	5.3	157.2	433.9
Pr5_Zr21	955.2	204.5	7.9	846.6	2.1	5.8	30.6	2.0	9.7	3.5	0.3	14.4	5.0	64.5	26.4	135.1	275.4	56.6	11808.2	4.9	191.5	397.2
Pr5_Zr22a	282.5	201.8	8.8	1108.9	1.1	0.0	12.1	0.0	1.2	3.1	0.6	20.3	7.2	91.2	34.6	168.5	320.9	64.6	11142.9	3.8	177.8	297.2
Pr5_Zr22b	437.3	203.2	6.2	1183.1	0.9	0.0	12.9	0.1	1.2	3.9	0.7	22.7	7.6	101.1	37.3	184.8	335.5	69.7	11146.5	4.0	193.8	310.0
Pr5_Zr23	617.5	169.1	4.0	924.1	1.0	0.0	7.1	0.1	1.9	3.5	0.6	16.7	5.3	72.1	28.5	147.3	326.2	72.8	10043.6	4.9	175.6	378.5
Pr5_Zr26	200.8	184.1	4.1	1194.7	1.2	0.1	9.8	0.2	2.4	4.5	0.8	22.2	7.4	92.3	36.7	189.3	420.7	87.2	9907.6	6.4	271.2	515.4

Tabla 8. Elementos traza (ppm) en circones de la muestra Pr6

Muestra	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
Pr6_Zm-01	45.2	134.9	7.1	1980.2	2.4	0.1	13.8	0.2	2.9	7.4	1.6	40.9	13.1	173.7	64.3	323.4	606.9	125.4	9786.5	4.5	497.1	564.9
Pr6_Zm-02	-119.2	196.5	6.5	1176.7	2.5	0.1	7.7	0.1	1.0	3.6	0.7	20.4	7.4	95.9	37.3	193.4	358.5	74.5	9422.7	2.9	207.7	335.4
Pr6_Zm-03	-23.5	227.6	7.8	2604.6	5.0	0.1	26.0	0.1	2.3	5.9	1.5	42.9	16.6	215.5	85.7	419.0	788.9	162.9	9176.0	8.1	774.7	692.6
Pr6_Zm-05	1945.5	195.3	7.5	2347.3	2.1	17.8	55.0	6.8	37.5	16.6	3.2	66.0	19.8	228.6	81.9	373.6	606.0	121.9	9006.8	3.9	202.1	221.1
Pr6_Zm-06	821.4	142.3	4.7	6759.4	19.3	0.1	122.7	0.9	14.9	33.6	2.7	176.2	59.2	706.7	258.8	1212.0	2077.0	403.4	7817.1	35.8	6003.4	3095.4
Pr6_Zm-07	384.4	141.9	5.8	1550.7	3.0	0.0	15.7	0.1	1.7	4.0	0.9	26.5	9.8	130.1	50.9	249.6	466.0	95.1	10098.4	5.7	524.6	546.6
Pr6_Zm-08	386.1	227.2	4.3	2287.1	1.5	0.2	7.7	0.4	6.6	12.5	2.8	67.5	20.1	230.6	81.2	366.7	582.8	114.4	8373.2	3.0	244.1	282.6
Pr6_Zm-09	177.2	163.7	2.8	1581.1	4.8	0.2	16.8	0.1	1.2	2.8	0.5	20.8	8.1	115.0	49.2	261.4	567.3	126.5	10721.6	5.7	321.5	567.4
Pr6_Zm-10	514.1	133.4	3.6	1500.6	5.1	0.1	17.0	0.1	1.3	3.7	0.5	22.1	8.8	121.8	48.2	246.5	475.8	97.5	10374.6	7.1	473.4	703.0
Pr6_Zm-11	0.5	182.0	2.7	3147.3	2.9	0.0	13.8	0.4	6.0	12.4	2.0	78.8	25.3	305.8	111.8	506.0	807.4	155.8	8932.9	6.6	579.7	677.0
Pr6_Zm-12	60.0	206.7	8.5	2150.7	1.2	0.1	5.5	0.3	5.4	11.3	2.5	60.5	18.7	213.3	74.2	331.8	538.1	106.2	8325.1	2.4	267.7	316.9
Pr6_Zm-14	253.3	145.6	5.3	1776.5	2.1	0.1	12.4	0.1	2.5	5.4	1.0	31.6	11.4	147.5	58.5	291.6	557.2	116.4	10600.2	4.4	395.5	587.5
Pr6_Zm-15	607.8	147.3	4.3	2261.6	2.6	0.1	19.7	0.2	4.6	8.8	2.1	42.3	14.9	188.8	72.2	357.5	692.7	145.1	9721.1	5.3	657.0	667.2
Pr6_Zm-16	356.6	168.8	5.6	3202.6	2.5	0.1	16.6	0.4	7.0	13.6	3.3	73.4	24.2	293.4	107.7	505.2	867.7	173.9	8696.6	5.1	626.1	613.9
Pr6_Zm-17	664.7	246.9	7.4	2401.0	5.3	0.0	20.3	0.2	2.9	6.5	1.5	47.9	16.8	211.8	81.8	383.7	652.0	131.5	8921.9	8.5	1248.3	922.1
Pr6_Zm-18	258.6	128.8	3.1	3401.3	4.1	0.2	28.6	0.4	6.9	14.9	1.4	77.8	26.4	326.0	120.4	574.1	999.3	193.5	10235.5	10.1	1343.9	1230.4
Pr6_Zm-19	10378.3	241.7	5.7	4376.9	4.8	302.4	802.2	117.5	575.2	141.9	9.5	235.4	53.5	548.8	181.1	780.8	1178.2	226.4	9429.3	10.5	1206.2	1160.0
Pr6_Zm-20	772.0	152.3	10.5	3977.4	16.2	0.6	21.1	0.3	2.8	8.3	0.2	72.3	27.9	379.4	150.4	724.4	1300.8	257.5	11331.3	28.1	2110.9	3836.9
Pr6_Zm-21	50.5	154.0	5.3	1628.0	4.4	0.0	19.3	0.1	1.5	4.5	0.7	28.4	10.3	139.3	54.0	268.2	494.7	102.1	11089.7	6.0	490.4	626.0
Pr6_Zm-22	1049.2	146.4	10.8	1790.1	3.4	5.8	32.9	2.4	15.4	6.8	1.1	29.7	11.0	141.6	58.5	294.0	595.6	126.1	10208.2	11.9	1198.7	1492.8
Pr6_Zm-23	404.7	182.6	2.1	1437.5	3.5	7.0	35.5	2.5	12.1	6.0	0.9	24.7	8.8	116.6	46.7	234.4	454.9	97.1	9760.9	4.5	258.7	422.8
Pr6_Zm-27	77.5	132.0	4.3	1677.9	5.2	0.0	24.1	0.1	1.5	4.8	0.9	29.2	10.1	138.3	54.4	275.4	537.8	112.3	10210.5	9.2	1075.2	894.0
Pr6_Zm-28	630.1	157.8	4.1	2734.2	4.3	0.0	21.0	0.3	4.8	11.5	2.1	62.6	20.7	249.8	93.7	429.5	730.5	145.6	8924.2	8.7	997.0	839.5
Pr6_Zm-29	186.5	195.1	8.1	2106.8	1.5	0.0	6.7	0.2	4.3	9.4	1.9	54.5	17.3	203.2	73.3	329.4	543.8	106.8	8920.8	2.8	250.6	305.2
Pr6_Zm-30	116.0	167.4	4.2	2136.1	1.5	0.0	8.5	0.3	4.6	10.3	1.9	55.4	17.7	210.7	75.0	341.1	549.3	108.6	8863.8	3.3	301.6	352.3

Tabla 9. Elementos traza (ppm) en circones de la muestra PC4

Muestra	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
PC4_Zrn-01	2244.2	93.3	3.5	1327.1	3.2	0.1	8.5	0.1	1.2	2.7	0.4	19.5	7.7	104.2	43.0	221.9	461.4	95.4	9383.4	6.5	194.7	586.1
PC4_Zrn-02	1574.7	140.8	8.2	1107.4	2.8	0.9	10.1	0.4	3.7	4.4	0.7	24.7	8.1	95.9	38.0	184.7	372.6	75.4	9934.5	4.0	117.1	323.3
PC4_Zrn-03	136862.1	283.3	7.5	4053.7	5.0	317.4	872.3	119.1	619.2	163.0	12.2	240.4	48.4	452.0	146.9	612.1	964.6	189.2	7249.3	9.2	359.7	433.4
PC4_Zrn-04	27738.7	139.2	4.9	1744.4	3.0	32.2	97.3	11.5	50.5	14.7	1.9	34.8	11.0	139.9	57.3	290.4	600.0	125.2	8370.4	7.2	314.6	657.2
PC4_Zrn-05	12675.1	339.8	5.9	5230.4	7.6	34.5	142.1	17.2	95.3	53.3	8.6	186.4	57.3	605.2	217.9	935.1	1598.4	280.0	8070.7	14.8	826.4	1024.9
PC4_Zrn-06	771.7	100.0	770.8	2204.9	3.5	0.1	11.4	0.3	4.4	8.7	1.1	50.0	16.3	200.4	75.5	355.4	627.5	121.0	8439.6	5.8	221.9	458.2
PC4_Zrn-07	875.1	291.0	7.2	1424.0	2.3	0.9	7.0	0.4	3.8	4.8	1.3	27.0	9.4	121.0	47.5	228.6	415.1	83.4	6826.9	3.9	123.2	289.4
PC4_Zrn-08	2288.5	84.1	-1.4	1552.0	6.7	0.0	16.2	0.0	1.1	2.9	0.4	22.9	9.0	125.1	51.0	257.9	528.4	108.2	10400.0	10.1	343.0	915.3
PC4_Zrn-09	6468.8	177.6	3.5	3738.3	6.5	2.7	30.1	1.3	9.8	14.2	1.6	75.6	25.9	327.8	126.6	600.4	1090.4	219.4	7859.2	16.1	714.9	1214.9
PC4_Zrn-10	1471.7	114.1	2.2	2107.4	4.5	0.0	13.9	0.1	2.5	6.2	0.6	38.1	13.2	182.9	69.2	364.2	710.2	146.4	11640.7	9.3	306.3	634.6
PC4_Zrn-11	3353.3	238.9	7.4	2572.0	2.7	1.1	14.0	1.1	13.7	18.4	4.4	83.2	24.1	266.1	91.6	407.5	643.8	124.7	6710.8	5.1	358.8	437.1
PC4_Zrn-12	545.5	137.0	0.9	2301.6	7.2	1.3	24.5	0.6	5.0	7.7	0.9	42.7	14.8	192.0	75.1	371.9	703.2	143.2	8822.9	14.3	661.7	1018.2
PC4_Zrn-13	5105.5	311.4	4.8	2770.7	2.2	0.5	10.9	0.7	9.7	17.7	4.1	82.3	24.7	276.9	96.7	433.5	718.4	140.8	6565.5	5.3	314.6	444.9
PC4_Zrn-14	10082.2	95.0	1.6	1325.0	5.6	0.0	13.2	0.1	1.0	3.8	0.3	18.8	7.5	105.5	42.3	217.6	401.8	82.9	8641.4	9.8	637.1	1008.9
PC4_Zrn-15	7887.6	116.1	4.5	2017.1	9.4	0.0	26.7	0.1	2.4	6.2	0.2	39.9	14.5	185.2	69.0	319.2	526.1	100.5	8248.1	16.0	1429.0	1686.7
PC4_Zrn-16	4046.3	69.4	1.6	1691.2	3.8	0.3	12.7	0.2	2.6	4.5	0.3	28.9	10.2	135.6	54.5	272.1	560.9	112.0	9079.9	8.2	472.1	784.4
PC4_Zrn-17	2439.8	72.0	-0.2	1652.4	4.3	0.6	15.3	0.3	2.9	5.3	0.5	28.2	10.4	135.8	53.8	271.3	531.7	110.8	9227.0	9.0	537.8	876.3
PC4_Zrn-18	2333.6	101.4	3.1	1171.1	1.7	0.8	10.0	0.3	2.2	3.7	0.4	20.7	7.8	100.3	39.1	192.5	372.2	76.0	10028.6	6.0	352.1	733.7
PC4_Zrn-19	-1079.0	141.9	4.4	3017.8	6.1	0.5	23.5	0.4	5.6	12.5	1.8	62.0	22.3	270.2	101.3	478.4	870.0	171.9	8177.9	13.9	1095.3	1375.9
PC4_Zrn-20	48406.5	317.9	9.1	5372.9	15.5	122.3	396.7	50.1	244.0	82.0	7.5	204.5	54.4	579.9	195.8	848.3	1323.7	248.6	6115.7	25.2	3252.3	2344.4
PC4_Zrn-21	29111.6	78.6	1.0	1643.5	2.5	79.6	214.6	30.4	144.4	34.1	1.7	56.2	13.7	148.1	54.2	263.2	498.5	101.0	9415.4	6.6	177.9	472.3
PC4_Zrn-23	2736.6	88.0	2.3	2407.3	9.0	0.1	28.4	0.1	2.5	6.2	0.6	38.3	15.1	195.4	77.7	393.6	768.7	156.5	9052.1	18.5	878.1	1337.5
PC4_Zrn-24	-2251.8	71.2	0.7	934.8	2.6	0.0	7.7	0.0	0.7	1.9	0.2	13.5	5.1	72.6	30.4	156.4	322.4	68.1	9434.7	4.1	83.3	264.7
PC4_Zrn-25	1323.6	240.9	9.0	1604.7	1.2	0.0	4.8	0.3	5.5	9.2	2.8	42.9	13.3	153.2	56.0	250.3	431.9	86.0	6781.9	2.5	88.2	182.6
PC4_Zrn-26	542.8	116.0	0.7	3332.3	3.8	0.1	16.9	0.4	6.1	14.3	2.1	73.0	25.3	305.3	112.6	536.7	947.6	185.6	7644.3	10.0	439.8	754.8
PC4_Zrn-27	5359.0	85.1	1.4	1927.7	2.5	9.7	30.2	2.8	16.8	10.1	1.0	39.4	13.3	163.7	62.2	305.2	559.9	115.9	8209.0	5.8	184.0	372.0
PC4_Zrn-28	9509.6	394.2	5.8	5031.7	9.6	19.0	97.5	7.6	52.2	38.2	6.7	153.5	46.2	519.0	181.1	798.6	1266.7	238.9	6498.5	20.0	1365.2	1261.9
PC4_Zrn-29	534.2	114.3	3.1	2095.6	2.9	0.0	9.6	0.1	2.6	6.5	1.0	36.6	13.5	175.0	67.2	338.8	654.1	136.1	8017.0	6.6	243.8	526.4
PC4_Zrn-30	1392.3	216.6	7.2	1615.0	2.9	0.7	13.6	0.4	3.3	5.3	0.7	36.7	11.8	148.4	56.0	252.9	427.9	82.4	7587.2	6.9	311.2	555.9

Tabla 10. Elementos traza (ppm) en circones de la muestra PC12

Muestra	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
PC12_Zr02	-46.8	219.4	10.0	793.0	1.8	0.0	8.8	0.1	0.9	2.5	1.2	15.1	5.2	65.1	24.2	118.7	244.0	52.2	6129.0	0.7	30.7	48.8
PC12_Zr03	-88.3	240.2	4.7	1940.0	3.8	0.2	17.5	0.2	2.6	4.9	0.8	32.0	11.7	156.1	63.0	323.2	652.0	137.6	8321.8	6.6	276.5	511.4
PC12_Zr04	-51.8	293.7	1.5	3275.1	4.3	0.0	15.7	0.4	6.7	15.5	2.4	80.5	26.2	319.0	116.2	524.4	837.1	159.7	7089.7	8.0	459.0	609.6
PC12_Zr05	-50.7	188.4	3.6	1566.2	7.3	0.6	18.3	0.2	1.6	3.4	0.2	19.4	8.8	117.8	49.0	246.8	496.3	103.0	8529.9	10.0	267.9	646.6
PC12_Zr06	-61.4	332.5	3.9	2573.9	5.4	0.0	17.0	0.2	4.1	9.5	1.7	64.7	20.9	248.9	90.6	408.4	648.4	126.9	6730.0	10.5	575.8	586.7
PC12_Zr08a	-49.0	382.7	5.3	2667.3	4.4	0.0	14.2	0.2	3.7	9.0	1.8	51.4	17.6	230.9	88.8	428.8	744.3	149.4	7155.8	5.0	231.4	431.3
PC12_Zr09	-6285.3	255.2	7.1	1470.7	2.0	15.5	43.6	5.6	27.6	8.2	1.2	28.9	10.5	127.6	49.2	243.7	457.1	93.9	8196.8	3.6	126.4	279.9
PC12_Zr10	14.4	241.5	2.0	1303.1	2.8	0.0	10.8	0.1	1.0	3.5	0.6	22.6	7.9	110.2	43.7	219.5	414.5	85.8	7864.6	4.6	122.0	262.8
PC12_Zr11	49.1	302.0	4.1	3119.7	6.2	0.0	22.2	0.1	2.7	8.7	0.9	49.5	19.2	255.7	102.3	518.8	1018.8	204.7	10227.1	13.7	527.9	1239.5
PC12_Zr12	13.2	284.7	7.0	2750.4	3.0	0.0	15.4	0.2	4.9	8.2	2.1	51.1	18.7	241.3	93.4	447.0	794.6	163.2	7437.8	5.1	222.8	337.0
PC12_Zr13	14.9	243.8	1.9	1561.4	1.9	0.0	7.4	0.2	1.6	5.4	0.8	31.8	10.3	137.1	52.9	249.9	463.4	92.0	8005.7	3.7	119.1	258.4
PC12_Zr14	25.8	319.9	5.2	2692.9	3.0	0.0	12.6	0.3	5.8	10.8	2.5	67.3	22.0	266.3	95.5	426.6	692.9	138.0	6700.0	5.5	287.2	366.2
PC12_Zr15	21.6	192.2	1.7	1173.8	2.5	0.4	12.2	0.2	1.2	2.8	0.6	19.3	6.4	91.2	37.3	188.2	410.8	87.4	8860.2	4.1	149.1	302.7
PC12_Zr16	58.4	257.3	2.9	2413.7	8.5	0.0	9.1	0.0	0.3	2.3	0.1	26.2	12.0	174.3	77.6	407.6	887.2	182.4	11654.0	14.6	300.9	1249.6
PC12_Zr17	408.3	230.8	2.9	2843.6	18.0	40.0	141.1	19.8	106.9	37.9	0.7	70.6	20.1	241.8	94.2	465.4	917.1	183.0	11385.8	21.3	591.0	1870.4
PC12_Zr18	23.1	239.8	6.1	1238.3	3.4	0.1	18.4	0.1	1.3	3.4	0.4	23.2	8.5	110.5	41.7	207.1	374.2	73.7	8702.4	4.3	148.9	315.8
PC12_Zr19	90.0	216.1	1.0	2022.6	3.9	0.3	18.4	0.2	2.0	5.5	0.6	33.7	12.3	167.1	66.0	326.6	651.2	134.4	9743.5	6.7	256.5	542.7
PC12_Zr20	-37.9	350.8	8.0	1087.1	2.7	0.0	6.7	0.1	1.5	3.1	0.7	18.5	6.3	92.4	36.7	185.6	349.3	74.8	7374.2	2.4	79.7	215.4
PC12_Zr21a	-72.1	311.9	5.9	1200.9	2.7	3.0	14.8	1.3	6.9	5.1	0.7	21.4	7.5	95.3	40.5	199.8	389.9	82.1	8022.7	2.6	65.4	183.4
PC12_Zr22a	-29.4	213.2	3.0	1170.6	4.8	0.0	14.2	0.0	0.4	1.7	0.2	13.7	5.8	86.0	36.3	195.6	443.2	97.6	10175.1	4.4	129.4	393.2
PC12_Zr22b	-254.9	198.7	2.4	1241.1	4.3	6.5	33.2	2.5	12.2	4.9	0.4	17.7	7.2	97.1	39.2	206.9	428.6	90.0	10243.9	6.3	202.8	476.4
PC12_Zr23	-806.1	199.4	0.7	1238.1	4.4	8.8	42.2	4.6	24.4	7.4	0.3	21.0	7.3	95.4	39.0	207.5	439.2	91.7	10305.6	5.1	152.4	430.6
PC12_Zr24	-2127.3	334.7	10.8	2131.5	5.3	29.8	93.2	11.4	49.5	15.4	1.9	37.3	12.4	170.1	67.5	354.5	744.7	157.5	9179.4	5.5	179.3	429.5
PC12_Zr25	534.6	240.9	3.4	1616.5	5.9	0.9	18.5	0.2	2.0	2.9	0.5	22.1	8.9	121.4	51.2	267.9	571.4	124.5	10479.5	13.8	251.0	779.1
PC12_Zr26	75.3	338.0	5.5	1271.5	2.7	0.0	7.6	0.0	1.0	3.1	0.6	22.0	8.0	104.7	42.3	218.0	422.8	88.8	7704.5	3.0	63.8	196.3
PC12_Zr27	92.4	218.2	6.9	1298.5	2.7	0.0	13.2	0.0	0.9	3.2	0.7	20.4	7.4	100.3	40.7	211.2	445.9	92.7	9233.0	6.7	222.5	442.0

Tabla 11. Elementos traza (ppm) en circones de la muestra SF1

Muestra	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
SF1_Zr01	164.6	260.4	9.2	1836.4	5.8	0.0	23.6	0.1	1.7	4.5	0.9	31.3	11.1	151.8	58.6	287.7	550.7	110.6	10615.1	6.7	409.5	530.4
SF1_Zr02	68.2	279.0	9.1	3460.0	3.3	0.0	15.9	0.8	9.6	18.3	3.2	102.8	30.3	348.4	122.9	533.7	838.1	160.7	7858.7	7.6	367.4	431.1
SF1_Zr03	65.9	360.7	7.8	3291.0	4.6	0.8	23.7	0.8	8.9	15.8	2.9	94.3	29.0	330.8	117.7	520.5	815.8	156.0	8190.0	10.1	693.6	651.8
SF1_Zr04	53.5	396.1	10.4	2916.8	3.2	0.2	11.9	0.4	6.7	13.7	3.8	75.9	23.9	283.1	97.8	437.8	704.6	138.2	7731.8	10.0	428.9	505.4
SF1_Zr05b	23.7	208.3	2.8	1149.4	1.5	0.0	11.7	0.1	2.1	5.0	0.7	24.6	8.2	101.0	38.7	178.9	322.3	66.8	9734.8	2.8	100.0	182.2
SF1_Zr06	114.0	236.1	7.7	2298.6	2.8	2.1	27.4	1.0	7.0	8.4	0.5	46.6	15.0	198.6	74.5	356.4	647.5	124.0	11020.3	12.7	635.6	990.2
SF1_Zr07	87.7	250.4	5.7	1965.1	3.1	0.1	14.7	0.2	4.7	10.0	1.0	48.8	15.5	179.1	66.5	311.8	520.2	98.5	8539.8	4.9	212.3	322.7
SF1_Zr08a	53.9	222.3	6.1	1803.8	2.8	0.0	13.0	0.2	4.9	9.3	1.3	46.5	14.6	173.9	63.2	284.2	490.9	96.7	9451.7	5.1	246.7	291.7
SF1_Zr08b	68.1	248.6	5.8	2173.0	1.6	0.0	15.9	0.4	6.6	13.5	1.9	57.7	17.8	211.1	74.0	343.2	598.4	119.4	9175.0	5.6	261.3	355.7
SF1_Zr09	-4709.2	309.8	6.5	3012.0	13.4	3.6	53.2	1.6	8.2	8.3	0.9	54.9	20.8	266.6	102.6	488.1	870.6	173.8	10069.9	22.1	1027.5	1472.0
SF1_Zr10a	-351.0	264.7	5.4	1427.4	1.4	0.0	8.8	0.2	3.9	8.1	1.1	32.8	11.1	127.2	49.2	222.0	378.0	81.6	8737.0	3.3	112.7	179.2
SF1_Zr10b	-143.6	263.7	2.3	1211.3	1.2	0.0	8.9	0.1	2.6	4.6	1.1	26.4	9.9	115.7	43.4	202.8	356.5	72.2	8910.1	3.0	121.5	218.4
SF1_Zr11	-260.8	222.2	3.8	1364.4	2.5	1.2	16.8	0.5	4.2	5.0	0.7	29.4	9.1	121.2	46.3	217.1	406.8	83.1	9983.8	5.1	205.3	340.4
SF1_Zr12	-1315.2	286.1	3.2	4015.5	4.4	32.2	117.9	14.0	67.3	36.8	3.8	127.8	37.7	417.3	145.5	616.5	951.4	185.2	8753.0	10.0	452.4	550.9
SF1_Zr13	-169.0	225.8	3.9	2009.8	2.6	0.0	13.2	0.2	3.1	7.8	0.9	44.3	15.5	186.8	69.3	317.9	530.9	105.2	9287.0	5.9	222.9	409.3
SF1_Zr14	-2082.5	207.5	2.4	2566.3	7.3	26.2	91.2	13.7	70.6	25.1	0.5	58.1	17.9	212.7	83.9	418.2	802.0	166.8	13398.9	18.0	511.0	1483.6
SF1_Zr15	-429.9	315.9	4.1	4543.9	4.8	1.6	28.3	1.3	14.8	26.0	4.5	131.5	41.3	451.2	159.2	692.7	1055.1	205.0	8283.7	9.0	551.0	639.6
SF1_Zr16	-3496.9	277.6	2.5	3470.2	3.3	24.8	87.7	8.5	49.4	27.4	3.9	95.4	28.4	332.8	119.0	538.8	911.4	180.9	8526.5	15.1	544.8	696.2
SF1_Zr17	-618.7	324.0	6.1	4421.3	4.5	0.1	28.7	0.8	15.4	27.2	5.4	140.3	42.4	464.6	159.3	675.9	1023.8	200.5	7842.6	9.2	576.5	594.3
SF1_Zr22	136.5	215.3	3.5	2117.4	3.8	0.0	10.8	0.1	3.5	7.1	0.9	43.7	15.3	190.6	72.6	347.8	594.7	120.6	10651.6	8.4	276.8	607.9
SF1_Zr23	103.1	234.8	3.7	2352.2	3.7	0.0	16.5	0.4	6.3	15.1	1.8	65.1	19.9	223.4	81.6	364.3	598.9	117.1	8783.6	5.8	223.0	294.7
SF1_Zr24b	188.8	239.3	1.9	1931.1	2.2	0.1	12.6	0.2	3.1	6.5	1.0	39.5	13.9	171.2	64.7	306.1	548.6	112.7	8936.9	6.5	214.0	411.2
SF1_Zr25	432.6	299.1	6.9	5758.7	3.5	0.1	37.6	0.8	13.2	25.1	6.9	134.3	42.7	508.7	188.9	859.7	1600.6	324.5	8649.9	6.6	376.3	374.6
SF1_Zr26	235.4	234.3	3.3	3472.3	27.7	0.0	19.1	0.2	2.1	6.9	0.3	48.0	21.1	291.0	115.4	575.3	998.7	201.4	13522.3	32.3	818.2	2117.8

15. ANEXO III
Actividades de retribución social

Participación en la XXXV Convención Internacional de Minería México 2023

DESCRIPCIÓN PETROLÓGICA, GEOQUÍMICA Y GEOESPACIAL DE LOS ENJAMBRES DE DIQUES DEL CORREDOR LINARES-BURGOS, NE DE MÉXICO.

Yadira Zulema Antonio Durán^{*1}, Juan Alonso Ramírez Fernández*, Jorge Alán Salinas Jasso*,
Juan Carlos Montalvo Arrieta*.

*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L.

¹yadira.antoniodu@uanl.edu.mx

Resumen

En la presente contribución se describe el complejo geológico-estructural Corredor Linares Burgos (CLB), ubicado en el límite de los estados de Nuevo León y Tamaulipas (México), el cual también limita a la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) y la Cuenca de Burgos, en la provincia fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México (PCGM).

A través de un análisis geoespacial en el CLB se distinguieron lineamientos de diques, fracturas, fallas y cuellos volcánicos, todos los anteriores orientados con una tendencia NE-SW.

Con base en las relaciones de campo, geoespaciales, petrografía y geoquímica se describieron dos enjambres de diques aplíticos emplazados en las Formaciones San Felipe (Santoniano-Campaniano) y Méndez (Campaniano-Maastrichtiano) en las localidades Presa Cerro Prieto y Purísima de Conchos, del CLB.

Las aplitas presentan valores de SiO₂ desde 55.9% hasta 74.7% en peso y su composición corresponde a una riolita-dacita (subalcalina). Las aplitas tienen una afinidad geoquímica a la de un arco volcánico.

Además de los análisis anteriormente mencionados, se realizó una comparación de la geoquímica de sienitas cenozoicas de la SSCC y tobas del Cretácico Tardío de la Formación San Felipe, con el objetivo de encontrar una correlación con los diques aplíticos. En esta comparación, las aplitas presentan una más clara afinidad geoquímica con las tobas que con las sienitas.

Esta contribución presenta los primeros resultados de las investigaciones realizadas en el CLB, que no había sido descrito con anterioridad.

Summary

This contribution describes the Linares-Burgos Alignment (LBA), a geological-structural complex located on the border of the states of Nuevo León and Tamaulipas (Mexico), which is also the border of the Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC) and the Burgos Basin, in the Gulf of Mexico Coastal Plain (GMCP) physiographic province.

Through a geospatial analysis in the LBA, lineaments of dikes, fractures, faults and volcanic necks were distinguished, all of the above oriented with a NE-SW trend.

Based on field, geospatial, petrographic and geochemical relationships, two aplitic dike swarms were described, emplaced in the San Felipe (Santonian-Campanian) and Méndez (Campanian-Maastrichtian) Formations in the Cerro Prieto Dam and Purísima de Conchos localities, within the LBA.

The aplites present SiO₂ values from 55.9% to 74.7 wt% and its composition corresponds to a rhyolite-dacite (subalkaline). Aplites have a volcanic arc geochemical affinity.

In addition to the previously mentioned analyses, the aplites were compared to the Cenozoic syenites from the SSCC and the Late Cretaceous tuffs from the San Felipe Formation, looking for petrogenetic relationships. In this comparison, the aplites are related with the tuffs, rather than with the syenites.

This contribution presents the first results of the LBA analysis, which are not yet described.







La AIMMGM otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a: Yadira Zulema Antonio Durán, Juan Alonso Ramírez
 Fernández, Jorge Alán Salinas Jasso y Juan Carlos
 Montalvo Arrieta

Por su participación con el Trabajo Técnico:

Descripción petrológica, geoquímica y geoespacial de los enjambres de
 diques del Corredor Linares-Burgos, NE de México

Presentado en el marco de la XXXV Convención Internacional de Minería.




 Ing. Luis Humberto Vázquez San Miguel
 Presidente del CDN de la AIMMGM


 Ing. Jesús Ricardo Moreno Trousselle
 Coordinador General de la XXXV
 Convención Internacional de Minería

Acapulco Guerrero, México 23 AL 27 DE OCTUBRE 2023



La AIMMCM otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a: **Yadira Zulema Antonio Durán**

Por la presentación de la Conferencia

Descripción petrológica, geoquímica y geoespacial de los enjambres de diques del Corredor Linares-Burgos, NE de México



Impartida en el marco de la XXXV Convención Internacional de Minería.


Ing. Luis Humberto Vázquez San Miguel
Presidente del CDN de la AIMMCM


Ing. Jesús Ricardo Moreno Trousselle
Coordinador General de la XXXV Convención Internacional de Minería

Acapulco Guerrero, México **23 AL 27 DE OCTUBRE 2023**

Conferencia para Geolatinas A. C.

El Comité de Educación y Divulgación de GeoLatinas invita a:



GeoSeminarios

Edición especial con la
Facultad Ciencias de la Tierra de la
Universidad Autónoma de Nuevo León, México



Proyecto doctoral: Estudio teórico y experimental de surfactantes iónicos como método de recuperación mejorada de aceite en la Formación Chicontepec

MC. Ana Teresa Finol González

Profesora en la Facultad de Ciencias de la Tierra de la UANL

Manejo y procedimientos experimentales relacionados a Geoquímica

Ing. Ana María Garza Castillo

Profesora encargada del Lab. de Geoquímica de la FCT de la UANL



Proyecto de maestría: Análisis petrológico y geoespacial del enjambre de diques Linares del Corredor Linares - Burgos, NE de México

Ing. Yadira Zulema Antonio Durán

Estudiante de maestría en FCT de la UANL, creadora del proyecto "La Geólaca"

Miércoles, 22 de Noviembre de 2023

10:00 am (México)



GeoLatinas



GeoLatinasFace



geolatinasinsta



@GeoLatinas

GeoSeminarios

de Geolatinas

OTORGA EL PRESENTE RECONOCIMIENTO A YADIRA ZULEMA ANTONIO DURÁN

POR HABER PARTICIPADO COMO PONENTE CON EL TEMA
ANÁLISIS PETROLÓGICO Y GEOESPACIAL
DEL ENJAMBRE DE DIQUES LINARES DEL CORREDOR
LINARES - BURGOS, NE DE MÉXICO

LLEVADO A CABO EL DÍA 22 DE NOVIEMBRE DE 2023
COMO PARTE DE LA INICIATIVA DE EDUCACIÓN Y DIVULGACIÓN


LISBETT SUSANA MATERANO
CO-LIDER DE GEOSMINARIOS,
EMBAJADORA DE MÉXICO


CLARA RODRÍGUEZ RONDÓN
CO-FUNDADORA DE GEOLATINAS,
CO-LIDER DE SEMINARIOS


M. CRISTINA ARRIETA MARTÍNEZ
CO-LIDER DE GEOSMINARIOS,
EMBAJADORA DE MÉXICO


N. LINNETH GONZÁLEZ CUEVAS
CO-LIDER DE GEOSMINARIOS


VANIA AMARO REDONDA
CO-LIDER DE GEOSMINARIOS,
EMBAJADORA DE MÉXICO



Conferencia para la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

CONFERENCIA



"ANÁLISIS DE CUERPOS SUBVOLCÁNICOS: ¿CÓMO SE ESTUDIAN LOS DIQUES MAGMÁTICOS?"



ING. YADIRA ANTONIO DURÁN



Egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Ha impartido charlas de divulgación geológica en diversas instituciones en Latinoamérica, incluyendo la UNAM y UNI. Recibió menciones honoríficas, como la Distinción Talentos Universitarios UANL (2020 y 2021) y el Premio Nacional a la mejor egresada de Ingeniería Geológica (ANFEI, 2021). Experiencia en la exploración geológica, estratigrafía, petrología, y SIG. Actualmente, estudia Maestría en Ciencias Geológicas (UANL) con enfoque en geodinámica y forma parte del Space4Women Mentorship Program de la UNESCO, además de ser la creadora de La Geóloca.

MODALIDAD



VIRTUAL



**29 de
noviembre**




SGP Student Chapter UNI



@SgpUni

SPONSOR SGP SC UNI:
Sampling OK S.A.C.



Conferencia para la Universidad Nacional de Piura.



SGP STUDENT CHAPTER
Universidad Nacional de Piura

1ER CICLO DE PONENCIAS

15 MAYO, 2024 **05.00 PM**
(HORA PERUANA)

TEMA
GEOLOGÍA DEL CORREDOR LINARES-BURGOS, NE DE MÉXICO.

PONENTE

Yadira Zulema Antonio Durán, ingeniera geóloga originaria de Monterrey, N.L., se graduó de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Ha impartido charlas de divulgación geológica en diversas instituciones y empresas en México y América Latina, incluyendo el Instituto Montessori, la UNAM, la Universidad Nacional de Ingeniería en Perú, entre otros. Ha sido reconocida con menciones honoríficas y premios, incluyendo el Premio Nacional a la mejor egresada de Ingeniería Geológica otorgado por ANFEI en 2021. En su carrera, se ha especializado en exploración geológica de campo, estratigrafía, petrología y sistemas de información geográfica, con un enfoque en la petrología, geoquímica, geofísica y análisis geoespacial de cuerpos subvolcánicos. En 2023, fue reconocida en el Senado de la República Mexicana por su labor como divulgadora científica. Actualmente, está cursando la Maestría en Ciencias Geológicas en la UANL, forma parte del Space4Women Mentorship Program de la UNESCO y es creadora de La Geólca, un proyecto de divulgación de las Geociencias en redes sociales.

ING. YADIRA ZULEMA ANTONIO DURÁN

SGP Student Chapter - UNP @sgp_unp @sgp_unp SGP Student Chapter UNP SGP Student Chapter UNP

