



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA  
AMBIENTAL

**TESIS**

**GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA DE  
UNA SUCESIÓN MARINA DEL CRETÁCICO  
SUPERIOR EN POTRERO EL LLANO, ALDAMA,  
CHIHUAHUA**

Para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo Ambiental**

**PRESENTA**

Brandon Alain Gómez Cruz

**Director (a)**

Dr. Kinardo Flores Castro

**Codirector (a)**

Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza

**Comité tutorial**

Dr. Fred Yoan Pérez Corona  
Ing. Dahina Yanileysi López Ángeles

Pachuca de Soto, Hidalgo., noviembre, 2023



Mineral de la Reforma, Hgo., a 13 de noviembre de 2023

Número de control: ICBI-D/1627/2023  
 Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO  
 DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado al Pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Brandon Alain Gómez Cruz**, quien presenta el trabajo de titulación **“Geología estructural y tectónica de una sucesión marina del Cretácico Superior en Potrero El Llano, Aldama, Chihuahua”**, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente** Dr. Fred Yoan Pérez Corona

**Secretario:** Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza

**Vocal:** Dr. Kinardo Flores Castro

**Suplente:** Ing. Dahina Yanileysi López Ángeles

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval  
 Director del ICBI



OAAS/YCC

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca-Tulancingo km-4.5 Colonia  
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
 México, C.P. 42184  
 Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx



Mineral de la Reforma, Hidalgo, 10 de noviembre de 2023

Asunto: **CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD**

### **CERTIFICADO DE DIRECTORES DE TESIS**

Los catedráticos abajo firmantes certificamos que la tesis titulada "**Geología estructural y tectónica de una sucesión marina del Cretácico Superior en Potrero el Llano, Aldama, Chihuahua**" presentada por **Brandon Alain Gómez Cruz**, ha sido realizado por el durante el periodo Julio 2022 a octubre 2023 bajo nuestra dirección; además informamos que este trabajo es original y no forma parte de otra tesis o trabajo previo.



**Dr. Kinardo Flores Castro**

Profesor Investigador Titular C

Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y Materiales

Laboratorio de Geoquímica

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



**Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza**

Profesor Investigador Titular C

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Chihuahua



## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, **Concepción Cruz García** y **Santos Gómez Islas**, quienes me han brindado todo su apoyo a lo largo de este proyecto y durante toda mi vida. Sin su guía y consejo, probablemente no sería la persona que soy hoy, y es por ello que mi primera razón e inspiración para intentar hacer las cosas un poco mejor cada día son ustedes.

A mi hermano **Michell**, quien me ha apoyado de muchas maneras para alcanzar este logro y ha sido en innumerables ocasiones una fuente de consejos y un ejemplo a seguir.

A **Eliza**, que me has acompañado durante este proceso; me has dado la paz, el cariño y apoyo que me ha permitido concluir con este capítulo y apuntar hacia el futuro con motivación y esperanza.

A mis amigos **José** y **Diana**, porque todo este proceso no habría sido igual sin ustedes que fueron parte de los buenos y malos momentos. No fue un camino sin tropiezos, por lo que siempre apreciaré mucho su apoyo y amistad, sin importar el tiempo y la distancia.

### *Agradecimientos especiales*

A **Don Álvaro** y la **Sra. Laura**, por su hospitalidad, sus charlas y en general, por lo buenas personas que han sido no solo conmigo, sino con aquellos a quienes han abierto sus puertas para formar parte de este proyecto, por el cual guardo un cariño especial.

Al **Dr. Alexander Iriondo** del Centro de Geociencias, UNAM, por apoyar este proyecto con el fechamiento isotópico y, sobre todo, por su conocimiento, dirección y tiempo. Ha sido una experiencia enriquecedora y sé que recordaré sus recomendaciones en el futuro. Así mismo, agradezco a **Erick**, **Ramón** y **Rogelio**, porque su ayuda ha sido invaluable en esta parte del proceso, en la que me han permitido participar y aprender de ustedes.

Al **Dr. Francisco Abraham Paz Moreno** del Departamento de Geología, UNISON, por su apoyo con la petrografía incluida en este proyecto, cuya interpretación ha permitido esclarecer el alcance e implicaciones del trabajo.

Al **Dr. Fred Yoan** y la **Ing. Dahina Yanileysi**, por su tiempo para la revisión de mi trabajo y sus acertadas observaciones para que este fuese de mayor calidad.

A **Melinda S.** por su ayuda en la revisión del texto en inglés y sus palabras de aliento a lo largo de esta etapa. *Thank you for always being so kind and encouraging!*

Al **Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza**, por todo su tiempo y conocimiento compartido conmigo durante este proyecto, además de los datos que sirvieron como base del mismo. Ha sido una experiencia de aprendizaje incomparable y no tengo duda de que este trabajo no habría sido igual sin su ayuda.

Al **Dr. Kinardo Flores Castro**, por las incontables horas y el sobrehumano apoyo que me ha brindado, por su hospitalidad y dedicación hacia los estudiantes, así como su paciencia y guía durante este proceso. Me es imposible hallar palabras que hagan justicia a la dedicación que me ha mostrado; gracias por su apoyo, su conocimiento y su amistad. Simplemente gracias por todo.

## Abreviaturas

° **C**: Grados centígrados.

**µm**: Micrómetro.

**A**: Ampere.

**ca.**: Locución latina. *Circa* (Aproximadamente, cerca de, hacia).

**cm**: Centímetro.

**COREMI**: Consejo de Recursos Minerales.

**CT**: *Chihuahua Trough* (Cuenca de Chihuahua).

**ENE**: Este noreste.

**et al.**: Locución latina. *Et alli* (y otros).

**g**: Gramo.

**km**: Kilómetro.

**m**: Metro.

**Ma**: Locución latina. *Mega annum* (Millón de años).

**MEI**: *Methylene Iodide* (Yoduro de Metileno).

**ml**: Mililitro.

**NE**: Noreste.

**NIR**: *Near-Infrared* (Infrarrojo cercano).

**NNE**: Norte noreste.

**NNW**: Norte noroeste.

**NW**: Noroeste.

**op. cit.**: Locución latina. *Opere citato* (en la obra citada).

**Pb**: Plomo.

**RGB**: *Red - Green - Blue* (Rojo - Verde - Azul).

**SGM**: Servicio Geológico Mexicano.

**SSE**: Sur sureste.

**SSW**: Sur suroeste.

**SW**: Suroeste.

**U**: Uranio.

**WNW**: Oeste noroeste.

**WSW**: Oeste suroeste.

## Contenido

Dedicatoria.....	3
Abreviaturas.....	4
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	11
Resumen.....	13
Abstract.....	14
I. Introducción.....	16
1.1 Generalidades.....	16
1.2 Antecedentes.....	18
1.3 Justificación.....	21
1.4 Objetivos.....	22
1.5 Área de estudio.....	23
1.5.1 Localización y vías de acceso.....	23
1.5.2 Marco geográfico y físico.....	24
1.5.3 Marco geológico.....	26
1.6 Métodos.....	35
1.6.1 Trabajo de campo.....	35
1.6.2 Trabajo en gabinete.....	36
II. Desarrollo y resultados.....	40
2.1 Levantamiento geológico y análisis fotogeológico.....	40
2.2 Análisis geométrico - descriptivo.....	49
2.2.1 Población de fallas.....	49
2.2.2 Pliegues.....	51
2.3 Petrología y petrografía de los productos volcánicos.....	53
2.4 Geocronología U - Pb.....	55
2.5 Cartografía geológica.....	57
III. Discusión.....	62
3.1 Geología estructural y tectónica.....	62
3.1.1 Relación con la Cuenca de Chihuahua y la Fm. San Carlos.....	64
3.1.2 Plegamiento.....	66
3.1.3 Fallamiento.....	70

3.2 Volcanismo del Cretácico tardío .....	72
IV. Conclusiones .....	76
Glosario .....	78
Bibliografía .....	81
Anexo I.....	88
Anexo II.....	94

## Índice de figuras

Figura 1. A) Mapa de localización y vías de acceso al área de estudio. B) Mapa de localización del municipio de Aldama. Se incluye una tabla con las coordenadas que delimitan de manera aproximada los terrenos del Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy. ....	23
Figura 2. Mapa de provincias y subprovincias fisiográficas en el Estado de Chihuahua. Construido con datos vectoriales escala 1:1'000,000 de INEGI (2001).....	24
Figura 3. Reconstrucción paleogeográfica de la Cuenca de Chihuahua durante el Jurásico tardío; modificada de Haenggi (2002). Líneas punteadas representan la trama estructural pre-jurásica. Una línea roja continua representa la extensión de la cuenca durante el Aptiano - Albiano. Una línea continua negra muestra el límite del cratón norteamericano y la zona de acreción del terreno sudamericano durante la orogenia Ouachita - Marathon en el Paleozoico (James y Henry, 1993). La localización del área de estudio de este trabajo está marcada con una estrella amarilla. ....	30
Figura 4. Mapa de las principales estructuras reportadas en la región del área de estudio (mostrada como un rectángulo) y su relación espacial con el levantamiento de Plomosas. Construido con información de Eguiluz de Antuñano (1987), Hennings (1994), Consejo de Recursos Minerales (COREMI, 2002, 2003, 2004a, 2004b), Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2005, 2019), Franco-Rubio (2007), Oviedo-Padrón (2008), Oviedo-Padrón et al. (2010), Flores-Castro et al. (2011).....	34
Figura 5. Vista de la unidad félsica muestreada de la secuencia volcánica. ....	35
Figura 6. Mapa de dominios estructurales establecidos para el análisis geométrico de los pliegues.....	37
Figura 7. A y C) Equipo de molienda tipo quijadas y pulverizador Shatterbox, usados durante la trituración de la muestra. B) Vasos de precipitado con muestra lavada post-secado. D) Separador magnético Frantz durante el hand mag. E) Separación por líquidos densos con MEI. ....	39
Figura 8. Mosaico de imágenes RGB y NIR del área de estudio. Una línea punteada indica los límites de la propiedad, mientras que líneas gruesas continuas de color negro delimitan los afloramientos. ....	40
Figura 9. Mapa de caminamientos para el levantamiento geológico - cartográfico.....	41
Figura 10. A) Calizas nodulares gruesas. B) Arenisca conglomerática de grano fino - medio. ....	42

Figura 11. A) Secuencia de calcarenitas, areniscas conglomeráticas y areniscas con estratificación cruzada. B) Arenisca conglomerática rojiza. C) Arenisca incipientemente conglomerática de grano medio - fino. D) Arenisca con madera fósil embebida. ....	43
Figura 12. A) Acercamiento a una fractura rellena con evaporitas (yesos). B) Calizas que contienen bivalvos y dientes de tiburón. C) Detalle del diente de tiburón. ....	44
Figura 13. A) Arenisca oxidada bien clasificada. B) Calcarenitas embebidas en arenas limosas. C) Conglomerado polimíctico. D) Secuencia volcánica de izquierda a derecha: Toba andesítica fracturada con relleno evaporítico, toba caolinizada indeterminada y toba félsica. ....	45
Figura 14. A) Tronco fósil rodeado por limos. B) Secuencia de arenisca con estratificación cruzada y arenisca conglomerática. ....	46
Figura 15. A) Afloramiento de arenisca fuertemente erosionado en un canal seco. B) Arenisca mal clasificada de grano fino - medio. ....	47
Figura 16. A) Arenisca nodular en discordancia con la terraza aluvial. B) Estratos de arenisca de orientación SSW - NNE. ....	48
Figura 17. Mapa de fallas. Lineamientos azules (y amarillos en F-4) reflejan el rumbo aproximado de los estratos. Evidencia de las fallas principales con vista en planta se presenta dentro de círculos. El diagrama de roseta muestra la dirección preferencial de la población de fallas. ....	50
Figura 18. Red estereográfica del Sinclinal El Chalino. Los flancos del pliegue se representan con líneas continuas de color morado y sus polos con cuadrados violeta; el eje con un punto naranja; el plano axial con una línea punteada rosa; el círculo mayor Pi con una línea punteada violeta. ....	51
Figura 19. Red estereográfica del Anticlinal La Labor. Los flancos del pliegue se representan con líneas continuas de color morado y sus polos con cuadrados violeta; el eje con un punto naranja; el plano axial con una línea punteada rosa; el círculo mayor Pi con una línea punteada violeta. ....	52
Figura 20. Secuencia de productos volcánicos. De derecha a izquierda: Toba riolítica, toba caolinizada mal preservada y toba intermedia de color gris. ....	53
Figura 21. Muestra de mano perteneciente a la toba félsica analizada. ....	54
Figura 22. Fotomicrografía de la lámina delgada correspondiente a la toba félsica RDCH-1. ....	54

Figura 23. Gráficos de datos U - Pb y fotomicrografías por catodoluminiscencia para la muestra de zircones RDCH-1. A) Diagrama de concordia Tera - Wasserburg: Se muestran los datos analizados con su correspondiente elipse de error. Los datos de color azul fueron utilizados para el cálculo de edad, los de color gris fueron descartados. B) Diagrama de edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ media ponderada: Cada barra azul representa una de las seis mediciones consideradas para el cálculo de edad. C) Imágenes por catodoluminiscencia post-ablación: Un medio círculo rojo muestra el lugar de ablación de 24 $\mu\text{m}$ ; las edades subrayadas en blanco son las utilizadas para calcular la edad media ponderada de la muestra. ....	56
Figura 24. A) Columna estratigráfica sintética del área de estudio. B) Columna estratigráfica a detalle de la secuencia de depósitos volcánicos. ....	57
Figura 25. Mapa geológico - estructural a detalle del área de estudio. ....	58
Figura 26. Simbología del mapa geológico - estructural (Fig. 25).....	60
Figura 27. Sección geológica Norte - Sur transversal a los pliegues descritos. Se presentan los ejes de cada pliegue con líneas punteadas de color rosa. Guías de altitud cada 40 metros (msnm) como líneas punteadas horizontales de color negro. Escala vertical exagerada 2:1. ....	60
Figura 28. A) Flexión de estratos en una zona de falla (Echeveste, 2017). B) Ejemplo de flexión de estratos observado en una de las fallas principales reconocidas en el área. Líneas azules indican la dirección del rumbo de los estratos. ....	63
Figura 29. Estratos suavemente inclinados en las inmediaciones del D.E.C.A. Parque Cretácico. Imagen cortesía del Dr. K. Flores-Castro. ....	67
Figura 30. Acercamiento del mapa estructural de la región. El área de estudio de este trabajo se encuentra en un rectángulo, con las fallas reconocidas presentadas de manera sintética, así como los pliegues. Las sierras se representan sobre el relieve con líneas punteadas rojas. Fallas y lineamientos se presentan con su simbología habitual. El D.E.C.A. Parque Cretácico se indica con un triángulo azul. ....	68
Figura 31. Actividad volcánica en el sur de Estados Unidos y el norte de México durante el Cretácico tardío. Una estrella naranja indica la ubicación del área de estudio. Se indican con símbolos amarillos las ocurrencias de volcanismo intermedio asociado al arco magmático; con símbolos verdes se indican ocurrencias de volcanismo basáltico asociado a la Provincia Magmática Balcones (BMP). Líneas punteadas muestran el avance del arco magmático desde el oeste. BMP = Provincia Magmática Balcones. TPMP = Provincia Magmática de Trans-Pecos. Modificado de Breyer et al. (2007)	

con información de Flawn et al. (1961), Damon et al. (1981) y Luttrell (1977).  
Registros adicionales de volcanismo de McDowell et al. (2001) y Lehman et al.  
(2006)..... 74

Figura 32. Mapa geológico - estructural. Incluye de manera sintética hallazgos  
paleontológicos a la fecha y curvas de nivel a detalle..... 94

Figura 33. Simbología del mapa geológico - estructural. .... 96

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros geométricos del Sinclinal El Chalino. ....	51
Tabla 2. Parámetros geométricos del Anticlinal La Labor. ....	52
Tabla 3. Datos medidos de acimut y buzamiento (rumbo y echado). ....	88
Tabla 4. Datos medidos de acimut aparente (rumbo aparente). ....	89
Tabla 5. Hallazgos paleontológicos en el Rancho Don Chuy. Con información de Méndez-Díaz (2018), Capitán-López (2021) y datos proporcionados por el Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza (comunicación personal, 2022). ....	90



## Resumen

El presente trabajo describe el estilo de deformación de los afloramientos del Cretácico Superior en las inmediaciones del Museo de Sitio Ecológico y Paleontológico Rancho Don Chuy y su relación con los eventos de deformación regional, además de proveer una base geológica a detalle actualizada a partir de la realización de la cartografía geológica - estructural con apoyo de Sistemas de Información Geográfica e imágenes de dron de alta resolución, y en el uso de técnicas geométricas de análisis estructural.

La secuencia compuesta por unidades sinorogénicas de areniscas, margas, conglomerados y tobas volcánicas, de composición intermedia a félsica, posee una edad mínima de Maastrichtiano ( $68.9 \pm 1.3$  Ma) obtenida con fechamiento radioisotópico U-Pb; este conjunto litológico constituye el **Sinclinal El Chalino** y el **Anticlinal La Labor**. Se propone que estos pliegues cerrados, de orientación Este - Oeste, son el resultado de la inversión de la Cuenca de Chihuahua, o una cuenca posterior a ella durante la orogenia Laramide, cuya interacción con la Cizalla Plomosas habría provocado las diferencias estructurales con respecto al sistema de pliegues del Sinclinal San José, al cual se establece que pertenecen.

El fallamiento de tipo sinistral que impera en el área de estudio podría explicar el abrupto cambio de rumbo que experimentan los estratos hacia el este del área. Es posible que su origen esté relacionado a estructuras de basamento pre-jurásicas, a la extensión de la provincia *Basin & Range*, o al relajamiento de las estructuras tras finalizar el plegamiento causado por la orogenia Laramide. Se requieren estudios posteriores para determinar el origen y tiempo de actividad del fallamiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de una muestra de toba de ceniza de caída, estos productos volcánicos pueden interpretarse como una expresión del Arco Magmático Laramide o de la Provincia Magmática Balcones, a finales del Cretácico tardío, cuya relación genética exacta requiere de análisis geoquímicos y petrogenéticos. Este depósito volcánico y su edad, así como las condiciones de depósito de los sedimentos de la columna sedimentaria y el contenido fósil, revelan una posible relación con la Formación Javelina, cuyos afloramientos se hallan en el sur de Texas.

Palabras clave: Cartografía geológica, Estructural, Orogenia, Radioisotópico, Cretácico Superior, Maastrichtiano.

## Abstract

The present work describes the style of deformation of the Upper Cretaceous outcrops in the vicinity of the Rancho Don Chuy Ecological and Paleontological Site Museum and its relationship with regional deformation events. In addition, this work provides a detailed geological basis updated from the carrying out of geological and structural mapping with support of Geographic Information Systems and high-resolution drone images, and the use of geometric structural analysis techniques.

The sequence composed of synorogenic units of sandstones, marls, conglomerates, and intermediate to felsic volcanic tuffs, and has a minimum age of Maastrichtian ( $68.9 \pm 1.3$  Ma) obtained with U-Pb radioisotope dating. This lithological set constitutes the El Chalino Syncline and the La Labor Anticline. It is proposed that these close folds, oriented East - West, are the result of the inversion of the Chihuahua Trough, or a later basin during the Laramide orogeny, in which interaction with the Plomosas Shear would have caused structural differences with respect to the fold system of the San José Syncline, to which it is established that these folds belong.

The left-lateral strike-slip faulting that prevails in the study area could explain the abrupt change in direction experienced by the strata towards the east of the area. It is possible that its origin is related to pre-Jurassic basement structures, to the extension of the Basin & Range province, or to the relaxation of the structures after completing the folding caused by the Laramide orogeny. Further studies are required to determine the origin and timing of the faulting.

According to the results obtained from a sample of ash tuff, these volcanic products can be interpreted as an expression of the Laramide Magmatic Arc or the Balcones Magmatic Province, at the end of the late Cretaceous. The exact genetic relationship requires further geochemical and petrogenetic analyses. This volcanic deposit and its age, as well as the deposition conditions of the sedimentary column sediments and the fossil content, reveal a possible relationship with the Javelina Formation, of which outcrops are found in southern Texas.

Keywords: Geological mapping, Structural, Orogeny, Radioisotope, Upper Cretaceous, Maastrichtian.



# I. Introducción

## 1.1 Generalidades

La investigación geológica en el estado de Chihuahua tiene sus orígenes en el siglo XIX, cuando se comenzaron a realizar los primeros levantamientos geológicos, algunos en el área que comprende el municipio de Aldama. A medida que aumentaba la inversión extranjera en los distritos mineros del norte de México durante finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, numerosos trabajos sentaron las bases que conformarían el conocimiento acerca de la geología de la región. Esta tendencia se potenciaría con las actividades de exploración a cargo de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el Instituto Mexicano del Petróleo (SGM, 2018); así como los reportes técnicos que contemplan la zona de Placer de Guadalupe y Plomosas, lugar donde se establece la primera mina de Uranio en Norteamérica (Gonzales-Reyna, 1945; *in*: Villareal-Fuentes, 2014).

A más de un siglo de exploración y explotación de minerales metálicos en la zona del levantamiento tectónico que exhuma el zócalo cristalino Precámbrico y los afloramientos de rocas paleozoicas, la naturaleza exacta que envuelve a este emblemático elemento tectónico continúa provocando desacuerdo entre académicos (Bridges, 1962; Hennings, 1994; Barboza-Gudiño *et al.*, 2016; entre otros). Esto se debe a la compleja historia y evolución geológica de esta parte del norte de México, caracterizada por múltiples eventos tectónicos que se traslapan en tiempo y espacio desde el Paleozoico, como la orogenia Ouachita - Marathon - Sonora (Poole *et al.*, 2005), el arco magmático Nazas del Jurásico, el arco magmático Tarahumara del Cretácico - Paleógeno y la orogenia Laramide (Centeno-García, 2015); aunado a que el suroeste de Estados Unidos y esta parte del norte de México, presentan varias estructuras de basamento con orientación general NW y WNW propuestas en respuesta a la distribución de rocas precámbricas y paleozoicas, así como cambios de facies y contenido faunístico del Jurásico y Cretácico Inferior, y finalmente los cambios en el estilo de la deformación de la Sierra Madre Oriental (Aranda-Gómez *et al.*, 2005). Algunas de estas estructuras como la Falla San Marcos, La Babia y la Megacizalla Mojave - Sonora, pudieron tener un papel en la evolución tectónica del estado; sin embargo, se ha señalado que la traza propuesta de la Falla San Marcos no ha sido reconocida en esta región de Chihuahua (Oviedo-Padrón, 2008), y para el caso particular de la Megacizalla Mojave - Sonora, que Molina-Garza e Iriando (2005) ponen en duda su existencia, debido a evidencias estratigráficas, paleomagnéticas y geocronológicas.

En medio de esta compleja discusión acerca de la evolución geológica de esta parte del norte de México y a menos de 25 km del frente occidental del levantamiento de Plomosas, se encuentra una sucesión sedimentaria del Cretácico Superior que aflora a lo largo de ~2 km y está relacionada a los terrenos del Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy, misma que fue cartografiada a detalle por Méndez-Díaz (2018). Estas unidades cretácicas se presentan prácticamente verticales y afloran a través de ventanas de erosión que los diferencia de la cobertura aluvial reciente relacionada a la cuenca del río Conchos y a las rocas preexistentes de la Sierra El Morrión - La Gloria y la Sierra Cuesta El Infierno, las cuales poseen una orientación en su parte septentrional NNW que cambia bruscamente a WNW en su parte meridional; esta situación también es observable en las estructuras cercanas al levantamiento de Plomosas.

A pesar de la existencia de trabajos previos en esta área de estudio, la cartografía geológica y nivel de conocimiento acerca de su configuración estructural es incipiente, por lo que este trabajo busca esclarecer la naturaleza geológica y la afinidad estructural entre los afloramientos del Rancho Don Chuy con los elementos tectónicos y estructurales que componen la geología regional.

## 1.2 Antecedentes

Como se ha mencionado, la sucesión sedimentaria que aflora en las cercanías del Rancho Don Chuy ha sido objeto de varios estudios e informes técnicos en años recientes, aunque en su mayoría se trata de trabajos paleontológicos y paleobotánicos.

Oviedo-Padrón (2008) y colaboradores (2010), realizan la cartografía geológica - estructural de la Sierra Cuesta El Infierno, próxima al área de estudio, e identifican dos sucesiones volcánicas del Paleógeno que yacen discordantemente sobre el Cinturón Plegado de Chihuahua; también describen y discriminan entre los sistemas de fallas normales asociados a la actividad de la provincia *Basin & Range*, destacando una zona de transferencia en el sistema de fallas “Ojo de León”, misma que señalan como la fuente de los derrames de lavas andesíticas de la secuencia superior; y sugieren que la Sierra Cuesta El Infierno fue emplazada cuando la deformación Laramide ya se había detenido y que el volcanismo que le dio origen fue sintectónico a la extensión en la región, misma que también reactivaría el levantamiento de Plomosas.

Otro de los primeros trabajos publicados es el reporte de una madera fósil del género *Javelinoxylon* por Estrada-Ruiz y Martínez-Cabrera (2011) en las inmediaciones del D.E.C.A. Parque Cretácico ubicado a 10 km al noroeste del Rancho Don Chuy. Los autores asocian los estratos de arenisca que contienen el material fosilífero como parte de la Fm. San Carlos y realizan una columna estratigráfica sintética.

Más tarde, Montaña-Ruiz (2013) y González-Moreno (2015) realizaron el levantamiento geológico del D.E.C.A. Parque Cretácico y determinaron mediante la geoquímica orgánica de biomarcadores y geoquímica inorgánica de elementos mayores y traza, que los sedimentos fueron depositados bajo un ambiente marino - marginal (transicional) caracterizado por deltas y lagunas costeras.

Delgadillo-Escobar y colaboradores (2015) reportan el hallazgo de un diente erosionado de 44 mm asignado al género *Onchosaurus* (Sclerorhynchidae) en un estrato de coquina intercalada entre areniscas que se relacionan con las formaciones Ojinaga, San Carlos y Picacho del Cretácico Superior. Además, señalan que esta es la primer ocurrencia del género en México.

Expediciones subsecuentes reportaron ocurrencias de los géneros de madera fósil *Paraphyllanthoxylon anasazi* y *Agathoxylon*, de hasta 12 m de longitud en el D.E.C.A. Parque Cretácico A.C. y en el Rancho Don Chuy respectivamente; en el trabajo publicado se define a los estratos que los contienen como una secuencia de areniscas que

sobreyacen a arcillas calcáreas y subyacen a la vez a conglomerados; los autores resaltan el abundante contenido fósil de estas unidades (García-Hernández et al., 2016).

Mendoza-Ostria (2016) y Lugo-Rodríguez (2017) retoman el estudio de las maderas fósiles *Javelinoxylon* y *Paraphyllanthoxylon* respectivamente y determinaron, mediante la caracterización de compuestos orgánicos preservados por Cromatografía de Gases-Masa (CG-Ms) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de  $^1\text{H}$ , que estos géneros de maderas fósiles están relacionados con ambientes de tipo continental con clima tropical a subtropical.

Posteriormente, Méndez-Díaz (2018) también realiza el análisis de geoquímica orgánica de una madera fósil del género *Agathoxylon* reportada por García-Hernández y colaboradores (2016) en el Rancho Don Chuy. Este estudio contempló submuestras correspondientes a la corteza, anillos y núcleo del ejemplar, resultando la composición de la materia orgánica sedimentaria preservada y biomarcadores que se relacionan de igual manera a condiciones paleoclimáticas cálidas - tropicales. En cuanto a la geología del Rancho Don Chuy, describe una sucesión de areniscas, conglomerados y margas pertenecientes a un ambiente marino - transicional que se interpreta como un frente deltaico relacionado a la Formación San Carlos. A partir de estos resultados, publica el primer plano geológico a detalle de la zona y su correspondiente columna estratigráfica, ubicando el material fosilífero.

En el año 2019, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) publica la carta Geológico - Minera Trancas H13 - C58 a escala 1:50,000 que provee la base geológica - estructural para el área comprendida entre la Sierra Cuesta el Infierno y las inmediaciones de la presa El Granero. Debido a su escala, no provee detalle suficiente acerca del área de estudio y no contempla los trabajos previos realizados en la región por el grupo de trabajo.

Martínez-Sosa y colaboradores (2020) publican como colaboración entre la Universidad Autónoma de Chihuahua y Museos Comunitarios A.C., un informe técnico que busca determinar áreas con mayor probabilidad de hallazgos paleontológicos mediante el uso de drones en las inmediaciones del Rancho Don Chuy. Este trabajo publica una serie de productos de alta resolución que incluye imágenes NIR (*Near-Infrared*) y RGB (*Red - Green - Blue*), un modelo digital de elevación, mapas de interpolación de radiación gamma natural, de reflectancia y de probabilidad de hallazgos paleontológicos, que para este trabajo han sido muy importantes.

Capitán-López (2021) realiza una colecta de material fosilífero en el Rancho Don Chuy, cuyo afloramiento se localiza a pocos metros del camino que conduce a Chorreras y estratigráficamente se ubica en la parte superior de la columna medida por Méndez-Díaz

(2018), e identifica por primera vez en el estado de Chihuahua a los géneros de amonites *Sphenodiscus* y *Discoscaphites*, que habitaron en ambientes marinos planctónicos y demersales de alta energía y baja profundidad, pertenecientes a una plataforma nerítica que recibía constantes aportes terrígenos entre los que se incluyen materiales volcánicos. En sus resultados asocia la sucesión sedimentaria del área de estudio a una facies más costera de la Formación San Carlos y le asigna mediante bioestratigrafía de amonites una edad de Coniaciano - Maastrichtiano.

### 1.3 Justificación

Algunas de las investigaciones llevadas a cabo en la propiedad del Rancho Don Chuy en los últimos años han tenido la finalidad de aportar conocimiento sobre la historia geológica, los paleoambientes y la diversidad paleontológica que muestran los afloramientos de la zona de estudio, con el objeto de difundir y proteger el patrimonio ecológico y paleontológico que alberga el Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy con registro ante el Instituto Nacional de Antropología e Historia, como localidad paleontológica en el Sistema Único de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicas e Históricas, bajo el Folio Real 2PSP00000127, distinción otorgada como resultado de los trabajos de investigación previos, que en su mayoría son del grupo de trabajo.

Partiendo de esa premisa, se reconoce que el nivel de conocimiento geológico que se tiene en la actualidad es insuficiente, pues la mayoría de los trabajos han sido principalmente paleontológicos y paleobotánicos que han sido referidos a una cartografía geológica de detalle realizada por Méndez-Díaz (2018), que incluye control estratigráfico detallado y que posteriormente, es complementado por el estudio bioestratigráfico de Capitán-López (2021).

Actualmente no existe un mapa geológico a detalle que contemple la medición y el análisis de las estructuras geológicas que permita explicar la configuración estructural de los afloramientos, así como los eventos que intervinieron en su deformación, objeto de esta investigación.

Por esta razón, este trabajo ampliará el nivel de conocimiento geológico de los afloramientos del Cretácico Superior que afloran en las inmediaciones del Museo de Sitio Ecológico y Paleontológico Rancho Don Chuy, mediante el levantamiento geológico - estructural respaldado por un análisis de las estructuras medidas y la geocronología de los productos volcánicos asociados.

## 1.4 Objetivos

### **Objetivo general**

Analizar la geología estructural y tectónica de los afloramientos del Cretácico Superior en las inmediaciones del Museo de Sitio Ecológico y Paleontológico Rancho Don Chuy, para establecer su relación con los eventos de deformación regional y estilo de deformación.

### **Objetivos específicos**

- Realizar un levantamiento geológico - estructural apoyado con fotogeología para complementar la cartografía de trabajos previos.
- Describir mediante un análisis geométrico - descriptivo los elementos estructurales reconocidos en el área de estudio para determinar el estilo de deformación.
- Determinar la edad de los productos volcánicos de composición félsica e intermedia que se encuentran interestratificados, para dilucidar su relación de campo y cronoestratigrafía.
- Diseñar un perfil geológico que muestre el detalle de las estructuras geológicas medidas.

## 1.5 Área de estudio

### 1.5.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio corresponde a los terrenos pertenecientes al Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy, localizado en la comunidad de Potrero El Llano, municipio de Aldama, Chihuahua, México.

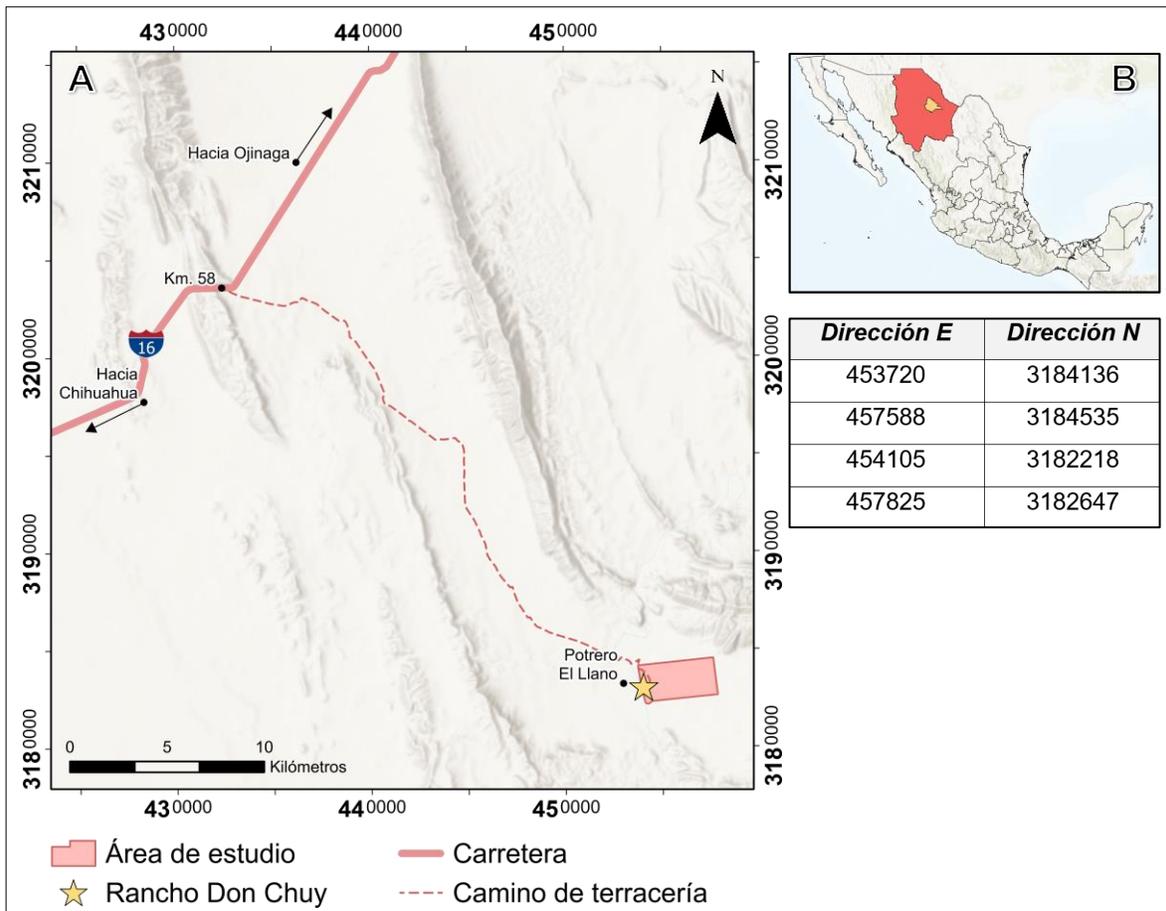


Figura 1. A) Mapa de localización y vías de acceso al área de estudio. B) Mapa de localización del municipio de Aldama. Se incluye una tabla con las coordenadas que delimitan de manera aproximada los terrenos del Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy.

Se accede al área de estudio mediante un recorrido a partir de la ciudad de Chihuahua a través de la carretera federal n. 16 (Chihuahua - Ojinaga), por aproximadamente 58 km hasta el entronque con el camino de terracería que conecta con Potrero El Llano - Chorreras, a partir del cual se continúa por aproximadamente 32 km hasta cruzar el puente del río Conchos. Se continúa el camino de terracería por aproximadamente otros 3 km hasta llegar al Rancho Don Chuy (Fig. 1).

### 1.5.2 Marco geográfico y físico

El municipio de Aldama, localizado en la región centro oriental del estado de Chihuahua, posee una extensión territorial de 9216.3 km<sup>2</sup> (INEGI, 2020) que colinda con los municipios de Ahumada al norte, Coyame del Sotol y Ojinaga al este, Julimes y Aquiles Serdán al sur, y de Chihuahua al oeste.

Fisiográficamente pertenece a la provincia de Sierras y Llanuras del Norte (Fig. 2) que se caracteriza por sierras de reducida elevación y pendientes muy inclinadas que están separadas entre sí por amplias llanuras, y que en ocasiones son denominadas bolsones (INEGI, 2008). La naturaleza de esta provincia se suele relacionar con el plegamiento de secuencias marinas del Mesozoico durante la orogenia Laramide, además del relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y flujos de lava (SGM, 2019). Esta provincia se encuentra en contacto con la Sierra Madre Occidental (SMOcc) al oeste y la Sierra Madre Oriental (SMO) al este. Específicamente, el municipio de Aldama forma parte de la subprovincia fisiográfica de Sierras Plegadas del Norte (INEGI, 2008).

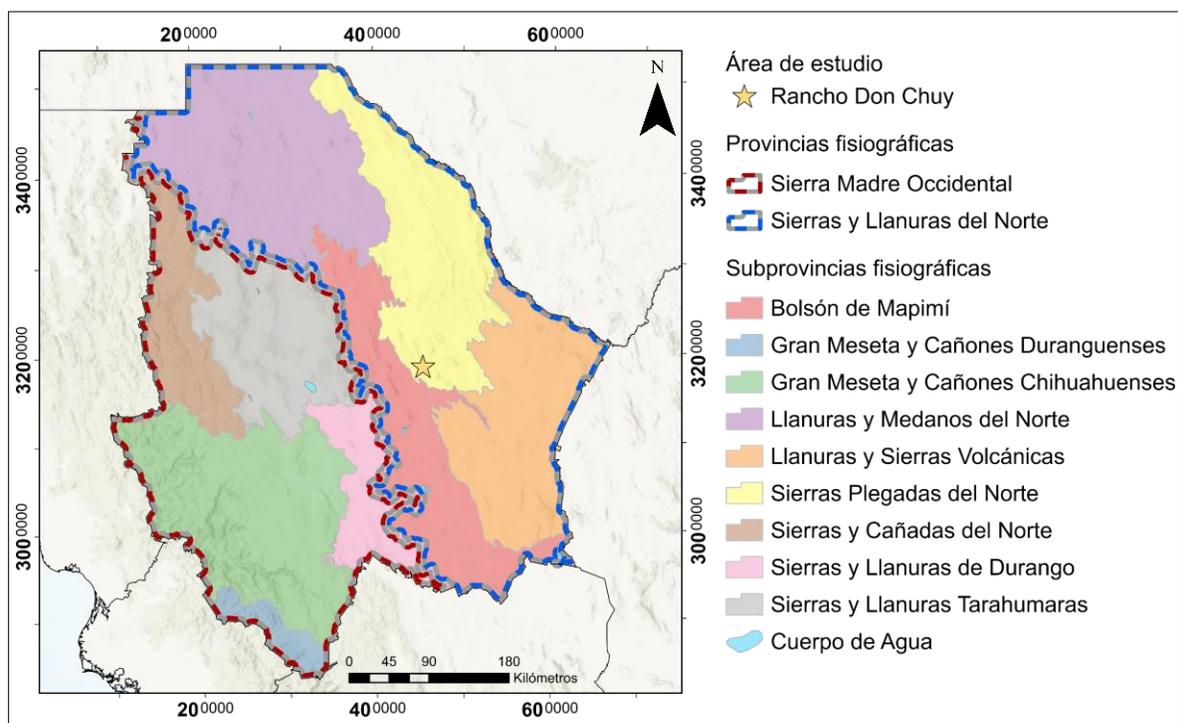


Figura 2. Mapa de provincias y subprovincias fisiográficas en el Estado de Chihuahua. Construido con datos vectoriales escala 1:1'000,000 de INEGI (2001).

El clima predominante es de tipo muy seco semicálido (clave BWhw(h)) a seco templado (clave BS0kw(w)), con reducidas regiones de clima seco templado a semicálido. La temperatura media anual suele ser entre 14 - 20° C, aunque en zonas desérticas las temperaturas pueden alcanzar y superar los 40° C en verano y temperaturas bajo cero en invierno (INEGI, 2010).

Hidrográficamente, el municipio de Aldama pertenece a las regiones hidrológicas de Bravo Conchos y Cuencas Cerradas del Norte. El Río Conchos, cuyo cauce recorre un total de 560 km, es la principal corriente fluvial que nace en la SMOcc y finalmente conecta con el Río Bravo por la región de Ojinaga; posee varios embalses entre los que destacan la Presa La Boquilla, Las Vírgenes y El Granero (en la zona de influencia del área de estudio), cuyas funciones principales son la de generar energía eléctrica, proveer agua para riego y el control de avenidas (CONAGUA, 2008).

La vegetación en el municipio de Aldama está conformada en su mayoría por matorral arbustivo y en menor medida pastizales; los bosques representan menos del 1 % del territorio (INEGI, 2010). La diversidad de especies vegetales, principalmente del desierto, comprende especies como el creosote (también llamada *gobernadora*), ocotillo, diversas biznagas, sotol (*Dasyilirion wheeleri*), yuca, chamizo, mezquite dulce, peyote y lechuguilla.

### 1.5.3 Marco geológico

La geología regional está conformada principalmente por sierras que son el resultado de intenso cabalgamiento en complejos sistemas de fallas que exponen rocas del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, así como numerosos cuerpos de naturaleza volcánica e intrusiva emplazados durante el Terciario, que a menudo cubren rocas precenozoicas. Estos accidentes geográficos son separados por amplios valles o bolsones donde unidades mesozoicas plegadas afloran esporádicamente entre la cobertura aluvial de relleno.

#### *Geología y evolución tectónica*

El basamento cristalino, al igual que en otras localidades al norte de México, está representado por alóctonos, particularmente del Mesoproterozoico en el Cerro Carrizalillo y en la Sierra El Cuervo. Se trata de granulitas y gnéises anfibolíticos intrusionados por pegmatitas relacionadas con los eventos Grenville (Mauger *et al.*, 1983, *in*: Quintero-Legorreta y Guerrero, 1985; Quintero-Legorreta y Guerrero, *op. cit.*). Se especula que en este periodo, el Rift de Baca propuesto a partir de rocas basálticas y metasedimentarias en Nuevo México y Texas, podría haberse expresado en el norte de Chihuahua como un magmatismo y sedimentación asociada (Haenggi, 2001).

Durante el Paleozoico Inferior se deposita una secuencia que refleja una serie de eventos regresivos y transgresivos en ambientes litorales o de plataforma, que depositaron principalmente calizas, areniscas y lutitas durante el Cámbrico - Devónico (COREMI, 2004a, 2004b) en un periodo de escaso tectonismo en el norte de Chihuahua, más allá de la separación y partida del terreno Cuyania del cratón norteamericano. Se ha observado que algunas unidades en Nuevo México y Texas presentan eventos erosionales coetáneos que no han sido reportados en Chihuahua (Haenggi, 2001).

El Paleozoico Superior muestra una secuencia de depósitos someros de plataforma y planicies aluviales (Bridges, 1962; COREMI, 2002, 2004a, 2004b) que revelan un aumento en el tectonismo regional resultado de la consolidación de Pangea. Este régimen tectónico se expresa con cuatro pulsos de tectonismo que comprenden un evento de deformación misisípica - pensilvánica, una orogenia pensilvánica, plegamiento y cabalgamiento durante el Pensilvánico - Pérmico y la eventual erosión - basculamiento del Pérmico (Haenggi, 2001; Barboza-Gudiño *et al.*, 2016).

El Mesozoico se caracteriza por el avance de los mares desde el este debido a procesos de expansión oceánica que eventualmente llevarían a la rotura del supercontinente Pangea. La ausencia de depósitos del Triásico indica que el área permaneció emergida, aunque se ha reportado una secuencia de areniscas que se extiende hasta el Pérmico - Triásico (Barboza-Gudiño *et al.*, 2016). La secuencia del Jurásico muestra la transgresión de los mares mediante depósitos de abanicos aluviales a litorales y de plataforma en mar abierto (COREMI, 2002). Es durante este periodo, específicamente durante el Oxfordiano, que la Cuenca de Chihuahua se desarrolla como un elemento *pull-apart* por rotación en sentido antihorario de la placa norteamericana, misma que acumularía sedimentos durante el resto del Mesozoico (Haenggi y Muehlberger, 2005). La tasa de subsidencia variable de la cuenca provocaría la formación de evaporitas en el Jurásico Superior, extendiéndose hasta el Cretácico Inferior. Durante el resto del Cretácico en numerosas formaciones se depositaron calizas, lutitas y areniscas que reflejan las continuas transgresiones marinas durante el Cretácico temprano y el gradual retroceso de los mares hacia el sureste a partir del Cenomaniano, hasta la eventual inversión de la cuenca durante la orogenia Laramide, cuyo inicio no está bien definido, pero se considera estuvo activa desde los 84 - 78 Ma, hasta hace 48 Ma en el Eoceno (Haenggi, 2002). Los esfuerzos compresivos en dirección NE - SW levantaron y plegaron la columna sedimentaria, formando los elementos estructurales de dirección NW - SE y Norte - Sur del Cinturón Plegado de Chihuahua (COREMI, 2002).

A medida que la placa Farallón era subducida por la placa de Norteamérica, un arco magmático resultante generó depósitos volcánicos de composición intermedia - ácida y numerosos batolitos graníticos durante el Cretácico tardío - Paleoceno, seguido por un volcanismo andesítico - riolítico en el Eoceno, que en conjunto conforman el Complejo Volcánico Inferior (CVI). En el Oligoceno temprano (32 - 28 Ma) y Mioceno temprano (24 - 20 Ma), dos pulsos ignimbríticos emplazan el Supergrupo Volcánico Superior con coladas máficas transicionales posteriores a cada pulso. Al concluir el periodo de subducción, un último evento volcánico caracterizado por basaltos alcalinos e ignimbritas fue emplazado en diferentes episodios durante el Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario (Ferrari *et al.*, 2005; Haenggi, 2002; Oviedo-Padrón, 2008); estos conjuntos, constituyen la Sierra Madre Occidental (SMOcc), que cubre el basamento pre-Cenozoico. Haenggi (*op. cit.*) sugiere que el volcanismo del Oligoceno habría reemplazado un relieve topográfico similar al actual a medida que se erosionaban montañas de la orogenia Laramide. El mismo autor especula a

partir de la reactivación de sistemas de fallas que el tectonismo de evaporitas habría continuado por algún tiempo.

Tectónicamente, el periodo entre el final de la orogenia Laramide y el inicio de la extensión del Terciario - Cuaternario (ca. 31 Ma) no presenta fallamiento asociado más allá de la reactivación de sistemas de fallas antiguos y el fallamiento relacionado a flujo de evaporitas (Haenggi, 2002), aunque hay indicios de posibles fallas sinistralas de escala regional con actividad en el Oligoceno - Mioceno como la Falla Juárez, que se infiere podría haber tenido desplazamientos sinistralas de hasta 10 km a lo largo de un lineamiento desde Ciudad Juárez hasta el margen sur de la paleocuenca Chihuahua, pasando por el valle formado entre la Sierra El Morrión y la Sierra de Gómez (Eguiluz de Antuñano, 1984). Existe evidencia de fallamiento posterior al reajuste del sistema de esfuerzos regional, cuando este pasó de compresión ENE a extensión ENE; algunos reportes podrían relacionarse con fallamiento coetáneo posterior a 10 Ma del Rift de Río Grande, mientras que otros con actividad posterior a 28 Ma indican que podrían haber influenciado la distribución de bolsones y sierras sin haber controlado la topografía (Haenggi, *op. cit.*).

### *Cuenca de Chihuahua y estructuras de basamento*

Como ya se ha mencionado, la Cuenca de Chihuahua (*Chihuahua Trough*) fue un elemento tectónico *pull-apart* formado durante el Oxfordiano, este se originó como un *right step* dextral entre el lineamiento de la Zona de Texas y la Falla San Marcos en el área que ocupó la cuenca paleozoica Pedregosa al noreste de Chihuahua y partes adyacentes de Texas, Nuevo México y Sonora. Es sugerido que se conectaba al noroeste con la cuenca Bisbee y al sureste con la cuenca Sabinas y el Mar Mexicano, mientras que al suroeste y noreste colindaba mediante fallas de alto ángulo con las plataformas emergidas de Aldama y Diablo respectivamente, por lo que se ha interpretado que este grupo de cuencas pudieron formarse por el mismo evento extensional, aunque la ausencia de un conglomerado basal sintectónico y diferencias en la actividad ígnea jurásica en Chihuahua muestran en cierta medida un origen diferente (Haenggi, 2002). Alternativamente, se ha interpretado como resultado de un sistema de *rift* jurásico (Franco-Rubio *et al.*, 2018).

Su desarrollo fue controlado por una trama estructural regional pre-jurásica (Fig. 3) que consiste en una serie de lineamientos de orientación NW que intersecan zonas de debilidad cortical de orientación Norte - Sur (Muehlberger y Moustafa, 1984; Haenggi, 2002). Algunos elementos de orientación NW en el margen suroeste del cratón norteamericano han sido reportados como activos de manera intermitente desde el Proterozoico Medio (Muehlberger, 1980; Haenggi, 2001), por lo que algo parecido se ha inferido con los de orientación Norte - Sur (Haenggi y Muehlberger, 2005).

La cuenca mantuvo una tasa de subsidencia variable que le permitió acumular sedimentos hasta el Campaniano temprano, cuando la cuenca dejó de existir y las últimas formaciones del Cretácico se depositaron en la cuenca de antepaís de retroarco denominada Tornillo, y localizada de manera paralela al curso presente del Río Bravo al noreste de la extinta cuenca Chihuahua (Haenggi, 2002). Se han reportado afloramientos de estas mismas formaciones a lo largo del área que alguna vez perteneció a la Cuenca de Chihuahua (Stevens y Stevens, 1990, *in*: Haenggi, 2002; COREMI, 2004a, 2004b; SGM, 2005, 2019; Méndez-Díaz, 2018).

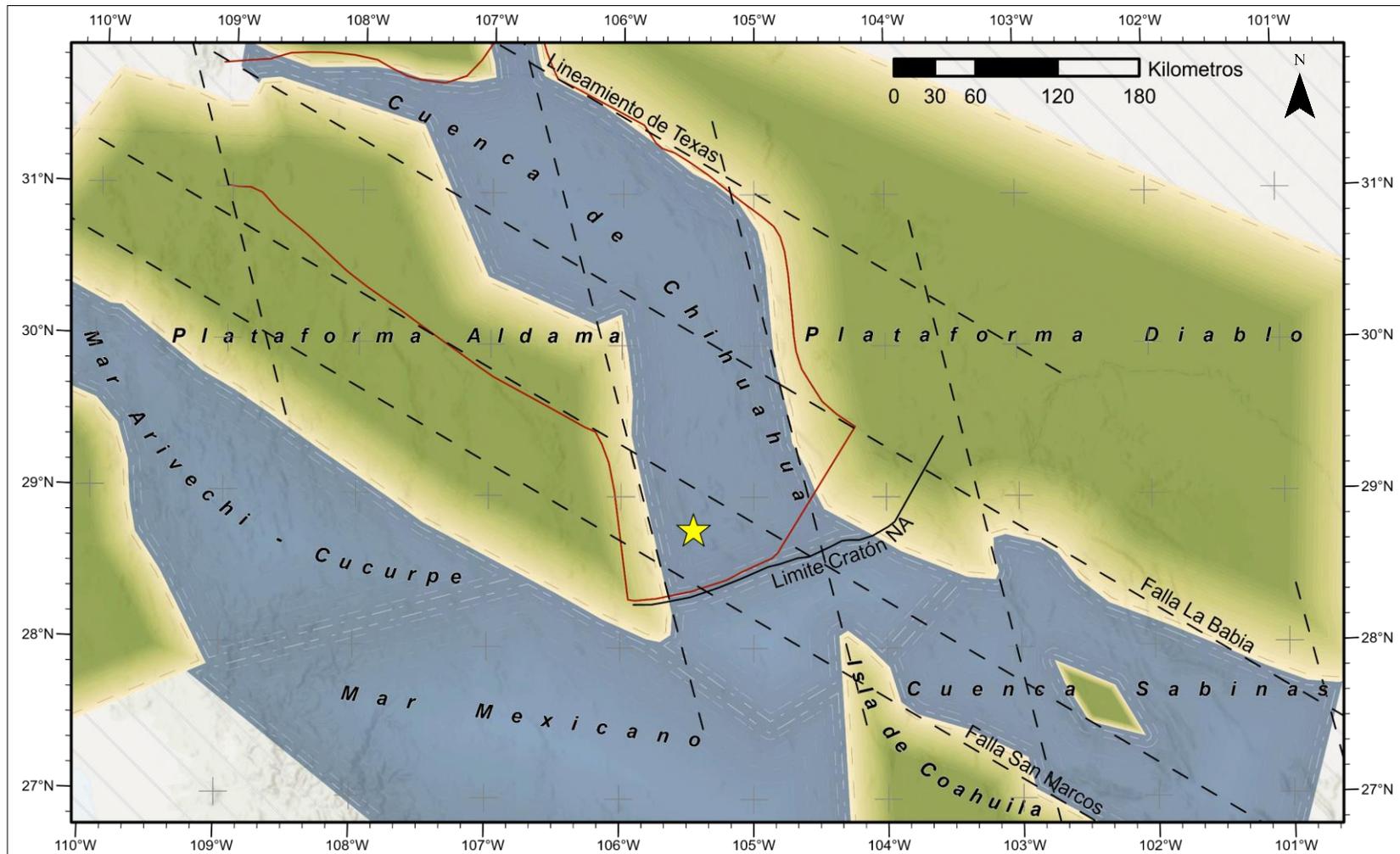


Figura 3. Reconstrucción paleogeográfica de la Cuenca de Chihuahua durante el Jurásico tardío; modificada de Haenggli (2002). Líneas punteadas representan la trama estructural pre-jurásica. Una línea roja continua representa la extensión de la cuenca durante el Aptiano - Albiano. Una línea continua negra muestra el límite del cratón norteamericano y la zona de acreción del terreno sudamericano durante la orogenia Ouachita - Marathon en el Paleozoico (James y Henry, 1993). La localización del área de estudio de este trabajo está marcada con una estrella amarilla.

### *Cinturón Plegado de Chihuahua y provincia Basin & Range*

Es conocido que el Cinturón Plegado de Chihuahua es el resultado de la inversión tectónica de la Cuenca de Chihuahua durante la orogenia Laramide; sin embargo, no existe un solo modelo que explique su formación de manera satisfactoria entre la comunidad científica (Gries, 1980; Muehlberger, 1980; Padilla y Sánchez, 1986; Hennings, 1994), por lo que Haenggi (2002) sugiere un modelo donde la deformación es única para cada área de la cuenca:

- Para el área este, consiste en la reactivación de las fallas que limitaban la cuenca de Chihuahua como fallas inversas con un posible componente sinistral y la formación de pliegues en rocas que sobreyacen a las secuencias evaporíticas que conforman las superficies de despegue (*décollement*), seguida de la amplificación de los mismos por el flujo de evaporitas hacia las crestas de los anticlinales y el desarrollo de cabalgamientos hacia la Plataforma Diablo, junto a fallas de desgarre mientras el plegamiento y las intrusiones evaporíticas continuaban.
- Para el área noroeste, la deformación es resultado de la compresión NE - SW con cabalgaduras menores hacia la Plataforma Aldama, debido a la reactivación de estructuras de basamento con un posible componente sinistral a lo largo de fallas de dirección WNW y la falta de zonas de despegue. Es necesario mencionar que este último estilo de deformación es una mera especulación no documentada en campo.

La provincia *Basin & Range* (también llamada de Cuencas y Sierras) por otra parte, es una región del oeste de Norteamérica caracterizada por valles y sierras alternantes provocados por fallamiento de bloques resultado de la extensión del Cenozoico que incluyen entre otros, a los dominios del Altiplano Mexicano y el Rift de Río Grande. (Stewart, 1998). A pesar de la similitud del Cinturón Plegado de Chihuahua con la topografía típica de la provincia *Basin & Range*, no está claro si el mecanismo responsable es la compleja y variable tectónica de esta provincia, ya que la cobertura aluvial imposibilita el reconocimiento de fallas normales que controlen el desarrollo de bolsones (Haenggi, 2002).

### *Levantamiento de Plomosas*

También referido como el levantamiento de Placer de Guadalupe - Plomosas (Villareal-Fuentes *et al.*, 2014), se caracteriza por una serie de cabalgamientos que colocan en contacto tectónico a rocas paleozoicas con mesozoicas (Fig. 4). Aunque han sido objeto de diversos estudios (King y Adkins, 1946; Bridges, 1962; Hennings, 1994; Haenggi, 2001; Barboza-Gudiño *et al.*, 2013, *in*: Villareal-Fuentes *et al.*, *op. cit.*; Barboza-Gudiño *et al.*, 2016) no existe acuerdo en el modelo de formación para esta cadena de afloramientos antiguos. Se ha propuesto que los pliegues y cabalgamientos con transporte tectónico hacia el oeste son el resultado de compresión durante el Pérmico - Triásico o de la combinación de acortamiento horizontal con fallamiento sinistral en la propuesta Zona de Cizalla Plomosas de orientación WNW durante la orogenia Laramide, lo que resultaría en un pliegue por doblez de falla.

Oviedo-Padrón y colaboradores (2010) sugieren a partir del análisis estructural de la Sierra Cuesta El Infierno que la deformación extensional asociada a la actividad del *Basin & Range* reactivó el frente occidental del levantamiento de Plomosas, y a una falla de basamento bajo el sistema de fallas Ojo de León de orientación WNW, pues la edad del emplazamiento de la sierra implica una evolución estructural con reactivación de estos elementos.



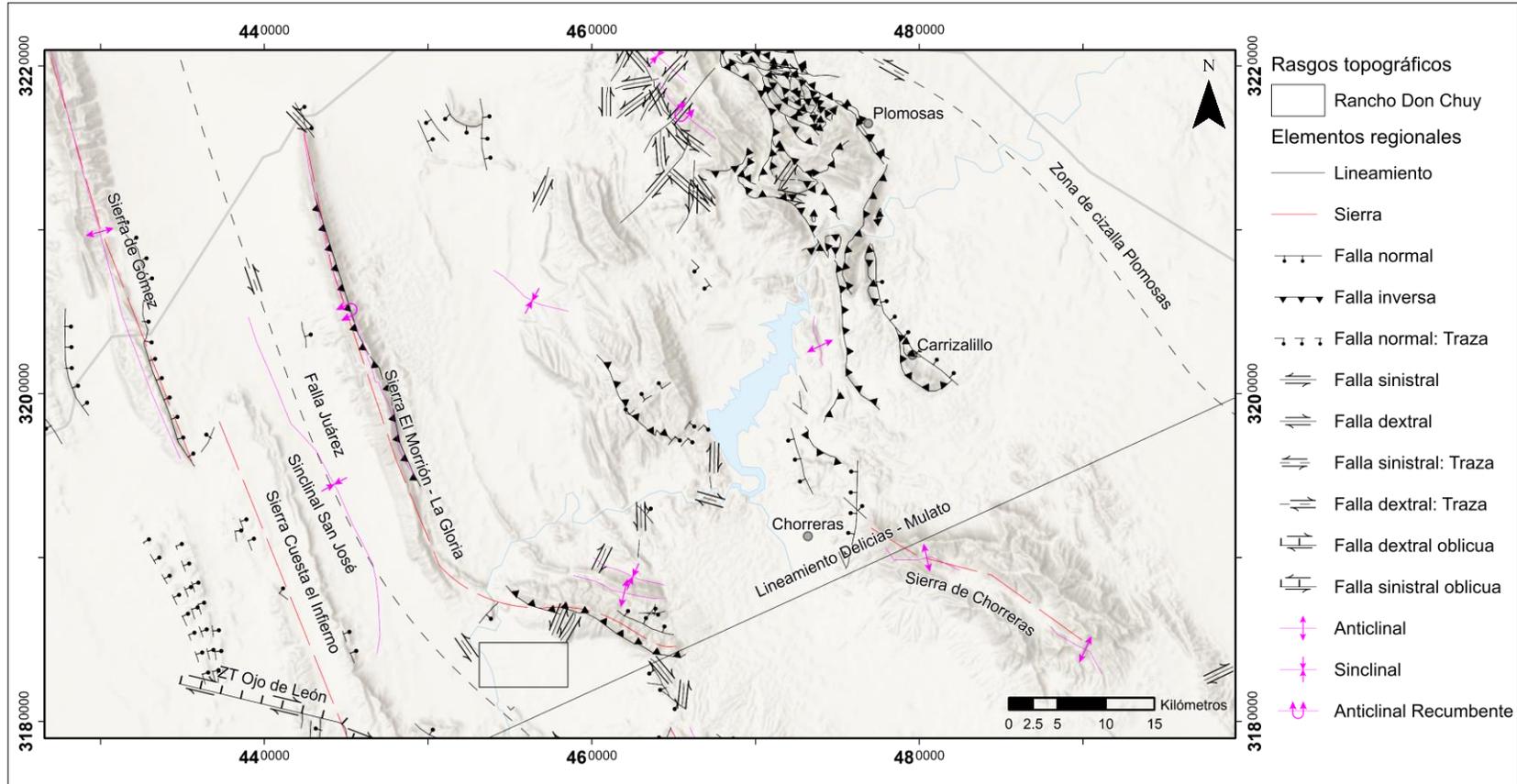


Figura 4. Mapa de las principales estructuras reportadas en la región del área de estudio (mostrada como un rectángulo) y su relación espacial con el levantamiento de Plomosos. Construido con información de Eguluz de Antuñano (1987), Hennings (1994), Consejo de Recursos Minerales (COREMI, 2002, 2003, 2004a, 2004b), Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2005, 2019), Franco-Rubio (2007), Oviedo-Padrón (2008), Oviedo-Padrón et al. (2010), Flores-Castro et al. (2011).

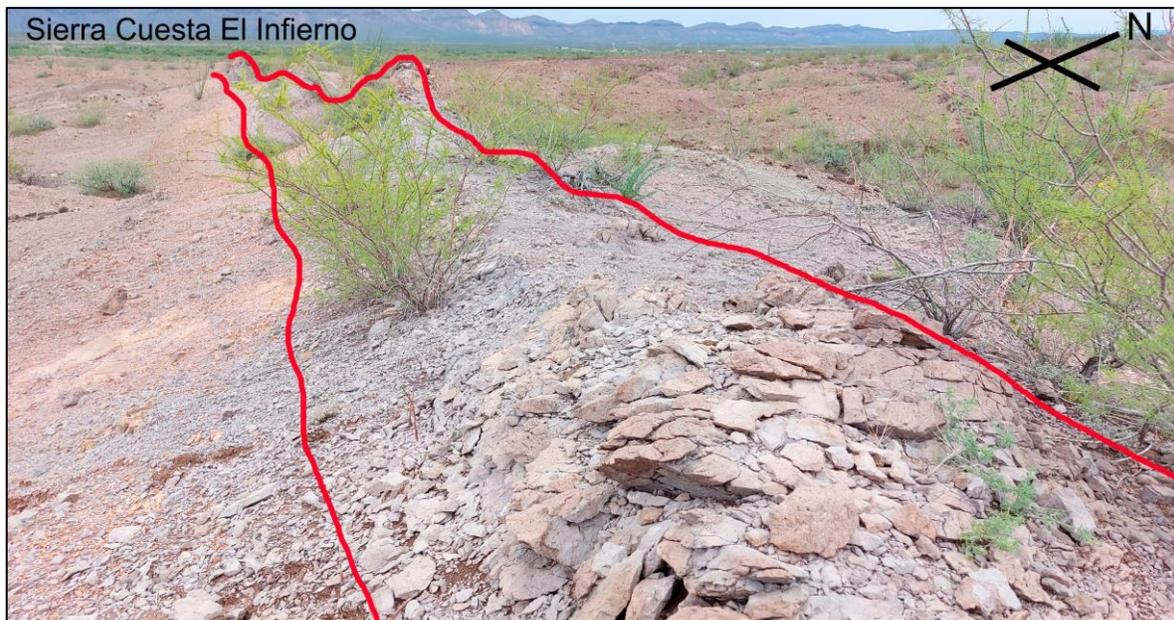
## 1.6 Métodos

### 1.6.1 Trabajo de campo

Se realizó una visita de campo que consistió en múltiples caminamientos dentro de los terrenos del Rancho Don Chuy en Julio de 2022, con el objetivo de realizar una descripción general de los estratos que afloran, completar la cartografía geológica existente y determinar sus relaciones estratigráficas, con especial énfasis en la toma de datos estructurales y recolección de muestras para análisis geocronológico.

#### *Muestreo*

Se realizó la recuperación de fragmentos de roca del miembro superior de una secuencia volcánica de composición félsica - intermedia (Fig. 5) reportada previamente por Méndez-Díaz (2018). Se recolectó un aproximado de 2 kg de muestra que fue almacenado en una bolsa de polietileno y etiquetado bajo el código RDCH-1.



*Figura 5. Vista de la unidad félsica muestreada de la secuencia volcánica.*

El material recolectado fue trasladado desde Aldama, Chihuahua al Laboratorio de Geoquímica de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo para la separación de fragmentos destinados a lámina delgada y posteriores estudios petrográficos. La muestra restante RDCH-1 fue trasladada al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México en Juriquilla, Querétaro, para su análisis geocronológico para

determinar la afinidad con la SMOcc, o bien identificar actividad volcánica relacionada al arco volcánico mencionado en estudios previos para el Cretácico Superior.

### 1.6.2 Trabajo en gabinete

Las observaciones de campo fueron digitalizadas para su incorporación en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS Pro 3.0.2, entorno donde se construyó un plano geológico actualizado. Estos registros incluyen los nombres y descripciones de cada observación, coordenadas UTM para su georreferenciación, datos de altitud y espesor, así como estructuras sedimentarias y orientación estructural. Posteriormente se compilaron las orientaciones de elementos estructurales en archivos de formato csv y tsv para su uso en el software de análisis de datos direccionales Stereonet 11.

Adicionalmente se construyeron dos columnas estratigráficas del área de estudio y una sección geológica de dirección Norte - Sur a partir del plano geológico actualizado, haciendo uso de los software libres de edición de gráficos vectoriales Inkscape 1.2.2 y de pintura digital Krita 5.1.5.

#### *Análisis fotogeológico*

Se realizó un análisis fotogeológico de la zona de estudio utilizando imágenes multispectrales tomadas por drones tipo Phantom, Ebee y Parrot Disco, que cuentan con una resolución espacial de 30 cm y fueron proporcionadas por el Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza. Este proceso consistió en la revisión detallada e interpretación visual de cada zona del área de estudio cubierta por las imágenes de dron disponibles con sustento en la información recabada en el levantamiento geológico - estructural. De esta manera se pudo complementar el trabajo de campo con la delimitación precisa de las unidades litológicas y la medición de estructuras de difícil observación.

#### *Análisis geométrico - descriptivo*

Consistió en la definición geométrica de los pliegues inferidos a partir de un análisis estereográfico con base en la identificación y definición de tres dominios estructurales denominados A, B y C, a partir de los límites aproximados inferidos para cada flanco con la intención de categorizar los datos para su uso en el análisis geométrico de pliegues (Fig. 6).

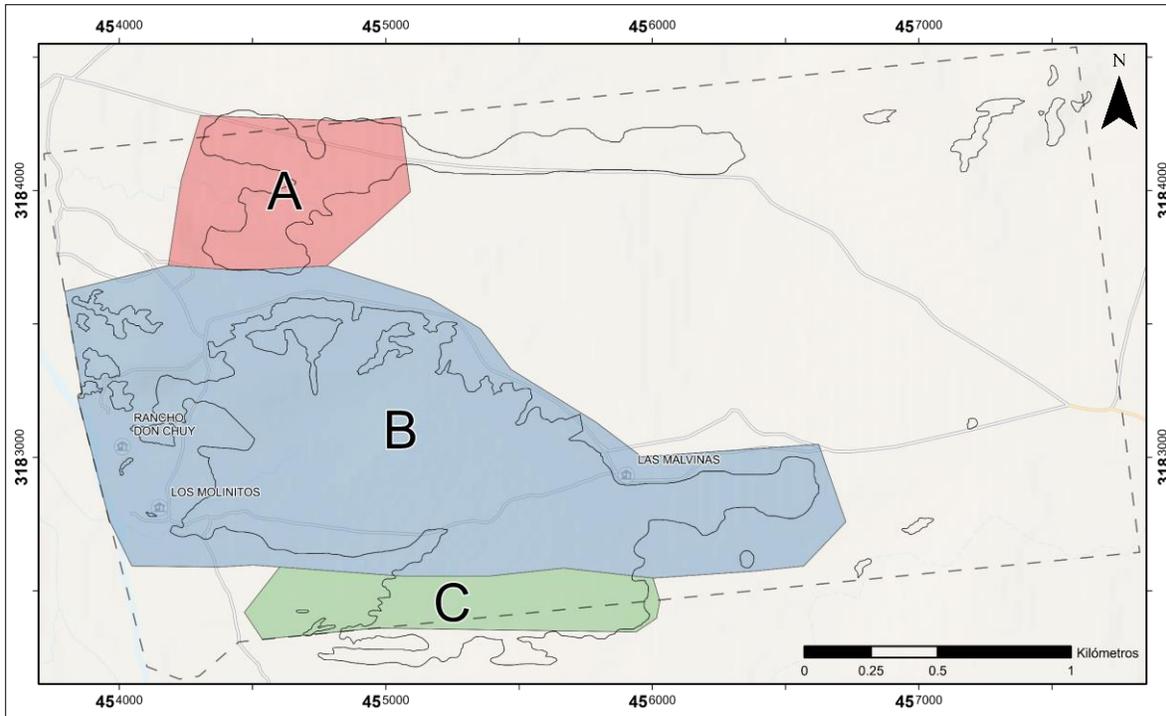


Figura 6. Mapa de dominios estructurales establecidos para el análisis geométrico de los pliegues.

La definición geométrica de los pliegues se realizó mediante el uso de una red de Schmidt (equiareal) en Stereonet, donde se introdujeron los datos de orientación de los planos correspondientes a cada dominio estructural en subconjuntos denominados A, B y C (Fig. 6); a través de un conteo de puntos con los polos de los planos medidos, se calculó el polo del flanco correspondiente a cada dominio. Se agruparon posteriormente los datos de cada pliegue en subconjuntos denominados A - B para el sinclinal, y B - C para el anticlinal identificado. Utilizando los nuevos subconjuntos se halló el círculo mayor  $P_i$  que contiene los polos de los flancos de cada pliegue, así como su polo o Eje  $P_i$ , línea cuya orientación corresponde al eje del pliegue (Rowland *et al.*, 2007). El plano axial fue calculado utilizando la función *Axial Plane Finder* de Stereonet, al igual que el ángulo interflanco del pliegue (Allmendinger *et al.*, 2012; Cardozo y Allmendinger, 2013).

### *Petrología y petrografía*

Se realizó la descripción megascópica de la muestra geológica RDCH-1, cuya lámina e interpretación la realizó el Dr. Francisco Abraham Paz Moreno, Profesor - Investigador del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

### Geocronología U - Pb

La muestra RDCH-1 fue procesada bajo la supervisión del Dr. Alexander Iriondo, siguiendo la metodología descrita a continuación en el Laboratorio de Separación Mineral y el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla (Fig. 7).

- Fragmentación y trituración: Utilizando un martillo y cincel, se descartaron superficies alteradas y se fragmentó la roca en piezas de ~5 cm por lado. Haciendo uso de una quebradora de quijadas y un pulverizador Shatterbox con disco de carburo de tungsteno (Fig. 7: A y C), los fragmentos fueron pulverizados y tamizados con una malla de 60 micras ( $\mu\text{m}$ ) para ser resguardados en bolsas herméticas ( $<60 \mu\text{m}$  y  $>60 \mu\text{m}$ ). Para este trabajo se ha utilizado solamente la fracción  $>60 \mu\text{m}$ .
- Lavado y secado: Para reducir la cantidad de polvo en la muestra, esta fue distribuida en vasos de precipitado de 1000 ml, conteniendo cada uno un aproximado de 100 ml de muestra. El proceso de lavado consistió en llenar el vaso de agua, agitar la muestra suavemente con una espátula y una vez se asientan los sedimentos más pesados, vaciar el agua a velocidad constante. Este paso se repitió hasta que el agua presentase pocos sedimentos en suspensión (Fig. 7: B). Una vez terminado, los vasos se introdujeron en un horno durante 24 horas para su secado.
- Separación mineral: La separación mineral se llevó a cabo en un separador magnético tipo Frantz de 0 - 2 Amperes. Primero se realizó una separación *hand mag* a 2.00 A para separar la mayor parte de la fracción mineral magnética (Fig. 7: D). Se ajustó el separador a una inclinación frontal y lateral de  $\sim 15^\circ$  para pasar la muestra por un carril a 0.50 A y después a 2.00 A con el fin de obtener una fracción magnética y una no magnética. La fracción contenedora de zircones (no magnética) fue sometida a separación por líquidos densos bajo una campana de extracción utilizando como líquido de inmersión Yoduro de Metileno (MEI por *Methylene Iodide*) cuya densidad fue medida en  $3.27 \text{ g/cm}^3$  (Fig. 7: E). La fracción densa, compuesta principalmente por zircones ( $\sim 4.6 \text{ g/cm}^3$ ) y otros minerales densos, fue decantada y recuperada mediante un filtro; posteriormente lavada con acetona y finalmente puesta a secar. Con ayuda de otros filtros se recuperó la fracción mineral menos densa y el resto de MEI. Una vez seco el concentrado mineral denso, se almacenó en un recipiente de vidrio para su montaje.

- Montaje y selección de puntos: Una población de aproximadamente 50 granos de zircón contenidos en el concentrado mineral fueron seleccionados a mano con un microscopio binocular y montados en una probeta con resina epóxica. Al dejarse secar por 8 horas, la probeta fue desbastada para exponer los cristales de zircón y mediante fotomicrográficas de microscopía óptica e imágenes de catodoluminiscencia SEM - CL, se seleccionaron 13 puntos adecuados en 12 zircones para los estudios isotópicos U - Pb,
- Análisis isotópico U - Pb: Se realizaron mediciones isotópicas en los puntos seleccionados mediante un sistema de ablación láser modelo Resolution M50 con láser LPX 220 acoplado a un espectrómetro de masas (ICP - MS) Thermo X - Series, cuyo proceso fue descrito originalmente por Solari y colaboradores (2010). Los datos fueron procesados utilizando el software Thermo PlasmaLab.



Figura 7. A y C) Equipo de molienda tipo quijadas y pulverizador Shatterbox, usados durante la trituration de la muestra. B) Vasos de precipitado con muestra lavada post-secado. D) Separador magnético Frantz durante el hand mag. E) Separación por líquidos densos con MEI.

## II. Desarrollo y resultados

### 2.1 Levantamiento geológico y análisis fotogeológico

A partir de las imágenes en alta resolución del área de estudio, se realizó la delimitación de los afloramientos (Fig. 8).

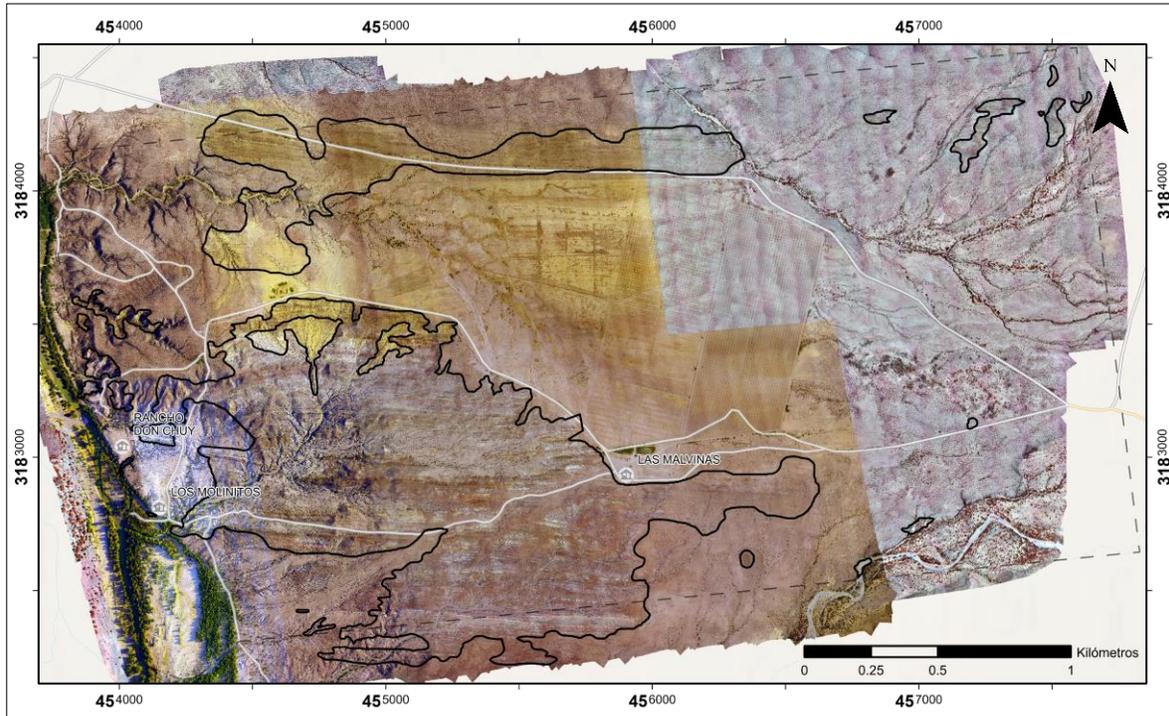


Figura 8. Mosaico de imágenes RGB y NIR del área de estudio. Una línea punteada indica los límites de la propiedad, mientras que líneas gruesas continuas de color negro delimitan los afloramientos.

Como parte del levantamiento geológico se describen de manera generalizada los hallazgos realizados y su localización aproximada. Con la intención de facilitar la visualización de las áreas descritas se acompañan las observaciones realizadas en cada caminamiento con un mapa de su ubicación aproximada y el sentido del recorrido que permitió el levantamiento geológico - cartográfico (Fig. 9).

Las mediciones de rumbo obtenidas en campo presentan una alta homogeneidad, por lo que puede asumirse una orientación preferencial general de rumbo de Este - Oeste para las secciones descritas a continuación con excepción de aquellas donde se especifique una orientación diferente a Este - Oeste (Consultar el Anexo I para las mediciones a detalle, así como los rumbos aproximados y los hallazgos paleontológicos en

conjunto con los reportes de trabajos previos). La ubicación e identidad de la población de fallas será discutida en el apartado *Análisis geométrico - descriptivo*.

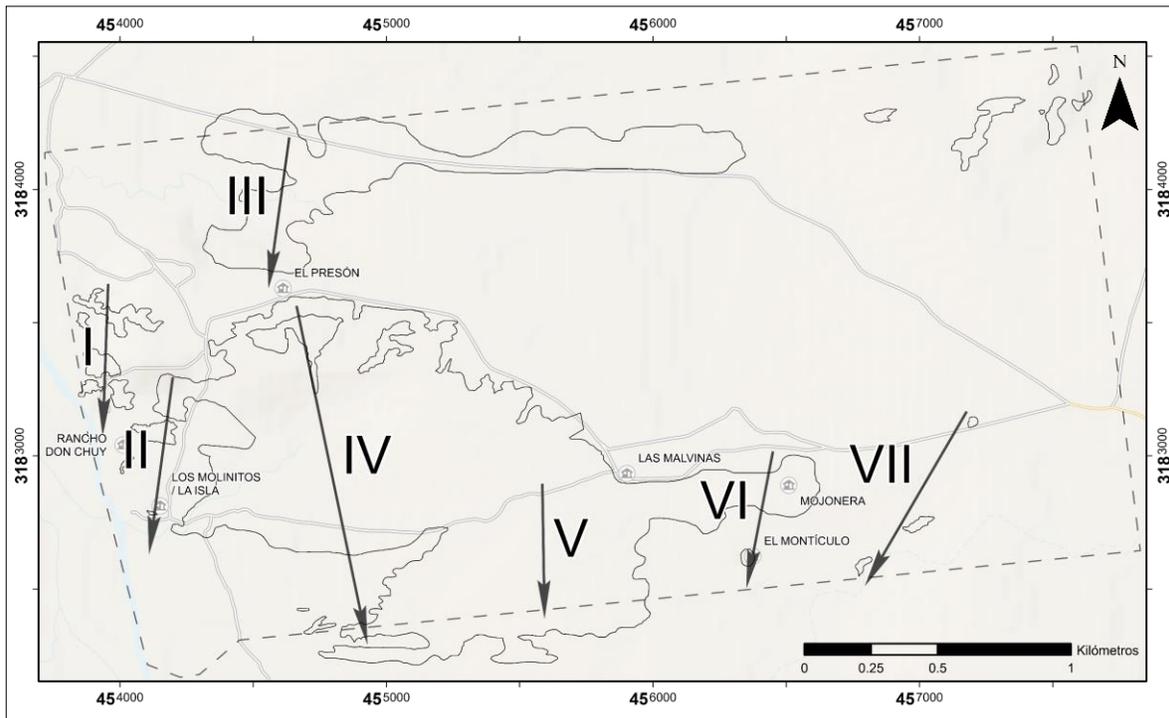


Figura 9. Mapa de caminamientos para el levantamiento geológico - cartográfico.

- I. Se observa de norte a sur una alternancia de calizas nodulares gruesas, lentes de arenisca color ocre de grano fino bien clasificadas y arenas limosas color ocre con nódulos calcáreos. La terraza aluvial cubre totalmente los afloramientos hasta laderas donde se reporta la continuación de la secuencia con alternancias de areniscas de grano grueso que pasan a conglomeráticas, arenas limosas con yesos y calcarenitas oxidadas con nódulos calcáreos. Esporádicamente aparecen entre las unidades margosas, estratos de arenisca de grano fino - medio con estratificación cruzada, areniscas conglomeráticas de color rojo blanquecino de grano grueso mal clasificadas y areniscas masivas (Fig. 10).



Figura 10. A) Calizas nodulares gruesas. B) Arenisca conglomerática de grano fino - medio.

- II. Se describe una secuencia de calcarenitas oxidadas con nódulos calcáreos, areniscas con estratificación cruzada, arenas limosas y areniscas conglomeráticas que pasan a conglomerado con matriz de arena gruesa. La secuencia continua y aumentan los estratos de arenisca de grano fino con esporádicas unidades de arenisca conglomerática con matriz de grano medio a grueso. Gradualmente desaparecen las areniscas y la secuencia se compone de arenas limosas con lentes embebidos de calcarenita nodular oxidada. Al continuar con el trayecto, la terraza aluvial cubre casi en su totalidad la secuencia, aunque puede observarse la desaparición de las unidades carbonatadas y margosas para dar paso a numerosos estratos de arenisca color gris de grano medio moderadamente clasificada, que pasa a areniscas conglomeráticas granosoportadas con nódulos de núcleo conglomerático. Se reportan a continuación parches y lentes de escasos centímetros con nódulos que concentran carbonatos y yesos; hacia el sur, la secuencia continúa como una alternancia de areniscas conglomeráticas color gris con matriz de grano fino, medio y grueso, que presentan bandas de conglomerados intercalados con arena fina; areniscas de grano medio con estratificación cruzada y escasos lentes de arenisca empobrecida en carbonato y nódulos calcáreos de núcleo conglomerático. Cerca de las instalaciones del Museo de sitio Rancho Don Chuy, la cobertura del aluvión se intensifica; aparecen esporádicos afloramientos que permiten reportar recurrentes areniscas de playa que pasan a areniscas conglomeráticas grises y conglomerados polimícticos cuyos clastos se observan bien redondeados a subredondeados, que a su vez contienen maderas fósiles. De manera paralela a estas unidades, se describe una secuencia de areniscas que cambian gradualmente a areniscas conglomeráticas, después a areniscas bien

clasificadas y a conglomerados. Se observan cambios similares en la granulometría de las areniscas y conglomerados, existe una tendencia ocasional de arenas poco clasificadas que pasan a clasificadas; algunas areniscas conglomeráticas están respaldadas por arenas limosas y cambian lateralmente a areniscas con estratificación cruzada moderadamente bien clasificada, o a conglomerado. En las cercanías del lugar conocido como La Isla, se reportan maderas fósiles en estratos de arenisca con estratificación cruzada y areniscas conglomeráticas polimícticas de granos subredondeados a redondeados (Fig. 11).



Figura 11. A) Secuencia de calcarenitas, areniscas conglomeráticas y areniscas con estratificación cruzada. B) Arenisca conglomerática rojiza. C) Arenisca incipientemente conglomerática de grano medio - fino. D) Arenisca con madera fósil embebida.

- III. Se reportan secuencias conformadas por areniscas oxidadas color ocre de grano fino - medio, bien clasificadas e intercaladas con areniscas conglomeráticas de matriz de grano medio - grueso y sedimentos margosos que contienen concreciones calcáreas tipo septaria y ocasionalmente amonites que han sido identificados como *Sphenodiscus* y *Discoscaphites* de edad Coniaciano - Maastrichtiano (Capitán-López, 2021). La secuencia pasa gradualmente a unidades de calcarenitas parcialmente conglomeráticas con matriz arenosa de grano medio a grueso que incluyen abundantes bivalvos y gasterópodos de facies somera y alta energía y que

es cubierta por sedimentos aluviales recientes. Esta secuencia aflora nuevamente como calizas que incluyen bivalvos, espinas y mandíbulas de peces y dientes de tiburón en la zona del arroyo El Chalino, donde se intercalan con calizas arenosas fuertemente retrabajadas con fracturas rellenas por yeso y calcita (Fig. 12).



Figura 12. A) Acercamiento a una fractura rellena con evaporitas (yesos). B) Calizas que contienen bivalvos y dientes de tiburón. C) Detalle del diente de tiburón.

- IV. Iniciando en el lugar conocido localmente como El Presón, frente al predio de Las Malvinas, se reporta una sucesión de areniscas oxidadas, bien clasificadas de color verde - grisáceo y marrón - rojizo cuyo contenido en carbonato de calcio varía constantemente. Estos afloramientos se encuentran cubiertos irregularmente por el aluvión de sedimentos recientes, dejándolos observar debido al patrón de drenaje y a condiciones de erosión diferencial; a medida que se avanza se encuentran calcarenitas oxidadas de color café - marrón con incipientes yesos que son soportadas por margas, calizas arenosas parcialmente conglomeráticas de color gris con matriz de grano grueso, areniscas moderadamente clasificadas que contienen concreciones arenosas y bivalvos, calcarenitas de color marrón - rojizo con bivalvos y calizas nodulares. Posteriormente, se observa predominancia de areniscas de grano medio y color café - rojizo que están en contacto con

conglomerados color café, de matriz de grano medio a grueso y clastos subredondeados a redondeados. En esta parte de la secuencia los fósiles de maderas se vuelven particularmente abundantes y continúan los afloramientos de arenisca ligeramente conglomerática de color gris - blanco - ocre y conglomerados polimícticos en contacto con arenas que tienen estratificación cruzada, margas y yesos.

Antes de llegar al cerco que marca el límite sur de la propiedad, aflora una secuencia volcánica previamente reportada (Méndez-Díaz, 2018) con emplazamiento concordante a la estratificación y parcialmente cubierta por el aluvión, que se habían asignado a volcanismo del Terciario; sin embargo, se tenía la duda de sus relaciones de campo y edad. Esta secuencia se encuentra respaldada por arenas oxidadas intercaladas con arenas margosas que presentan abundantes concreciones calcáreas y fracturas rellenas de yeso que cambian gradualmente a evaporitas; estas alternancias son respaldadas nuevamente por areniscas grises de grano fino a grueso con estratificación cruzada y nódulos arenosos (Fig. 13).



Figura 13. A) Arenisca oxidada bien clasificada. B) Calcarenitas embebidas en arenas limosas. C) Conglomerado polimíctico. D) Secuencia volcánica de izquierda a derecha: Toba andesítica fracturada con relleno evaporítico, toba caolinizada indeterminada y toba félsica.

- V. Se observan areniscas con estratificación cruzada y areniscas conglomeráticas oxidadas que incluyen clastos reabajados y abundantes fragmentos de maderas fósiles que fueron transportados del continente al escenario fluvio - deltaico y de playa. Cerca del límite sur de la propiedad se observa nuevamente la secuencia volcánica reportada con anterioridad (Fig. 14).



Figura 14. A) Tronco fósil rodeado por limos. B) Secuencia de arenisca con estratificación cruzada y arenisca conglomerática.

- VI. Esta región del área de estudio en particular corresponde a sedimentos aluviales recientes que sepultan casi totalmente la secuencia cretácica previamente descrita; sin embargo, cerca del lugar conocido como La Mojonera, aflora una secuencia de areniscas conglomeráticas oxidadas de grano medio con presencia de nódulos calcáreos y parches ovoides de areniscas concrecionales con mayor concentración de carbonato de calcio, que se intercalan con arenas limosas, areniscas mal clasificadas y areniscas incipientemente conglomeráticas de grano fino a medio con estratificación cruzada.

En el extremo sur de este trayecto, en un lugar denominado El Montículo, por su morfología sobresaliente en comparación a la topografía plana que lo rodea; se observa una pequeña secuencia de areniscas oxidadas con estratificación cruzada, conglomerados polimícticos de grano grueso y subredondeado a bien redondeado, y areniscas mal clasificadas de grano fino a medio. Ambas secuencias presentan abundante material fósil, principalmente fragmentos de maderas que en ocasiones se ha advertido la presencia de estos *debris* en el aluvión reciente, significando saqueo ilegal de estas piezas de sus respectivos afloramientos, situación reportada a los dueños del predio. En esta zona, se observa un ligero cambio de directriz de los estratos, pasando de Este - Oeste a ser WSW - ENE (Fig. 15).



Figura 15. A) Afloramiento de arenisca fuertemente erosionado en un canal seco. B) Arenisca mal clasificada de grano fino - medio.

- VII. La terraza aluvial y el aluvión reciente, así como la densa vegetación arbustiva en esta parte sureste de la propiedad, condicionan en gran medida las observaciones de los sedimentos cretácicos; sin embargo, el arroyo que entra y sale de la propiedad en este lugar, permite detallar la litología y toma de datos estructurales de las secuencias cubiertas.

Cerca del camino que conecta a la vía principal al noreste de la propiedad y que conduce al poblado de Chorreras, aflora como un parche de 10 m de diámetro un conjunto de rocas volcánicas de afinidad máfica (basaltos) que incluyen grandes cristales de color oscuro (piroxenos?) y cuyas relaciones de campo no se observan debido a que este afloramiento está bordeado por el aluvión reciente. Estos basaltos requieren de un estudio petrológico, petrográfico, geoquímico y geocronológico adicional, así como la determinación de sus relaciones de campo implementando herramientas geofísicas, dado que no se ha observado esta litología en las cercanías.

En las inmediaciones del arroyo citado anteriormente, se observan arenas limosas que alternan con areniscas de estratificación cruzada que incluyen lentes de calcarenita y areniscas conglomeráticas. Esta región sureste en particular, presenta un cambio de orientación estructural abrupto, pues los estratos poseen rumbos de orientación general SSW - NNE contra la orientación del resto del área de estudio, caracterizada por rumbos de orientación Este - Oeste (Fig. 16).



*Figura 16. A) Arenisca nodular en discordancia con la terraza aluvial. B) Estratos de arenisca de orientación SSW - NNE.*

## 2.2 Análisis geométrico - descriptivo

### 2.2.1 Población de fallas

La región se caracteriza por un profuso fallamiento vertical, predominantemente de tipo sinistral sin evidencia de movimientos oblicuos, y tal como se muestra en el diagrama de roseta (Fig. 17), la población de fallas presenta una orientación preferencial NW. Las fallas generan un desplazamiento horizontal entre unidades que varía entre ~5 y 50 m, y por lo general su traza puede seguirse en superficie. En el caso de las fallas de mayor desplazamiento puede observarse la flexión de estratos en la zona de falla. A continuación, se realiza una breve descripción de las fallas reconocidas, indicando la dirección de la falla y la extensión aproximada de su traza en superficie. Esta descripción se acompaña con un mapa de fallas, donde se presentan las principales evidencias con vista en planta de estos desplazamientos (Fig. 17). Las mediciones de las fallas pueden encontrarse en el *Anexo I*.

Al norte del área de estudio, se localiza una falla dextral N13E que desplaza unidades de arenisca a lo largo de un lineamiento de 169 m (F-1); aproximadamente a 1.2 km al este se encuentra una falla sinistral N09W con lineamiento de 140 m (F-2). A 0.2 km al sureste de la primera falla dextral mencionada, se observa evidencia limitada de una posible falla normal cuyo plano aproximado es N83W / 80° SW (F-3), su extensión e identidad permanecen inferidas.

Al sur de las fallas mencionadas y cerca de las instalaciones del Museo de Sitio, se localiza una de las fallas sinistral reconocidas de mayor extensión, con orientación N45W sobre un lineamiento de 856 m (F-4). Alrededor de 0.7 km al este, se localiza una falla dextral N37E (F-5) y cuatro fallas sinistral de orientación N57W (F-6), N51W (F-7), N38W (F-8) y N32W (F-9), con lineamientos entre 80 y 170 m. Ligeramente al sur de ellas, se encuentra una falla sinistral N38W con un lineamiento de 297 m (F-10). Casi de manera paralela y 0.3 km al este, se observa una falla sinistral N35W (F-11) que presenta ligeros cambios de dirección que se interpretan como una estructura *right step* (Woodcock y Schubert, 1994); esta falla presenta una traza en superficie de ~989 m y cerca de su parte meridional se encuentra una falla sinistral de orientación N69W (F-12) con lineamiento de 307 m. Este último par de fallas se presentan como una estructura de tipo anastomosado (*anastomosing o braided*; Woodcock y Schubert, *op. cit.*).

Finalmente, en la porción meridional de los afloramientos, se localizan dos fallas sinistral de dirección N23W (F-13) y N44W (F-14) con lineamientos de ~320 m.

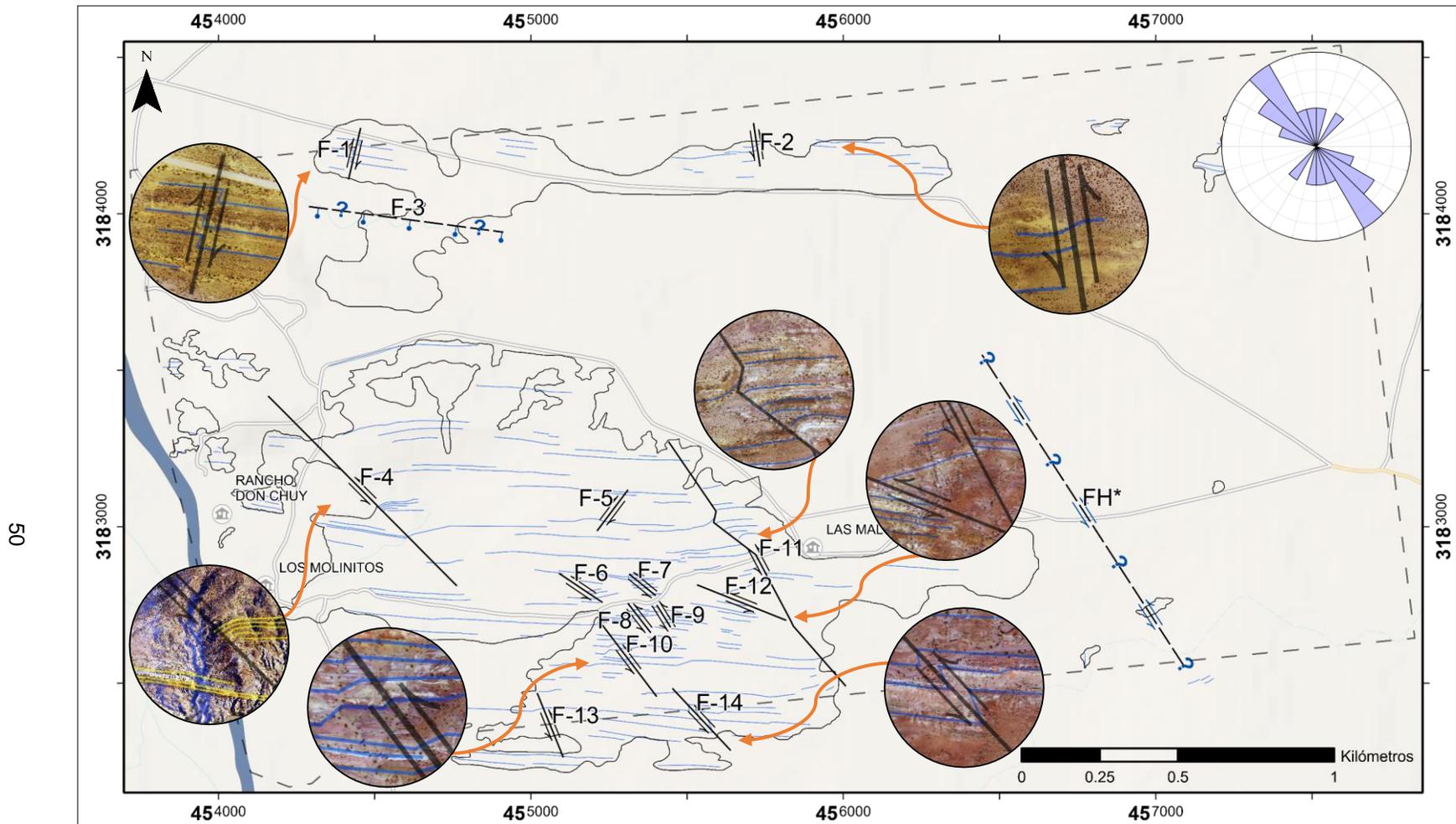


Figura 17. Mapa de fallas. Lineamientos azules (y amarillos en F-4) reflejan el rumbo aproximado de los estratos. Evidencia de las fallas principales con vista en planta se presenta dentro de círculos. El diagrama de roseta muestra la dirección preferencial de la población de fallas.

## 2.2.2 Pliegues

A partir del subconjunto de datos A - B (Fig. 18; Tabla 1), se describe un sinclinal cuyo ángulo interflanco de  $39^\circ$  lo clasifica como un pliegue cerrado; la inclinación del plano axial lo clasifica como un pliegue vertical y la inclinación (*plunge*) del eje sugiere que se trata de un pliegue horizontal (Fleuty, 1964). Debido a su posición geográfica es sugerido que se denomine como **Sinclinal El Chalino**.

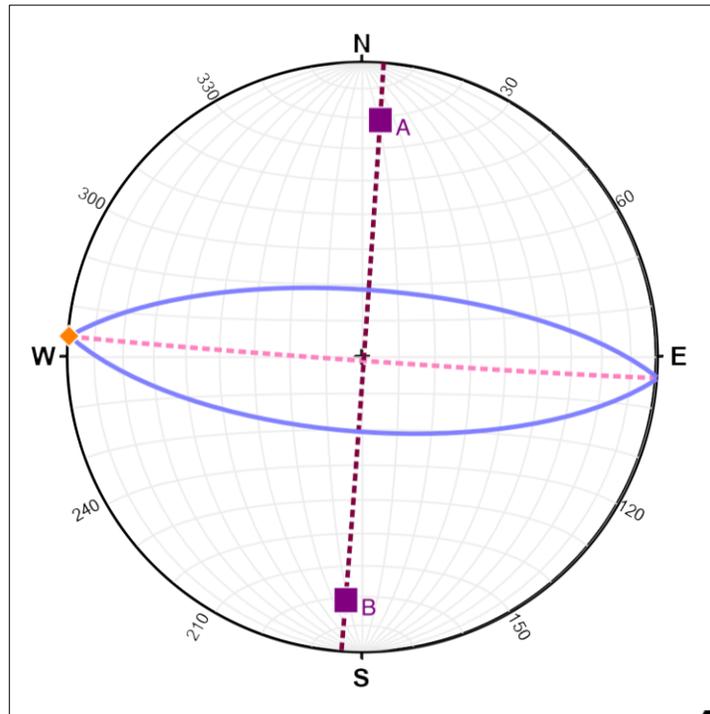


Figura 18. Red estereográfica del Sinclinal El Chalino. Los flancos del pliegue se representan con líneas continuas de color morado y sus polos con cuadrados violeta; el eje con un punto naranja; el plano axial con una línea punteada rosa; el círculo mayor  $P_i$  con una línea punteada violeta.

Tabla 1. Parámetros geométricos del Sinclinal El Chalino.

<b>Sinclinal El Chalino</b>	
Ángulo interflanco	$39^\circ$
Plano axial	$094^\circ / 89^\circ$ SW
Orientación del flanco norte	$094^\circ / 69^\circ$ SW
Orientación del flanco sur	$274^\circ / 71^\circ$ NE
Trend y plunge del eje del pliegue	$274^\circ / 0^\circ$

Los datos del subconjunto B - C (Fig. 19; Tabla 2) muestran un anticlinal de tipo cerrado según el ángulo interflanco de  $31^\circ$ ; por la inclinación del plano axial se clasifica como un pliegue vertical, mientras que el eje lo clasifica como un pliegue horizontal (Fleuty, 1964). Existe un anticlinal nombrado Anticlinal Tres Hermanos en la carta Trancas (SGM, 2019); sin embargo, dado que carece de una descripción y que difiere en su ubicación con los datos de este trabajo, es sugerido que se denomine **Anticlinal La Labor**.

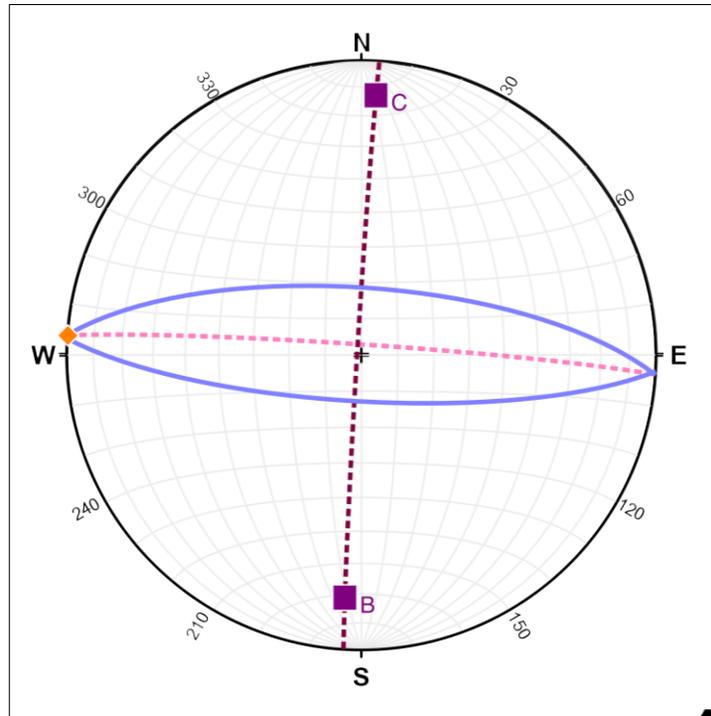


Figura 19. Red estereográfica del Anticlinal La Labor. Los flancos del pliegue se representan con líneas continuas de color morado y sus polos con cuadrados violeta; el eje con un punto naranja; el plano axial con una línea punteada rosa; el círculo mayor  $P_i$  con una línea punteada violeta

Tabla 2. Parámetros geométricos del Anticlinal La Labor.

<b>Anticlinal La Labor</b>	
Ángulo interflanco	$31^\circ$
Plano axial	$274^\circ / 87^\circ$ NE
Orientación del flanco norte	$274^\circ / 71^\circ$ NE
Orientación del flanco sur	$093^\circ / 77^\circ$ SW
Trend y plunge del eje del pliegue	$273^\circ / 0^\circ$

### 2.3 Petrología y petrografía de los productos volcánicos

Los productos volcánicos que afloran concordantemente en la región meridional del área de estudio comprenden una secuencia félsica - intermedia de continuidad lateral por ~1.3 km y espesor variable de 6 a 12 m, compuesta por tobas de composición intermedia de color gris con fracturas rellenas por yeso, tobas caolinizadas de color crema mal preservadas y tobas alteradas de composición riolítica color rosa - gris (Fig. 20).

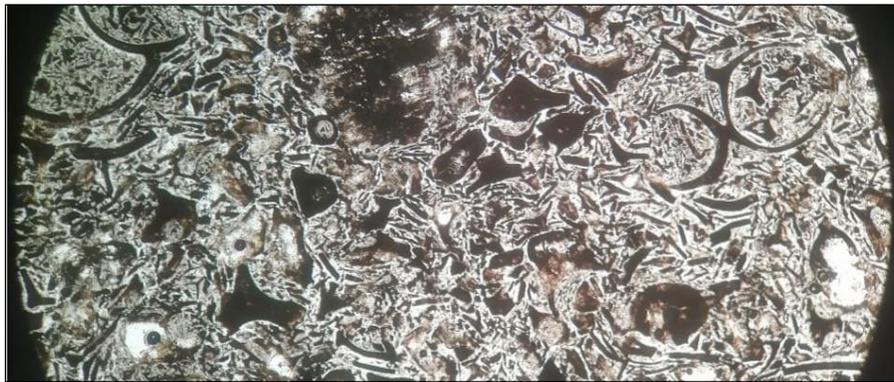


*Figura 20. Secuencia de productos volcánicos. De derecha a izquierda: Toba riolítica, toba caolinizada mal preservada y toba intermedia de color gris.*

La muestra recolectada corresponde a una toba riolítica alterada de color rosa - gris de textura afanítica con fenocristales de ~0.2 mm y vesículas alineadas a la estratificación (Fig. 21); esta corresponde a la cima de la secuencia mencionada y ha sido identificada a partir de su lámina delgada como una toba piroclástica félsica de ceniza de caída que presenta astillas de vidrio no deformadas y una matriz de ceniza más fina zeolitizada - argilizada (Fig. 22).



*Figura 21. Muestra de mano perteneciente a la toba félsica analizada.*



*Figura 22. Fotomicrografía de la lámina delgada correspondiente a la toba félsica RDCH-1.*

## 2.4 Geocronología U - Pb

De las 13 mediciones isotópicas realizadas, se han elegido seis para calcular la edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . Las mediciones descartadas no fueron consideradas por su desviación de la línea de concordia, o en el caso de las estimaciones más antiguas por tratarse de antecristales que podrían haber crecido en la cámara magmática y permanecer en fase sólida antes de la explosión piroclástica. Estos antecristales o núcleos, son apreciables en las imágenes de catodoluminiscencia post-ablación, particularmente en los zircones Z = 1, 3 y 4 (Fig. 23).

Los resultados geocronométricos por  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , indican una edad media ponderada para el miembro superior de la secuencia volcánica de  $68.9 \pm 1.3$  Ma con un factor de dispersión MSWD de 1.6 (*Mean Square of the Weighted Deviates*), lo que revela una edad para la explosión piroclástica de Maastrichtiano. Al ser el cuerpo volcánico concordante con la estratificación, se asigna su edad al resto de la secuencia sedimentaria.

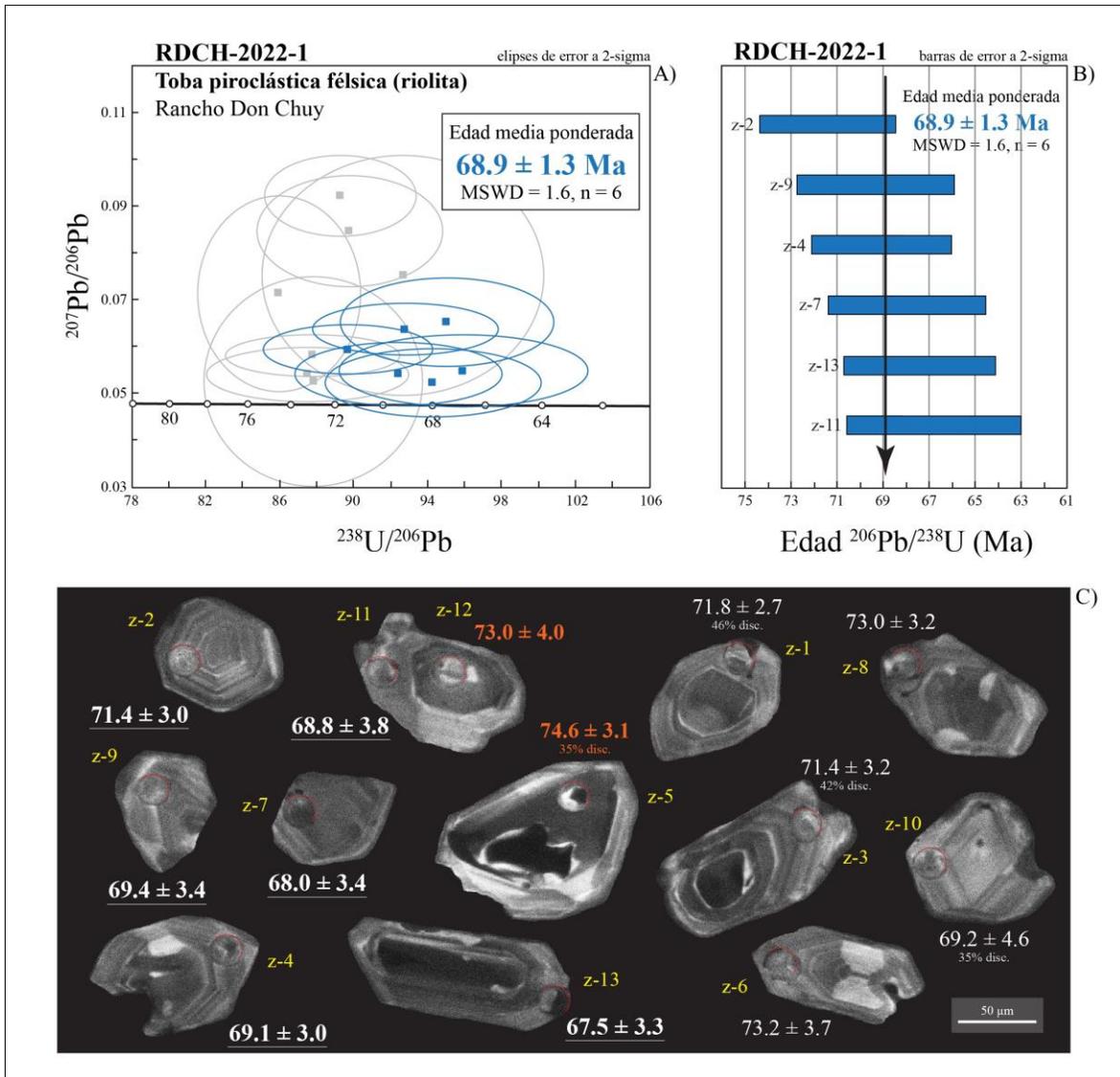


Figura 23. Gráficos de datos U - Pb y fotomicrografías por catodoluminiscencia para la muestra de zircones RDCH-1. A) Diagrama de concordia Tera - Wasserburg: Se muestran los datos analizados con su correspondiente elipse de error. Los datos de color azul fueron utilizados para el cálculo de edad, los de color gris fueron descartados. B) Diagrama de edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada: Cada barra azul representa una de las seis mediciones consideradas para el cálculo de edad. C) Imágenes por catodoluminiscencia post-ablación: Un medio círculo rojo muestra el lugar de ablación de 24  $\mu\text{m}$ ; las edades subrayadas en blanco son las utilizadas para calcular la edad media ponderada de la muestra.

## 2.5 Cartografía geológica

Los resultados obtenidos del levantamiento geológico, el análisis estructural y la geocronología U - Pb, permitieron generar una columna estratigráfica sintética (Fig. 24), así como un mapa geológico - estructural actualizado (Fig. 25; Fig. 26) y una nueva sección geológica Norte - Sur que permite observar la deformación de los estratos y aclarar la tipología de los pliegues (Fig. 27). El plano geológico puede encontrarse con más detalle e información adicional en el *Anexo II*.

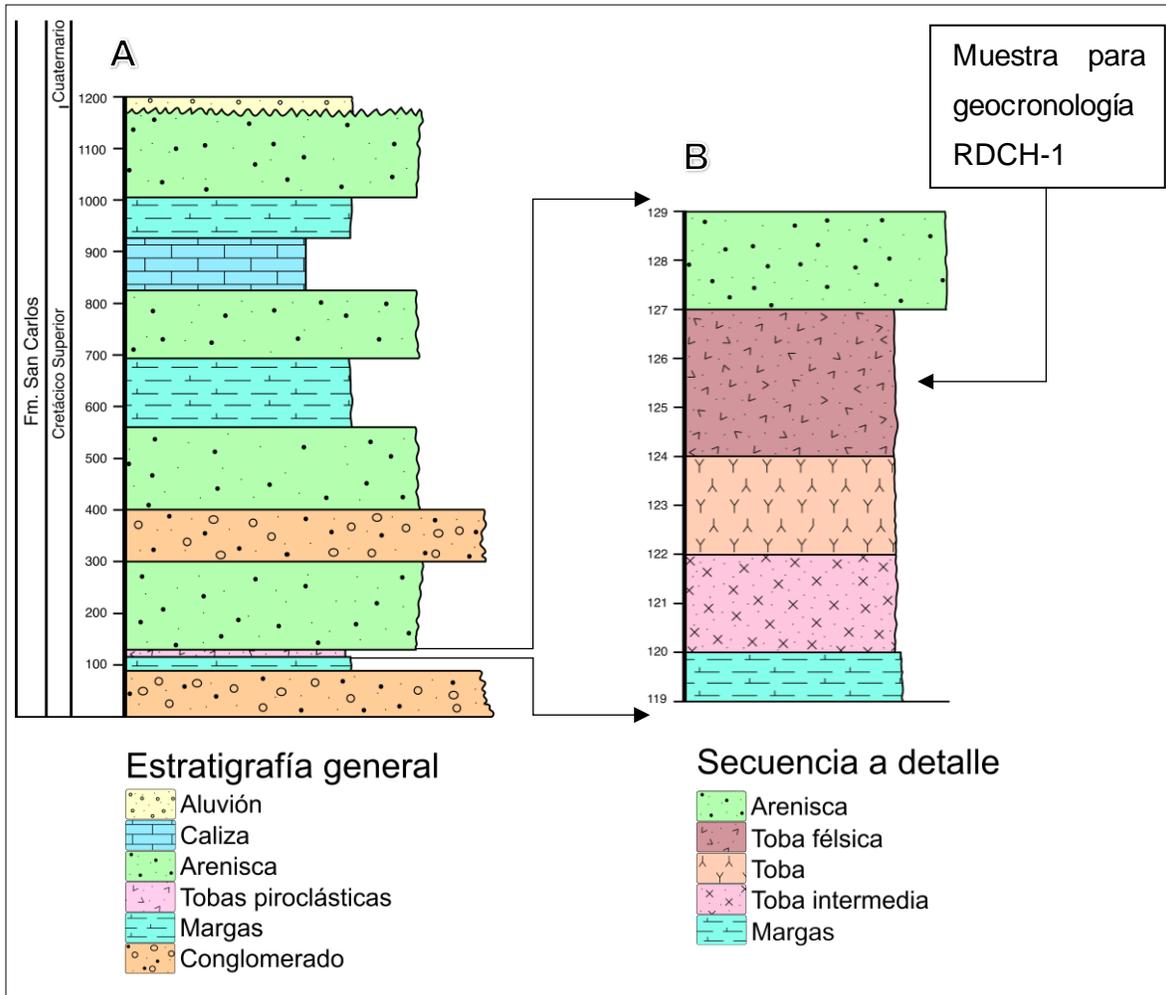


Figura 24. A) Columna estratigráfica sintética del área de estudio. B) Columna estratigráfica a detalle de la secuencia de depósitos volcánicos.

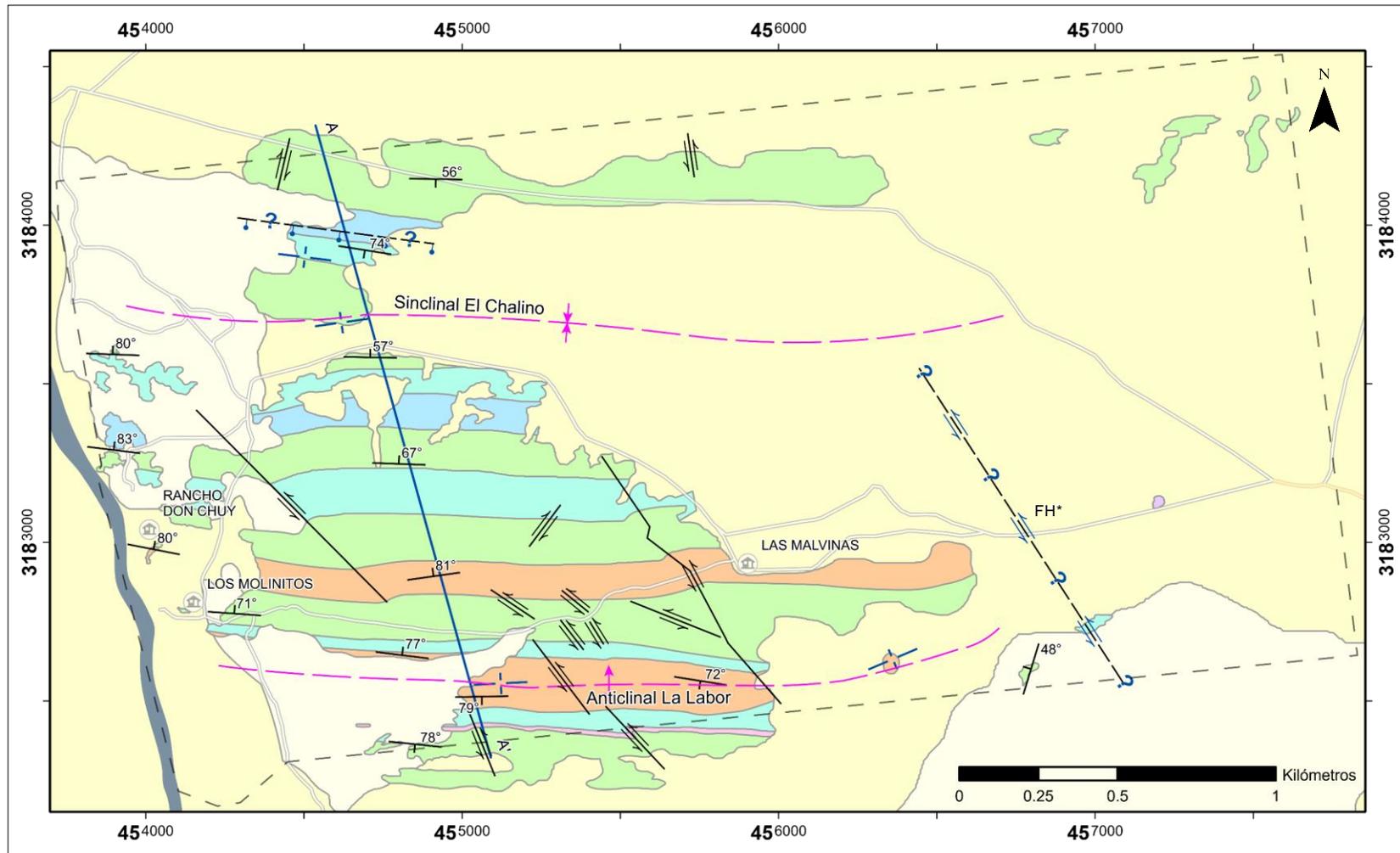
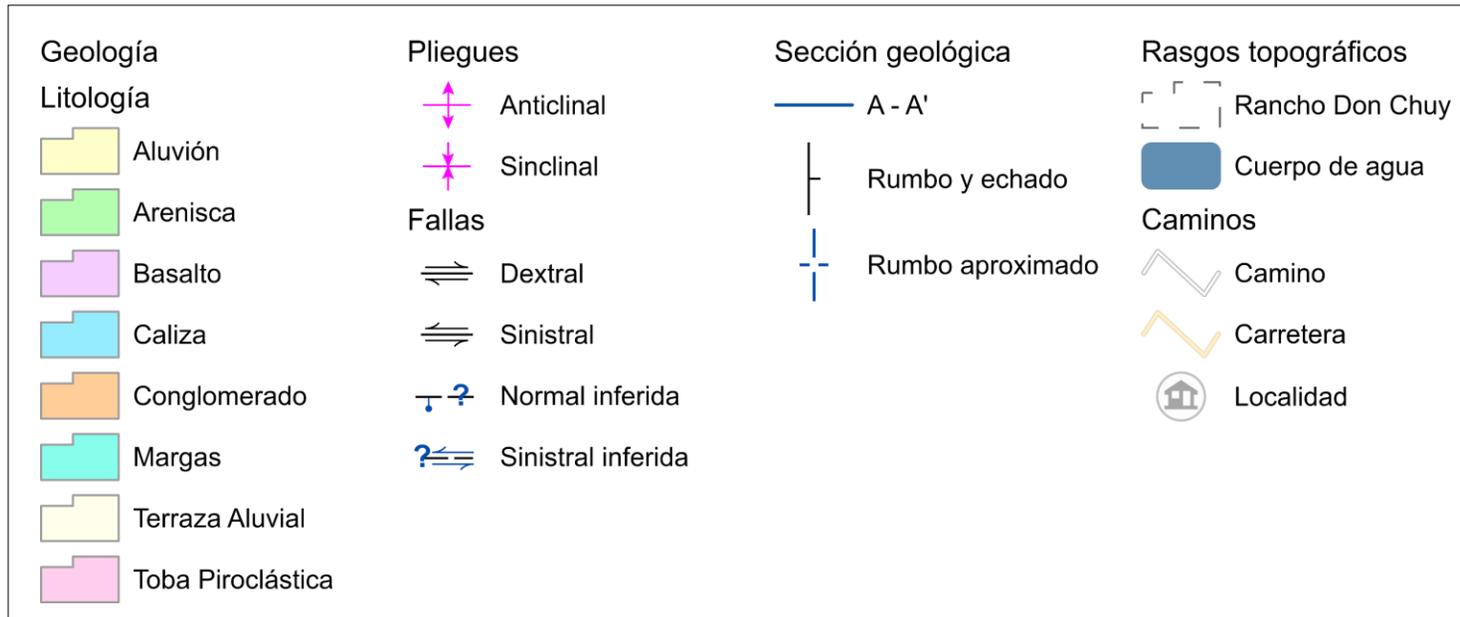


Figura 25. Mapa geológico - estructural a detalle del área de estudio.





89

Figura 26. Simbología del mapa geológico - estructural (Fig. 25).

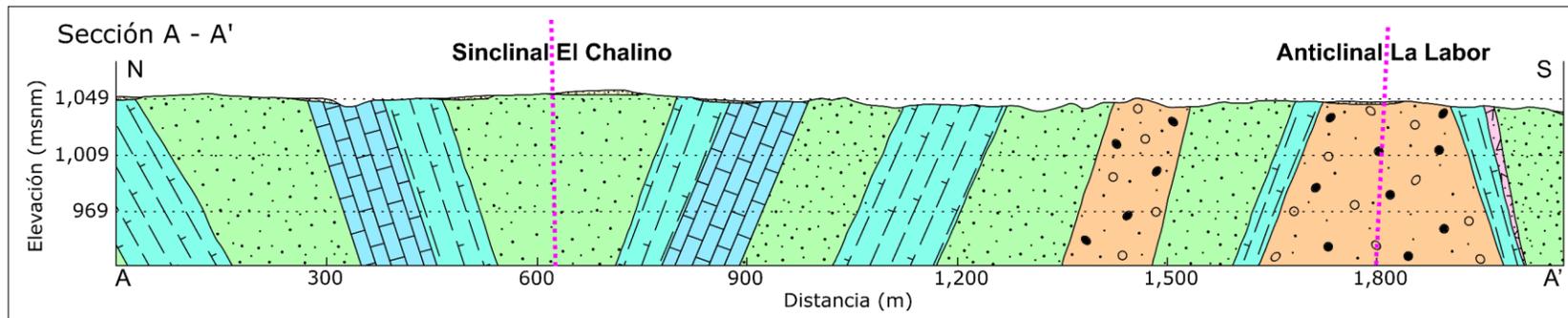


Figura 27. Sección geológica Norte - Sur transversal a los pliegues descritos. Se presentan los ejes de cada pliegue con líneas punteadas de color rosa. Guías de altitud cada 40 metros (msnm) como líneas punteadas horizontales de color negro. Escala vertical exagerada 2:1.



### III. Discusión

#### 3.1 Geología estructural y tectónica

La cartografía geológica - estructural realizada y presentada en los apartados anteriores revela que la sucesión sedimentaria, que anteriormente se había propuesto como una columna simple, no lo es debido a la deformación compresiva y en realidad forma parte de un sistema de pliegues de orientación Este - Oeste. Iniciando en las inmediaciones del cerco norte de la propiedad y avanzando hacia el sur, los estratos presentan inclinaciones que varían entre 55° y 74° con vergencia hacia el sur; posteriormente, en un punto medio conocido como el Valle del Presón (28°46'48" N), se encuentra enterrado bajo el aluvión la traza del eje del **Sinclinal El Chalino**, aunque cabe mencionar que es posible encontrar esporádicos afloramientos de arenisca que sobresalen mínimamente del relleno. A partir de esta zona y hasta un punto medio de los conglomerados en la latitud del Montículo (28°46'11" N), los estratos presentan una inclinación entre 46° y 84° (70° en promedio) con vergencia al norte. Es en esta zona meridional del área de estudio donde se localiza la traza del **Anticlinal La Labor**; a partir de aquí los estratos nuevamente se inclinan entre 72° y 80° al sur.

La interpretación y análisis de estos datos indica un sistema de pliegues cerrados conformado por un sinclinal y un anticlinal paralelos de orientación Este - Oeste con plano axial vertical y un eje de pliegue o charnela horizontal. Los flancos geométricos de este sistema presentan por consecuencia una orientación similar entre sí, y tienen inclinaciones cercanas a los 70° (Fig. 18, Fig. 19, Fig. 25, Fig. 26, Fig. 27, Tabla 1, Tabla 2).

Como se mencionó en el apartado del *Levantamiento geológico* y se observó en el mapa geológico - estructural (Fig. 25), en la sección VI de la propiedad (Fig. 9) se observa un cambio en la dirección de los estratos, pues los rumbos (con notación en acimut en este trabajo) empiezan a girar en sentido antihorario aproximadamente 30°, pasando de Este - Oeste a WSW - ENE. En la sección VII, el cambio de dirección alcanza los 80°, convirtiéndose prácticamente en Norte - Sur. No existe evidencia sólida acerca de la causa del abrupto cambio en la orientación de los estratos en esta zona, pues los afloramientos hacia el margen este de la propiedad desaparecen debajo de la cobertura aluvial reciente; sin embargo, un fenómeno similar puede observarse en las zonas de falla, donde el movimiento de los bloques provoca flexión en los estratos, resultando en cambios locales en su dirección (Fig. 28).

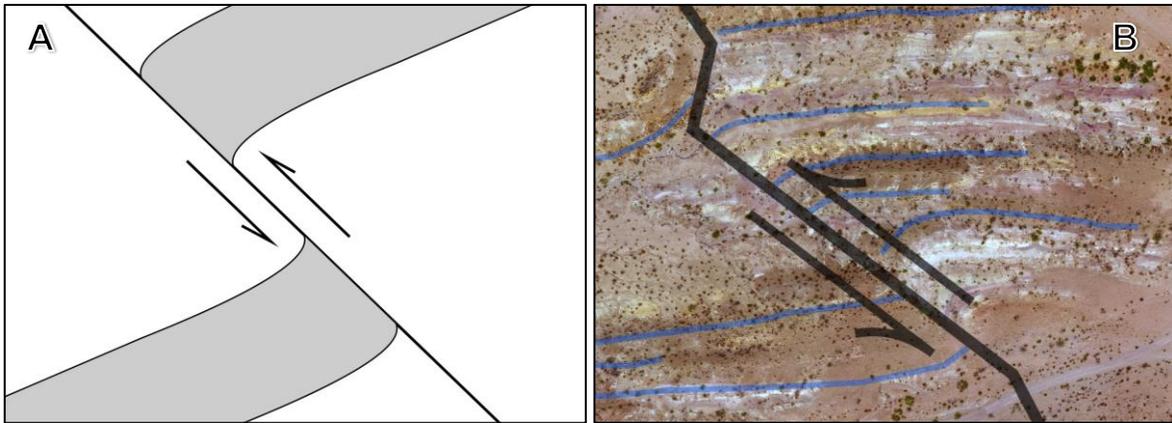


Figura 28. A) Flexión de estratos en una zona de falla (Echeveste, 2017). B) Ejemplo de flexión de estratos observado en una de las fallas principales reconocidas en el área. Líneas azules indican la dirección del rumbo de los estratos.

Es por ello que, y dada la configuración estructural del área, se infiere que el cambio de rumbo podría ser evidencia de flexión de estratos por una posible falla sinistral de orientación NNW (indicada en la Fig. 17 y Fig. 25 como FH\*) que se encuentra enterrada bajo sedimentos aluviales y fluviales recientes.

### 3.1.1 Relación con la Cuenca de Chihuahua y la Fm. San Carlos

Ha sido evidenciado que los afloramientos no sólo están plegados, sino también profusamente fallados. Por principio de sucesión de eventos geológicos, queda claro que históricamente los sedimentos del Cretácico fueron plegados y posteriormente fallados. La geología que envuelve al área de estudio, la edad de la base de la columna estratigráfica (Maastrichtiano,  $68.9 \pm 1.3$  Ma) y su relación con la Cuenca de Chihuahua (CT), indican que como se esperaba, el plegamiento ocurre en algún punto de la deformación Laramide (84 - 78 Ma hasta hace 48 Ma) después del depósito de la toba analizada, como resultado de la inversión de la cuenca. Recapitulando el *Marco geológico* de este trabajo: Haenggi (2002) menciona que la cuenca ya había dejado de existir para el Campaniano temprano (~80 Ma) y que las formaciones San Carlos y Picacho se habrían depositado ya no en la CT, sino en la Cuenca Tornillo en Texas, localizada en el margen este de la CT. Lehman (1985, *in*: Lehman, 1991) ha señalado que las formaciones bajo estos nombres son parcialmente equivalentes a parte de la secuencia de siete formaciones descritas en la Cuenca Tornillo, siendo la Fm. San Carlos equivalente a la Fm. Aguja (SGM, 2014). A pesar de que estas formaciones se encuentran formalmente restringidas al margen este de la CT en México y Texas, existen numerosos reportes de afloramientos asociados a la Fm. San Carlos dentro del área de la CT (SGM, 2010), incluyendo la sucesión sedimentaria objeto de estudio.

Partiendo de esta premisa, y ya que los afloramientos de este trabajo se localizan cerca del borde sur de la CT (Fig. 3), es válido suponer que algunas partes de la CT seguían activas a finales del Cretácico (posterior al Campaniano temprano), o que existió una cuenca de antepaís análoga a la Cuenca Tornillo durante este periodo, a medida que el frente oriental de la orogenia Laramide avanzaba. Sea cual sea el caso, es claro que la tectónica que envuelve a estos afloramientos es en cierta medida diferente al de otras formaciones de la CT.

Capitán-López (2021) interpreta a partir de láminas delgadas de la cima de la columna estratigráfica (**Sinclinal El Chalino**), condiciones de depósito relacionadas a un borde activo que presenta considerables aportes por erosión, materiales ígneos de composición intermedia y actividad volcánica manifestada como tobas. Estos resultados son congruentes con lo obtenido por González-Moreno (2015) mediante el análisis geoquímico de elementos mayores y traza de areniscas recolectadas en el D.E.C.A Parque Cretácico, en cuyo trabajo determina que los clastos de las rocas analizadas tienden a ser de composición intermedia y pertenecen a un arco de islas continental.

Existe un reporte en afloramientos cercanos posiblemente emparentados a nuestra área de estudio (D.E.C.A.) de *Javelinoxylon* (García-Hernández *et al.*, 2016), una especie de malvácea dicotiledónea que fue descrita originalmente por Wheeler y colaboradores (1994) en la Fm. Javelina del Parque Nacional Big Bend en Texas. Esta formación se depositó en la Cuenca Tornillo y presenta según Lehman (1991) condiciones de depósito que son tectónicamente similares a lo descrito por Capitán-López (*op. cit.*), aunque los de esta parte de Chihuahua pertenecen a un depósito de plataforma, a diferencia de los depósitos fluviales de la Fm. Javelina. En un trabajo posterior, Lehman y colaboradores (2006) obtienen una edad de  $69 \pm 0.9$  Ma (Maastrichtiano) para la Fm. Javelina mediante geocronología U - Pb de una toba de caída de escaso espesor que se acumuló en una posible depresión en una planicie de inundación; debe hacerse notar que esta edad es muy similar a la obtenida por métodos geocronométricos U- Pb en este trabajo ( $68.9 \pm 1.3$  Ma).

Con base en estas evidencias de investigaciones previas, así como en los puntos planteados en el párrafo anterior a ellas, se considera que hay razón suficiente para suponer que estos afloramientos guardan más relación (al menos en su contexto tectónico) y temporalidad con la Fm. Javelina, que ya ha sido reportada en las inmediaciones de la Sierra El Morrión (Ruiz-Vázquez, 2017), y no con la Fm. San Carlos, cuyo rango estratigráfico ha sido extendido como máximo hasta Santoniano y Campaniano (SGM, 2010) ni su equivalente: la Fm. Aguja. Por supuesto, la discusión acerca de la estratigrafía local excede el alcance de este trabajo, por lo que investigaciones futuras podrían esclarecer las relaciones estratigráficas de estos afloramientos.

### 3.1.2 Plegamiento

Independientemente de sus relaciones con otras formaciones, este sistema de pliegues difiere de otros en la región, principalmente del Sinclinal San José (Fig. 30) que conforma el valle entre la Sierra de Gómez - Sierra Cuesta El Infierno y la Sierra El Morrión - La Gloria (SGM, 2019). Al igual que la mayoría de las estructuras en el Cinturón Plegado de Chihuahua (CPCH), este sinclinal presenta una dirección NNW - SSE que cambia gradualmente a Norte - Sur en las inmediaciones del D.E.C.A. Parque Cretácico A.C. (Flores-Castro *et al.*, 2011). Si se consideran los pliegues descritos en este trabajo como una extensión del sistema que conforma el Sinclinal San José, es evidente que al igual que las prolongaciones meridionales de la Sierra Cuesta El Infierno (SCI) y la Sierra El Morrión (Sierra La Gloria), los pliegues del área de estudio rompen abruptamente la tendencia regional NNW - SSE y Norte - Sur para orientarse Este - Oeste. En el caso de la SCI el cambio de dirección es menos abrupto, girando solamente hasta NW - SE, mientras que para la Sierra La Gloria, el cambio es mucho mayor y se acerca a WNW - ESE; cabe mencionar que ninguno de estos rasgos presenta el cambio de orientación a Norte - Sur observado en el D.E.C.A. Parque Cretácico (Fig. 30, indicado con un triángulo azul).

En cuanto a la magnitud del plegamiento, también existen diferencias notables que contrastan la porción septentrional del sistema representada por el Sinclinal San José y la porción meridional representada por el Sinclinal El Chalino y el Anticlinal La Labor. En el primer caso no existe una descripción geométrica detallada, Hennings (1994) no provee detalles acerca del plegamiento de las rocas del Cretácico Superior en el valle entre las Sierras de Gómez y El Morrión; sin embargo, una inspección de los datos publicados en la carta geológica Trancas (SGM, 2019) sugiere que podría tratarse de un pliegue con flancos de  $\sim 30 - 50^\circ$  de inclinación, lo que lo catalogaría como un pliegue de tipo suave a abierto según Fleuty (1964). Esto contrasta fuertemente con los pliegues de tipo cerrado del área de estudio, pues la longitud de onda en ellos se aproxima a 2.4 km mientras que, en el caso del Sinclinal San José, esta sería (según la información disponible a la fecha) superior a 4 km. Flores-Castro (comunicación personal, 2023) describe que la zona donde se realizaron los trabajos del D.E.C.A. Parque Cretácico (Fig. 30, indicado con un triángulo azul) presenta estratos cuya inclinación suele ser menor a  $45^\circ$  y carece de evidencia que indique la existencia de múltiples flancos de pliegues (Fig. 29).



*Figura 29. Estratos suavemente inclinados en las inmediaciones del D.E.C.A. Parque Cretácico. Imagen cortesía del Dr. K. Flores-Castro.*

Oviedo-Padrón (2008) asocia el cambio de dirección de la SCI a una posible reactivación de la Cizalla Plomosas con un movimiento de tipo sinistral con una zona de transferencia reactivada llamada Ojo de León (a partir del sistema de fallas del mismo nombre) después de la orogenia Laramide, durante la extensión *Basin & Range* que inició ca. 31 Ma, posterior al depósito de la Secuencia Inferior de la SCI. La secuencia superior, al menos como lo menciona en sus trabajos, sería resultado de volcanismo sintectónico con la extensión.

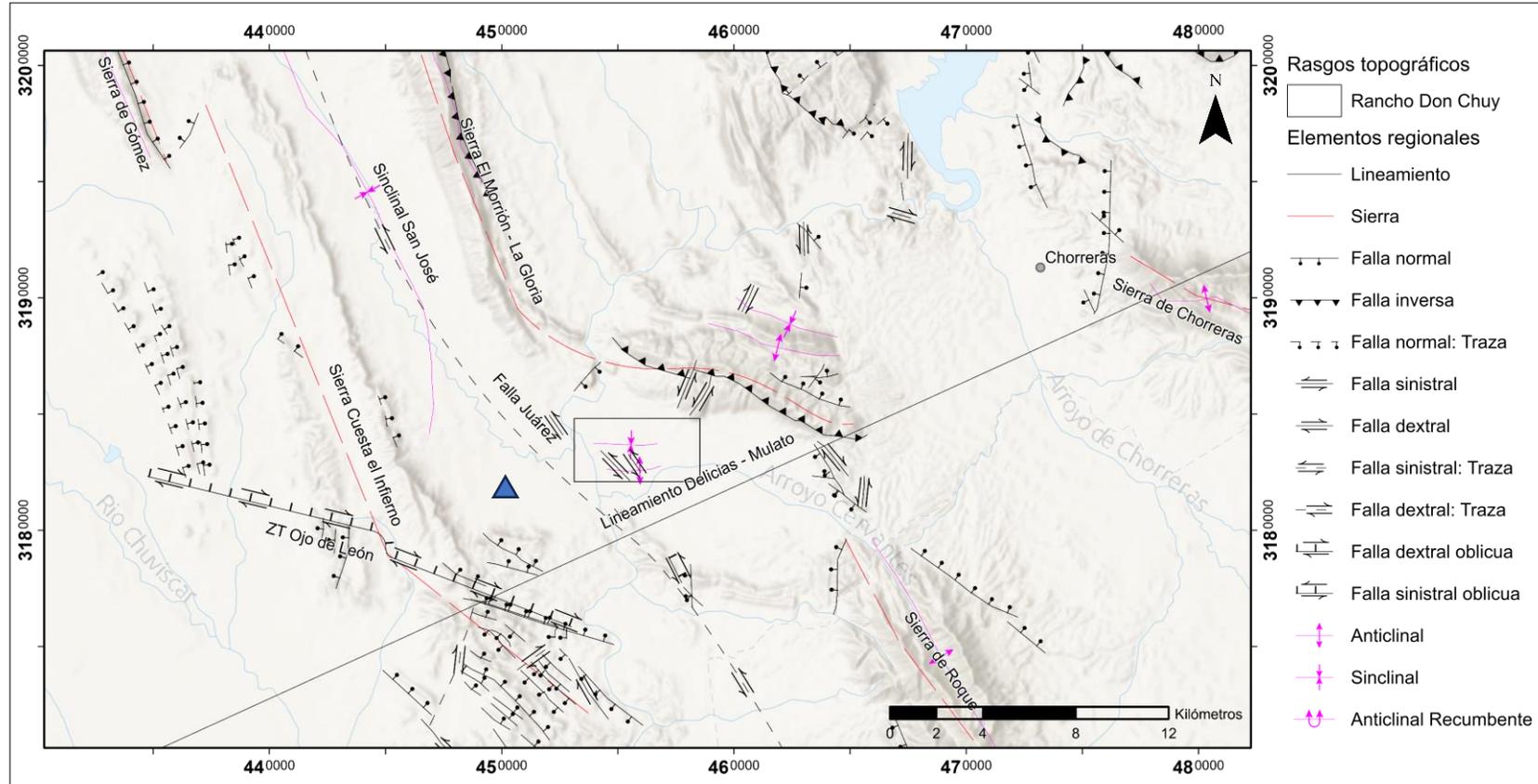


Figura 30. Acercamiento del mapa estructural de la región. El área de estudio de este trabajo se encuentra en un rectángulo, con las fallas reconocidas presentadas de manera sintética, así como los pliegues. Las sierras se representan sobre el relieve con líneas punteadas rojas. Fallas y lineamientos se presentan con su simbología habitual. El D.E.C.A. Parque Cretácico se indica con un triángulo azul.

Franco-Rubio (2007) explica estos cambios de dirección (así como diferencias en el relieve y el paquete sedimentario) con la existencia de un lineamiento N65E denominado Lineamiento Delicias - Mulato (Fig. 30) que asocia a la sutura generada por la colisión entre Laurencia y Gondwana durante el Paleozoico tardío. Este lineamiento habría tenido reactivaciones posteriores con movimientos de tipo dextral y sinistral en secciones diferentes (propone un movimiento dextral en la región de este trabajo, lo que provocaría el cambio de dirección en la SCI y El Morrión). En sintonía con lo señalado por Oviedo-Padrón (2008), se considera que la deformación en el área parece estar más relacionada al levantamiento de Plomosas que al lineamiento Delicias - Mulato.

A partir de estas relaciones entre el sistema de pliegues descrito y las estructuras de la región, se considera posible que la orientación de los mismos sea resultado de la actividad del levantamiento de Plomosas durante la orogenia Laramide en algún punto del Paleógeno. El movimiento sinistral de la Cizalla Plomosas habría girado los pliegues de dirección original NNW - SSE o Norte - Sur, así como ocurrió con la prolongación La Gloria de la Sierra El Morrión, para posteriormente continuar con la deformación durante su reactivación con la extensión de la provincia *Basin & Range*. En cuanto a su relación con el Sinclinal San José, se considera que pertenecen a un mismo sistema, convirtiéndolos en la prolongación meridional del pliegue del valle; la diferencia de longitud de onda de los pliegues descritos en este trabajo no tiene una explicación definitiva; sin embargo, es posible que sea resultado directo de la deformación Laramide, quizá por efecto mismo del levantamiento de Plomosas.

### 3.1.3 Fallamiento

En relación al fallamiento, Oviedo-Padrón (2008) presenta direcciones de extensión ENE - WSW para la parte occidental de la SCI (en esta zona se mantiene la tendencia de las sierras NNW - SSE de la región); para los sistemas de fallas meridionales (cuya tendencia cambia a WNW - NW) calcula una dirección de extensión NE - SW; mientras que para la zona centro - oriental (la más cercana al área de estudio) obtiene extensión en dirección NE - SW y ENE - WSW para la localidad de la Falla Ojo de León, que pasa a extensión Norte - Sur en el Cerro Agujerado, mientras que la Falla Soledad arroja en sus estaciones extensión NE - SW y casi Norte - Sur. A partir de estos hallazgos, Oviedo-Padrón (*op. cit.*) acusa a la zona de transferencia Ojo de León de ser una estructura de basamento pre-jurásica reactivada que perturbó los esfuerzos locales y generó de esta manera la diferencia en dirección entre las partes septentrional y meridional de la SCI, cuando el sistema de esfuerzos regional pasó de compresión ENE a extensión ENE. En el mismo trabajo reporta fallas normales al noreste de la zona de transferencia Ojo de León, mientras que en las laderas de la Sierra La Gloria y De Roque, existen fallas de vergencia opuesta que podrían ser también una expresión de la extensión que propuso para la región de la SCI (Fig. 30). Sin embargo, asumir que las fallas en las laderas de estas sierras son producto de la extensión de la provincia *Basin & Range* es como menos debatible, pues también podrían estar relacionadas a relajamiento al término de la compresión; por ello se sugiere realizar exploración en las inmediaciones, principalmente en la Sierra La Gloria, para reconocer si existen fallas asociadas a la extensión del Terciario y si se propagan a la superficie.

La dirección de las fallas descritas en este trabajo no coincide con prácticamente ninguna reportada en la SCI y en general, casi con ninguna en las inmediaciones de la zona. En las cartas Trancas y San Diego de Alcalá (SGM, 2005, 2019) se reporta una falla oblicua con un componente de movimiento sinistral a ~4 km al sureste del área de estudio, y a ~1 km al noroeste se reporta una falla sinistral, ambas de orientación NNW - SSW y con trazas en superficie cercanas a 1 km (Fig. 29). En múltiples trabajos consultados en esta investigación (Eguiluz de Antuñano, 1984; Muehlberger y Moustafa, 1984; Hennings, 1994; Haenggi, 2001, 2002; Aranda-Gómez *et al.*, 2005; Franco-Rubio, 2007; Oviedo-Padrón, 2008; Oviedo-Padrón *et al.*, 2010) se proponen una serie de estructuras de basamento que han estado involucradas de manera alternante en la evolución del norte de México y el sur de Estados Unidos, generalmente con orientación WNW a NW y algunas de ellas, como la

Falla San Marcos, Falla La Babia, Cizalla Plomosas, que son particularmente relevantes en la evolución geológica de Chihuahua.

Señalar fallas tan grandes como las causantes del fallamiento en el Rancho Don Chuy requiere una mayor cantidad de datos que permitan definir cinemática y dinámicamente el fallamiento, así como su edad de actividad, considerando la incipiente evidencia de esas estructuras dentro del estado de Chihuahua. Como mucho, puede considerarse que el fallamiento descrito, junto a las fallas mencionadas de las cartas Trancas y San Diego de Alcalá (SGM, 2005, 2019), podrían estar relacionadas a una estructura de basamento de naturaleza similar a la Falla Juárez (Eguiluz de Antuñano, 1984) que pasa por el valle entre las Sierras de Gómez y El Morrión (Fig. 30), a la extensión de la provincia *Basin & Range*, o al relajamiento ocurrido tras la conclusión del plegamiento.

### 3.2 Volcanismo del Cretácico tardío

Uno de los aportes adicionales de esta investigación es el fechamiento de una secuencia volcánica que había sido considerada como Terciaria en trabajos previos. Conociendo ahora la naturaleza petrográfica del miembro superior de la secuencia volcánica aflorante y su edad de  $68.9 \pm 1.3$  Ma (Maastrichtiano), surgen dos eventos que podrían estar relacionados a su origen, tanto por su extensión espacial como temporal: El Arco Magmático Laramide, también llamado Arco Magmático Mexicano (Valencia-Moreno *et al.*, 2021) o Arco Magmático Tarahumara (Centeno-García, 2016) del Cretácico y la Provincia Magmática Balcones.

Se ha sugerido que a medida que migraba hacia el este el arco magmático, creó las unidades asociadas al Complejo Volcánico Inferior (McDowell y Keizer, 1977), incluyendo a los aparatos volcánicos de la Caldera de Majalca (también llamados Grupo Volcánico Peñas Azules) localizados a solo 80 km al oeste del área de estudio (Ferriz, 1981), la Fm. Tarahumara en Sonora (Wilson y Rocha, 1949) y los depósitos volcánicos ya mencionados de la Fm. Javelina en el Campo Volcánico de Trans-Pecos, Texas.

En todas estas localidades, los depósitos se caracterizan por ser secuencias basculadas de lavas, unidades clásticas gruesas y tobas de caída de composición intermedia a félsica, con edades entre 90 y 67 Ma: la Fm Tarahumara posee edades U - Pb de  $\sim 90$  Ma y 72.5 - 70 Ma (McDowell *et al.*, 2001); en el caso de la caldera de Majalca se han obtenido edades K - Ar y U - Pb de 68.2 y 67.5 Ma, respectivamente (McDowell y Mauger, 1994); mientras que para la Fm. Javelina se obtuvo una edad U - Pb de  $69 \pm 0.9$  Ma (Lehman *et al.*, 2006). Desafortunadamente, los depósitos asociados al arco magmático son escasos a medida que se avanza hacia el este de Sonora, razón por la cual Ferrari y colaboradores (2005) señalan que las rocas del Complejo Volcánico Inferior desaparecen debajo de la cobertura ignimbrítica de la SMOcc.

La Provincia Magmática Balcones por otra parte, se localiza en la región sureste de Texas y está compuesta por numerosos centros ígneos que estuvieron activos durante el Cretácico tardío a lo largo de la zona de sutura de la orogenia Ouachita - Marathon. Esta provincia está representada, pero no exclusivamente, por dos sucesiones de depósitos piroclásticos basálticos con cantidades considerables de detritos terrígenos, que han sido interpretadas como producto de volcanes freatomagmáticos en la región de Trans-Pecos. El primero de estos depósitos tiene una edad U - Pb  $72.6 \pm 0.3$  Ma (Breyer *et al.*, 2007), mientras que el segundo tiene una edad bioestratigráfica de Campaniano tardío -

Maastrichtiano y una posible edad mínima U - Pb de  $76.9 \pm 1.2$  Ma (Befus *et al.*, 2008). En ambos trabajos, los autores infieren que el volcanismo es una extensión al suroeste de la provincia magmática, aunque resaltan las diferencias entre las erupciones freatomagmáticas en planicies aluviales de Trans-Pecos y las erupciones surtseyanas marinas de baja profundidad características de la provincia Balcones. Además, se menciona la posible relación con el arco magmático, pues señalan que el magmatismo Laramide llegó a Trans-Pecos ca. 64 Ma (Breyer *et al.*, *op. cit.*).

Como se puede observar en el mapa de actividad volcánica en el sur de Estados Unidos y norte de México durante el Cretácico tardío (Fig. 31), los depósitos volcánicos del Rancho Don Chuy se localizan en un punto medio entre la extensión de ambos eventos magmáticos y volcánicos durante el Cretácico tardío. Dada la similitud entre ellos, así como el traslape en tiempo y espacio, queda claro que la información acerca de los depósitos volcánicos del área de estudio es insuficiente para establecer una relación genética clara, por lo que es necesario realizar posteriores estudios petrográficos y geoquímico - petrogenéticos para asociar esta secuencia volcanosedimentaria con el magmatismo que le dio origen.

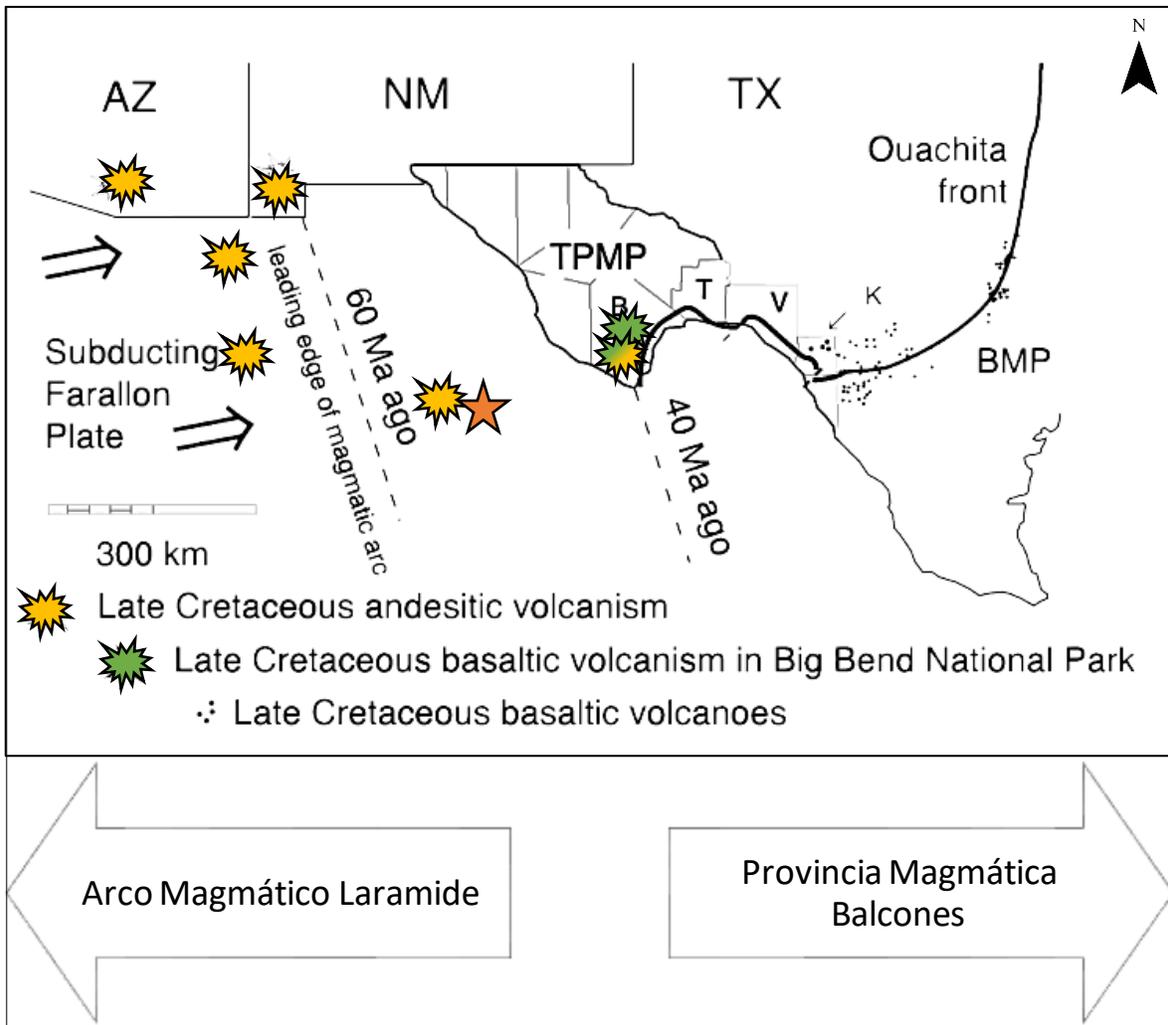


Figura 31. Actividad volcánica en el sur de Estados Unidos y el norte de México durante el Cretácico tardío. Una estrella naranja indica la ubicación del área de estudio. Se indican con símbolos amarillos las ocurrencias de volcanismo intermedio asociado al arco magmático; con símbolos verdes se indican ocurrencias de volcanismo basáltico asociado a la Provincia Magmática Balcones (BMP). Líneas punteadas muestran el avance del arco magmático desde el oeste. BMP = Provincia Magmática Balcones. TPMP = Provincia Magmática de Trans-Pecos. Modificado de Breyer et al. (2007) con información de Flawn et al. (1961), Damon et al. (1981) y Luttrell (1977). Registros adicionales de volcanismo de McDowell et al. (2001) y Lehman et al. (2006).



## IV. Conclusiones

- El levantamiento geológico - estructural ha permitido generar un plano geológico actualizado detallado de la sucesión sedimentaria con profuso fallamiento que aflora en las inmediaciones del Museo de Sitio Paleontológico y Ecológico Rancho Don Chuy.
- La medición de datos estructurales realizada en campo hizo posible describir geoméricamente un par de pliegues de orientación Este - Oeste y plano axial vertical, conformado por el **Sinclinal El Chalino** y el **Anticlinal La Labor**. Se propone que la formación de estos pliegues es resultado de la inversión de la Cuenca de Chihuahua (o de una cuenca de corta vida remanente y/o posterior a ella, resultado del progresivo avance de la orogenia Laramide), en algún punto del Paleógeno con una posible interacción de la Cizalla Plomosas, elemento tectónico de movimiento sinistral que propició la orientación característica del sistema y no la típica orientación NW - SE, o Norte - Sur de las sierras y valles del Cinturón Plegado de Chihuahua. Estos pliegues descritos se establecen como la posible prolongación meridional del sistema del Sinclinal San José, cuyas diferencias estructurales podrían ser el resultado de la interacción con la Cizalla Plomosas.
- El fallamiento está caracterizado por ser de tipo sinistral con una dirección preferencial NW que lo diferencia de la mayoría de fallas en la región; este fallamiento podría explicar el cambio de rumbo que experimentan los estratos hacia el este del área de estudio, por medio de una falla sinistral enterrada bajo los sedimentos recientes.  

A la fecha de publicación de este trabajo, la evidencia acerca de la cinemática y dinámica del fallamiento es insuficiente para definir la edad de actividad y, por lo tanto, el evento que daría origen al fallamiento. Preliminarmente se señala que este podría estar asociado a una posible estructura de basamento de la trama estructural pre-jurásica, a la extensión de la provincia *Basin & Range*, o al relajamiento ocurrido al término del plegamiento. Futuras expediciones podrían determinar la temporalidad y origen del fallamiento.
- El fechamiento isotópico publicado en este trabajo ha permitido asignar una edad mínima de Maastrichtiano ( $68.9 \pm 1.3$  Ma) a la sucesión sedimentaria y reinterpretar la columna estratigráfica del área de estudio, poniendo en evidencia

la posibilidad de tener una de las expresiones más orientales del Arco Magmático Laramide, o una de las más occidentales de la Provincia Magmática Balcones del Cretácico Superior. Se requiere de posteriores estudios petrográficos y geoquímico - petrogenéticos que permitan asociar estos depósitos volcánicos al evento magmático que les dio origen.

- La información obtenida posibilitó la obtención de una sección geológica Norte - Sur que muestra las unidades deformadas del Cretácico Superior, dispuestas en pliegues cerrados que se encuentran parcialmente cubiertos por el extenso relleno aluvial reciente atribuidos a la cuenca del Río Conchos.
- Los resultados obtenidos en este trabajo, aunado a los presentados en trabajos previos de diversos autores, sugieren que hay razón suficiente para sospechar que estos afloramientos sinorogénicos podrían estar relacionados a la Formación Javelina en lugar de ser atribuidos a la Formación San Carlos.

## Glosario

**Ablación:** Proceso que remueve masa de un objeto por medio de diversos procesos erosivos o explosiones de energía.

**Acimut:** Se refiere a datos de dirección en un tipo de notación que se expresa como valores de ángulo de 0 - 360° a partir del norte. Requiere expresar el ángulo de dirección, seguido del ángulo y dirección de buzamiento.

**Análisis fotogeológico:** Técnica que consiste en el reconocimiento y definición (no exclusivamente) de rasgos geológicos por medio de imágenes satelitales, aéreas o de dron.

**Análisis geométrico - descriptivo:** Se refiere a la descripción de estructuras geológicas a partir de su definición geométrica como planos o líneas en una red estereográfica.

**Análisis isotópico:** Técnica que busca caracterizar la distribución y proporción de los isótopos estables de un elemento en una muestra.

**Ángulo interflanco:** Ángulo que se forma entre los flancos adyacentes de un pliegue.

**Antecristal:** Cristales heredados o reciclados que no comparten en su totalidad la historia del magma o evento volcánico que los contiene.

**Anticlinal:** Pliegue cuyo núcleo está compuesto por rocas más antiguas.

**Calcarenita:** Roca sedimentaria compuesta en más del 50 % por arenas calcáreas. Es el equivalente a una arenisca.

**Círculo mayor Pi:** Círculo mayor que contiene los polos de los flancos de un pliegue.

**Círculo mayor:** Línea o traza ciclográfica dibujada de norte a sur en una red estereográfica.

**Cuenca de antepaís (*Foreland*):** Depresión formada entre un cinturón orogénico y un cratón.

**Cuenca de retroarco:** Tipo de cuenca de antepaís en el que el frente orogénico y el arco magmático presentan la misma posición.

**Dextral:** Falla de rumbo lateral derecha.

**Dominio estructural:** Región caracterizada por propiedades y elementos estructurales similares que se diferencia de áreas adyacentes.

**Echado:** Ángulo de inclinación de un plano.

**Eje del pliegue:** Línea recta hipotética que define geoméricamente la formación de pliegues cilíndricos.

**Eje Pi:** Polo del círculo mayor Pi, es una línea paralela al eje del pliegue.

**Flexión de estratos:** Se refiere a los estratos que se doblan o curvan como parte de una respuesta temprana antes del fallamiento.

**Geocronología:** Ciencia y proceso que busca determinar la edad de los materiales terrestres, así como el orden cronológico de los eventos geológicos.

**Georreferenciación:** Proceso que permite establecer la posición de un elemento en un sistema de coordenadas destino.

**Hand mag:** Técnica de separación magnética mineral que consiste en la separación de los minerales magnéticos aprovechando su alta susceptibilidad magnética.

**Homogeneidad:** Se refiere a la cualidad de los elementos de un sistema que comparten una misma propiedad.

**Meridional:** Relativo al sur o algo situado al sur.

**MSWD:** Medida que cuantifica la dispersión de los datos.

**Multiespectral:** Relativo a imágenes o información visual recabada por diversos medios dentro de rangos específicos de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético.

**Nódulo:** Concreción esférica formada por la acreción de capas alrededor de un núcleo que puede ser un fragmento de roca o restos biológicos.

**Ortogonal:** Se refiere a la cualidad de un elemento que existe en un ángulo de 90°.

**Plano axial:** Superficie plana que une las líneas de charnela de todas las capas de un pliegue.

**Pliegue:** Estructura geológica constituida por capas originalmente horizontales que fueron dobladas o curvadas durante un periodo de deformación dúctil.

**Red de Schmidt:** También llamada red equiareal de Lambert, es un tipo de red estereográfica que mantiene iguales las áreas de la esfera de referencia, pero no conserva sus relaciones angulares.

**Retrabajado:** Material que fue desprendido de un sedimento o roca original por actividad erosiva y posteriormente fue incorporado en sedimentos más jóvenes.

**Rumbo:** En un sentido general, se usa para hablar de la dirección de un elemento estructural independientemente de la notación que se esté usando (E.g. "... *el cambio de rumbo podría ser evidencia de flexión de estratos ...*"). También puede referirse a los datos de dirección en un tipo de notación que se expresa como valores de ángulo de 0 - 90° con respecto al norte o sur y que requiere indicar la desviación hacia el este u oeste, además del ángulo y dirección del buzamiento.

**Sinclinal:** Pliegue cuyo núcleo está compuesto por rocas más jóvenes.

**Sinistral:** Falla de rumbo lateral izquierda.

**Sinorogénico:** Que ocurre simultáneamente con un periodo de orogénesis.

**Sintectónico:** Que ocurre durante un periodo de actividad tectónica cualquiera.

**Traza:** Intersección de una superficie estructural (una superficie axial, superficie de cresta o una falla) con otra superficie (un plano horizontal, plano de perfil o la superficie de la Tierra).

**Zircón:** Ortosilicato de zirconio que ocurre principalmente en rocas ígneas y metamórficas en menor medida. Se usa en el fechamiento radiométrico de rocas por medio del análisis isotópico de U, Th, Pb radiogénico, Hf, Y, P, entre otros.

## Bibliografía

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology*. Cambridge University Press.
- Aranda-Gómez, J. J., Housh, T. B., Luhr, J. F., Henry, C. D., Becker, T., & Chávez-Cabello, G. (2005). Reactivation of the San Marcos fault during mid-to-late Tertiary extension, Chihuahua, Mexico. In T. H. Anderson, J. A. Nourse, J. W. McKee, & M. B. Steiner, *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives: Geological Society of America Special Paper* (Vol. 393, pp. 509-521). doi:10.1130/0-8137-2393-0.509
- Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., & Villasuso-Martínez, R. (2016). Revisión estratigráfica y estructura de la Sierra Plomosa, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 221-238.
- Befus, K. S., Hanson, R. E., Lehman, T. M., & Griffin, W. R. (2008). Cretaceous basaltic phreatomagmatic volcanism in West Texas: Maar complex at Peña Mountain, Big Bend National Park. *Journal of volcanology and geothermal research*, 173, 245-264.
- Breyer, J. A., Busbey III, A. B., Hanson, R. E., Befus, K. E., Griffin, W. R., Hargrove, U. S., & Bergman, S. C. (2007). Evidence for Late Cretaceous Volcanism in Trans-Pecos Texas. *The Journal of Geology*, 115, 243-251.
- Bridges, L. W. (1962). *Geology of Mina Plomosas area, Chihuahua, Mexico*. Tesis doctoral, University of Texas.
- Capitán-López, C. V. (2021). *Bioestratigrafía de una sucesión marina con base en ammonites (Mollusca, Cephalopoda Cuvier 1797) en Rancho Don Chuy, municipio de Aldama, Chihuahua, México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Cardozo, N., & Allmendinger, R. (2013). Spherical projections with OSXStereonet. *Computers & Geosciences*, 51, 193-205. doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021
- Centeno-García, E. (2016). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews*, 81(3), 1035-1052. doi:10.1016/j.oregeorev.2016.10.010
- Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Molina-Garza, R. S., Cossío-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I. R., & González-Naranjo, G. A. (2005). La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multireactivada del noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 27-52.
- Consejo de Recursos Minerales. (2002). *Carta Geológico - Minera Chorreras Clave H13-C59*.

- Consejo de Recursos Minerales. (2003). *Carta Geológico - Minera El Jateado Clave H13-C69*.
- Consejo de Recursos Minerales. (2004a). *Carta Geológico - Minera Plomosa Clave H13-C49*.
- Consejo de Recursos Minerales. (2004b). *Carta Geológico - Minera Placer de Guadalupe Clave H13-C48*.
- Delgadillo-Escobar, A. A., Rodríguez-de la Rosa, R. A., Saenz-Quiñonez, A. I., & Gutiérrez-Martínez, J. A. (2015). The first record of Onchosaurus (Sclerorhynchidae) from the Late Cretaceous of northern Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 113-117.
- Eguiluz de Antuñano, S. (1984). Tectónica cenozoica del norte de México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 36(1), 43-62.
- Estrada-Ruíz, E., & Martínez-Cabrera, H. I. (2011). A new Late Cretaceous (Coniacian-Maastrichtian) Javelinoxylon wood from Chihuahua, Mexico. *IAWA Journal*, 32(4), 521-530. doi:10.1163/22941932-90000074
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.
- Ferriz, H. (1981). Geología de la Caldera de San Marcos, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 5(1), 65-79.
- Flawn, P. T. (1961). *The Ouachita System*. Austin, Texas: Publications of The University of Texas.
- Fleuty, M. J. (1964). The Description of Folds. *Proceedings of the Geologists' Association*, 75(4), 461-492.
- Flores-Castro, K., Montaña, S., González, Y., Estrada-Ruíz, E., Esquivel, C., Torres-Valencia, J. M., . . . Durán-Álvarez, J. C. (2011). Geoquímica orgánica aplicada a madera fósil del género Javelinoxylon depositada en sedimentos del Cretácico Superior de la Sierra Cuesta El Infierno, Aldama, Chihuahua (México). *Actas INAGEQ XXI Congreso Nacional de Geoquímica*, 17, pp. 49-53.
- Franco-Rubio, M. (2007). *Geología y Paleomagnetismo de la porción centro - oriental del Estado de Chihuahua, México: Definición del lineamiento Delicias - Mulato*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Franco-Rubio, M., Oviedo, A., Montelongo-Flores, M. Y., Juárez-Martínez, R., & Llamas-Jiménez, L. A. (2018). Late Jurassic rifting in Chihuahua, México.

*Paleontología Mexicana - 10th International Congress on the Jurassic System*, (pp. 58-60).

- García-Hernández, I. P., Estrada-Ruíz, E., & Martínez-Cabrera, H. I. (2016). Maderas fósiles de la Formación San Carlos (Cretácico Superior), Chihuahua, México. *Botanical Sciences*, 94(2), 269-280.
- González-Moreno, Y. L. (2015). *Geoquímica inorgánica de rocas siliciclásticas del afloramiento DECA - Parque Cretácico en la Sierra Cuesta El Iniferno, Municipio de Aldama, Chihuahua (México); clasificación y análisis de procedencia*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Gries, J. C. (n.d.). Laramide evaporite tectonics along the Texas-northern Chihuahua border. In P. W. Dickerson, J. M. Hoffer, & J. F. Callender, *New Mexico Geological Society Fall Field Conference Guidebook - Trans Pecos Region (Southeastern New Mexico and West Texas)* (Vol. 31, pp. 93-100). doi:10.56577/FFC-31.93
- Haenggi, W. T. (2001). Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA, Part I: the pre-Mesozoic setting. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 54(1), 28-66.
- Haenggi, W. T. (2002). Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA, Part II: Mesozoic and Cenozoic. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 38-94.
- Haenggi, W. T., & Muehlberger, W. R. (2005). Chihuahua trough—A Jurassic pull-apart basin. In T. H. Anderson, J. A. Nourse, J. W. McKee, & M. B. Steiner, *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper* (Vol. 393, pp. 619-630). doi:10.1130/0-8137-2393-0.619
- Hennings, P. H. (1994). Structural transect of the southern Chihuahua Fold Belt between Ojinaga and Aldama, Chihuahua, México. *Tectonics*, 13(6), 1445-1460.
- James, E. W., & Henry, C. D. (1993). Pb isotopes of Ore Deposits in Trans-Pecos Texas and northeastern Chihuahua, Mexico: Basement, igneous, and sedimentary sources of metals. *Economic Geology*, 88, 934-947.
- King, R. E., & Adkins, W. S. (1946). Geology of a part of the lower Conchos Valley, Chihuahua, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 57, 275-294.
- Lehman, T. M. (1991). Sedimentation and tectonism in the Laramide Tornillo Basin of West Texas. *Sedimentary Geology*, 75, 9-28.

- Lehman, T. M., McDowell, F. W., & Connelly, J. N. (2006). First isotopic (U-Pb) age for the Late Cretaceous Alamosaurus vertebrate fauna of West Texas, and its significance as a link between two faunal provinces. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 26(4), 922-928.
- Lugo-Rodríguez, M. J. (2017). *Identificación de compuestos orgánicos preservados en madera fósil del género Paraphyllanthoxylon (cf. Lauraceae) del Cretácico Superior del Desierto Chihuahuense*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- McDowell, F. W., & Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 1479-1487.
- McDowell, F. W., & Mauger, R. L. (1994). K-Ar and U-Pb zircon chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in central Chihuahua State, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 118-132.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Connelly, J. N. (2001). Duration of Late Cretaceous–early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(4), 521-531.
- Méndez-Díaz, C. (2018). *Geoquímica orgánica de la madera del género fósil Agathoxylon (Araucariaceae) del Cretácico Superior, Potrero El Llano, Aldama, Chihuahua (México)*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Mendoza-Ostria, D. (2016). *Compuestos orgánicos preservados en madera fósil del género Javelinoxylon del afloramiento deca-parque Cretácico, municipio de Aldama, Chihuahua México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Molina-Garza, R. S., & Iriondo, A. (2005). La Megacizalla Mojave-Sonora: la hipótesis, la controversia y el estado actual de conocimiento. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 1-26.
- Montaño-Ruíz, L. S. (2013). *Geoquímica orgánica de las rocas siliciclásticas del Cretácico Superior de la Sierra Cuesta El Infierno (municipio de Aldama, Chihuahua), mediante la interpretación de Biomarcadores*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Muehlberger, W. R. (1980). Texas lineament revisited. In P. W. Dickerson, J. M. Hoffer, & J. F. Callender, *New Mexico Geological Society Fall Field Conference Guidebook - Trans Pecos Region (Southeastern New Mexico and West Texas)* (Vol. 31, pp. 113-121). doi:10.56577/FFC-31.113

- Muehlberger, W. R., & Moustafa, A. R. (1984). Late Cenozoic Pull-Apart Graben Development, Big Bend Region, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64, 510.
- Oviedo-Padrón, E. G. (2008). *Tectónica de la Sierra Cuesta El Infierno, Chihuahua y su relación con el levantamiento de Plomosas*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Oviedo-Padrón, E. G., Aranda-Gómez, J. J., Chávez-Cabello, G., Molina-Garza, R. S., Iriondo, A., González-Becerra, P. C., . . . Solorio-Munguía, J. G. (2010). Tectónica de la sierra Cuesta El Infierno y su posible relación con fallas reactivadas cerca del levantamiento de Plomosas, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(3), 389-411.
- Padilla, R. J., & Sanchez. (1986). Post-Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*, 25(1), 157-206.
- Poole, F. G., Perry Jr., W. J., Madrid, R. J., & Amaya-Martínez, R. (2005). Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model. In T. H. Anderson, J. A. Nourse, J. W. McKee, & M. B. Steiner, *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives: Geological Society of America Special Paper* (Vol. 393, pp. 543-596). doi:10.1130/0-8137-2393-0.543
- Quintero-Legorreta, O., & Guerrero, J. C. (1985). Una nueva localidad del basamento precámbrico de Chihuahua, en el área de Carrizalillo. *Revista del Instituto de Geología*, 6(1).
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., & Schiefelbein, I. M. (2007). *Structural Analysis and Synthesis - A Laboratory Course in Structural Geology* (Tercera ed.). Blackwell Publishing Ltd.
- Ruiz-Vázquez, J. E. (2017). *Maduración térmica del Cretácico Superior en la Sierra del Morrión, Chihuahua, México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Servicio Geológico Mexicano. (2005). *Carta Geológico - Minera San Diego de Alcalá Clave H13-C68*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2010). *Ficha de Unidad Litoestratigráfica - Formación San Carlos*. Léxico Estratigráfico de México.
- Servicio Geológico Mexicano. (2014). *Ficha de Unidad Litoestratigráfica - Formación Aguja*. Léxico Estratigráfico Mexicano.

- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Monografía Geológica del Estado de Chihuahua*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Carta Geológico - Minera Trancas Clave H13-C58*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2022). *Ficha de Unidad Litoestratigráfica - Formación Javelina*. Léxico Estratigráfico de México.
- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., & Tanner, M. (2010). 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.
- Stewart, J. H. (1998). Regional characteristics, tilt domains, and extensional history of the Late Cenozoic Basin and Range province, western North America. In J. E. Faulds, & J. H. Stewart, *Accommodation zones and transfer zones; the regional segmentation of the Basin and Range Province* (Vol. 323, pp. 47-74). doi:10.1130/0-8137-2323-X.47
- Valencia-Moreno, M., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., Calmus, T., Noury, M., & Mendivil-Quijada, H. (2021). The Cretaceous-Eocene Mexican Magmatic Arc: Conceptual framework from geochemical and geochronological data of plutonic rocks. *Earth-Science Reviews*, 220. doi:10.1016/j.earscirev.2021.103721
- Villareal-Fuentes, J., Levresse, G., Nieto-Samaniego, A. F., & Corona-Esquivel, R. (2014). New geological and geochronological data of the Placer de Guadalupe uplift, México: a new piece of the Late Triassic-Jurassic Nazas Arc? *International Geology Review*, 56(16), 2000-2014. doi:10.1080/00206814.2014.984353
- Wheeler, E. A., Lehman, T. M., & Gasson, P. E. (1994). Javelinoxylon, an Upper Cretaceous dicotyledonous tree from Big Bend National Park, Texas, with presumed malvacean affinities. *American Journal of Botany*, 81(6), 703-710.
- Wilson, I. F., & Rocha, V. S. (1949). Coal Deposits of the Santa Clara District near Tonichi Sonora, Mexico. *Geological Survey Bulletin*, 962(A), 80.
- Woodcock, N. H., & Schubert, C. (1994). Continental Strike-Slip Tectonics. In P. L. Hancock, *Continental Deformation* (Primera ed., p. 421). Pergamon Press.



## Anexo I

Tabla 3. Datos medidos de acimut y buzamiento (rumbo y echado).

<b>Acimut</b>	<b>Buzamiento</b>	<b>Dirección de buzamiento</b>	<b>Dirección E</b>	<b>Dirección N</b>
099°	72°	SW	455750.251	3182551.379
092°	71°	SW	454522.288	3183989.107
091°	55°	SW	454552.737	3184190.174
091°	56°	SW	454915.801	3184133.363
099°	74°	SW	454689.948	3183909.557
271°	57°	NE	454710.393	3183595.605
269°	65°	NW	454782.94	3183426.033
267°	73°	NW	454788.106	3183349.013
272°	67°	NE	454801.23	3183259.775
262°	63°	NW	454809.237	3183210.441
273°	67°	NE	454852.194	3183111.781
262°	73°	NW	454873.433	3183000.907
262°	81°	NW	454908.78	3182905.412
277°	77°	NE	454812.451	3182656.472
089°	80°	SE	455033.916	3182421.733
089°	79°	SE	455061.363	3182501.618
271°	62°	NE	454101.13	3183105.528
284°	46°	NE	453857.588	3183229.582
277°	83°	NE	453901.22	3183303.307
277°	74°	NE	454105.271	3182794.742
276°	78°	NE	454245.997	3182711.093
096°	78°	SW	454849.24	3182351.653
274°	71°	NE	454281.539	3182787.843
277°	66°	NE	454179.877	3183148.315
272°	80°	NE	453897.049	3183604.898
281°	80°	NE	454028	3182990
197°	48°	NW	456786	3182605

Tabla 4. Datos medidos de acimut aparente (rumbo aparente).

<b>Acimut aparente</b>	<b>Dirección E</b>	<b>Dirección N</b>
097°	454499.985	3183879.5
270°	454519.934	3184113.302
277°	454913.058	3184105.676
275°	454695.292	3183903.332
262°	454615.974	3183712.858
267°	455121.292	3182575.284
275°	453879.905	3183392.579
268°	453891.497	3183583.427
247°	456352.635	3182650.585
277°	454673.315	3182423.134
273°	454264.442	3183280.267

Tabla 5. Hallazgos paleontológicos en el Rancho Don Chuy. Con información de Méndez-Díaz (2018), Capián-López (2021) y datos proporcionados por el Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza (comunicación personal, 2022).

<b>Tipo de fósil</b>	<b>Dirección E</b>	<b>Dirección N</b>
Madera	455047.794	3182501.671
Madera	455820.817	3182548.008
Madera	455750.251	3182551.379
Marinos	454541.108	3183987.028
Gasterópodos	454519.934	3184113.302
Amonites	454913.058	3184105.676
Bivalvos	454714.32	3183881.61
Bivalvos	454801.23	3183259.775
Bivalvos	454809.237	3183210.441
Madera	454843.351	3182921.033
Madera	454854.174	3182917.888
Madera	454854.162	3182914.897
Madera	454932.803	3182905.285
Madera	454327.311	3182710.773
Madera	456527.451	3182985.405
Madera	454186.366	3182714.32
Madera	456352.635	3182650.585
Madera	456350.64	3182642.24
Madera	456350.5	3182635.9
Madera	456355.195	3182604.486
Gasterópodos	454880.11	3184057.12
Dientes de tiburón	454536.88	3183983.8
Madera	455236.65	3183098.51
Madera	455061.48	3182995.76
Madera	455048.94	3182997.37
Madera	454985.83	3182918.89
Huesos	454991.09	3182920.1
Huesos	455120.95	3182975.12
Madera	455307.45	3182898.26

Madera	455347.5	3182859.83
Madera	455364.49	3182536.59
Tronco de árbol	455344.455	3182856.72
Tronco de árbol	455311.131	3182897.841
Tronco de árbol	455058.922	3183006.392
Tronco de árbol	455050.397	3182998.005
Huesos	455227.197	3183281.724
Huesos	455223.81	3183213.489
Tronco de árbol	455256.997	3183213.029
Amonites	455007.647	3184082.929
Amonites	454926.128	3184052.888
Fósiles y dientes	454589.889	3184106.159
Dientes de tiburón	454543.467	3184016.268
Amonites	454996	3184080
Amonites	454926	3184052
Eponjas	454539	3183997
Tronco de árbol	455345	3182842
Incerámidos	454541	3183992
Dientes	454586	3184108
Tronco de árbol	455315	3182894
Tronco de árbol	455307	3182898
Tronco de árbol	455258	3183213
Tronco de árbol	455057	3182993
Tronco de árbol	455095	3183016
Huesos de dinosaurio	455225	3183207
Huesos de dinosaurio	455219	3183208
Huesos de dinosaurio	455227	3183204
Tronco de árbol	455064	3183001
Ostras	454682	3183590
Onchosaurus	454698	3183592
Astillas de madera	454845	3182733
Madera	455285	3182689
Dientes de terópodo	455214	3182621

Vertebra y dientes	455233	3182603
Diente rodado	455290	3182593
Huesos de dinosaurio	455266	3182508
Tronco de árbol	455405	3182619
Huesos y vértebra	455296	3182634
Diente de terópodo	455403	3182625
Tronco de árbol	455357	3182536



## Anexo II

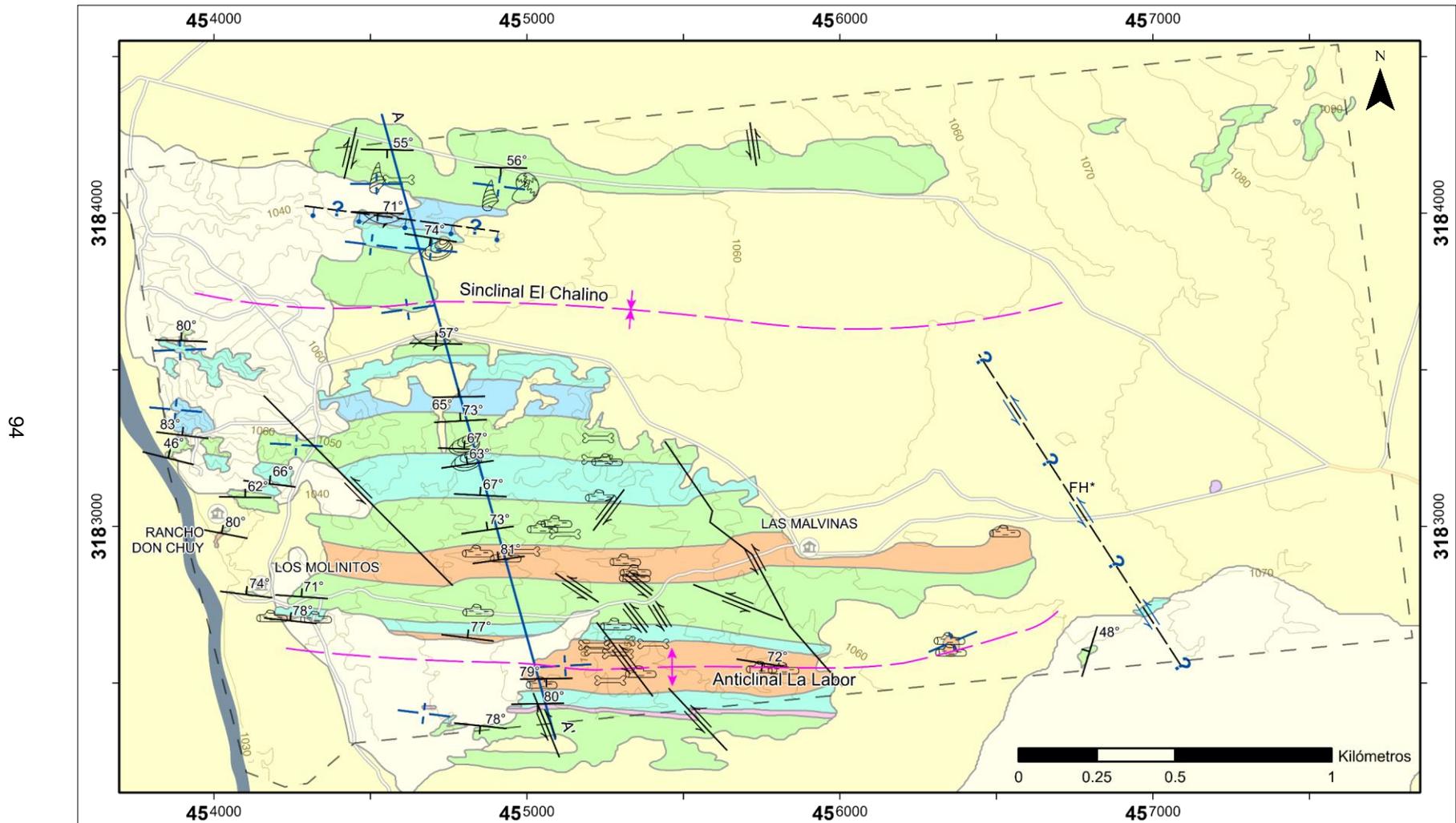


Figura 32. Mapa geológico - estructural. Incluye de manera sintética hallazgos paleontológicos a la fecha y curvas de nivel a detalle.



Geología	Pliegues	Sección geológica	Fósiles	Rasgos topográficos
<b>Litología</b>				
 Aluvión	 Anticlinal	 A - A'	 Amonites	 Rancho Don Chuy
 Arenisca	 Sinclinal	 Rumbo y echado	 Bivalvos	 Cuerpo de agua
 Basalto	<b>Fallas</b>	 Rumbo aproximado	 Esponjas	<b>Caminos</b>
 Caliza	 Dextral		 Gasteropodos	 Camino
 Conglomerado	 Sinistral		 Huesos	 Carretera
 Margas	 Normal inferida		 Madera	 Curva de nivel
 Terraza Aluvial	 Sinistral inferida		 Marinos	 Localidad
 Toba Piroclástica				

Figura 33. Simbología del mapa geológico - estructural.