



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Maestría en Geología Aplicada

Título:

**“Modelo estructural del depósito de Azufre-Yeso El Fénix,
zona mineralizada Villa Hidalgo, S.L.P.”**

Beca SECIHTI

CVU: 1319056

Presenta:

Ing. Yaritza Patricia Saucedo Castro

Asesor:

Dr. José Rafael Barboza Gudiño

San Luis Potosí, S.L. P

septiembre de 2026





19 de junio de 2025

**ING. YARITZA PATRICIA SAUCEDO CASTRO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. José Rafael Barboza Gudiño**, *Asesor del Trabajo de Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Modelo estructural del depósito de Azufre-Yeso El Fénix, zona mineralizada Villa Hidalgo, S.L.P."

INTRODUCCIÓN

- I. MARCO GEOLÓGICO
 - II. ANÁLISIS ESTRUCTURAL
 - III. DEPÓSITOS DE AZUFRE-YESO EN EL ÁREA DE LA MINA EL FÉNIX
 - IV. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Modelo estructural del depósito de Azufre-Yeso El Fénix, zona mineralizada Villa Hidalgo, S.L.P.”

se realizó en el periodo diciembre de 2024 a septiembre de 2026 bajo la dirección del **Dr. José Rafael Barboza Gudiño**

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis, para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Yaritza Patricia Saucedo Castro.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
AUTORIZACIÓN	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	
RESUMEN	viii
AGRADECIMIENTOS	x
DEDICATORIA	xi
INTRODUCCIÓN/GENERALIDADES	1
a) Planteamiento del problema	1
b) Objetivo	1
c) Metas	2
d) Hipótesis	2
e) Justificación	2
f) Metodología	3
g) Antecedentes	8
h) Localización y vías de acceso	10
i) Génesis de los depósitos de azufre	11
CAPÍTULO I. MARCO GEOLÓGICO	13
1.1. Geología regional	13
1.2. Geomorfología	15
1.3. Estratigrafía	16
Mesozoico	18
Formación Guaxcamá	18
Formación El Abra	19
Formación Cárdenas	21
Cuaternario	22
Conglomerado oligomítico	22
Aluvión	22
1.4. Estructura general del área	22
1.5. Mineralizaciones regionales de yeso y azufre	24
CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	28
2.1 Deformación contractiva inicial	28
2.2 Fallamiento y fracturamiento post orogénico	30
2.3 Detalle estructural de la mina El Fénix	39
CAPÍTULO III. DEPÓSITOS DE AZUFRE-YESO EN EL ÁREA DE LA MINA EL FÉNIX	49
3.1 Especies minerales del yacimiento y su origen	49
3.2 Los cuerpos mineralizados y su emplazamiento	55
CAPÍTULO IV. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	62
CONCLUSIONES	66

Recomendaciones	68
Bibliografía	ix
Anexos	xii

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Fotografías del proceso de preparación de muestras para difracción de rayos X.	4
Figura 2. Procedimiento ilustrativo para el análisis mediante MEB.	6
Figura 3. Fotografías de preparación de muestras.	7
Figura 4. Localización y vías de acceso del depósito de yeso y azufre “El Fénix” señalado con círculo amarillo.	10
Figura 1.1. Provincias geológicas señalando el área de estudio, modificadas de Ortega-Gutiérrez (1991).	14
Figura 1.2. Fotografías panorámicas que muestran la geomorfología del área	15
Figura 1.3. Columna estratigráfica del área de estudio, basada en las hojas F14-A54, F14-A55, F14-A64, F14-A65	19
Figura 1.4. Mapa geológico estructural en el que aparecen las principales estructuras plegadas y fallas basado en la carta geológico-minera F14-A54	23
Figura 1.5. Depósitos de azufre en San Luis Potosí, modificado de GEOIN-FOMEX (2018); Núñez-Miranda (2006); Ruiz-Ortiz (2005).	26
Figura 2.1. Se muestra un diagrama de densidad de polos de estratificación (n=132), medidos en la porción sureste del área de la carta Llanos del Carmen	28
Figura 2.2 Vista panorámica del plegamiento de la sierra de Las Pilas o sierra de La Tapona, viendo de poniente a oriente.	29
Figura 2.3. Imágenes representativas de los estratos del área de estudio en la que se pueden dimensionar las variaciones en espesor de las capas.	30
Figura 2.4. Lineaciones sobre imagen Google del área de estudio y diagrama de roseta basado en la longitud proporcional de las lineaciones medidas.	31
Figura 2.5. Estereograma del conjunto de fallas normales y laterales, frecuentemente con estrías que muestran una componente de desplazamiento lateral izquierdo, medidas dentro del área de estudio.	32
Figura 2.6. Proyección estereográfica de fracturas con rumbos predominantes noreste y noroeste, pudiéndose distinguir una tercera familia norte-noreste	33
Figura 2.7. Planos de Fracturas de orientación general noreste, que muestran cizallas tanto dextrales como siniestras y un ángulo entre 30° y hasta más de 50° con respecto a planos paralelos al lineamiento del Fénix	34
Figura 2.8. Fotografía representativa de los bancos de caliza con presencia de vetillas escalonadas afectadas por zonas de cizalla.	35

Figura 2.9. Calizas aledañas a los cuerpos de yeso muestran fracturas principalmente de orientación noreste.	36
Figura 2.10 A) Proyección de planos identificando flancos de charnela B) Promedio calculado para eje de plegamiento y buzamiento.	37
Figura 2.11. En la imagen se observa el límite por falla, entre un cuerpo de yeso con un poco de azufre en su periferia.	39
Figura 2.12. En proyección estereográfica de planos de fallas y vetas medidas en la zona de la mina El Fénix	41
Figura 2.13. Superficie con estrías en cuerpo de yeso con poco azufre.	42
Figura 2.14. Acercamiento de una muestra de yeso con azufre y caliza proveniente de la tabla este de la veta principal observada en la zona de la mina el Fénix.	43
Figura. 2.15. Proyección estereográfica de estructuras medidas en el área de El Verde, ~5.9 km al noroeste de El Fénix, sobre el mismo lineamiento.	44
Figura 2.16. Proyecciones estereográficas de Localidades en la zona de La Tapona, al este-noreste de la mina El Fénix.	47
Figura 3.1. Difractogramas de las muestras	50
Figura 3.2. Fotomicrografías realizadas utilizando la microscopia electrónica de barrido.	52
Figura 3.3. Tiros mineros en el área del Fénix.	54
Figura 3.4. Zona de contacto entre el yeso y la brecha calcárea	55
Figura 3.5. Tiro ubicado en el área del Verde en el que se puede observar la secuencia sedimentaria de calizas con plegamientos suaves y cuerpos de yeso con azufre, tanto concordantes como en forma de vetas.	57
Figura 3.6 A) Fotografía representativas del yeso en el área de estudio B) Fotomicrografía del yeso en lámina delgada bajo luz natural y C) Fotomicrografía de yeso bajo luz polarizada.	58
Figura 3.7 A) Fotomicrografías de nódulos de yeso B) Fotografía de nódulo de yeso a mayor aumento C) Intercalación de cristales de yeso de colores gris y blanco D) yeso alabastrino.	58
Figura 3.8 A) Muestra de mano de zona de contacto caliza + yeso + azufre B) y C) Fotomicrografías de caliza.	59
Figura 3.9. Fotomicrografías de la zona de contacto entre el yeso y azufre	60
Figura 4.1. Modelo esquemático de la formación del depósito de yeso-azufre El Fénix.	63
Figura 4.2. Columna litológica del área de estudio basada en las unidades vistas en campo.	64

Resumen

El depósito “El Fénix” se ubica dentro de la zona mineralizada Villa Hidalgo, San Luis Potosí, en el municipio de Villa de Arista. En esta zona han sido identificados cuerpos lenticulares y vetiformes de yeso con contenido de azufre. Estos depósitos son de gran interés científico, debido a su origen incierto y para la exploración y conocimiento de esta zona mineralizada. Dado que el azufre en general puede estar asociado a actividad fumarólica en zonas volcánicas activas o provenir de procesos sedimentarios donde bacterias reducen el sulfato generando azufre libre, por lo que la asociación con yeso en estos depósitos sugeriría el segundo tipo, aunque se han generado interrogantes sobre el tipo de emplazamiento y su relación con eventos tectónicos en la región.

Los depósitos del área El Fénix, se encuentran principalmente emplazados en fallas y fracturas con orientación N50°-60°W, lo que sugiere una posible influencia de la tectónica con asociación de una deformación frágil en su emplazamiento, sin embargo, persiste la incertidumbre de si estos cuerpos de yeso con azufre, como se han descrito provienen de un origen hidrotermal. El análisis estructural detallado en las rocas del área y las estructuras a lo largo del lineamiento del cañón El Fénix y dentro de los cuerpos minerales mismos, ha permitido generar un modelo de emplazamiento de estos cuerpos cuyo origen y presencia en esta zona específica se desconocen. Aunque su potencial y la factibilidad de un posible aprovechamiento son limitados, estos son un tipo particular e importante de yacimientos presentes en un distrito caracterizado por la presencia de escasos depósitos epitermales de mercurio y antimonio, en menor proporción oro y esencialmente por depósitos de minerales no metálicos en la porción sur de la región altiplano del estado de San Luis Potosí.

Dentro del área de estudio afloran principalmente calizas en facies lagunares y arrecifales de plataforma de la Formación El Abra, las cuales se encuentran plegadas y están también afectadas por fallas normales y laterales. Alrededor de los cuerpos montañosos, se encuentran conglomerados polimícticos con clastos que van desde guijarros de unos centímetros hasta bloques de varios decímetros, soportados por una matriz limo-arenosa, estos depósitos están pobremente consolidados y cementados por caliche. Finalmente, el depósito más reciente de material aluvial se localiza en las zonas planas.

La estratigrafía a nivel regional incluye algunas unidades como las formaciones Guaxcamá, El Abra, Cárdenas y depósitos de relleno. Cabe mencionar que, aunque la Formación Guaxcamá no aflora dentro del área de estudio, siendo una unidad que en áreas cercanas subyace concordantemente a la Formación El Abra, puede ser relevante para describir los cuerpos de yeso a los que se asocia el azufre. Posteriormente, la Formación El Abra está conformada por calizas que ocupan un alto porcentaje de los afloramientos del área de estudio, concordantemente, la unidad siguiente es la Formación Cárdenas conformada por lutitas y areniscas finas que afloran en la porción norte del área de estudio. Finalmente, en zonas aledañas afloran algunas rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno, así como rellenos aluviales recientes.

En general el conjunto de estructuras observadas indica una historia tectónica relacionada con procesos contractivos seguidos de fases de extensión y de fallamientos transcurrentes. El área de estudio presenta fallas, pliegues y fracturas, las cuales controlan en gran medida la distribución de los depósitos minerales en la región. Las fallas son una de las principales estructuras geológicas identificadas en el área de estudio y se presentan con desplazamientos de tipo normal y lateral izquierdo, aunque en áreas aledañas se han reportado fallas dextrales y fallas inversas de bajo ángulo, tipo cabalgaduras. Las fallas normales y de desplazamiento lateral, se presentan principalmente en dos direcciones: noroeste-sureste y noreste-suroeste, con algunas variaciones locales. Las fallas noroeste-sureste son de mayor longitud o se pueden seguir como lineamientos en imágenes satelitales hasta por varios kilómetros o decenas de kilómetros, como es el caso del lineamiento El Fénix. Fallas orientadas noroeste-sureste, que regularmente presentan echados sub-verticales, están asociadas a movimientos sinestrales.

En los cuerpos de mineral y zonas aledañas, se pudieron observar cuerpos de yeso con azufre emplazados en calizas de estratificación mediana y zonas brechadas de la misma caliza a ambos lados del cuerpo de mineral de yeso masivo, con azufre en pequeños agregados irregulares pero concentrados hacia la periferia. También se observaron planos de falla con recristalización de calcita y cortando al yeso, en donde se han desarrollado estrías bien preservadas y mostrando un deslizamiento lateral izquierdo. Por su orientación ligeramente oblicua con respecto al rumbo general del lineamiento El Fénix, con el que se alinean estos cuerpos, dichos planos de falla han sido interpretados como estructuras tipo *Riedel* relacionadas a un deslizamiento lateral izquierdo de la estructura regional interpretada para el lineamiento El Fénix. En parte, entre la brecha y el cuerpo de mineral de yeso con azufre, se observan zonas con ligera oxidación en forma bandeada paralela a la pared de la estructura, reproduciendo formas botroidales con recristalización fibrosa a radial de yeso y en menor proporción calcita. En otros casos, estructuras plegadas aledañas a este lineamiento y con orientaciones de sus ejes hacia el noreste, contrastantes con el plegamiento regional noroeste-sureste, pueden ser explicadas por transpresión asociada al deslizamiento izquierdo a lo largo del lineamiento El Fénix.

Agradecimientos

Durante el desarrollo de este proyecto de maestría, tuve el privilegio de contar con el apoyo de personas cuyas contribuciones resultaron fundamentales tanto en lo académico como en lo personal. A todas ellas, les expreso mi más sincero agradecimiento. A mis padres, Miguel (†) y Antonia, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida. A pesar de la ausencia en el plano terrenal, mi padre me dejó enseñanzas profundas que continúan guiando mi camino. A mi madre, por su fortaleza constante y su apoyo incondicional, le debo gran parte de este logro. A Cristian, por su compañía, aliento permanente y por recordarme que, mientras estemos juntos todo tiene solución, su presencia ha sido clave a lo largo de este proceso. A mi hija Ángela, gracias por recibir cada uno de mis regresos con una sonrisa. Su existencia es un faro que ilumina mi vida, no hay día en que no agradezca la bendición de tenerla conmigo. Agradezco profundamente a la Sra. Antonia Castro y a la Sra. Yolanda Fernández por el cuidado y dedicación con los que atendieron a Ángela durante mi ausencia. Su apoyo fue esencial para poder concentrarme en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Rafael Barboza, mi más sincero reconocimiento por haber aceptado ser mi asesor de tesis. Su orientación, compromiso y acompañamiento, incluso en circunstancias adversas, fueron decisivos para la culminación de este proyecto. Al Dr. Ramón Torres, le agradezco sus observaciones pertinentes, su constante disposición para el diálogo académico y su compromiso con la mejora continua de este trabajo. Su apoyo ha sido una fuente importante de motivación. Al Dr. Lorenzo Borselli, expreso mi agradecimiento por haber aceptado formar parte del comité sinodal, por su imparcialidad y profesionalismo a lo largo del proceso. A la Dra. Claudia Hernández, le agradezco su colaboración durante la fase de difracción de rayos X en el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Su asistencia técnica y disposición fueron invaluableles. A los maestros Helios Bafún y Diego Jaime, mi reconocimiento por los valiosos comentarios y sugerencias que enriquecieron sustancialmente este proyecto. Su experiencia y generosidad intelectual fueron de gran ayuda en momentos clave.

Agradezco a mí mejor amiga Karen Marian Saucedo Castro por su apoyo durante el proceso creativo, a mis amigos los M. SC. Luis Fernando Rodríguez Sosa, David Alejandro Morales Bascuro y Mariana Gómez Ramírez que siempre tuvieron un consejo oportuno o un aporte de conocimiento. También a mis compañeras de maestría Daría Barboza, Shaila Moreno y Lineth González con quienes coincidí durante este camino. Al Dr. Macario Rocha, quien creyó en mi potencial desde el inicio, gracias por impulsarme a emprender este difícil camino académico, por apoyarme aún en medio de las adversidades y por ser siempre un ejemplo de dedicación, le reitero mi más profunda admiración. Finalmente, a aquellas personas anónimas que facilitaron esta etapa. ¡Gracias!

Dedicatoria

Para Ángela y Cristian
Para Miguel (†) Antonia y Karen
Ustedes son todo en mi vida, los amo



INTRODUCCIÓN

a. Planteamiento del problema

El depósito “El Fénix” se ubica dentro de la zona mineralizada Villa Hidalgo, en el municipio de Villa de Arista. En esta zona han sido identificados cuerpos lenticulares y vetiforme de yeso con contenido de azufre. Estos depósitos son de gran interés debido a su origen incierto, ya que según Labrado *et. al.*, (2019) el azufre puede estar asociado a actividad fumarólica en zonas volcánicas activas o provenir de procesos sedimentarios donde las bacterias reducen el sulfato generando azufre libre. Aunque la asociación con yeso en estos depósitos sugiere el segundo tipo, tiene carácter vetiforme de sus cuerpos, así como algunas texturas y estructuras evidentemente asociadas a su emplazamiento, generan interrogantes sobre el tipo de emplazamiento y su relación con eventos tectónicos en la región. Barboza-Gudiño *et al.* (2001) menciona que estos depósitos se encuentran principalmente emplazados en fallas y fracturas con orientación N50°-60° W, lo que sugiere una posible influencia de la tectónica en su emplazamiento, existiendo también la incertidumbre de si estos cuerpos de yeso con azufre provienen de un origen hidrotermal.

b. Objetivo

Crear un modelo estructural del área del depósito de azufre-yeso El Fénix, en la zona mineralizada Villa Hidalgo SLP y establecer la relación de los cuerpos de mineral con estructuras y eventos tectónicos específicos estableciendo en este contexto los mecanismos de emplazamiento del mineral y su posible origen

c. Metas

- Cartografía a semi-detalle del área de estudio.
- Descripción de las rocas en las que se alojan los cuerpos de mineral yeso-azufre.
- Descripción general de los cuerpos y mineralogía.
- Levantamiento estructural del área del cañón del Fénix.
- Modelo de emplazamiento.
- Interpretación tectónica del área.

d. Hipótesis.

Los cuerpos de mineral de yeso-azufre en la zona de la mina El Fénix muestran una distribución y formas que sugieren su emplazamiento en estructuras más propiamente asociadas a una deformación frágil y su ocurrencia a lo largo de un lineamiento regional, así como el carácter brechado de las calizas cretácicas en las que se alojan, sugieren su asociación con fallamiento. Un levantamiento estructural detallado a lo largo del citado lineamiento y en las zonas aledañas a los cuerpos e incluso su estructura interna podrán arrojar información para establecer un modelo de emplazamiento de estos cuerpos y relacionarlos con algún evento tectónico de la región.

e. Justificación

El análisis estructural detallado en las rocas del área y las estructuras a lo largo del lineamiento del cañón del Fénix dentro de los cuerpos minerales mismos, permitirá generar un

modelo de emplazamiento de estos cuerpos cuyo origen y presencia en esta zona específica se desconocen. Aunque su potencial y factibilidad de un posible aprovechamiento son limitados, son un tipo particular e importante de yacimientos presentes en un distrito caracterizado por la presencia de escasos depósitos epitermales y esencialmente por depósitos de minerales no-metálicos en la porción sur de la región altiplano del estado de San Luis Potosí.

f. Metodología

La metodología utilizada para el presente proyecto consistió en cinco etapas principales que fueron gabinete, campo, laboratorio, interpretación de resultados y finalmente la conclusión de la tesis para presentar el examen de grado. Las etapas mencionadas anteriormente se describen a continuación.

Etapas de gabinete

La etapa de gabinete consistió en revisar y analizar información bibliográfica (folletos técnicos, libros, tesis, informes, artículos) relacionados al área de estudio con el fin de crear conocimiento en cuanto a los antecedentes del área de estudio y poder realizar un marco teórico. También, interpretación de modelos digitales de elevación, hojas topográficas y geológicas, así como la creación de bases de datos en Excel®, los cuales fueron documentados en campo con el fin de elaborar un mapa en el software ArcGIS®, escala 1:10,000. Este proceso permitió la generación de figuras, tablas y esquemas simplificados que posteriormente fueron integrados en la presente investigación.

Etapas de trabajo de campo

La etapa de campo consistió en 7 visitas al área de estudio, en las cuales se realizaron caminamientos, toma de muestras e imágenes y el registro de estaciones para medición de datos estructurales. Estas visitas permitieron identificar y describir las diferentes unidades litológicas presentes, así como documentar los datos estructurales. Además, este proceso permitió la recolección de muestras representativas para las técnicas analíticas aplicadas y la captura de imágenes del entorno y de afloramientos con rasgos estructurales particulares en las rocas encajonantes y dentro de los cuerpos de mineral.

Etapa de laboratorio

La etapa de laboratorio consistió en la aplicación de tres metodologías, la difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido y la petrografía de láminas delgadas.

Difracción de rayos X (DRX)

Es una metodología que permite determinar los minerales principales de una muestra en particular. Estos análisis proporcionan una caracterización mineralógica, lo que facilita la identificación y cuantificación de especies cristalinas, además de brindar informa-

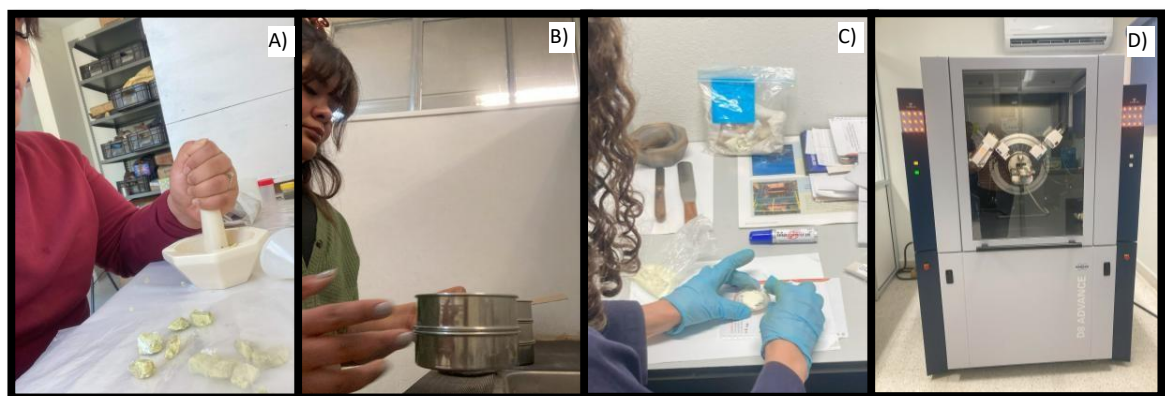


Figura 1. Fotografías del proceso de preparación de muestras para difracción de rayos X A) Trituración en molino de mortero B) Tamizado en cribas C) Preparación en pastilla para ingresar al difractómetro D) Proceso de difracción en acción.

ción estructural sobre ellas. La dispersión de rayos X involucra a todos los átomos del material irradiado. Debido al ordenamiento periódico de los átomos en una estructura cristalina, los rayos dispersados en distintos átomos generan un desfase interno, lo que provoca una interferencia constructiva entre las ondas (Gabriel-Tuesta y Huaypar-Vásquez, 2012).

La preparación de las muestras para el análisis de DRX se hizo en el Instituto de Geología de la UASLP. El procedimiento consistió en triturar cuatro muestras representativas en un mortero de porcelana, procurando obtener granos muy finos (Figura 1A). Posteriormente, el material pasó por un molino de discos vibratorios modelo *RETSCH* 200, permitiendo el tamizado con una malla No. 200 (Figura 1B), hasta tener cuatro muestras de 100 gr cada una, finalmente las muestras fueron almacenadas en recipientes herméticamente cerrados para evitar la contaminación. Después del proceso de preparación, las muestras fueron transportadas al Instituto de Metalurgia de la UASLP, donde el análisis se realizó en un difractómetro de rayos X para polvos *Bruker D8 Advance* con diseño *Davinci*, detector rápido "ojo de lince", óptica secundaria *twin-twin*. Para el análisis, las muestras fueron colocadas en una pastilla circular de plástico transparente de 7 cm de diámetro (Figura 1C), la cual fue rellena con la muestra pulverizada y compactada ligeramente para evitar alteraciones en los resultados.

Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La MEB es una técnica que analiza muestras de pesos menores a 10 g a las cuales se les aplica un haz de electrones de alta energía, los cuales son producidos a partir de un

filamento de tungsteno, elevando la temperatura a 2700 K; una vez que el tungsteno alcanza esta temperatura empieza a emitir electrones por emisión termoiónica.

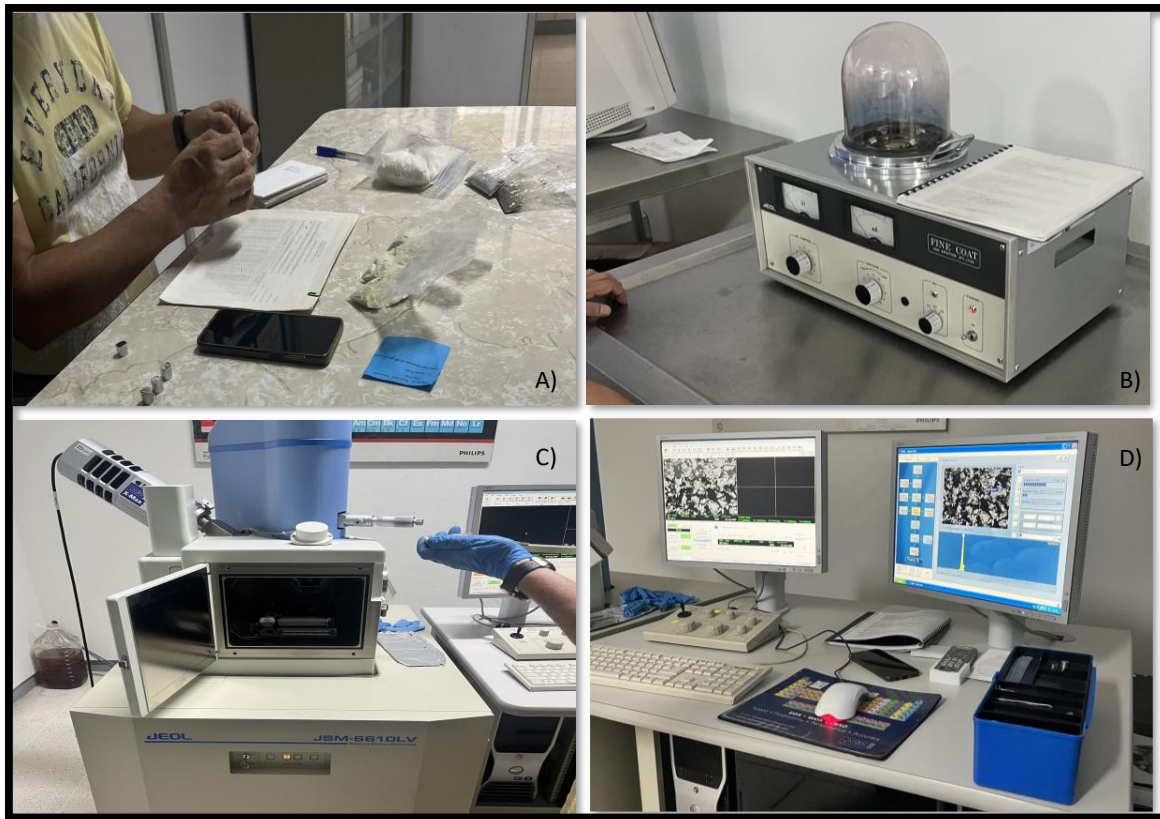


Figura 2. Procedimiento ilustrativo para el análisis mediante MEB A) Preparación y acondicionamiento de muestras B) Recubrimiento de oro mediante el equipo *Fine Coat Ion Sputter* en condiciones de vacío favoreciendo la conductividad eléctrica C) Colocación y análisis de las muestras en el microscopio electrónico de barrido y D) Adquisición y procesamiento de las micrografías obtenidas mediante el software especializado del equipo.

De esta manera la energía del proceso genera una transferencia de electrones entre el filamento y la muestra, favoreciendo que los electrones secundarios puedan ser detectados e identificados, permitiendo reconstruir imágenes superficiales de las muestras (Hernández-Arteaga, 2018). El desarrollo de este estudio fue realizado en el Instituto de Metalurgia de la UASLP. El recubrimiento de oro fue el seleccionado para estas muestras ya que no conducen la electricidad y fue realizado en un *Fine Coat Ion Sputter* JFC-1100 con un vacío en nivel 10,

permitiendo el recubrimiento total mientras que el barrido electrónico se realizó en un *JEOL* modelo JSM-6610LV y una vez obtenidos los resultados fueron procesados en un software especial del equipo de barrido. Cabe recalcar que las muestras utilizadas para el MEB fueron procesadas a la par de la preparación de las muestras de DRX y de manera ilustrativa el procedimiento se muestra en la figura 2.

Petrografía de láminas delgadas

La petrografía de láminas delgadas de muestras seleccionadas en campo comenzó con la preparación de las muestras para petrografía y consistió en elegir ejemplares representativos para realizar un corte en forma de prisma rectangular. Este prisma fue desbastado (Figura 3B) con abrasivos desde el más grueso hasta el más fino para emparejar la cara de la muestra que posteriormente fue pegada en un portaobjetos de vidrio (3x2 cm) con resina (Figura 3C). Una vez pegado el cubo de roca, éste fue cortado lo más delgado posible y próximo al portaobjetos (Figura 3D), siguiendo con el desbaste de la fracción de la roca usando lijas y abrasivos hasta conseguir un grosor aproximado de 30 μm , permitiendo observar a



Figura 3. Fotografías de preparación de muestras A) Corte de prismas rectangulares B) Etapa de desbaste C) Etapa de pegado D) Resultado del pegado a láminas

través del producto (lámina delgada) los minerales y características de estos bajo un microscopio de luz transmitida marca Leica®, con el objetivo de identificar los minerales que conforman las muestras, basándose en propiedades ópticas de cada constituyente mineral, enfatizando forma, textura, color de interferencia, birrefringencia, relieve, crucero, ángulo de extinción, abundancia, permitiendo caracterizar el tipo de roca.

Interpretación de resultados

La interpretación de resultados consta en la integración, entendimiento, discernimiento e interpretación del conjunto de resultados de las metodologías planteadas y usadas en este trabajo de investigación.

La última etapa obligatoria incluye la integración, redacción de la base teórica, metodología y resultados obtenidos durante el trabajo de investigación para finalizar con un texto explicativo. Éste fue dividido en capítulos con temas específicos simplificando cada uno de los temas presentados en la Tesis, usando un procesador de texto que permitió la integración incluyendo gráficos, figuras y tablas que facilitaran la comprensión del texto.

g. Antecedentes

La zona de estudio ha sido objeto de diversas investigaciones a lo largo de los años, las cuales han permitido conocer la naturaleza geológica y mineralógica del área. Pérez Siliceo (1963) documentó en su reporte de visita al yacimiento de azufre "El Fénix" las primeras observaciones sobre la ubicación y características del yacimiento. Más tarde, Echegoyén (1966), en

su texto titulado Algunos depósitos de Villa Hidalgo, S.L.P., propuso que la mina "El Fénix" podría estar asociada a fallas y fracturas geológicas, lo cual sugirió como un factor clave en la formación del depósito. Posteriormente, Pérez-Ibargüengoitia *et al.* (1977) realizaron un estudio sobre la exploración regional del área Peyote-Tapona, que abarca los municipios de Villa Hidalgo y Guadalcázar. En este informe, se describió que el depósito mineral en la zona de "El Fénix" se formó en dos fracturas con rumbo N65°W y alcanzaban una profundidad de hasta 60 metros.

Barboza-Gudiño *et al.* (2001) cartografiaron para el Servicio Geológico Mexicano la carta Geológico-Minera Llanos del Carmen (F14A54) a escala 1:50,000, en la que identificaron el área de "El Fénix" como un depósito de yeso y azufre, sugiriendo un posible origen de inyecciones en fracturas y fallas. Recientemente, Ruiz Ortiz (2005) menciona en el inventario de los recursos minerales de Villa de Arista que El Nuevo Fénix tuvo un gran auge de producción de azufre nativo de alta pureza de 1933 a 1956, dicho autor menciona que el origen de este depósito es hidrotermal asociado a la Formación El Abra, estas calizas que encajonan el azufre fueron reemplazadas por impregnaciones sulfurosas en yeso y en zonas profundas con anhidrita, señala también que dichos depósitos contaban con sus plantas de beneficio *in situ*. Núñez-Miranda (2006) cuantificó el depósito mineral "Nuevo Fénix", que se estima contiene 220,000 toneladas de yeso en forma de vetas, con origen hidrotermal. Este depósito se encuentra ubicado en el ejido Salitrillos en el municipio de Villa de Arista en la colindancia norte con el municipio de Villa Hidalgo.

h. Localización y vías de comunicación

El área de estudio está dentro de la hoja F14-A54, titulada Llanos del Carmen, con una escala de 1:50,000, y en la hoja San Luis Potosí (F14-4) a escala 1:250,000. Para llegar al área desde la capital de San Luis Potosí, se toma la carretera federal 57 en dirección norte, recorriendo 80 km hasta llegar al entronque con la carretera al Peyote. Desde allí, gira hacia el oeste y continúa durante 25 km hasta la localidad de La Tapona, que conecta con el área de estudio, ubicada a 10 km en línea recta hacia el poniente de esta localidad. La accesibilidad es restringida: después de un trayecto de 15 km en camioneta, se llega a El Mulero, desde donde es necesario caminar durante dos horas para acceder a la mina El Fénix. Cabe señalar que el camino que conducía hasta la mina y apto para vehículos motrices, en sus últimos kilómetros se encuentra totalmente destruido por los muchos años fuera de uso.

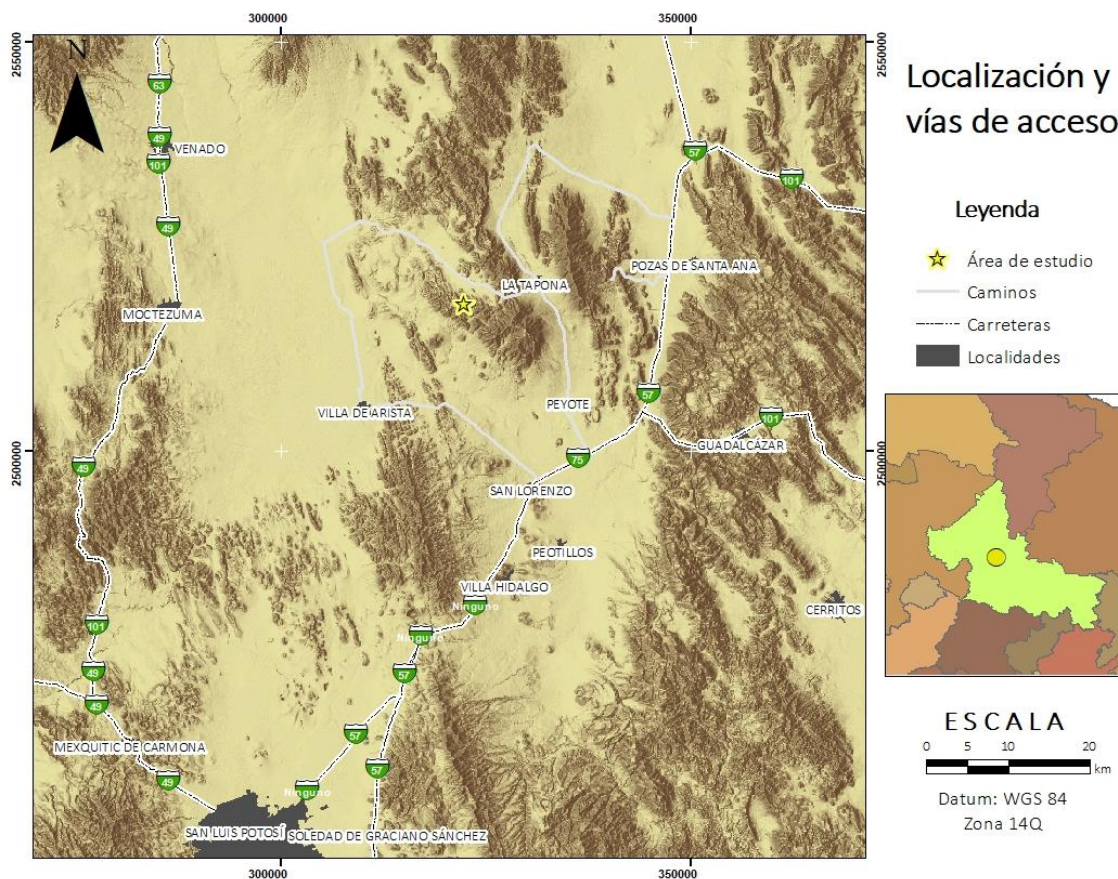


Figura 4. Localización y vías de acceso del depósito de yeso y azufre “El Fénix” señalado con círculo amarillo.

i. Génesis de los depósitos de azufre

El azufre elemental está asociado a diversos ambientes geológicos, utilizando la clasificación de Ruckmick *et al.*, (1979) los divide en dos categorías principales 1) depósitos biogénicos que incluyen los bioepigenéticos que son aquellos que ocurren por el reemplazamiento de yeso y anhidrita y biosingenéticos que son el resultado de reducción bacteriana de SO_{4-2} a H_2S y oxidación de H_2S a azufre nativo por la oxidación de aguas superficiales, ambientes lagunares, evaporíticos, marinos y lacustres y en 2) depósitos asociados a vulcanismo. Así como una tercera categoría de depósitos oxidativos y cuarta como acumulaciones termogénicas.

En una escala geológica, muchas de las acumulaciones de azufre nativo en estos entornos son transitorias. Al ser enterrado, el azufre nativo puede ser reducido a sulfuros, mientras que períodos extendidos de exposición a condiciones oxigenadas conducen a su oxidación a sulfato (Druckman *et al.*, 1994; Burhan *et al.*, 2002). Los depósitos de azufre epigenético fueron depositados posterior a la estratificación. Estos depósitos pueden formarse de manera bioepigenética, de tal manera que el azufre reemplaza una roca huésped rica en sulfatos como el yeso o anhidrita y tiene asociación con carbonatos autógenos como calcita, aragonito y dolomita. En los depósitos estratificados el azufre nativo reemplaza las capas ricas en sulfatos que fueron depositados durante la formación de las rocas evaporíticas, mientras que en los depósitos tipo *caprock*, el azufre nativo reemplaza los sulfatos que se acumularon en la cima de un diapiro de sal a través de la disolución preferencial del cloruro de sodio (Davis y Kirkland, 1979; Ruckmick *et al.*, 1979). Finalmente, los depósitos de azufre

relacionados con el vulcanismo se desarrollan principalmente en zonas con actividad volcánica reciente o activa, y se clasifican en depósitos de reemplazamiento e impregnación, depósitos por sublimación y depósitos vulcanosedimentarios. Los primeros se forman por la acción de soluciones hidrotermales ácidas, ricas en gases sulfurosos, que alteran y reemplazan las rocas encajonantes como tobas y brechas volcánicas por minerales como azufre nativo, ópalo, alunita y sulfuros, principalmente marcasita. Los depósitos por sublimación resultan de la condensación de gases volcánicos calientes, como H_2S y SO_4 , generando acumulaciones de azufre en fracturas, cavidades, estalagmitas, drusas y costras cerca de la superficie o en las inmediaciones de cráteres activos. Finalmente, los depósitos vulcanosedimentarios se originan en lagos termales volcánicos, donde el azufre precipita alrededor de fuentes hidrotermales, formando capas horizontales de pequeño espesor (Ahlfeld, 1947; Barker, 1983; Ortiz-Nava, 2005).

CAPÍTULO I. MARCO GEOLÓGICO

1.1. Geología regional

El área de estudio está ubicada dentro de la provincia geológica Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP) (Figura 1.1), descrita como una plataforma plegada y fallada, sobre un bloque elevado de rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas además de algunas rocas sedimentarias del Triásico y Jurásico (Ortega-Gutiérrez, 1991). Esta unidad también ha sido identificada como un elemento paleogeográfico formado durante el Mesozoico, compuesto por una secuencia marina, evaporítica y carbonatada arrecifal, desarrollada sobre un alto estructural que conforma una plataforma marina con una extensión aproximada de 48 000 km², según Carrillo Bravo (1971). La región experimentó deformaciones causadas por los efectos compresivos del orógeno mexicano (Fitz Díaz *et al.*, 2018), durante el Cretácico tardío-Paleógeno temprano, lo que originó fallas y pliegues en las rocas sedimentarias.

Al Eoceno tardío y Oligoceno corresponden una serie de productos volcánicos que en general se describen como pertenecientes al Campo Volcánico de San Luis Potosí, en el que al tiempo que se desarrollan fallamiento extensional y fosas tectónicas, ocurrió primeramente la emisión de lavas andesíticas (Tristán-González *et al.*, 2009). Seguidas de una actividad efusiva y de erupciones piroclásticas entre 32 y 28 Ma, que fue la más voluminosa, con formación de cadenas de domos exógenos de dacitas hasta riolitas. Una etapa de vulcanismo félsico que sucedió entre los 28-25 Ma, originó erupciones piroclásticas alternada con emisión de basaltos por lo que se considera un vulcanismo bimodal, en asociación con la etapa de mayor extensión y fallamiento normal en la región, ocurrida entre los 28-26

Ma. De 23 a 21 Ma datan algunas erupciones fisurales de basaltos a través de fallas. Finalmente, un vulcanismo intraplaca se traslapó sobre algunos de los complejos volcánicos del Campo Volcánico de San Luis Potosí durante el Cuaternario, con emisión de rocas de composición basanítica.

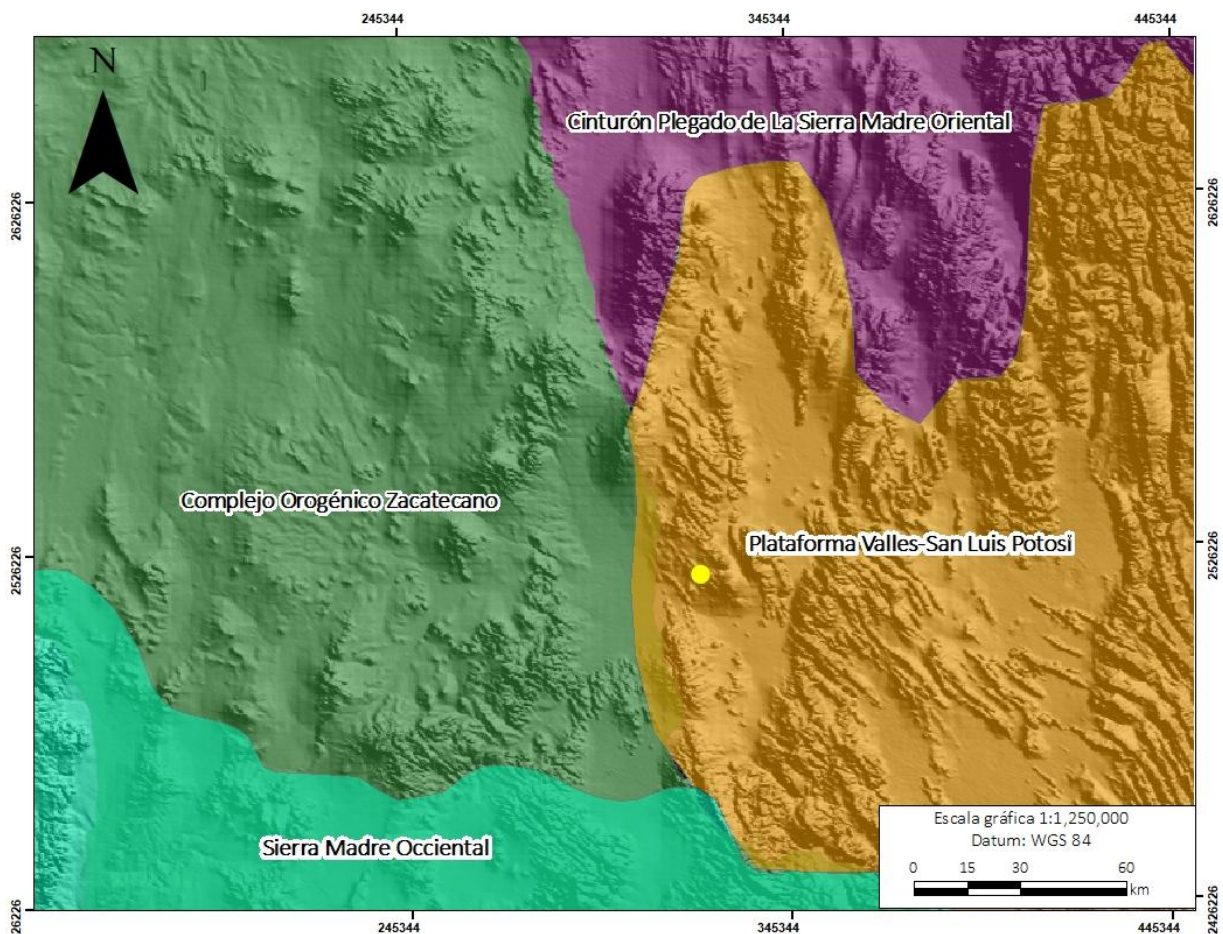


Figura 1.1. Provincias geológicas señalando el área de estudio, modificadas de Ortega-Gutiérrez (1991).

El área de estudio se encuentra en el extremo norte de lo que Tristán-González *et al.* (2009) consideran como Campo Volcánico de San Luis Potosí, siendo el complejo volcánico más próximo el conocido como La Repartición, compuesto de rocas piroclásticas félsicas de

32.5 Ma, domos de dacitas y andesitas de 32.1 Ma y derrames de basaltos de 20.7 Ma (Tristán-González et al., 2009; Barboza-Gudiño *et al.*, 2001). Los aparatos volcánicos más cercanos al área de estudio son algunos domos dacíticos a 8 km al noroeste de La Mina El Fénix y a solo 2 km hacia el poniente de la zona de El Verde. Subyaciendo o intercalados en la sucesión volcánica se encuentran por lo menos dos unidades de conglomerados fluvio-aluviales con matriz arenosa o en parte de cenizas volcánicas, cuya edad se supone pre-oligocénica para los más antiguos y del Oligoceno tardío-Mioceno temprano para los más recientes. Finalmente existen en la región amplias llanuras con rellenos en forma de abanicos aluviales con gravas y arenas hasta los depósitos limo-arcillosos.

1.2. Geomorfología

El depósito de yeso-azufre El Fénix, se ubica a una altitud de poco menos de 1900 m s.n.m. en una cañada que desciende de noroeste a sureste a través de un alto morfológico en donde las altitudes mayores alcanzan los 2000 m s.n.m. en la mesa El Pedernal al poniente y los 2100 m s.n.m. en el cerro Las Piletas al oriente. Este alto morfológico forma parte de las estribaciones hacia el nor-poniente de la Sierra de las Pilas, que en su parte más elevada



Figura 1.2. Fotografías panorámicas que muestran la geomorfología del área.

rebasa los 2550 m s.n.m. La morfología es en general abrupta, con un patrón de drenaje dendrítico y tendencia a patrones de drenaje enrejado por la influencia del patrón de fallas y fracturas.

1.3. Estratigrafía

Dentro del área de estudio afloran principalmente calizas en facies lagunares y arrecifales de plataforma de la Formación El Abra, las cuales se encuentran plegadas y están también afectadas por fallas normales y laterales. Alrededor de los cuerpos montañosos, se encuentran conglomerados polimícticos con clastos que van desde guijarros de unos centímetros hasta bloques de varios decímetros, soportados por una matriz limo-arenosa, estos depósitos están pobremente consolidados y cementados por caliche. Finalmente, el depósito más reciente de material aluvial se localiza en las zonas planas.

La estratigrafía del área de estudio incluye algunas unidades como las formaciones Guaxcamá, El Abra, Cárdenas y depósitos de relleno. Cabe mencionar que, aunque la Formación Guaxcamá no aflora dentro del área de estudio, siendo una unidad que en áreas cercanas subyace concordantemente a la Formación El Abra, es importante describir sus características ya que pueden ser relevantes para describir los cuerpos de yeso que son observados en el área, a los que se asocia el azufre, que es el objeto de este estudio. Posteriormente, la Formación El Abra está conformada por calizas que ocupan un alto porcentaje de los afloramientos del área de estudio, concordantemente, la unidad siguiente es la Formación Cárdenas conformada por lutitas y areniscas finas que afloran en la porción norte del área de estudio, sin embargo, afloran en menor proporción. Finalmente, en zonas aledañas al área de

estudio afloran algunas rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno, así como rellenos aluviales recientes, como se muestra en la figura 1.2.

Mesozoico

Formación Guaxcamá

La Formación Guaxcamá fue descrita inicialmente por Martínez-Pérez (1965), quien la definió como una secuencia evaporítica dentro de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP), con localidad tipo situada en la mina Guaxcamá, a 25 km al suroeste de Cerritos, San Luis Potosí (Carrillo-Bravo, 1971). La descripción litológica de esta unidad fue detallada por Quilantán-Pedraza *et al.* (2008), quienes la caracterizan como una unidad compuesta por yesos y anhidritas bien estratificadas en capas de 5 a 50 cm de espesor, de colores que varían del gris claro al oscuro. Estas capas presentan bandas de material arcilloso intercaladas con yeso y están en contacto, además, con calizas microcristalinas y dolomías de color gris oscuro a pardo.

Posteriormente, Rocha-Rocha (2008) señala que esta formación está principalmente constituida por anhidrita, con menor cantidad de yeso y dolomía. Las capas tienen un espesor de 5 a 50 cm y las rocas presentan un aspecto sacaroide, con tonos que oscilan entre diferentes tonos de gris. En ocasiones, se observan bandas formadas por la presencia de material carbonoso. Los estratos subyacentes a las capas de yeso y anhidrita están formados por calizas microcristalinas y dolomías de color oscuro, además de mostrar la presencia de azufre nativo, distribuido de forma diseminada, estratificada y rellenando fracturas. Aunque el espesor de esta unidad es incierto, Torres-Hernández y Tristán-González (1999) sugieren

que se presenta en forma de diapiros asociados a pequeños plegamientos que varían en todas las direcciones.

El ambiente de formación de esta secuencia evaporítica se desarrolló en una cuenca cerrada sobre la PV-SLP, separada del mar abierto por barreras orgánicas, como lo sugiere la abundancia de rocas arrecifales y post-arrecifales (Carrillo-Bravo, 1971). Según Valencia-Islas y Villaseñor-Rojas (1997), el espesor de las capas podría haber alcanzado decenas de metros, depositadas en un cuerpo de agua cuya profundidad variaba desde somera hasta alcanzar ambientes más profundos en un entorno confinado limitado por los altos relieves formados por los bloques levantados del basamento. El contacto superior de la Formación Guaxcamá es concordante con la Formación El Abra (Carrillo-Bravo, 1971), aunque, en el interior de la plataforma, la Formación El Abra cambia en algunas partes hacia las evaporitas de la Formación Guaxcamá (Aranda-Gómez, 2000).

Como se ha mencionado, en el área de estudio la Formación Guaxcamá no aflora como tal, sin embargo, son motivo del presente estudio, una serie de cuerpos de yeso con asociación de azufre, que ocurren en forma de cuerpos posiblemente inyectados y que, aunque se observaron en algunos casos concordantes, con espesores reducidos, estos podrían provenir de la propia Formación Guaxcamá, que es la única unidad con cuerpos mayores de yeso en la zona.

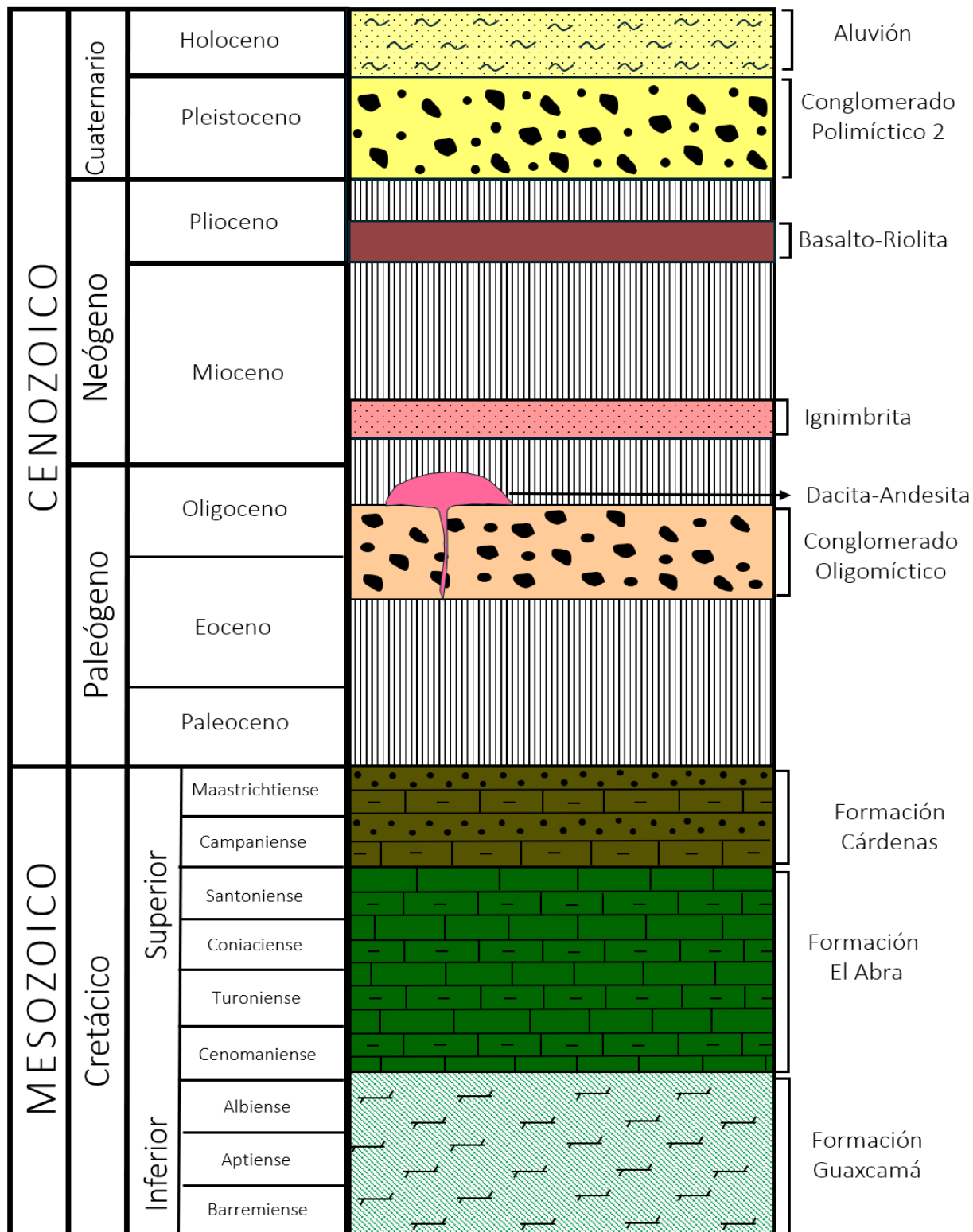


Figura 1.3. Columna estratigráfica del área de estudio, basada en las hojas F14-A54, F14-A55, F14-A64, F14-A65

Formación El Abra

La Formación El Abra fue descrita inicialmente por Muir (1936) mencionando que es un grupo compuesto por dos facies, El Abra y Taninul. La localidad tipo está ubicada en la estación El Abra, a 9 km al este de Ciudad Valles, San Luis Potosí (Aguayo-Camargo, 1973).

Carrillo-Bravo (1971) realizó una descripción de las facies, describiendo la facies Taninul como facies arrecifal conformada por caliza masiva de color crema a amarillento y gris a crema, constituida por un conjunto de bancos arrecifales separados por calcarenita, calcarenita oolítica y clastos biogénicos con cementante de calcita de grano fino, mientras que Suter (1990) menciona que esta facies consiste en caliza de color gris claro con capas lenticulares de caliza bioclástica de textura *rudstone-grainstone* mientras que la facies El Abra está constituida por carbonatos bien estratificados sin horizontes de referencia con espesores desde 30 cm hasta 3 m.

La edad de esta Formación ha sido definida por diversos autores como Albiano-Cenomaniano (Aguayo-Camargo, 1993; Scott, 2002). En cuanto al ambiente de depósito corresponde a una plataforma amplia y estable en aguas someras (PEMEX, 1988), también Basáñez *et al.* (1993) mencionan que esta formación tiene tres ambientes deposicionales: arrecifal, lagunar y laguna evaporítica. En las cartografías geológicas de la Mesa Central, ante la dificultad de diferenciar y separar por medio de las facies aquí presentes a la Formación El Abra del Albiano-Cenomaniano, de la Formación Tamasopo con facies arrecifales y lagunares del Turoniano y el Santoniano, descrita en la Sierra Madre Oriental, una secuencia equivalente a la Formación Tamasopo fue cartografiada como Formación El Abra “superior” (SGM, 2002),

que abarcaría hasta el Santoniano y posiblemente aún el Campaniano (Barboza-Treviño, 2022)

Formación Cárdenas

La Formación Cárdenas fue propuesta inicialmente por Böse (1906), quien la describió como una unidad de rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas del Cretácico, ubicada en la vía del ferrocarril San Luis Potosí-Tampico, en el municipio de Cárdenas, SLP. Esta formación está conformada por cuatro miembros principales. El primer miembro tiene un espesor que varía entre 50 y 500 m, y está compuesto por lutitas de color gris a verdoso en capas delgadas a gruesas, alternando con calizas biógenas y delgadas capas de bentonita. El segundo miembro tiene un espesor de 200 a 350 m y está constituido por lutitas calcáreas de color gris, alternando con capas de calcarenitas y calizas con orbitoides. El tercer miembro está formado por areniscas calcáreas de grano fino a medio, dispuestas en capas medianas a gruesas que alternan con estratos de lutitas calcáreas en capas gruesas, con presencia de orbitoides, rudistas y fragmentos de moluscos no identificados. Su espesor varía entre 300 y 500 m. Finalmente, el cuarto miembro tiene un espesor de 60 a 250 m y está compuesto por lutitas arenosas y limolitas de color pardo a rojizo, en capas delgadas a gruesas, alternando con estratos medianos de arenisca gris, sin contenido orgánico.

La edad de esta unidad corresponde al Campaniano-Maastrichtiano, depositada a finales del Cretácico en la PV-SLP, afectada por sedimentos terrígenos clásticos, en un ambiente de agua poco profunda y alta energía, y afectada por la Orogenia Laramide (Carrillo-Bravo, 1971). La distribución de esta unidad se encuentra en la margen occidental de la Sierra

Madre Oriental, y en el centro de la PV-SLP, con afloramientos expuestos en gran parte de los sinclinales (Rocha-Rocha, 2008).

Cuaternario

Conglomerado oligomíctico

En el área de estudio se presenta un conglomerado oligomíctico, que cubre parcialmente la unidad litológica El Abra, está conformado por fragmentos de caliza, pedernal y en ocasiones puede estar cementado por caliche.

Aluvión

Los depósitos aluviales del área de estudio se encuentran en las áreas aledañas a los márgenes de los arroyos, así como en zonas bajas y regularmente planas, estos depósitos son producto de la desintegración de rocas preexistentes, constituidos por clastos de grano muy fino sin consolidación.

1.4. Estructura general del área

El área de estudio presenta fallas, pliegues y fracturas, las cuales controlan en gran medida la distribución de los depósitos minerales en la región. Estas estructuras han sido el resultado de diversos eventos tectónicos que han afectado la región a lo largo del tiempo geológico, caracterizado por la presencia de unidades estratigráficas que se han visto modificadas por procesos de deformación. Las fallas son una de las principales estructuras geológicas identificadas en el área de estudio y se presentan con desplazamientos de tipo normal

y lateral izquierdo, aunque en áreas aledañas se han reportado fallas dextrales y fallas inversas de bajo ángulo, tipo cabalgaduras. Las fallas normales y de desplazamiento lateral, se presentan principalmente en dos direcciones: noroeste-sureste y noreste-suroeste, con algunas variaciones locales. Las fallas noroeste-sureste son de mayor longitud o se pueden seguir como lineamientos en imágenes satelitales hasta por varios kilómetros o decenas de kilómetros, presentan echados sub-verticales y están asociadas a movimientos sinestrales. En general el conjunto de estructuras observadas indica una historia tectónica relacionada con procesos contractivos seguidos de fases de extensión y de fallamientos transcurrentes.

Los pliegues observados en el área de estudio son predominantemente de tipo anticlinal y sinclinal, relativamente suaves, amplios y con ligera vergencia hacia el este-noreste, con una orientación general de sus ejes, noroeste-sureste. Se observan pliegues mayores de rumbo general noroeste-sureste y vergencia hacia el noreste, como es el caso del plegamiento de la Sierra de Las Pilas, aledaño al oriente del área de estudio, que se aprecia en la figura 1.4.

1.5. Mineralizaciones regionales de yeso y azufre

La plataforma GEOINFOMEX (2018) reporta un total de veintiún depósitos de azufre en el estado de San Luis Potosí (Figura 1.5). Estos yacimientos se encuentran emplazados en rocas sedimentarias, como caliza, lutita y arenisca. Además, en ese trabajo se indica que el azufre aparece en vetas de yeso, originadas por procesos hidrotermales. Núñez-Miranda (2006), en el Inventario de Recursos Minerales de Villa Hidalgo, describe tres depósitos de

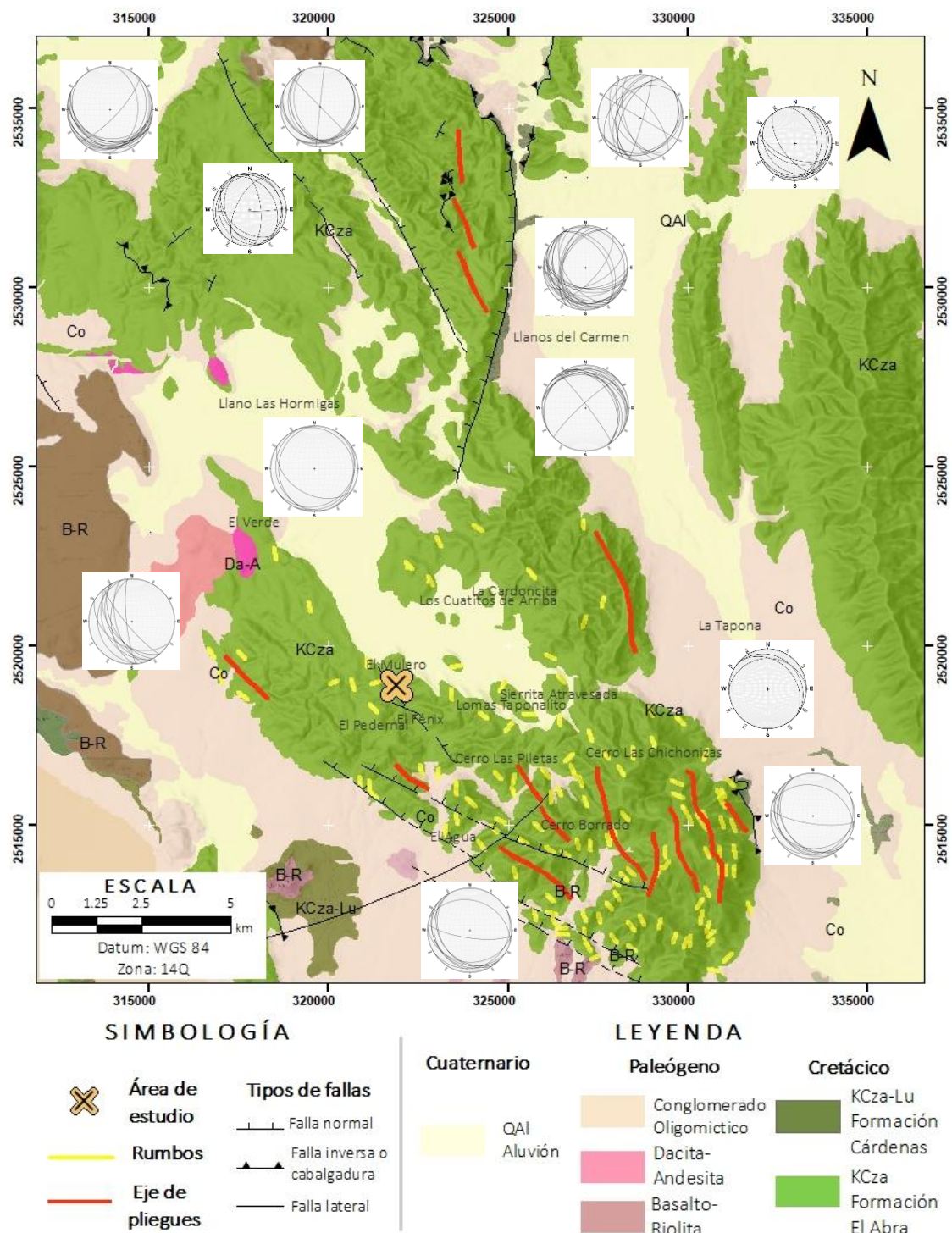


Figura 1.4. Mapa geológico estructural en el que aparecen las principales estructuras plegadas y fallas basado en la carta geológico-minera F14-A54 del Servicio Geológico Mexicano (Barboza-Gudiño et al., 2001) escala 1:50,000, en donde las redes estereográficas muestran círculos máximos de estratificación, en donde se aprecia la orientación general de los pliegues noroeste a norte.

azufre relacionados con vetas epitermales: Nuevo Fénix, La Manzanilla y El Verde. Ruiz-Ortiz (2005) añade cinco depósitos adicionales a esta lista. El primero, La Colorada, se ubica a 17 km de la mina El Fénix. El segundo, El Agua, se localiza a 2.5 km al sur de la misma mina y presenta una disposición del azufre en zanjas de 30 x 10 metros, con morfología lenticular e irregular. El tercer depósito, La Jareña, es de pequeñas dimensiones, una alta concentración de yeso y un terrero con fragmentos de azufre nativo. El cuarto, El Buey, incluye un terrero compuesto por azufre y arcilla roja. El quinto, La Cecilia, muestra mineralización de azufre en vetas y brechas de caliza, lo cual indica un origen hidrotermal con formación vinculada a vetas emplazadas en fallas. Esta información permite ampliar la base de datos regional de depósitos de azufre. El área de estudio comprende dos zonas principales con cuerpos mineralizados y obras mineras relevantes: El Fénix y El Verde. Ambas zonas presentan características geológicas favorables para la presencia de azufre-yeso. Además, otras áreas de la región también contienen mineralizaciones importantes interpretada como de origen epitermal, Pérez-Ibargüengoitia *et al.* (1977) documentan la existencia de minas antiguas de mercurio en el sector comprendido entre El Peyote y La Tapon, que consisten de vetas epitermales de orientación este-oeste que experimentaron una etapa productiva significativa entre 1940 y 1970. Las estructuras mineralizadas y las minas inactivas de mercurio más cercanas se encuentran a una distancia aproximada de 10 a 12 km en línea recta al noreste de la mina El Fénix. Estas minas iniciaron operaciones a principios del siglo XX y alcanzaron una producción total de 52,000 kg de mercurio, con una ley de hasta 2.2 kg por tonelada. La disminución del precio del mineral provocó la suspensión definitiva de las actividades extractivas en esa zona.

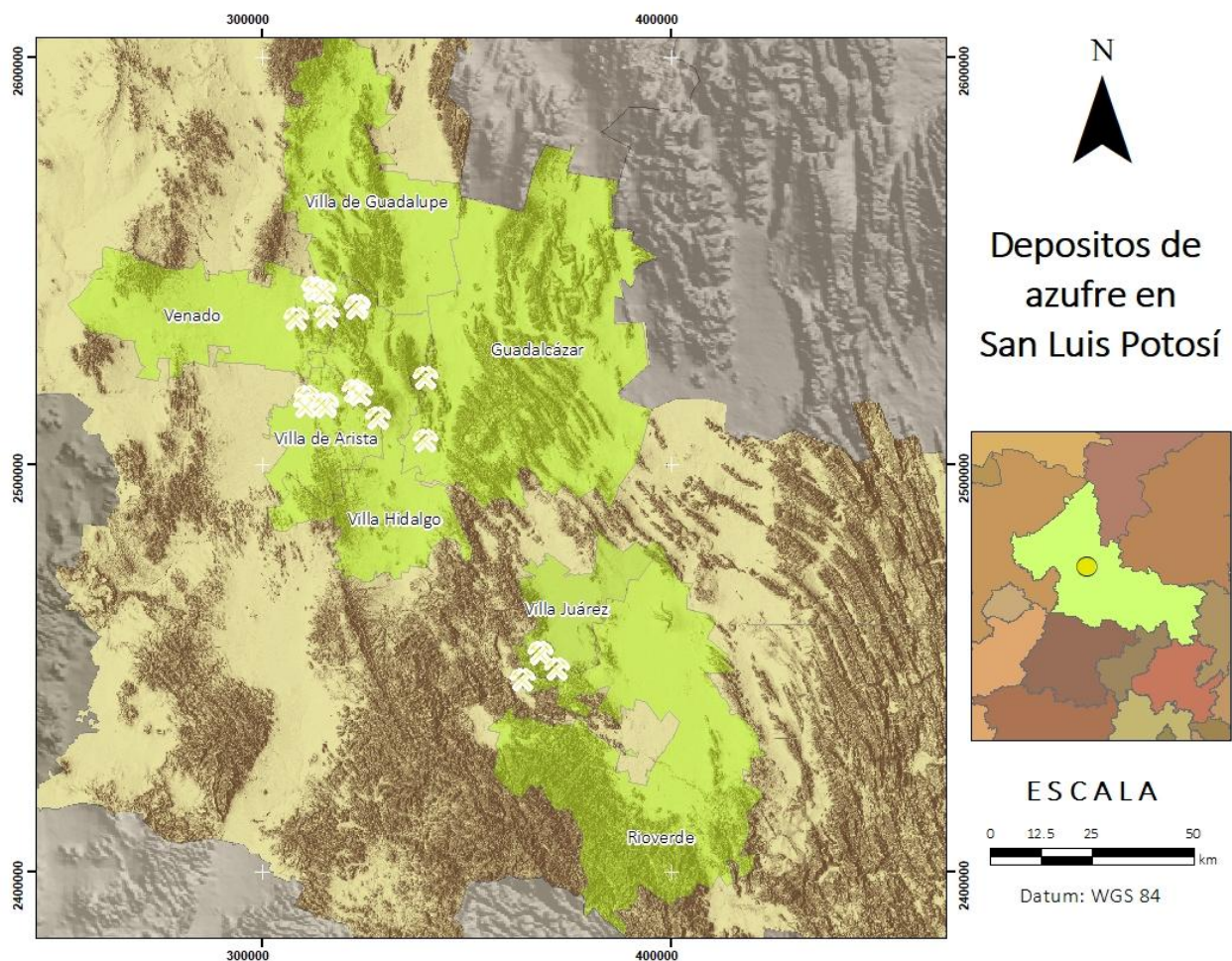


Figura 1.5. Depósitos de azufre en San Luis Potosí, modificado de GEOINFOMEX (2018); Núñez-Miranda (2006); Ruiz-Ortiz (2005).

Además del mercurio, la región contiene otros recursos minerales de interés. Depósitos de arcillas que se comercializan como caolín, actualmente inactivos, se emplazan en fallas ubicadas al poniente de La Taponá. En el sector suroriente del poblado El Coyote, antiguos trabajos mineros realizados por gambusinos durante la Segunda Guerra Mundial permitieron la extracción de celestina con concentraciones de hasta 41 % de estroncio, así como cuerpos o zonas dolomitizadas en las calizas Cretácicas de plataforma, con concentraciones de magnesio en la dolomita que puntualmente alcanzan el grado metalúrgico (Barboza-Gudiño et al., 2000). También se identifican cuerpos irregulares de óxidos de antimonio que

rellenan fisuras y cavidades, sustituyendo vetas de calcita. Por último, la presencia de plata se manifiesta en vetas con concentraciones que varían entre 10 y 125 partes por millón (ppm), lo cual confirma el potencial polimetálico de la región.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

2.1 Deformación contractiva inicial

Contemporáneo al depósito de las unidades marinas del Cretácico Superior en la región, debemos de suponer también a nivel regional, el inicio y paulatino incremento de la influencia de los procesos que causaron la deformación contractiva que finalmente produjo el plegamiento, fallamiento y levantamiento de todo el orógeno mexicano (Fitz Díaz et al., 2018). En la zona los rasgos estructurales más evidentes, son los plegamientos de la sucesión de rocas carbonatadas, en parte arcillosas y evaporíticas que subyacen en forma discordante a depósitos de rellenos fluvio-aluviales y lacustres del Paleógeno y Neógeno, así como algunas rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno.

En la sierra de Las Pilas y las sierras de la carta Llanos del Carmen, los pliegues son ligeramente vergentes hacia el noreste y sus ejes presentan orientaciones noroeste a norte-noroeste, como se observa en la figura 2.1.

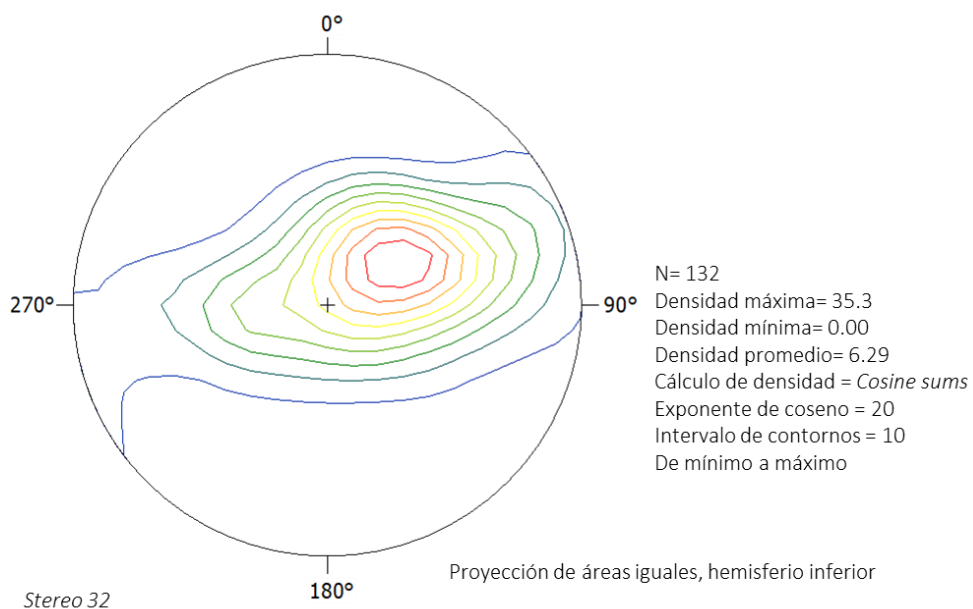


Figura 2.1. Se muestra un diagrama de densidad de polos de estratificación (n=132), medidos en la porción sureste del área de la carta Llanos del Carmen (INEGI, F14-A-54, escala 1:50 000). Se observa claramente la tendencia general de rumbo de las estructuras plegadas noroeste con una vergencia también marcada hacia el noreste, con la mayor densidad de polos ubicada en dicho cuadrante.

Una de las estructuras más notables e ilustrativa del estilo de plegamiento a nivel regional, y en particular, aledaña al área de estudio, es la sierra de Las Pilas, conocida también como sierra de La Tapon, que se encuentra a escasos 5 km al este del área de estudio. Esta sierra está conformada por una estructura anticlinal con una longitud de onda de más de tres kilómetros y un estilo que, aunque muestra una clara vergencia hacia el noreste, exhibe una forma de pliegue de caja, por su amplia cresta con estratificación casi horizontal, tendiendo a formar hacia sus extremos noreste y suroeste lo que se puede considerar como dos charnelas separadas (Figura 2.2).



Figura 2.2 Vista panorámica del plegamiento de la sierra de Las Pilas o sierra de La Tapon, viendo de poniente a oriente. Se puede notar el flanco suroeste con capas con echados de más de 30° , estratificación prácticamente horizontal en un amplio sector de la parte alta de la sierra y un plegamiento vergente o con una clara inclinación de superficie axial y capas volcadas hacia el noreste.

En el área de estudio, que corresponde a algunas de las capas superiores en la sucesión cretácica expuesta, no se aprecian estructuras plegadas y pareciera tratarse de una amplia zona en donde solamente se observa una estratificación suave de capas poco perturbadas con echado de menos de 15° hacia el suroeste (Figura 2.3). Esta monotonía solo se rompe con la aparición esporádica de algunas estructuras plegadas menores, a manera de pliegues especiales y que en la mayoría de los casos como podremos ver en el análisis de

las estructuras mineralizadas, no corresponden en su orientación con el rumbo general de las estructuras que se refieren comúnmente como laramídicas o asociadas al orógeno mexicano.



Figura 2.3. Imágenes representativas de los estratos del área de estudio en la que se pueden dimensionar las variaciones en espesor de las capas.

2.2 Fallamiento y fracturamiento post-orogénico

Las fallas principales reconocidas en la zona son fallas normales de rumbo noroeste, usualmente con una componente lateral izquierda o bien algunas fallas con la misma orientación e indicadores cinemáticos únicamente de dicho desplazamiento sinistral. Por otro lado, una importante estructura a nivel regional es la falla Llanos del Carmen, con rumbo norte-noreste, de tipo normal y mostrando una componente de deslizamiento lateral derecho. Aunque a nivel regional se tiene conocimiento de la existencia de fallas dextrales de rumbo noreste, dentro el área de estudio no se llegó a observar ninguna estructura con estas características, únicamente pequeños planos de falla o vetillas menores.

Las fallas normales de rumbo noroeste, estas fallas que se muestran sobre imágenes satelitales o en la cartografía, como lineamientos muy marcados y aunque no en todos los casos se encuentran afloramientos con las estructuras y los indicadores cinemáticos claros, en varios ejemplos se observan indicios de fallamiento normal y frecuentemente algunas estrías e indicadores compatibles con desplazamiento normal y una componente la-

teral izquierda (Barboza-Gudiño et al., 2001). A nivel regional se pueden apreciar claramente los distintos lineamientos en imágenes satelitales, como se observa en la figura 2.4 tomada de *Google Earth* y a la que se anexa un diagrama de rosa de fracturamiento, obtenida de las longitudes medidas de manera proporcional para dichos lineamientos sobre la imagen. Ejemplos de estructuras medidas dentro del área de estudio, también se muestran en forma de proyección estereográfica en la figura 2.4.

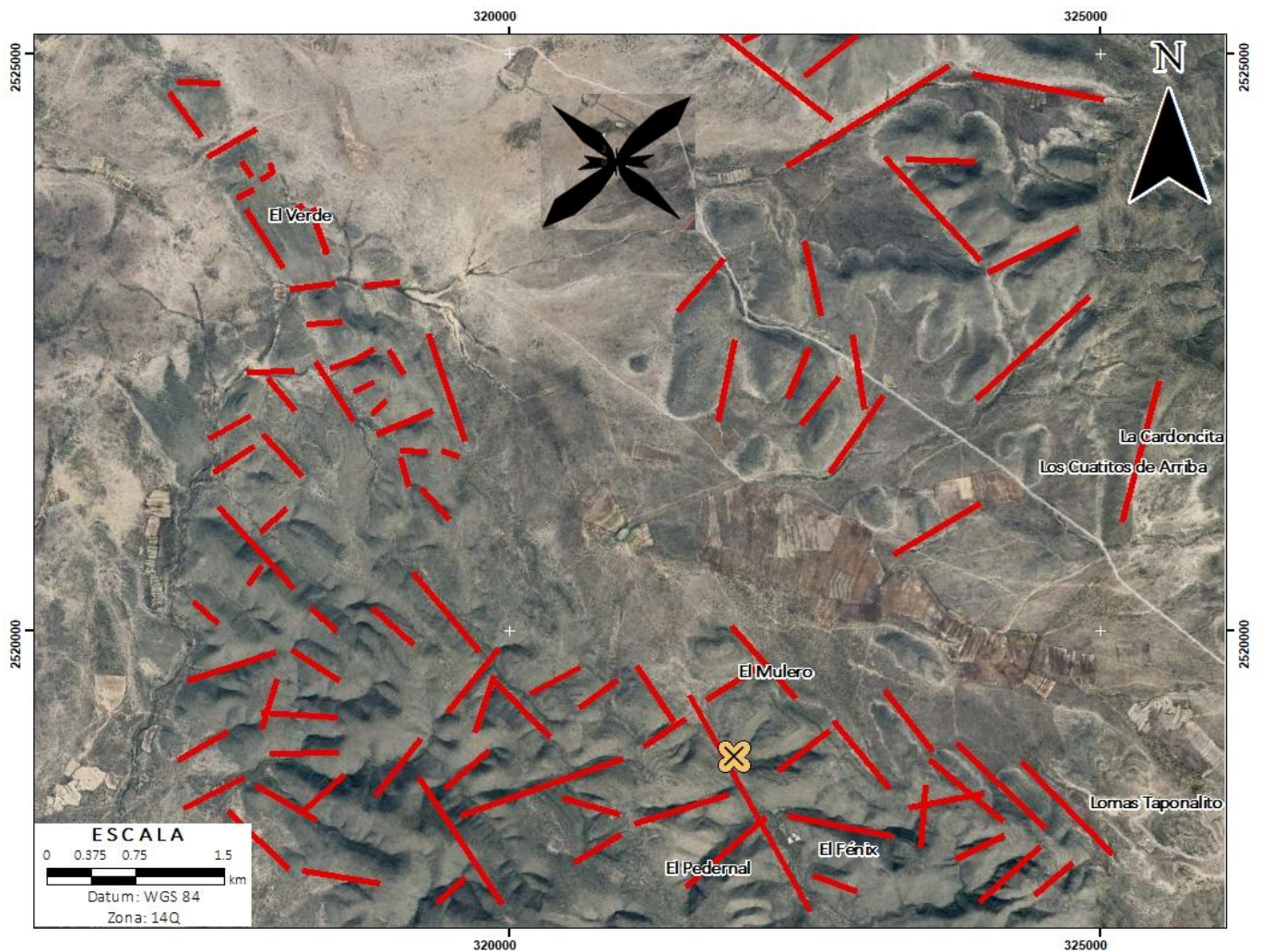


Figura 2.4. Lineaciones sobre imagen Google del área de estudio y diagrama de roseta basado en la longitud proporcional de las lineaciones medidas.

Las fallas normales o dextrales con un rumbo norte-noreste comparables a la llamada falla Llanos del Carmen que aparece en la cartografía geológico-minera F14-A-54 del Servicio Geológico Mexicano (Barboza, et al., 2001), no se observaron dentro del área de estudio,

sin embargo, si son comunes pequeñas fallas y vetillas de rumbo noreste y desplazamiento dextral, además de ser frecuentes lineaciones noreste como se muestra en la figura 2.5.

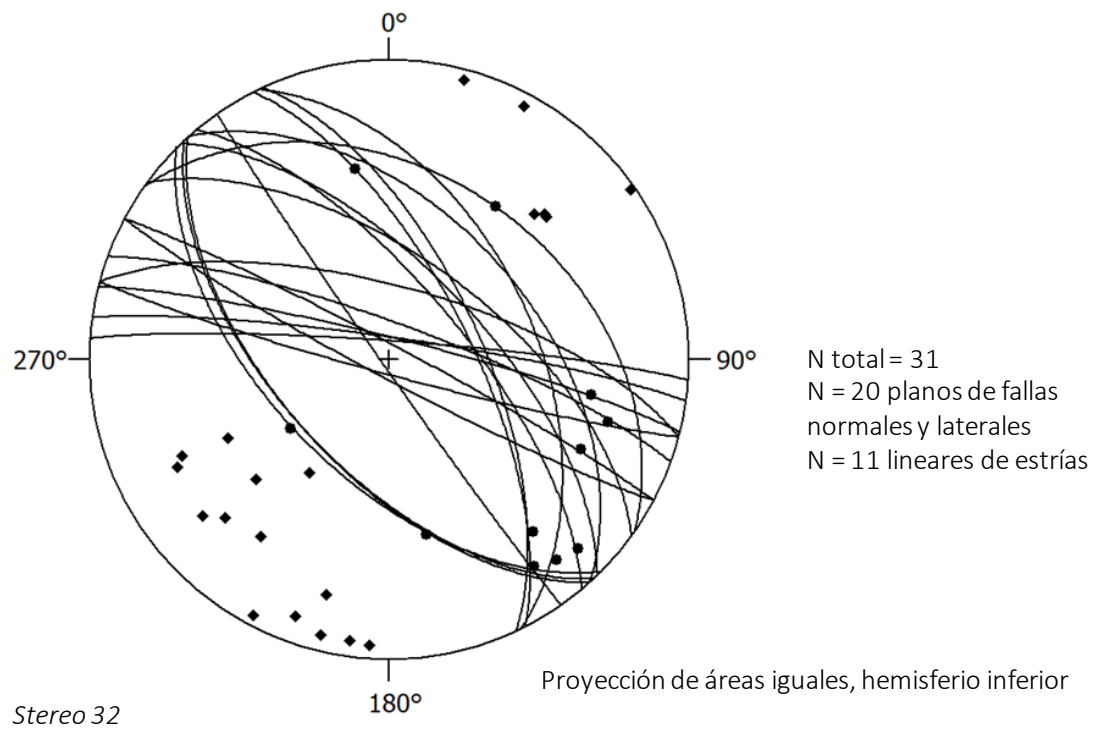


Figura 2.5. Estereograma del conjunto de fallas normales y laterales, frecuentemente con estrías que muestran una componente de desplazamiento lateral izquierdo, medidas dentro del área de estudio.

En el caso de las fracturas, como se observa en las proyecciones de la figura 2.6, predominan orientaciones similares de manera general con las obtenidas de la imagen de satélite, con direcciones noreste y noroeste, aunque se aprecian algunas fracturas norte-noreste que no resaltan en las direcciones obtenidas de la imagen, así como fracturas norte-noroeste de bajo ángulo que posiblemente por su echado no se manifiestan como lineaciones muy marcadas en la misma imagen.

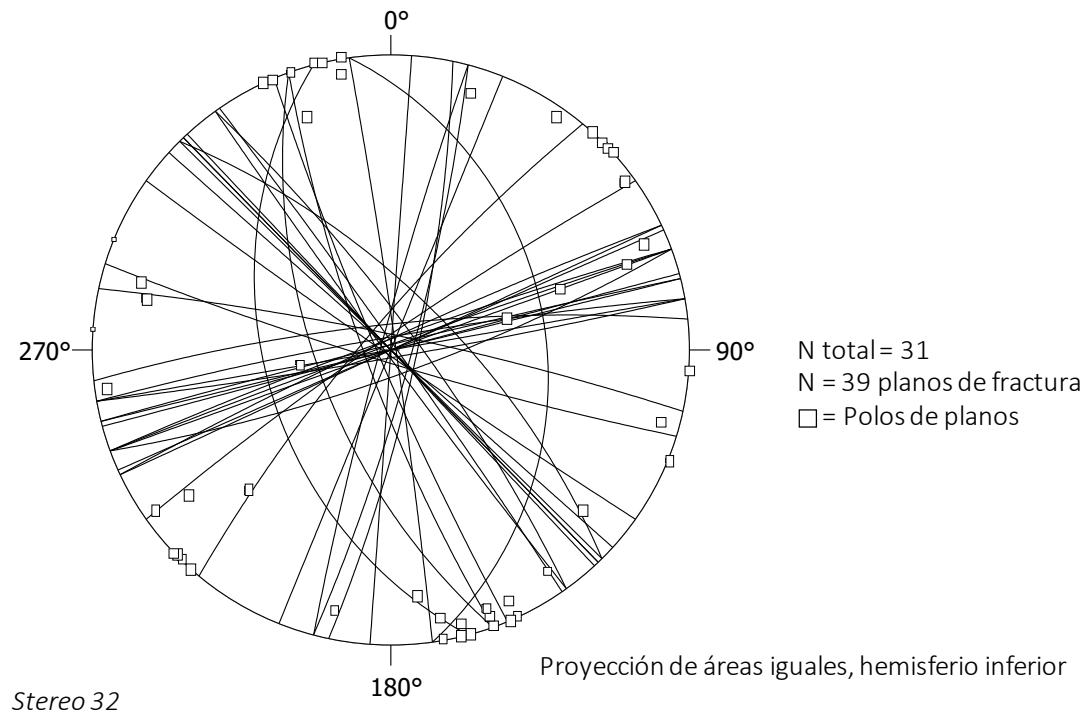


Figura 2.6. Proyección estereográfica de fracturas con rumbos predominantes noreste y noroeste, pudiéndose distinguir una tercera familia norte-noreste. Algunas fracturas norte-noroeste se observan dispersas, aunque algunas de estas son de ángulos sub-verticales, entre las mismas aparecen dos planos con bajo ángulo de echado, tanto al suroeste como al noreste.

En el caso de algunas fracturas a lo largo de la zona del lineamiento El Fénix (Figura 2.7), en las que se observaron juegos de cizalla tanto dextrales como sinestrales, se puede interpretar buena parte de ellas como paralelas a la dirección general del lineamiento N 60°-70° W, mientras que algunas que muestran más claramente indicadores cinemáticos de cizalla (Figura 2.8), se presentan en forma de cizallas conjugadas con un ángulo relativamente cerrado entre sí y con rumbos noreste en ambas familias. Lo anterior se puede interpretar como resultado de un tensor de esfuerzo " σ_1 ", que resultaría aproximado a la orientación del tensor compresivo asociado a un movimiento lateral izquierdo o como superficies tipo *Riedel* a lo largo del lineamiento El Fénix, de orientación general 50-

N60°W, como se muestra en la proyección estereográfica de estas superficies medidas (Figura 2.9), en donde sería necesario ubicar en campo un mayor número de superficies de este tipo y considerar algunas superficies con componentes de desplazamiento normal o inverso.

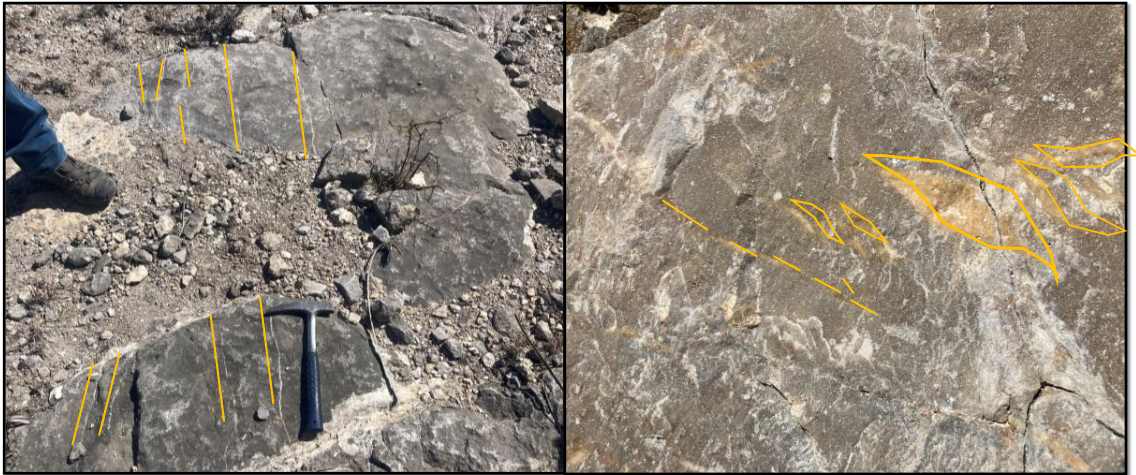


Figura 2.7. Fotografía representativa de los bancos de caliza con presencia de vetillas escalonadas afectadas por zonas de cizalla.

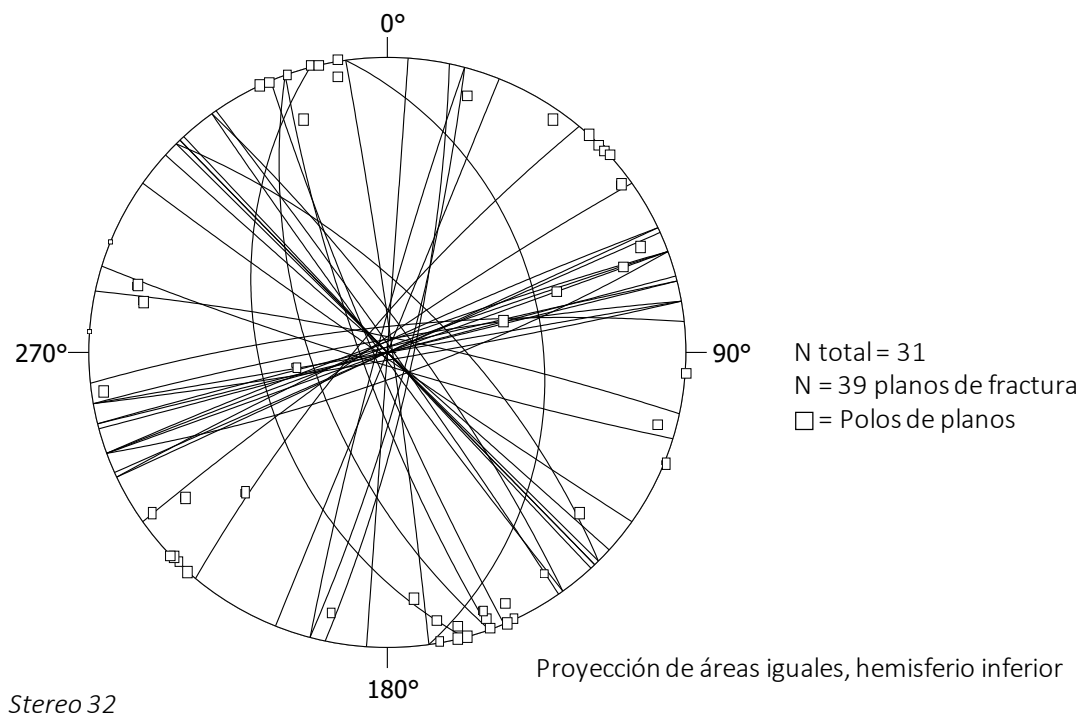


Figura 2.8. Planos de Fracturas de orientación general noreste, que muestran cizallas tanto dextrales como siniestrales y un ángulo entre 30° y hasta más de 50° con respecto a planos paralelos al lineamiento del Fénix, estas superficies de cizalla corresponderían a superficies tipo *Riedel* (R y R') acordes con un sentido siniestral de la falla a lo largo del lineamiento del Fénix.



Figura 2.9. Calizas aledañas a los cuerpos de yeso muestran fracturas principalmente de orientación noreste, aproximadamente perpendicular a la dirección de las fallas y cuerpos con Azufre en yeso, en cuyos planos o caras se pueden apreciar claras estructuras de tipo escoba o *Plumose structures*, que constituyen indicadores de la propagación de la ruptura desde un posible punto de inicio, que en esta imagen tomada de sur a norte, se ubicaría hacia el este o la ruptura habría ocurrido aproximadamente de este a oeste.

Finalmente, una estructura que pudo documentarse sobre la ladera oriental del cañón que en su parte sur corre a lo largo del lineamiento de El Fénix, fue una estructura plegada, que por los echados suaves de las capas de caliza de ambos flancos, solo de manera muy sutil es posible apreciar, mostrándose un ligero cambio en el echado entre un conjunto de capas con echado ligeramente más inclinado hacia el sur-sur-sureste en la parte baja de la ladera y un conjunto de estratos más horizontales con ligero echado hacia el oeste hacia la cima de la colina. En el campo no se aprecia una zona de charnela, en parte por la pendiente suave de la ladera, que no muestra una perspectiva favorable para apreciar toda la estructura, sin embargo, al proyectar los planos de estratificación en una

falsilla de Schmidt, es clara la presencia de los planos de ambos flancos de un plegamiento suave, de gran amplitud, los polos de uno y otro flanco apenas si se agrupan en dos conjuntos muy cercanos a la parte central de la falsilla y el máximo de las intersecciones de los planos señala un eje del plegamiento ligeramente buzante hacia el oeste-suroeste con 5° y 10° (Figura 2.10 A), siendo un promedio calculado para el máximo que se observa en la figura 2.10 B, un rumbo del eje del plegamiento y su buzamiento, $S65^\circ W/10^\circ$.

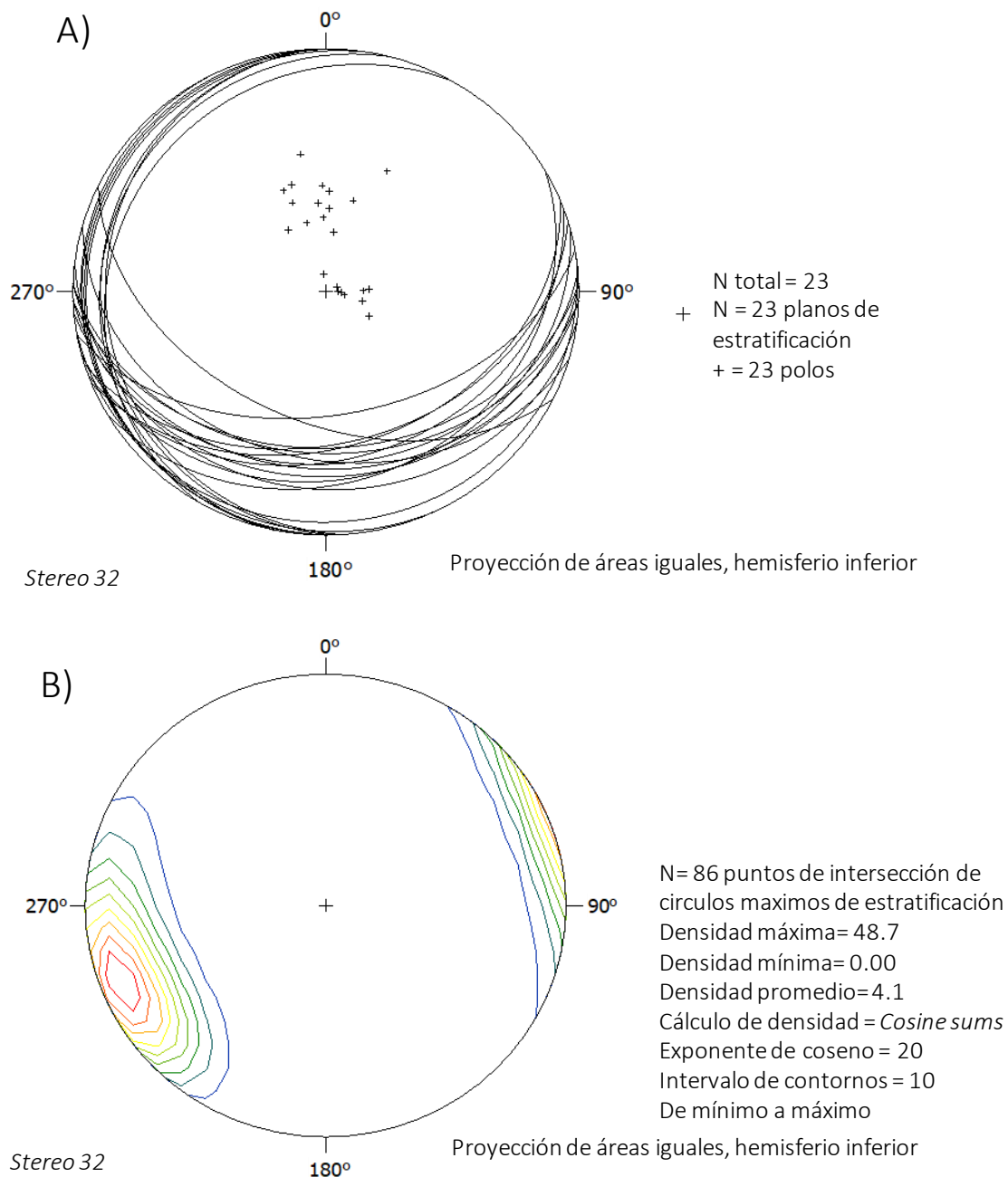


Figura 2.10 A) Proyección de planos identificando flancos de charnela de estratificación con bajo ángulo cuyos puntos de intersección muestran una zona de charnela de una estructura plegada con forma suave y baja amplitud (Shape E/Amplitud 1, en el esquema de clasificación de Hudleston, 1973) B) Promedio calculado para eje B de plegamiento y buzamiento.

De acuerdo a lo anterior el eje de este pliegue estaría orientado casi perpendicular al eje de los plegamientos a nivel regional, que se orientan desde norte-noreste hasta noroeste, ligeramente asimétricos o vergentes hacia el este-noreste. Dadas las características de este plegamiento y su ubicación alrededor a la traza del lineamiento regional El Fénix, para el cual hemos establecido en base a algunos indicadores cinemáticos, un sentido de desplazamiento o cizalla siniestral, podemos interpretar su naturaleza como posiblemente asociada a transpresión, dado que el eje del pliegue es noreste-suroeste y el rumbo general del lineamiento El Fénix es noroeste, siendo sin embargo el rumbo de este plegamiento más acorde con un rumbo noroeste menor a los 60° del fallamiento que se ha venido observando. Cabe aquí señalar que el lineamiento mismo en su parte sur.

2.3. Detalle estructural de la mina El Fénix

En particular, las estructuras de la mina El Fénix, que también se observan en torno a los distintos cuerpos de mineral en la zona, son estructuras tipo bolsas o clavos de mineral de yeso con azufre, de hasta dos o más metros de espesor a lo largo de lineamientos más regionales, que representan zonas de falla, las cuales se trataron de caracterizar a través del conjunto de planos e indicadores cinemáticos asociados que se observaron en campo. Como se ha mencionado, la estratificación dentro del área de estudio es en general de echados suaves, que se observan en las secuencias de capas gruesas a bancos de caliza, con alternancia de algunas capas delgadas y horizontes arcillosos de uno a dos metros de espesor, espaciados o separados hasta decenas de metros en la secuencia. En algunos de estos horizontes se llegan a observar también yesos, aunque se trata de paquetes delgados. La secuencia se observa cortada por fallas o estructuras tipo vetas alojadas en las mismas, con calcita y con los cuerpos de yeso con azufre, así como delgadas bandas de óxidos de hierro tipo goethita o limonita con formas radiales y siguiendo el contorno de estructuras botroidales en escalas centimétricas a decimétricas. También se observan en la periferia de los cuerpos, brechas cataclásticas desarrolladas en las calizas y finalmente planos de falla, ocasionalmente con estrías que muestran deslizamientos de carácter lateral, aunque en muchos de los casos el sentido del desplazamiento no es muy claro (Figura 2.11).



Figura 2.11. En la imagen se observa el límite por falla, entre un cuerpo de yeso con un poco de azufre en su periferia, en donde se aprecia una zona con oxidación y una franja de brecha cataclástica constituida principalmente de fragmentos de caliza en una matriz arcillosa escasa. Abruptamente después de esta zona brechada de 30 a 40 cm de espesor, se observan las capas delgadas de caliza ligeramente arcillosa sin una deformación destacable, únicamente un echado menor de 15 grados hacia el este, que en la perspectiva de la fotografía no se aprecia. El rumbo general de la falla es noroeste-sureste (azimutal = 120°) y su echado es de 80° al este, a subvertical.

En el caso de la mina El Fénix, se observaron rumbos generales de las vetas $N20^\circ-80^\circ W$, siendo las principales $N20^\circ-50^\circ W$ asociadas a fallas de rumbo, en donde comúnmente los planos más regulares se observan en el límite de las calizas y la brecha de caliza, aunque también se observan claros ejemplos en el yeso, reconociéndose en algunos casos estrías horizontales en las que solo con dificultad se llega a interpretar algún desplazamiento lateral izquierdo.

En la figura 2.12 se observa la proyección estereográfica de planos de fallas y vetas que fueron medidas en la zona de las obras mineras de El Fénix o nuevo Fénix, Pérez-Ibargüengoitia *et al.* (1977); Barboza-Gudiño *et al.* (2001). Se puede observar que la mayoría de los planos asociados a vetas o cuerpos de yeso con azufre, presentan rumbos noroeste-sureste (N18°-45°W) con echados desde 65° a más de 85° predominantemente al noreste, en tanto que otros planos de fallas, en algunos de los casos conteniendo vetas solo de calcita, se presentan con rumbos noroeste-sureste, hasta noreste-suroeste (N45°W a N40°E). Las superficies con estrías bien preservadas son escasas y es difícil establecer un sentido del desplazamiento sobre estas fallas, aunque se utilizaron algunos otros criterios, como planos de *Riedel* u otros indicadores cinemáticos, sin embargo en las superficies donde si fue posible medir estrías con el sentido del desplazamiento lateral más claro, se observan planos conjugados en donde las fallas noroeste son sinestrales y las de rumbo

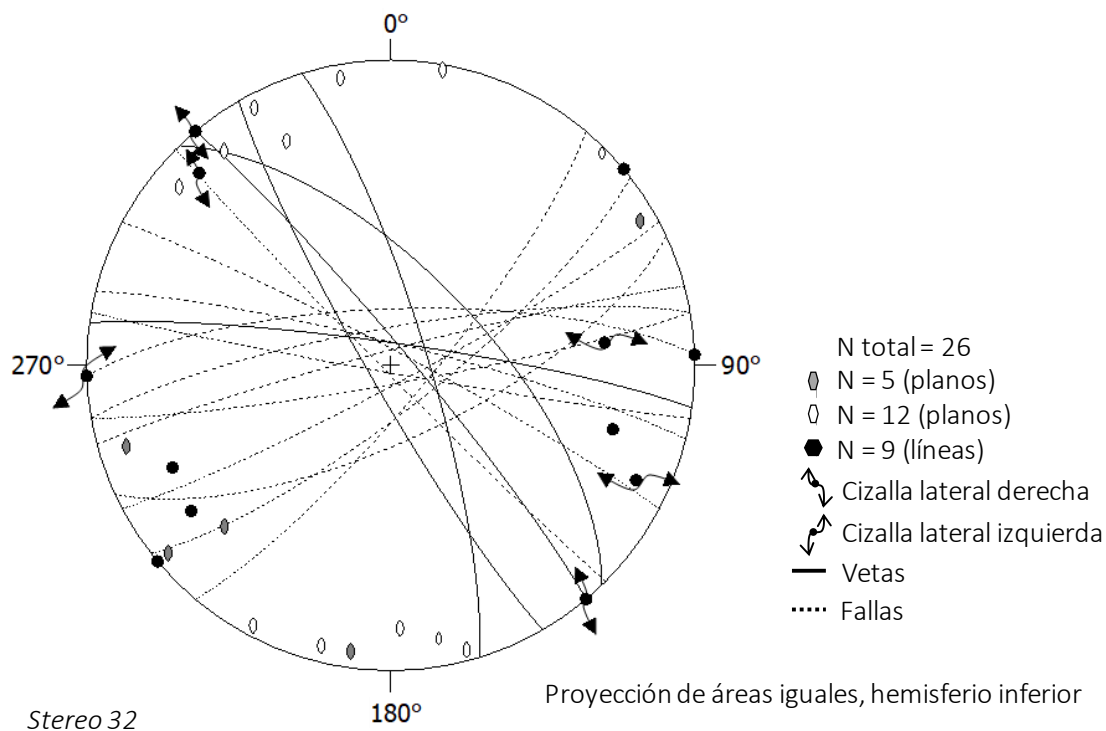


Figura 2.12. En proyección estereográfica de planos de fallas y vetas medidas en la zona de la mina El Fénix, se observan la mayoría de los planos de vetas con rumbos noroeste (N18°-45°W) y echados desde 65 a más de 80°, en tanto que otros planos de fallas, en algunos de los casos conteniendo vetas de calcita, se presentan con rumbos noroeste hasta suroeste (N45°W a N40°E). En las escasas superficies donde fue posible medir estrías con el sentido del desplazamiento lateral más claro, se observan planos conjugados en donde las fallas noroeste son sinestrales y las de rumbo este-sureste son dextrales, coincidiendo todo el conjunto con un campo de esfuerzos asociado a un fallamiento sinistral.

este-sureste son dextrales, coincidiendo todo con un campo de esfuerzos asociado a un fallamiento o cizalla sinistral, como se esquematiza en la figura 2.13. Un aspecto de los planos de falla con estrías en un cuerpo de yeso se puede apreciar en la figura 2.13.



Figura 2.13. Superficie con estrías en cuerpo de yeso con poco azufre. Se trata aparentemente de un plano de Riedel oblicuo con respecto al plano de falla principal que en este afloramiento solo se reconoce por el contacto con la brecha de caliza en la margen derecha de la imagen, límite que es abrupto y bien marcado, aunque en este no se aprecia ningún espejo de falla notable.

Hacia la periferia de los cuerpos de mineral, constituidos en su núcleo esencialmente por yeso seguido por bandas con óxidos tipo limonita o posiblemente goethita que remarcan el contorno de arreglos semi-radiales de cristales de yeso y calcita alternando con el azufre y produciendo formas botroidales de algunos centímetros de diámetro (Figura 2.13). Finalmente se presentan brechas de caliza, en buena medida recrystalizada hasta prácticamente sana, que pasa regularmente de forma abrupta y en la mayoría de los casos a capas de caliza sana no perturbadas, después de un plano de falla bien marcado.

En las minas del área de El Verde, poco menos de 7 km hacia el N40°W, en pequeñas obras como tiros aterrados, una pequeña rampa que culmina en un tiro, rebajes y pequeñas obras de cateo, se pueden observar algunas estructuras que permiten hacer algunas comparaciones con lo observado en la mina El Fénix. Aunque no se tuvo acceso hasta las partes más profundas de estas obras mineras y al igual que en el fénix solamente se llegó a observar las partes más superficiales de las obras mineras siempre con aseguramiento por medio de equipo de rapel, se puede estimar que dichas obras no fueron muy grandes, esto con base en la dimensión limitada de los terreros.



Figura 2.14. Acercamiento de una muestra de yeso con azufre y caliza proveniente de la tabla este de la veta principal observada en la zona de la mina el Fénix. Se observan de derecha a izquierda, con límites bien marcados las zonas o franjas de yeso con manchones de azufre, calcita con bandas de óxidos y finalmente caliza en parte recristalizada.

Las estructuras medidas y que se muestran en proyección estereográfica en la figura 2.15, son algunas vetas, hasta donde se observó de poco espesor, en un caso varias de algunos centímetros de ancho formando una zona de no más de un metro, así como un cuerpo de 40 a 50 cm de espesor. Las estructuras tipo veta observadas tienen rumbos de

N20°-50°W, con echados entre 70° y 80° hacia el noreste, en tanto que algunas fallas medidas en la zona poseen rumbos N12°-55°W con echados de 38° a 65° hacia el noreste. En un caso se observaron estrías de fallamiento normal y en una falla de rumbo N12°W con echado de 45° al noreste, se observaron estrías sinestrales. Cabe señalar que algunas de estas fallas son casi paralelas a la estratificación y que en esta zona se observaron pequeños cuerpos de yeso con azufre también concordantes con los estratos en determinados horizontes margosos. Se puede reconocer plegamiento con un rumbo de su eje ~N20°-30°W, aproximadamente paralelo al rumbo de fallas y vetas, el cual también se puede reconocer en la distribución de polos de los planos de estratificación medidos, los cuales tienden a formar un círculo “ π ” de dirección general N60°-70°E (Figura 2.15).

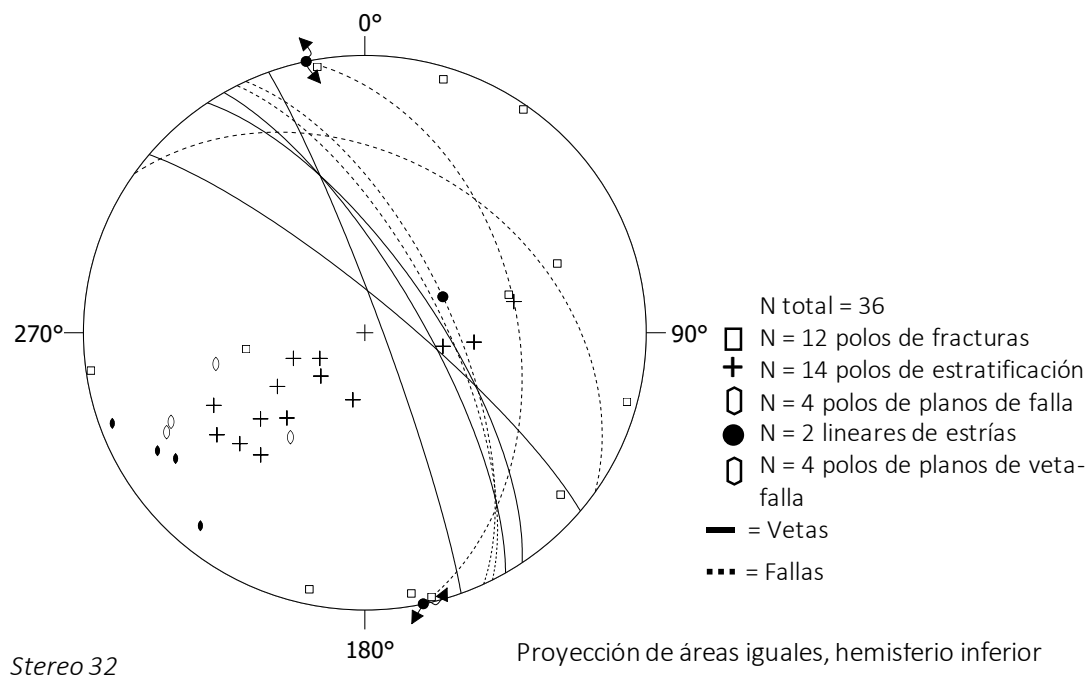


Figura. 2.15. Proyección estereográfica de estructuras medidas en el área de El Verde, ~5.9 km al noroeste de El Fénix, sobre el mismo lineamiento. Se observan vetas orientadas N20°-50°W, con echados de 70° a 80° al noreste. las fallas medidas muestran rumbos N12°-55°W con echados de 38° a 65° hacia el noreste. En esta zona se observaron pequeños cuerpos de yeso con azufre concordantes con la estratificación. Los estratos muestran un plegamiento orientado ~N20°-30°W, aproximadamente paralelo al rumbo de fallas y vetas, el cual se reconoce también por el círculo “ π ” de dirección general N60°-70°E que forman los polos de estratificación

Finalmente se comparan aquí algunas estructuras observadas en la zona de La Tapon, que se encuentra 4.6 km al este-noreste de la mina El Fénix. En esta zona existen obras mineras, y se encuentra ubicada hacia la culminación sur-sureste de un lineamiento que se observa paralelo al lineamiento de El Fénix, sin embargo, no se encontraron yesos ni azufre, únicamente vetas de calcita y zonas o cuerpos en parte también vetiformes, de material arcillosos blanco, que se ha reportado y explotado como caolín, aunque pudiera tratarse de diversas arcillas. Estos cuerpos o vetas están emplazados en calizas cretácicas de la Formación El Abra.

Aspectos de las estructuras medidas en esta zona se observan en la figura 2.16 y la proyección estereográfica que permite comparar estas estructuras con las del área de la mina El Fénix, como se muestran en la figura 2.16. Los datos medidos en esta zona fueron divididos en cuatro localidades muy cercanas entre sí y que se ubican a 5 km al este del área de estudio, en la zona identificada en el mapa como sierrita atravesada (Figura 2.16 A). En la localidad A (puntos LLC25-1a3) se tienen vetas con rumbo norte-noroeste a norte-noreste con echados desde 36° a 85° preferentemente hacia el poniente. Los planos reconocidos solo como fallas sin la asociación de cuerpos de mineral presentan en este punto rumbos N20°-60°W con echados de 68° a 88° hacia el suroeste y también al noreste. Las fallas de orientación noroeste llegan a mostrar estrías con débiles indicios de desplazamiento lateral izquierdo, en tanto que la estratificación es acorde con el plegamiento general de la zona de ejes orientados noroeste-sureste. En la localidad B (Figura 2.16B), se observa una veta de orientación norte-noreste y dos más prácticamente este-oeste, estas dos últimas corresponden a una serie de vetas de espesores de 10 a 15 cm con calcita y leves manifestaciones de algunos óxidos tipo limonita, que se observan en los cortes a lo largo del camino entre el Llano Las Hormigas y La Tapon. En esta localidad, las fallas medidas abarcan rumbos desde N40°W hasta S10°W, siendo algunas similares a las vetas este-oeste. La estratificación muestra en este punto echados de 40° a 45° hacia el poniente. En la localidad C, se observan vetas orientadas N20°-30°W con echados mayores a 80° hacia el suroeste, en tanto que estructuras en parte subparalelas a la estratificación, presentan rellenos similares a estas vetas no-

roeste y a las vetas este-oeste de la localidad B, con calcita y algunos óxidos. Una veta también de bajo ángulo con rumbo norte-sur presenta un echado de 30° hacia el oeste. Finalmente, en la localidad D, se reconocen vetas con rumbo noroeste y echados de 64° a 70° al suroeste y en un caso hacia el noreste. Estas vetas son paralelas a fallas de igual rumbo y echado ubicadas en la misma localidad, pero en las cuales no se observó mineralización, aunque aparentemente forman una misma familia de estructuras de extensión, en parte con una componente de desplazamiento lateral izquierdo. Fallas un tanto comparables se observan en los otros puntos o localidades de esta zona, aunque en esos puntos se observan además las vetas y fallas norte-noroeste a norte-noreste o las vetas de bajo ángulo, paralelas a la estratificación, con echados al sureste, que se observan en el punto 7.

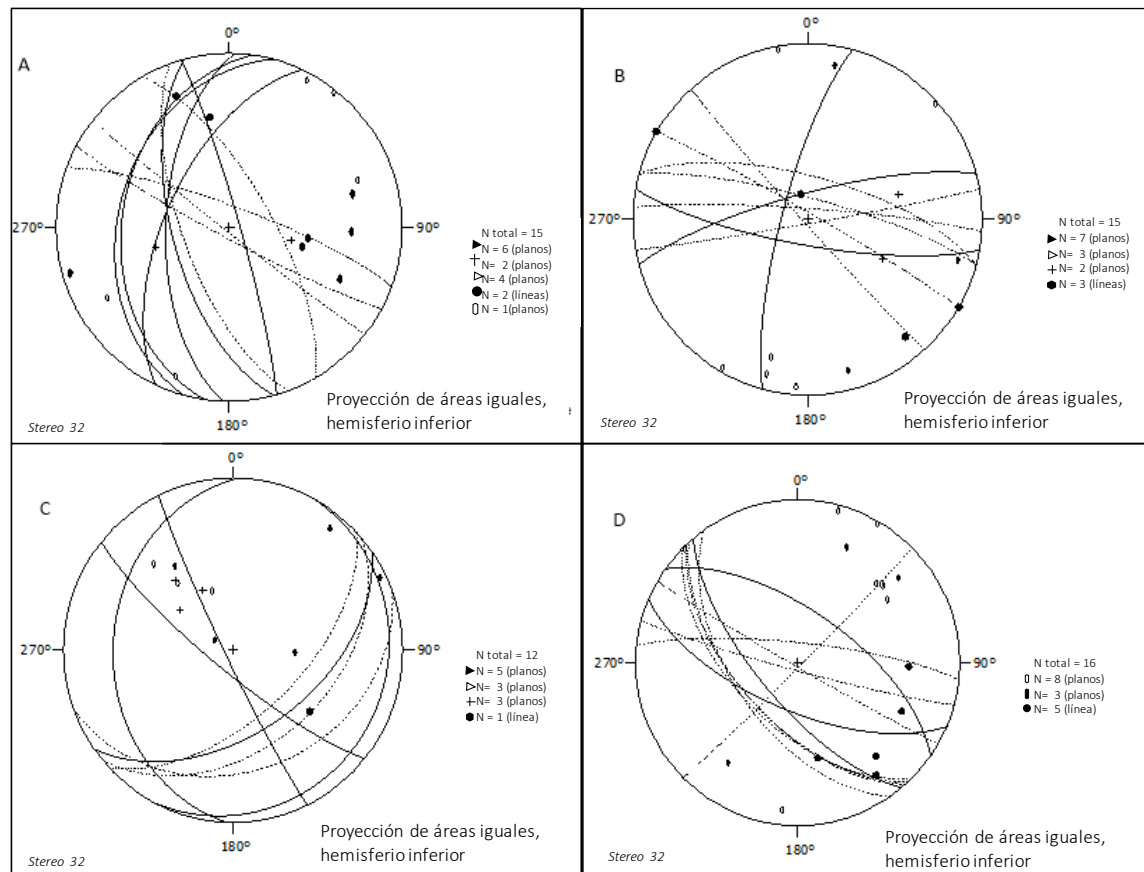


Figura 2.16. Proyecciones estereográficas de Localidades en la zona de La Tapon, al este-noreste de la mina El Fénix. A. Puntos LLC25-1a3 (coordenadas: 14Q 0327197/2518815), B. Puntos LLC25-4a6 (coordenadas: 14Q 0327093/2519191), C. Punto LLC25-7 (coordenadas: 14Q 0327532/2518902), D. Punto LLC25-8 a 9 (coordenadas: 14Q 0327823/2519359).

En este caso, se tendrían en la zona fallas y vetas comparables en su orientación, e incluso en su desplazamiento lateral izquierdo a las estructuras observadas a lo largo del lineamiento de El Fénix, sin embargo, aquí no se observó ningún cuerpo de yeso con azufre y en cambio se observó el emplazamiento de vetas claramente hidrotermales con calcita y óxidos que pudieran indicar la presencia original de sulfuros, aunque esto no se logró confirmar.

CAPÍTULO III. DEPÓSITOS DE AZUFRE-YESO EN EL ÁREA DE LA MINA EL FÉNIX

3.1 Especies minerales del yacimiento y su origen

El depósito mineral El Fénix fue analizado mediante diferentes técnicas para identificar las especies minerales que lo conforman, así como determinar el origen del yacimiento. Para ello se identificaron características que son afines a los depósitos de origen biogénico y están asociados a la reducción de bacterias anaeróbicas en el yeso y la anhidrita. Estos depósitos se generan a partir de la actividad bacteriana que reduce el sulfato (SO_4^{2-}) a sulfuro de hidrógeno (H_2S), y posteriormente, mediante la oxidación del H_2S por aguas superficiales oxigenadas, el sulfuro se convierte en azufre nativo. Este proceso ocurre en ambientes lagunares, marinos o lacustres, especialmente en zonas con condiciones evaporativas o eucínicas, es decir, en áreas donde el oxígeno es limitado y el ambiente es anóxico (Ruckmick *et. al.*, (1979). Aunque Labrado *et. al.*, (2019) mencionan que existen cuatro mecanismos de formación de azufre (1) un proceso modificado de reducción de sulfato que produce compuestos de azufre con un estado de oxidación intermedio, (2) acoplamiento de la oxidación de sulfuro con metanogénesis que utiliza compuestos metilados, acetato o dióxido de carbono, (3) oxidación de amonio acoplada a reducción de sulfato, y (4) proporciones de azufre en sulfatos y sulfuros especialmente, todos los depósitos económicamente importantes de azufre elemental que se explotan hoy en día son reemplazos bioepigenéticos de anhidrita o yeso. Estos se encuentran en dos estilos geológicos: en rocas encajonantes sobre diapirismos

salinos y en depósitos estratificados. Que coincide con las características del depósito el Fénix se identifica que los cuerpos de mineral están asociados a cuerpos de yeso con azufre interestratificados con calizas.

Los átomos de azufre pueden formar moléculas cíclicas y cadenas no ramificadas. La molécula S₈, que presenta la forma de un anillo corona cerrado, es la más estable y predomina tanto en estado cristalino como en estado fundido a temperaturas inferiores a 159°C. El azufre nativo se presenta en forma de cúmulos de cristales amarillos frágiles o masas fluidas con una estructura amorfa o criptocristalina. Se conocen tres modificaciones naturales del azufre cristalino: el azufre rómbico α y dos modificaciones monoclinicas (azufre β y azufre γ). Las tres formas son cristales moleculares que difieren entre sí en el número de moléculas cíclicas S₈ en la celda unitaria del cristal (azufre α : 16 moléculas, azufre β : 6 moléculas, azufre γ : 4 moléculas). El azufre α rómbico es más estable en condiciones normales. El azufre β monoclinico es estable a temperaturas superiores a 95,3 °C, y la aparición de azufre γ , extremadamente raro, es posible cerca del punto de fusión (azufre α : 112,8 °C, azufre β : 119,3 °C). Por lo tanto, la apariencia acicular de los cristales de azufre monoclinico natural indica temperaturas elevadas de formación (azufre volcánico). Las modificaciones del azufre presentan diferentes densidades. A 20 °C y presión atmosférica, la densidad del azufre rómbico es de 2070 kg/m³, la del azufre monoclinico es de 1957 kg/m³ y la del azufre polimérico es de 1920 kg/m³. La densidad del azufre líquido varía de 1810 a 1600 kg/m³ con el aumento de la temperatura de 120 a 444,6 °C (punto de ebullición del azufre en condiciones normales). Esto se debe a la reorganización de los átomos de azufre en las moléculas y a la formación de moléculas con menos átomos (Farquhar *et. al.*, 2010)

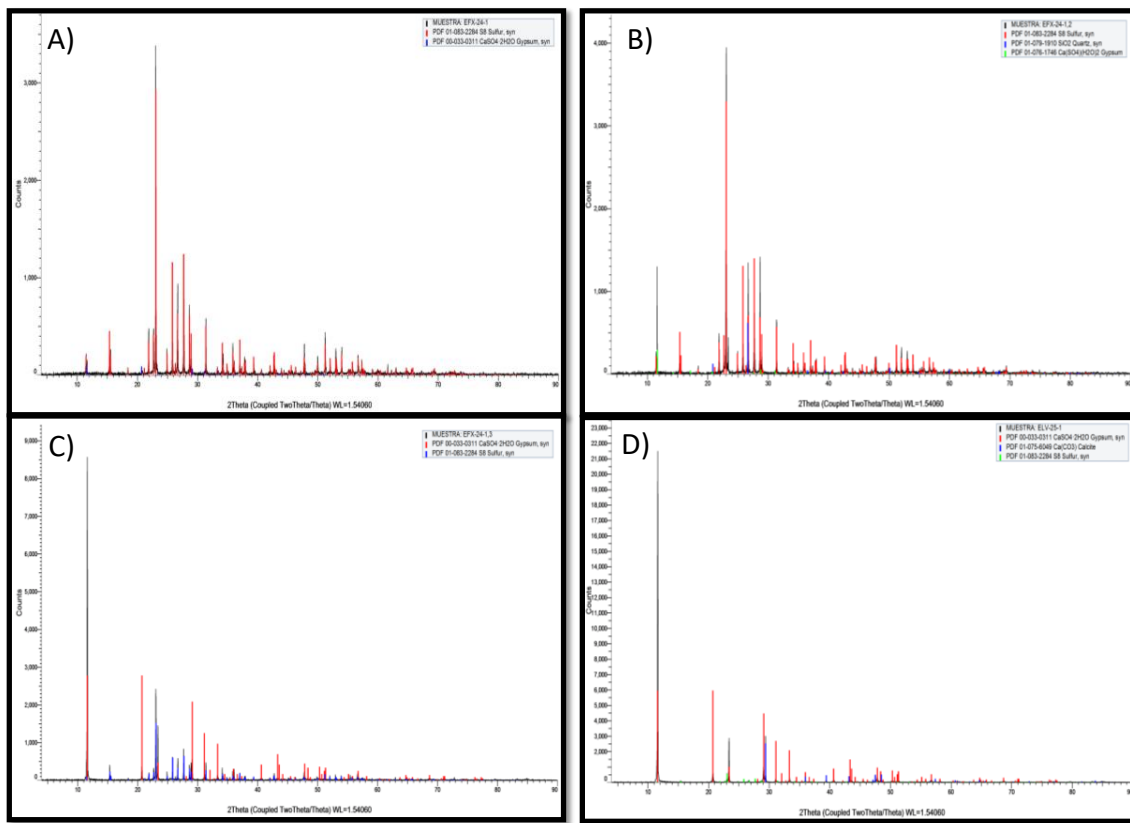


Figura 3.1. Difractogramas de las muestras A) EFX-24-1 indicando la presencia de dos minerales principales: azufre y yeso B) EFX-24-1.2 con presencia de azufre, yeso y cuarzo C) EFX-25-3 con mayor presencia de yeso que de azufre y D) ELV-25-1 donde el mineral predominante es yeso, luego calcita y azufre.

El análisis de difracción de rayos X fue realizado a las muestras EFX-1-01, ELV-03-1, ELV-03-1.2, ELV-03-1.3, las cuales son distribuidas en zonas de interés del área de estudio (Figura 3.1). En los difractogramas observan picos bien definidos que corresponden a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcita en menor proporción (CaCO_3) y azufre nativo (S8). El mineral mayoritario es el yeso, cuyos picos de difracción son más intensos particularmente entre los 11.6 2θ, característico de la estructura monoclinica del sulfato de calcio hidratado. La presencia de calcita esta evidenciada por picos entre 29° y 48° 2θ, mientras que el azufre muestra picos

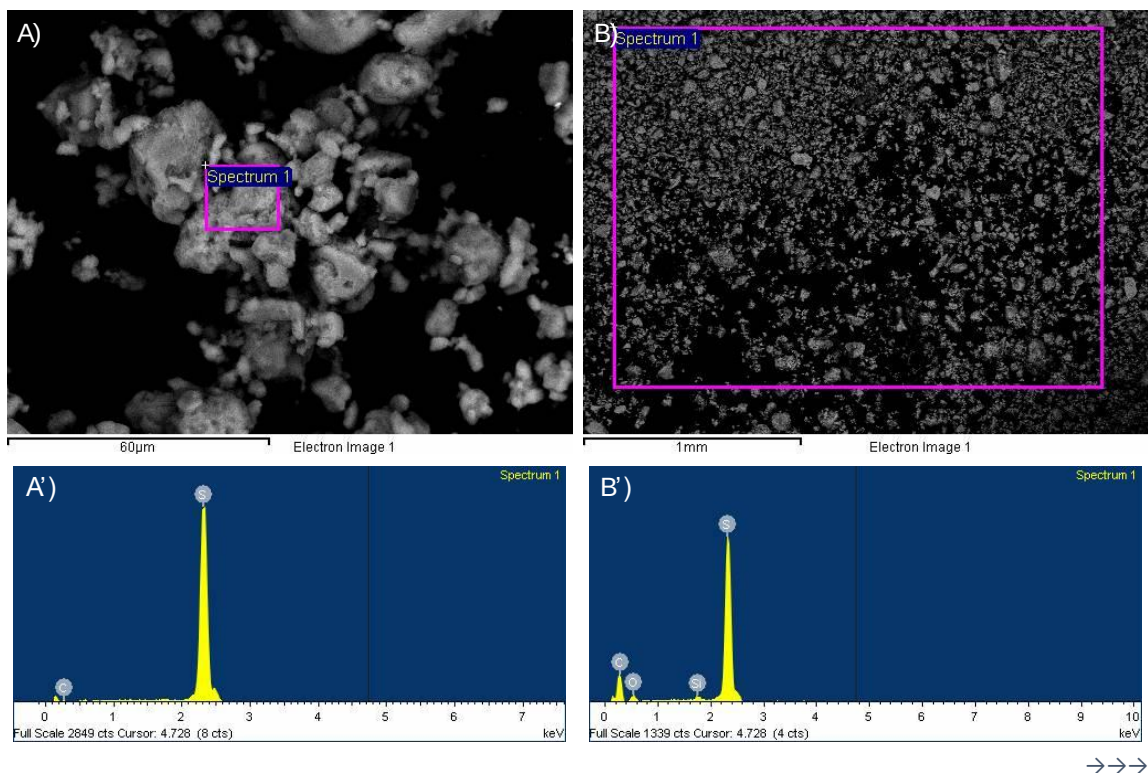
menores, distribuidos entre 23° y 30° 2θ correspondientes al sistema cristalino ortorrómico. Los átomos de azufre pueden formar moléculas cíclicas y cadenas no ramificadas formando la molécula S_8 , en forma de anillo cíclico, indicando que fue originado en un ambiente estable con temperaturas inferiores a 159°C . El azufre nativo genera cúmulos de cristales amarillos deleznales o con estructuras criptocristalinas.

La presencia de azufre nativo y yeso fomentó el desarrollo de sistemas donde ocurre oxidación de gases sulfurados H_2S que están asociados a ambiente de ácido-sulfato. Pero en este caso ocurre la precipitación parcial del azufre a partir del sulfuro de hidrógeno, mientras que el yeso fue formado por la reacción del ácido sulfúrico que se generó con rocas ricas en calcio. Aunque posteriormente la calcita indica que entre los procesos posteriores ocurrió la neutralización de fluidos ácidos entre la roca y el fluido lo que es compatible con circulación de fluidos hidrotermales superficiales supergénicos.

Las imágenes obtenidas mediante la microscopía electrónica de barrido corresponden a las muestras EXF-1-01, ELV-03-1, ELV-03-1.2, y ELV-03-1.3 (Figura 3.2). La descripción de la primera muestra indica algunos agregados minerales de morfología irregular a subredondeada conformados por partículas microgranulares de tamaños entre 5 y $25\ \mu\text{m}$, con textura masiva. La descripción puntual indica un pico dominante correspondiente al azufre y señales menores de carbono y oxígeno. La segunda muestra indica un conjunto de partículas dispersas de tamaños variables entre 10 y $80\ \mu\text{m}$, en comparación con la muestra anterior los cristales tienen formas mejor definidas y los cristales son subangulosos y presentan diferentes

partículas de accesorios de menor tamaño lo que podría indicar una coexistencia entre diversas fases cristalinas. Lo que se muestra en las gráficas son los picos dominantes del azufre contra la menor cantidad de calcio, oxígeno, carbono y aluminio, que al analizar esta asociación es posible identificar que corresponde a yeso y anhidrita.

En la tercera muestra se observa un agregado heterogéneo de fragmentos subangulosos que van desde 5 a 50 μm con morfologías variables que muestran cristales grandes y materiales finos intersticiales la textura es granular, utilizando la gráfica correspondiente se observan picos dominantes de azufre y calcio, señales significativas de oxígeno, silicio y aluminio y carbono. Comparando con las muestras anteriores se identifica una asociación de minerales evaporíticos y materiales detríticos como arcillas. En la cuarta muestra, se observa como un agregado mineral con tamaño fino a medio conformado por cristales tabulares y



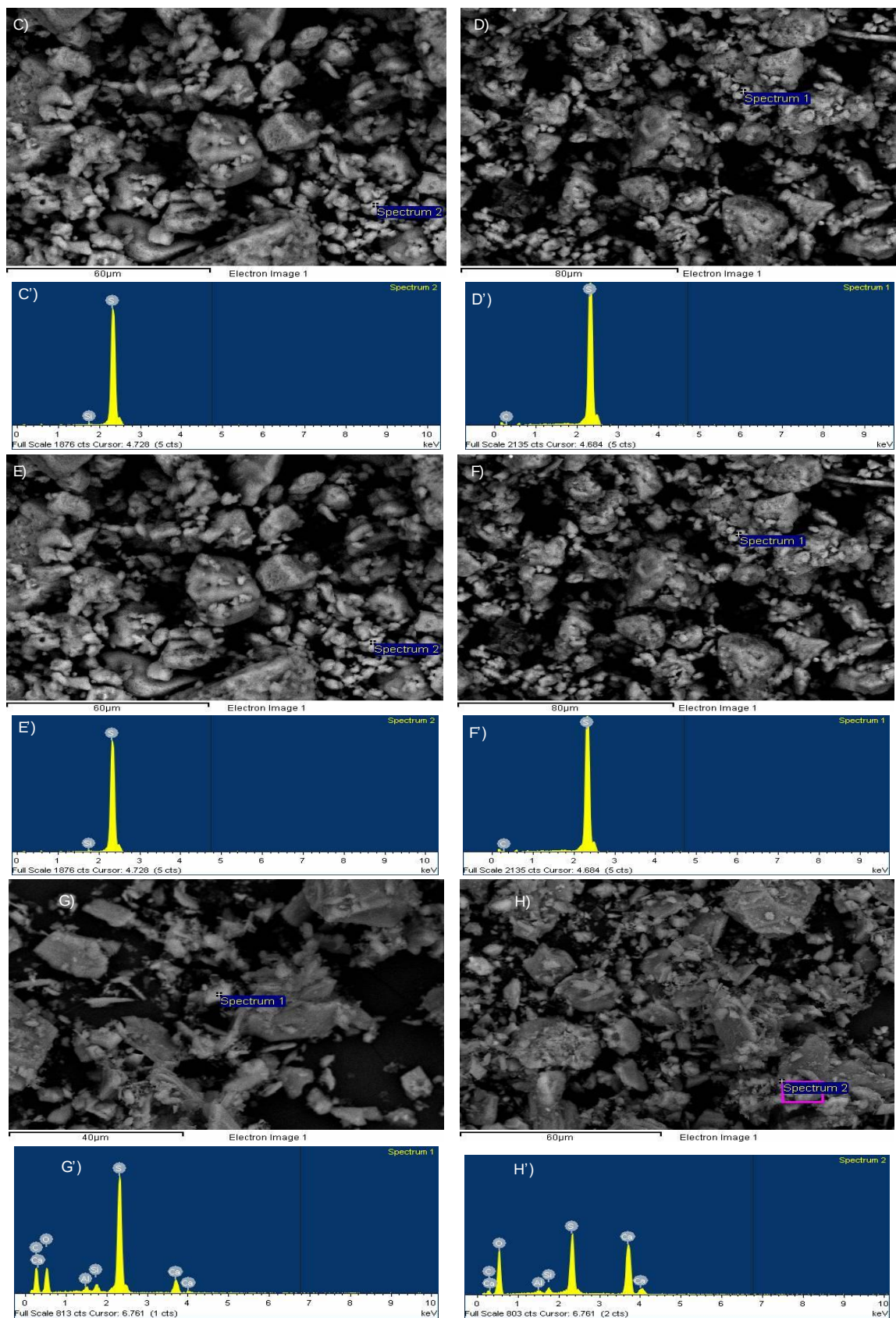


Figura 3.2. Fotomicrografías realizadas utilizando la microscopia electrónica de barrido. A-B) indican los espectros significativos tomados en cuenta para el análisis de la muestra EFX-1-1, A'-B') son las gráficas puntuales de los elementos que componen las muestras. Para la muestra ELV 01-1.1 corresponden las fotomicrografías C-D y los gráficos C'-D', la muestra ELV 01-1.2, E-F (Fotomicrografías) E'-F' (gráficos) y ELV 01-1.3 G-H (fotomicrografías) y G'-H' (gráficos).

gulares entre partículas. La textura es granular heterogénea en matriz de grano muy fino. Al contrastar con las descripciones anteriores confirmamos la asociación mineralógica de yeso y anhidrita y continúan los picos dominantes de azufre y calcio y señales de oxígeno y carbono.

3.2 Los cuerpos mineralizados y su emplazamiento

Los cuerpos mineralizados del área de estudio están distribuidos a lo largo de un lineamiento estructural, estos cuerpos están inyectados en fallas y fracturas en la secuencia de estratificación media a gruesa conformada por caliza y lutitas de la Formación El Abra Superior. Estos cuerpos son caracterizados por el color blanco correspondiente al yeso y un amarillo intenso correspondiente al azufre.

La zona representativa del Fénix tiene una amplitud de 200 m y según Echegoyén (1966), menciona que los cuerpos mineralizados están alojados en calizas, a lo largo de una falla 60°NW/77°NE. Las vetas tienen anchos hasta de 1.5 m, existen vetillas secundarias que se unen a las vetas principales formando cuerpos de hasta 5 m. Estas se encuentran alojadas en fracturas relacionadas a fallas que fueron rellenadas por yeso y azufre. También, menciona que la profundidad de la mineralización de yeso y azufre comienza entre 5 y 10 metros y en las secuencias sedimentarias pueden observarse como inyecciones de yeso en forma de hilos y pequeñas decoloraciones en blanco. Sin embargo, con las observaciones realizadas en campo los cuerpos mineralizados están en forma de diapiros asociados a zonas de falla que corresponden al control estructural del área de estudio.

Durante el trabajo de campo fueron identificados alrededor de 25 tiros de los cuales se pudo acceder a algunos de forma parcial dada la condición de abandono y estabilidad de los mismos (Figura 3.3). Con ello se logró identificar algunos rasgos de interés para poder determinar procesos y condiciones de la depositación de azufre y también tomar datos estructurales para determinar los cuerpos y establecer su relación con el fallamiento y fracturamiento en la zona. Se identificó que la secuencia sedimentaria está conformada mayormente por caliza llegando a apreciarse algunos horizontes arcillosos y en algunos casos yeso interestratificado, ocasionalmente con pequeños parches o cuerpos de azufre. Es posible identificar que la profundidad de estos tiros es de 5 y 15 metros (Figura 3.3).



Figura 3.3. Tiros mineros en el área del Fénix.

Los afloramientos en superficie que dominan el área de estudio muestran un patrón de zonación concéntrico que indica la circulación de fluidos y reducción por bacterias que cambia el color del yeso volviéndolo rojizo (Figura 3.4), sin enriquecimiento de otros minerales o elementos químicos de interés económico o no económico lo cual fue comprobado con estudios de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. La mineralización de azufre está en forma lenticular y estratiforme, rellenando fracturas y poros secundarios que indican que el emplazamiento ocurrió posterior a la depositación del yeso. Por ende, se

asume que el yeso es el proveedor del azufre y que la materia orgánica actúa como agente reductor ocurriendo la reacción química que permite la migración a ácido sulfúrico, oxidándose para finalmente formar el azufre nativo.



Figura 3.4. Zona de contacto entre el yeso y la brecha calcárea.

El área de El Verde presenta tiros con mayor accesibilidad en los que fueron encontrados montículos de yeso con presencia de azufre nativo, abriendo la posibilidad a encontrar más zonas de extracción, en esta área la columna litológica tenía estratificación delgada a media con depositación de yeso-azufre en forma lenticular, estratoligada y en vetas (Figura 3.5). También se realizó un análisis petrográfico en el cual se analizaron las muestras de interés que permitieron reconocer detalles de las formas de los cuerpos mineralizados y sus zonas de contacto, para la descripción de las texturas que presenta el yeso serán tomadas

de Ortí *et. al.*, (2010). Las muestras de yeso se describen como una roca de color blanco amarillento a aperlado con ligeras manchas rojizas al borde de los contactos, tiene brillo mate acerado en superficies donde se puede observar a la luz del sol, también se percibe dureza muy baja siendo posible rayarla con la uña, presenta superficies de crucero que corresponden al sistema cristalino ortorrómbico (Figura 3.6 A). En zonas de contacto con las zonas de brecha de calizas se aprecia una zonación aparente que podría indicar zonas de oxidación sin embargo al ser sometidas a otros estudios no se detectaron elementos que denoten la presencia de algún otro tipo de mineralización. En microscopio esta muestra se observa de habito acicular de color incoloro, los cristales son de tamaños hasta de 50µm hasta 100µm con formas de abanicos prismáticos (Figura 3.6 B), presenta relieve muy bajo, a luz polarizada se pueden observar colores azulados amarillentos y ligeramente rosados (Figura 3.6 C)

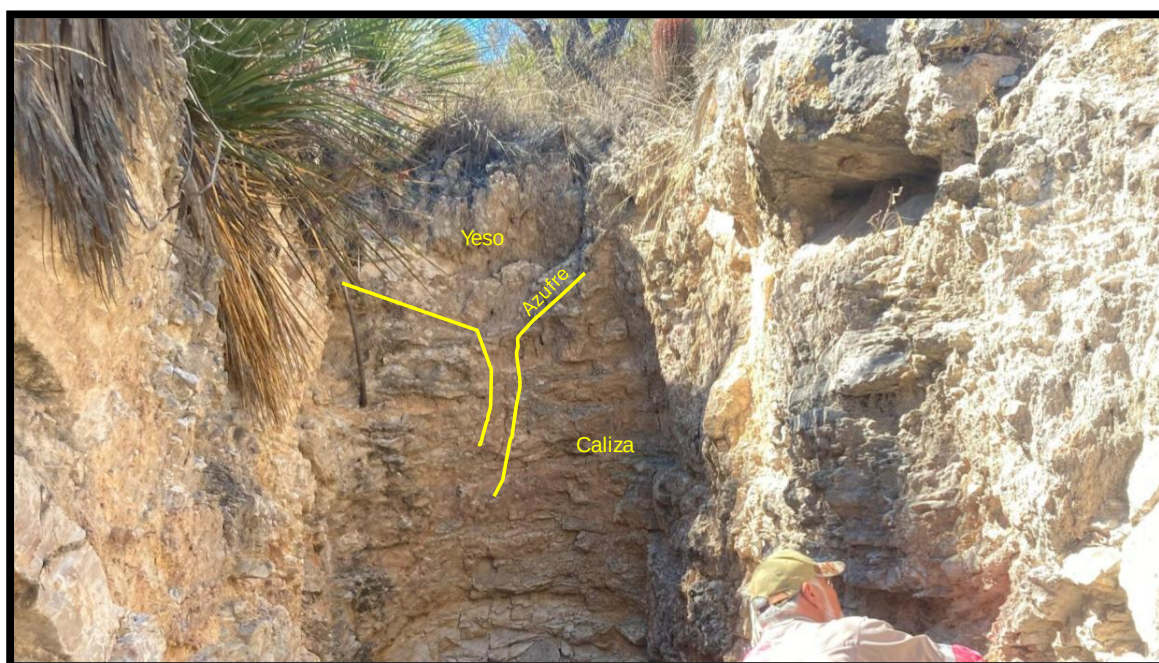


Figura 3.5. Tiro ubicado en el área del Verde en el que se puede observar la secuencia sedimentaria de calizas con plegamientos suaves y cuerpos de yeso con azufre, tanto concordantes como en forma de vetas.

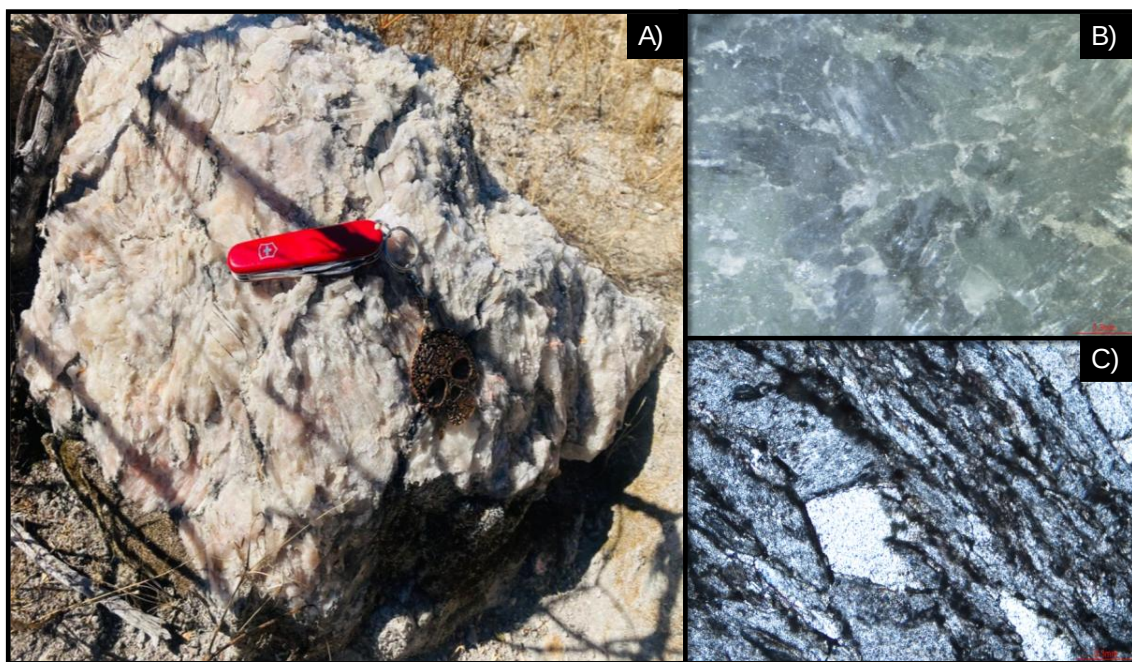


Figura 3.6 A) Fotografía representativas del yeso en el área de estudio B) Fotomicrografía del yeso en lámina delgada bajo luz natural y C) Fotomicrografía de yeso bajo luz polarizada.

También algunas formas de mineralización son nódulos totalmente redondeados en escalas 0.3 mm con yeso de grano muy fino (Figura 3.7 A). También se observan de gran forma zonas de intercalación de yeso en color blanco y grisáceo, así como cristales bien formados aciculares. mientras que también en la imagen 3.7 D podemos observar la textura de yeso tipo alabastrina donde los nódulos tienen un tamaño aproximado a 0.6mm. Los nódulos de alabastrina están emplazados como una serie de mosaicos cristalinos sin porosidad aparente.

El contacto entre caliza + yeso + azufre (Figura 3.8), la caliza es gris oscuro a medio y que al golpearla tiene fractura concoidal, también está dispuesta en estratos medianos a gruesos, textura tipo *grainstone* y al observarla bajo la lupa o al microscopio se identifica como esparita, aunque en el área se encontraron microfósiles como radiolitidos y en algunas ocasiones toucasias en las muestras analizadas en contacto con el yeso no se observaron. La

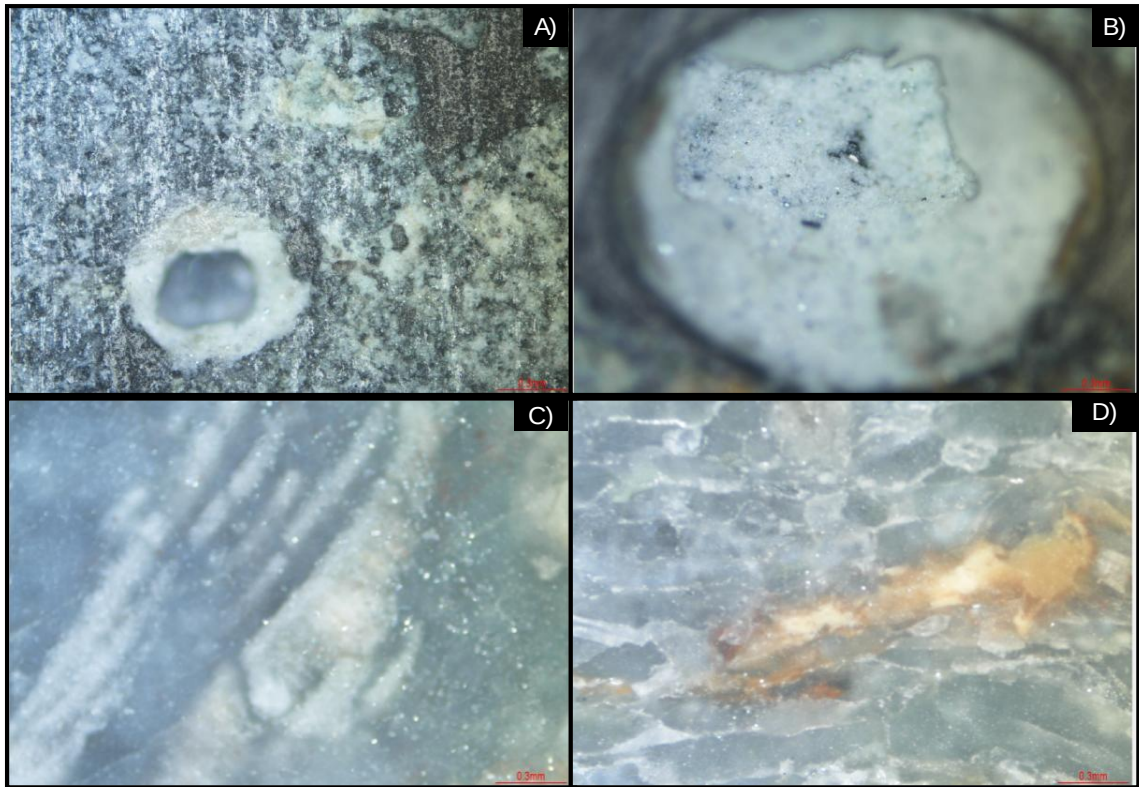


Figura 3.7 A) Fotomicrográficas de nódulos de yeso B) Fotografía de nódulo de yeso a mayor aumento C) Intercalación de cristales de yeso de colores gris y blanco D) yeso alabastrino.

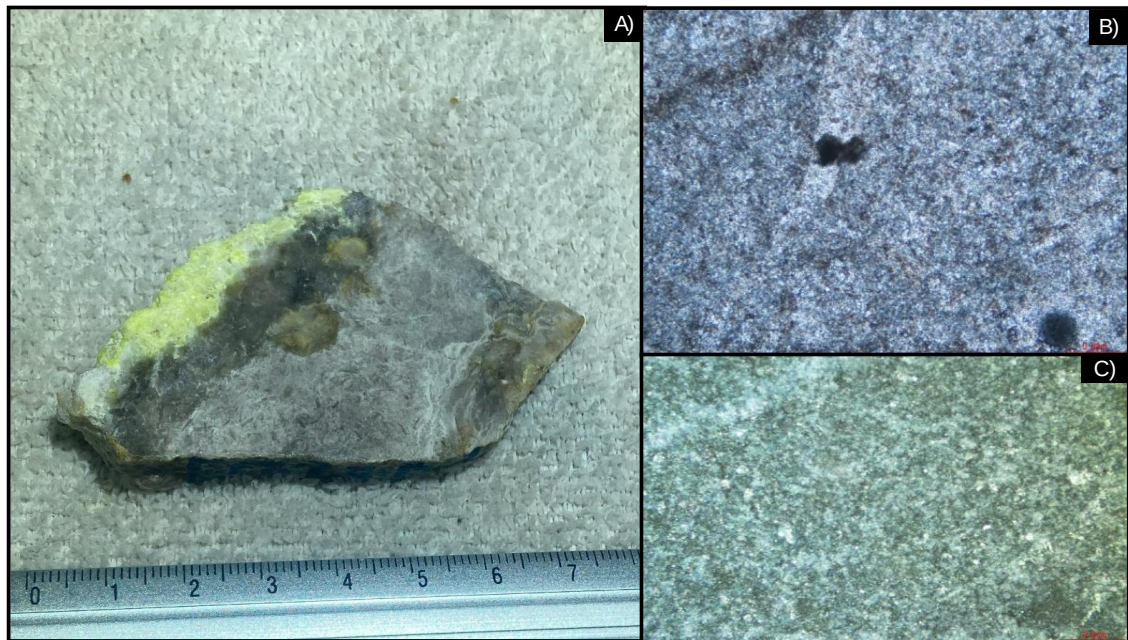


Figura 3.8 A) Muestra de mano de zona de contacto caliza + yeso + azufre B) y C) Fotomicrográficas de caliza.

zona de contacto entre los cuerpos de yeso y azufre están se muestra como transición irregular, pudiendo observarse zonas de venillas y vetas de yeso que fueron inyectadas en la roca de caja a partir del contacto principal, sin embargo, se sugiere que tienen alto control estructural y en parte reemplazamiento en litologías favorables (Figura 3.9)

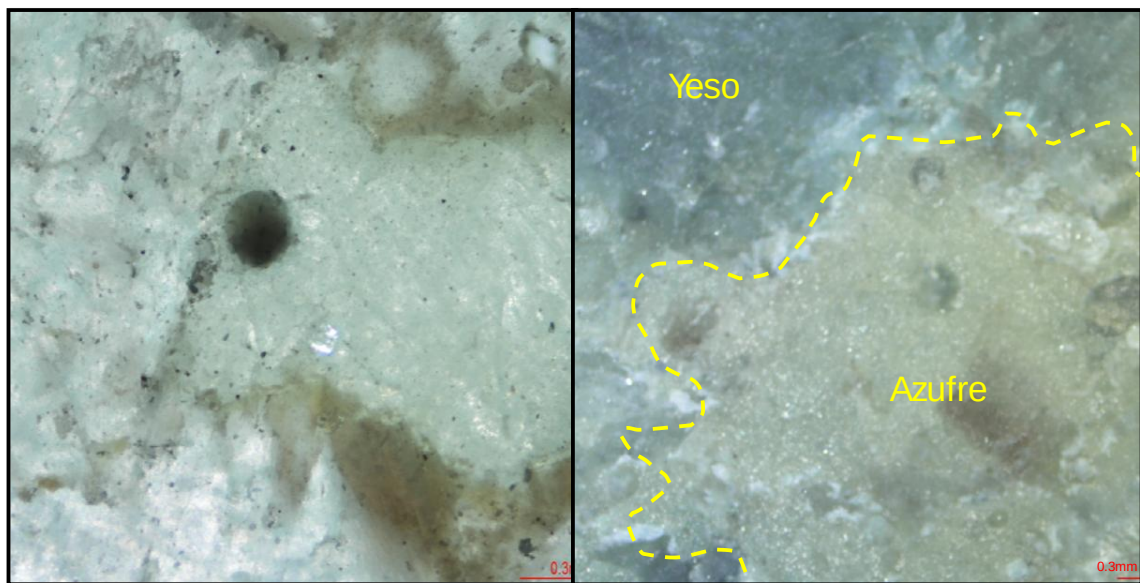


Figura 3.9. Fotomicrografías de la zona de contacto entre el yeso y azufre

CAPÍTULO IV. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

Las diversas técnicas que fueron aplicadas al estudio de este depósito aportaron un sinnúmero de ideas que llevaron a la interpretación e integración de los resultados que serán descritas en este apartado.

El depósito de yeso-azufre comenzó al aumentar los procesos de deformación contractiva generaron plegamiento, fallamiento y levantamiento de la zona. Posteriormente el yeso se emplazó en zonas de fallas y fracturas zonas de fallas especialmente en las fallas de orientación noroeste, que son fallas sinestrales con zonas de transtensión, en donde preferentemente se habrían emplazado los cuerpos de mineral, de una deformación frágil que afectó a las rocas carbonatadas, arcillosas y evaporíticas que fueron posteriormente cubiertas por depósitos fluvio-aluviales, lacustres (Paleógeno-Neógeno). Localmente el área no presenta grandes estructuras de plegamiento ya que se puede observar una estratificación suave con echados que oscilan los 15° al sureste a menos de 5 km al oriente se levanta la Sierra de Las Pilas o de La Tapon, una estructura plegada en forma de caja o cofre con varios kilómetros de amplitud y vergencia al noreste.

Las estructuras que dominan localmente, son las fallas de rumbo que en imagen satelital pueden ser observadas como lineamientos, pero en campo presentan indicadores claros de desplazamiento normal y lateral izquierdo. Las fracturas que predominan con orientaciones noreste y noroeste, así como cizallas dextrales y sinestrales, paralelas y en parte oblicuas al lineamiento, en parte conjugadas a lo largo del Cañón del Fénix, sugieren esfuerzos de transpresión y transtensión y en este caso corresponderían a superficies tipo

Riedel relacionadas a una cizalla o desplazamiento lateral izquierdo. De manera detallada podemos identificar que los cuerpos de yeso con azufre están alojados a lo largo de una falla regional, la estratificación local tiene echados muy suaves y están conformados por calizas masivas e intercaladas con horizontes arcillosos y yesos delgados. Las secuencias son cortadas por fallas y vetas de calcita, yeso con azufre y delgadas bandas de oxidación con estructuras botroidales, así como cuerpos de brechas cataclásticas en la periferia de los cuerpos del mineral, y que corresponderían con las zonas de falla. El análisis estructural detallado de la zona permitió establecer un modelo general de formación de estos depósitos (Figura 4.1)

Los resultados obtenidos mediante DRX determinaron que las fases primarias son yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y azufre nativo (S), con calcita (CaCO_3) y cuarzo (SiO_2) presentes como fases subordinadas. La intensidad alta y el contraste marcado de los picos, confirman que el yeso es la fase dominante en la mayoría de las muestras mientras que el azufre alcanza las concentraciones más significativas en sectores específicos del yacimiento. Estas asociaciones mineralógicas pueden estar relacionadas con ambientes sedimentarios evaporíticos, con presencia de yeso evidencia de la precipitación a partir de soluciones saturadas en calcio. La calcita refleja la naturaleza de la roca encajonante como una roca carbonatada y el cuarzo como un aporte de la cementación. La relación genética entre el azufre nativo y el yeso puede apuntar a un modelo en el que la mineralización controlada por procesos hidrotermales de interacción de fluidos que provienen de la misma formación de las rocas favorecida por espacios abiertos provocados por fallas y fracturas. Debido a esto ocurrieron

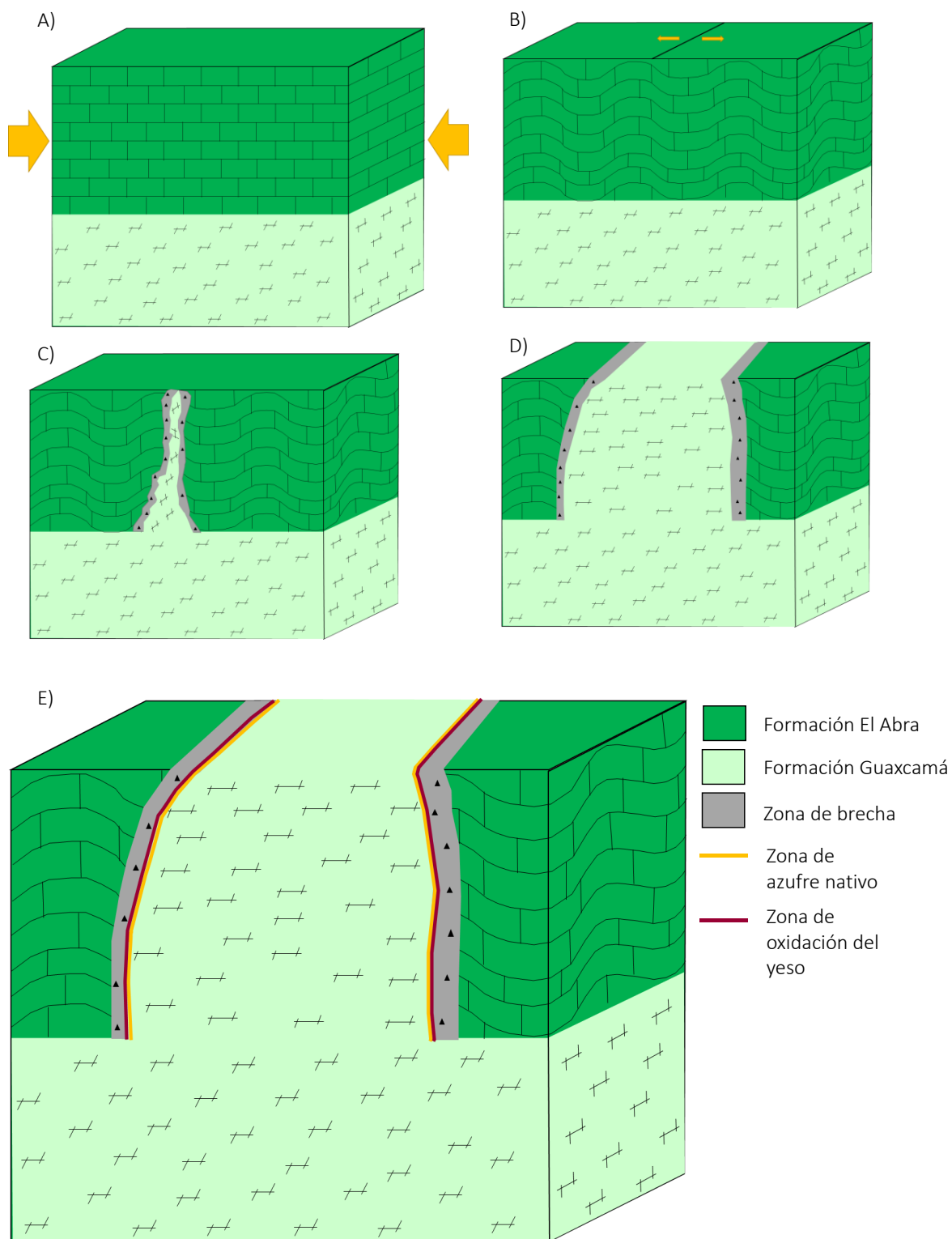


Figura 4.1. Modelo esquemático de la formación del depósito de yeso-azufre El Fénix.

tres etapas, la primera etapa consiste en la inyección de yeso en zonas de debilidad estructural, la segunda etapa es la reducción bacteriana en condiciones que liberan el H₂S a partir

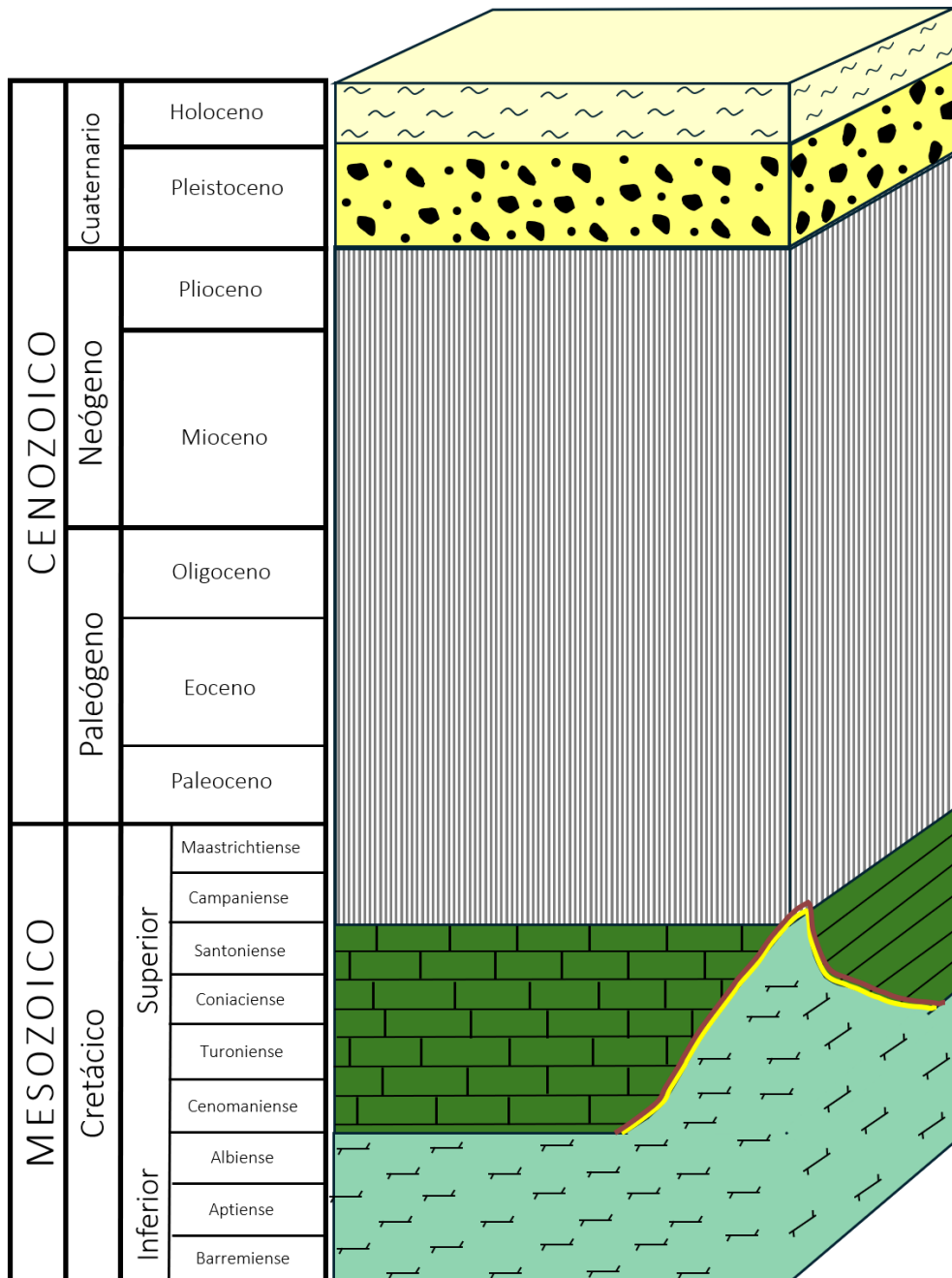


Figura 4.2. Columna litológica del área de estudio basada en las unidades vistas en campo.

del yeso, la tercera es la oxidación del H_2S por interacción con minerales con mayor contenido de oxígeno favoreciendo la precipitación de azufre nativo.

La microscopía electrónica de barrido permitió confirmar y corroborar los datos obtenidos con técnicas anteriores en los cuales se identificaron agregados microgranulares con carácter masivo de azufre y su asociación con cristales de yeso debido a que las fases dominantes corresponden a azufre, calcio, carbono, así como coexistencia de estas fases de elementos como Si y Al indicando que tienen influencia de arcillas.

CONCLUSIONES

El depósito de yeso-azufre El Fénix ha experimentado desde su génesis una evolución estructural, la cual inicia desde la fase misma de deformación contractiva asociada al orógeno mexicano la cual generó plegamientos que incluyen en la zona la deformación de cuerpos de yeso depositado originalmente como parte de las facies lagunares de la Plataforma Valles, San Luis Potosí, seguido lo anterior por una fase post-orogénica extensional que generó sistemas de fallamiento y fracturamiento que controlaron los sistemas mineralizantes.

El área de estudio se ubica sobre una estructura más relevante para el yacimiento que se conoce como lineamiento El Fénix N60°-70°W, el cual presenta diversas estructuras como zonas de cizalla conjugadas, algunas superficies tipo *Riedel* y plegamiento local con orientación que difiere de las estructuras regionales lo que sugiere un origen por transpresión y en tal caso el lineamiento habría funcionado como un mecanismo de cizalla siniestral, que también funciona como control estructural para los fluidos mineralizantes o en su caso la inyección de los cuerpos de yeso con azufre .

El origen de este yacimiento puede ser clasificado como hidrotermal bioepigenético, con el cual coinciden algunas de las características, dejando la aportación de un patrón de zonación concéntrico en el que interactúa la asociación de azufre-yeso, en contacto con calizas. Además, mediante la difracción de rayos X se identificó el azufre como de tipo ortorrómbico que es un punto importante para determinar la génesis de este depósito, es decir que fue generado por reducción bacteriana de sulfatos y la posterior oxidación de H₂S.

La evolución de este depósito está relacionada con la inyección del yeso, formando cuerpos masivos que proveen los iones sulfato con la interacción de fluidos hidrotermales de baja temperatura y aguas connatas que circularon a través de fallas afectando a las rocas ricas en calcio. En estas rocas se formaron cuerpos lenticulares, vetas, venillas, e inyecciones de yeso. Posteriormente en condiciones anóxicas la actividad bacteriana redujo el sulfato del yeso a H_2S . La interacción de ese gas con aguas oxigenadas superficiales en ambientes ácidos permitió la precipitación del azufre nativo, así mismo podemos identificar calcita lo que significa que ocurrió una etapa de neutralización de fluidos ácidos. Con las texturas de las rocas y la zonación de azufre hacia la periferia de los cuerpos de yeso, en el contacto con la caliza recristalizada y la delgada zona con óxidos tenemos la prueba final de la presencia de las interacciones entre fluidos y rocas y porosidad secundaria.

Recomendaciones

Las recomendaciones y trabajos a futuro que serían de interés al acervo científico podrían comenzar con tomografías de resistividad eléctrica a través de los lineamientos principales y plantear líneas que cruzan de manera perpendicular, permitiendo identificar la forma real del cuerpo y la profundidad. También se deberían considerar sería hacer dataciones de este depósito de yeso, de la roca encajonante y de la posible edad del emplazamiento para poder identificar si corresponde temporalmente a otros depósitos, también de ser posible, para dicha correlación hacer uso de técnicas analíticas con medición de relaciones isotópicas así como hacer una correlación entre los depósitos aledaños que están mostrando una tendencia que se puede observar en el mapa regional, lo que podría ser conveniente para crear una provincia de yacimientos de yeso, para adquirir un mayor conocimiento del origen y naturaleza de estos depósitos y poder contribuir a incrementar el acervo científico.

También, algunas zonas aledañas han sido mencionadas en datos bibliográficos que contienen cantidades interesantes de minerales polimetálicos, en las que se recomendaría también realizar una cartografía detallada en la que se identifiquen minerales y alteraciones supergénicas, así como una campaña de geoquímica de suelos para identificar puntos de interés.

Bibliografía

- Aguayo-Camargo, J. E. (1993). The middle Cretaceous El Abra limestone at its type locality and Laguna Colorada, east-central Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. In Third International Conference on Rudists, México DF, Guidebook for field trip" A (Vol. 43).
- Ahlfeld, F. (1947). Dos estudios sobre depósitos de azufre. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2(2), 113-115.
- Aranda-Gómez, J. J., Torres-Hernández, R., Carrasco-Núñez, G., Aguillón-Robles, A., (2000) Contrasting styles of laramide folding across the west-central margin of the Cretaceous Valles-San Luis Potosi Plataform, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17(2), 97-111.
- Barboza-Gudiño, J. R., et al. (2001). *Hoja Llanos del Carmen (F14-A54), escala 1:50,000*. Servicio Geológico Mexicano.
- Barboza-Treviño, J. F. (2022). Estudio geológico y mineralógico de la región sur de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Geología*.
- Barker, J. M. (1983). *Geology of sulfur deposits*. Geological Society of America.
- Basáñez, L., Barrera, D., & Pérez, E. (1993). Geología del sureste de la Plataforma Valles San Luis Potosí y su relación con la tectónica regional. Instituto de Geología, UNAM.
- Böse, E., 1906, La Fauna de Moluscos del Cenomaniano de Cárdenas San Luis Potosí: *Boletín del Instituto Geológico de México*, 24, 91 p
- Burhan, R. Y. P., Trendel, J. M., Adam, P., Wehrung, P., Albrecht, P., & Nissenbaum, A. (2002). Fossil bacterial ecosystem at methane seeps: origin of organic matter from Be eri sulfur deposit, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(23), 4085-4101.
- Carrillo Bravo, J., (1971), La Plataforma Valles San Luis Potosí: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 11(1-6). 1-113.
- Davis, J. B., & Kirkland, D. W. (1970). Native sulfur deposition in the Castile formation, Culberson County, Texas. *Economic Geology*, 65(2), 107-121.
- Druckman, Y., Weissbrod, T., & Aharon, P. (1994). Evidence for methane and hydrogen sulfide venting imprinted on a Quaternary eolianite from southern Israel. *Geo-Marine Letters*, 14(2), 170-176..
- Echegoyén, J. (1966). Algunos depósitos de azufre del municipio de Villa Hidalgo, S.L.P., Consejo de recursos naturales no renovables.

- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., & Chávez-Cabello, G. (2018). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56-84.
- Gabriel-Tuesta, D., & Huaypar-Vásquez, D. (2012). E. Gabriel - Y. Huaypar, Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (DRX) en la industria minera.
- Hernández-Arteaga J. G. R. (2018) "HETEROESTRUCTURAS GaN-n/Si-p/CeO₂ SOBRE SUBSTRATO FLEXIBLE PARA APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES", Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Hudleston, P.J., 1973, Fold morphology and some geometric implications of theories of fold development. *Tectonophysics* 16: 1–46.
- Labrado, A. L., Brunner, B., Bernasconi, S. M., & Peckmann, J. (2019). Formation of large native sulfur deposits does not require molecular oxygen. *Frontiers in microbiology*, 10, 24.
- Martínez-Pérez, A. (1965). Estudio geológico de la región de San Luis Potosí. Instituto de Geología, UNAM.
- Muir, J. M. (1936). Geology of the Tampico Region, Mexico: ERRATUM. *AAPG Bulletin*, 20(11), 1495-1495.
- Núñez-Miranda, C. (2006). Inventario de recursos minerales de Villa Hidalgo, San Luis Potosí. Secretaría de Economía, Gobierno del Estado de San Luis Potosí.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Alaniz-Álvarez, S., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Nieto-Samaniego, A. F. y Morán-Zenteno, D. J., 1991, Geological provinces of México. A new proposal and bases for their definition: Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología; Universidad Autónoma de Hidalgo, Instituto de Investigación en Ciencias de la Tierra; Sociedad Geológica de Mineralogía; y Secretaría de Educación Pública, Subsecretaría de Educación Superior e Investigación en Científica, Convención sobre la Evolución Geológica y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hidalgo, Memoria, p.p. 143-144.
- Ortiz-Nava, A., (2005). Los yacimientos de azufre y sus problemas de contaminación. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de México.
- Ortí, F., Rosell, L., & Anadón, P. (2010). Diagenetic gypsum related to sulfur deposits in evaporites (Libros Gypsum, Miocene, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 228(3-4), 304-318.
- Pérez-Silíceo, P., (1963). Yacimiento de azufre El Fénix en el estado de San Luis Potosí, *Geología y metalurgia* No. 03.

- Pérez-Ibargüengoitia, G., Cruz-Peralta M. J., Valladolid-Cacho, R.. (1977). Exploración regional del área Peyote-Tapona, municipios de Villa Hidalgo y Guadalcázar, San Luis Potosí, Consejo de recursos minerales, gerencia de estudios especiales.
- PEMEX, Petróleos Mexicanos, (1988), Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico: México, D.F., Subdirección de producción primaria, Coordinación ejecutiva de exploración, Informe Inédito.
- Quilantán-Pedraza, A., López-Doncel, R.A., Silva-Mendoza, S., (2008) Plataforma Valles San Luis y la Cuenca Mesozoica del Centro de México del Cretácico Medio y Superior: Boletín de Geociencias 2(4), 8-14.
- Rocha-Rocha, M., (2008), Yacimientos de Celestina en la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Tesis de Maestría, Instituto de Geología UASLP
- Ruckmick, J. C., Wimberly, B. H., & Edwards, A. F. (1979). Classification and genesis of biogenic sulfur deposits. *Economic Geology*, 74(2), 469-474.
- Ruiz Ortiz, E. (2005). *Inventario de los recursos minerales del municipio de Villa de Arista*. Servicio Geológico Mexicano.
- Scott, R. (2002). Geología y geofísica del Cretácico en el estado de San Luis Potosí, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Torres-Hernández, J.R., & Tristán-González, M. (1999). Informe de la carta geológico minera y geoquímica Guadalcázar F141-A65, escala 1,50,000: Consejo de recursos minerales, Informe técnico, 60 p.
- Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G. J., Labarthe-Hernández, G., Torres-Hernández, J. R., & Bellon, H. (2009). Post-Laramide and pre-Basin and Range deformation and implications for Paleogene (55–25 Ma) volcanism in central Mexico: A geological basis for a volcano-tectonic stress model. *Tectonophysics*, 471(1-2), 136-152.
- Valencia-Islas, V., & Villaseñor-Rojas, J. (1997). Implicaciones geodinámicas de los resultados de la geoquímica de rocas e isótopos de azufre de la formación Guaxcamá: **INAGEQ**.

Anexos

Carta Llanos del Carmen, estratificación, diagramas ß						
LLC2.1.1. - LLC2.1.11 (317636/2540752)S0			LLC2.6.1-2.6.9. cañon Zapotillo			
			Rumbo	Inclinación	Tipo de dato	
334	12	S0	204	20	S0	
320	9	S0	243	30	S0	
7	18	S0	126	18	S0	
42	28	S0	206	17	S0	
32	10	S0	190	19	S0	
37	15	S0	130	20	S0	
61	30	S0	236	30	S0	
56	35	S0	248	38	S0	
58	28	S0	242	23	S0	
18	25	S0	126	15	S0	
10	20	S0	96	90	Veta	
317	82	Fractura	225	90	Veta	
53	85	Fractura	LLC2.7.1-2.7.8 (320461/2533293)			
LLC2.2.1. - LLC2.2.3 Chancauero-Sierra del Pollo			32	15	S0	
294	20	S0	30	17	S0	
295	32	S0	58	20	S0	
234	35	S0	248	5	S0	
91	25	S0	0	16	S0	
85	40	S0	70	22	S0	
77	46	S0	53	12	S0	
25	90	Veta	62	15	S0	
LLC2.3.1-LLC2.3.9, Arroyo Las Jaras			86	15	S0	
334	12	S0	88	15	S0	
320	9	S0	LLC2.8.1-2.8.11			
7	18	S0	126	23	S0	
42	28	S0	128	20	S0	
32	10	S0	96	15	S0	
37	15	S0	38	22	S0	
61	30	S0	10	10	S0	
56	35	S0	48	10	S0	
58	28	S0	38	20	S0	
18	25	S0	145	16	S0	
10	20	S0	165	15	S0	
LLC2.4.1-2.4.5, cerro San Isidro			120	15	S0	
108	21	S0	56	15	S0	
103	20	S0	104	25	S0	
100	30	S0	78	42	S0	
55	30	S0	178	15	S0	
115	22	S0	205	90	Veta	
87	16	S0	195	90	Veta	
95	31	S0	210	90	Veta	
80	30	S0	220	90	Fractura	
27	40	S0	120	90	Fractura	
234	40	Falla Normal				

Rumbo	Inclinación	Tipo de dato		Rumbo	Inclinación	Tipo de dato
250	40	S0		228	55	S0
220	30	S0		68	33	S0
250	22	S0		98	24	S0
13	25	S0		LLC2.13.1-2.13.10 Potrero La Repartición-El Epazote (310437, 2528790)		
96	22	S0		264	50	S0
112	20	S0		284	45	S0
192	22	S0		248	47	S0
60	25	S0		222	30	S0
100	25	S0		246	47	S0
90	16	S0		64	30	S0
93	22	S0		58	25	S0
208	20	S0		282	45	S0
226	34	S0		268	65	S0
242	25	S0		66	45	S0
LLC2.10.1-2.10.7 loma la Masita-Loma Larga-mesa El Toro				80	42	S0
325	34	S0		LLC2.14.1-2.14.3 (309411, 2521353), Sierra El Meco		
50	65	S0		225	55	S0
278	42	S0		225	17	S0
282	45	S0		290	28	S0
138	20	S0		290	28	S0
140	20	S0		246	30	S0
295	55	S0		251	50	S0
300	45	S0		LLC2.15.1-2.15.6		
106	85	S0		258	34	S0
270	27	S0		244	80	S0
240	55	S0		72	20	S0
230	43	S0		200	30	S0
252	60	S0		142	10	S0
160	24	S0		LLC2.16.1.-2.16.3, Loma la Añeja		
168	20	S0		66	12	S0
210	90	Fractura rellena de CaCO3		118	10	S0
295	55	Fractura		144	15	S0
LLC2.11.1-2.11.8 tramo La Reparticion-El				212	40	S0
240	54	S0		253	14	S0
230	80	S0		270	20	S0
264	80	S0		LLC2.17.1-2.17.3 (324585, 252735) Llanos del Carmen		
266	50	S0		342	18	S0
230	50	S0		220	25	S0
244	45	S0		328	20	S0
260	22	S0		254	30	S0
210	40	S0		226	22	S0
242	35	S0				
255	60	S0				

Proyecto: “Modelo estructural del depósito de Azufre-Yeso El Fénix, zona mineralizada Villa Hidalgo, S.L.P.”											
13 dic 2024. El Fenix, azufre. Terrero Sw, 14Q0322428-2518150,											
terrero SE -alto-, 14Q0322488-2518203 a 14Q0322492-2518198 estructura vertical N60°W											
pozos 1 norte, estructura brechada y cuerpo de yeso, caliza brechada con planos 060°/80° + L izq. 160°/15°. 14Q0322448-2518223											
caliza arrecifal con alternancia de horizontes con terrigenos, algunas capas con pedernal negro.											
23/01/2025, mina El Verde, yeso-azufre, 14Q0318198-2523721											
ELV25-1 tiro cuadrangular circulado y adernado de piedra, 2.5 por 1.5 m, en caliza, poco mas de 8 m de honda con indicios de estructura con yeso y azufre, cubierta											
litologia-mineralogía	estratificación S0	foliación. S1, S2-Sn	Falla normal	Falla Inversa	Falla lateral d-l	Lineación	estrias n-l-d-s	veta-manto	eje b	fractura f	
caliza	50 40										
en bancos											
horizonte lajoso	42 34										
ELV25-2 Loc. 0318181-2523684											
bancos de caliza										170 87	
con bioclastos	70 22									255 44	
										250 62	
	calcita									215 88	
ELV25-3. 14Q 0318200-252393, pequeña cata de no mas de 0.5 m de honda con indicios de estructura con yeso y azufre, cubierta											
								E-W			
ELV25-4. 14Q 0318194-2523662, pequeña rampa inclinada de 10 m, rumbo de la obra S50°W , pendiente 25°											
litologia-mineralogía	estratificación S0	foliación. S1, S2-Sn	Falla normal	Falla Inversa	Falla lateral d-l	Lineación	estrias n-l-d-s	veta-manto	eje b	fractura f	
caliza de	10 20				78 45 i					82 88	
estratif.	45 18									12 84	
delgada a	275 32										
media	280 23										
	60 15										
	250 40									350 85	
	40 17									346 88 +caco3	
	5 4						50 80			82 35	
	265 60						70 85			310 80	
	258 45								345 0	285 86	
										197 85	
ELV25-5. 3118197-252328. veta en superficie											
							65 90				
							56 70				
							60 74				
ELV25-6. 14Q 0318229-2523654, tiro inclinado mas de 10 m											
litologia-mineralogía	estratificación S0	foliación. S1, S2-Sn	Falla normal	Falla Inversa	Falla lateral d-l	Lineación	estrias n-l-d-s	veta-manto	eje b	fractura f	
	55 54										
	40 48										
	48 50		63 68								
	64 50				35 38						
	58 30		65 65								
EFX25-1, 14Q 0321725/2519200											
19 feb. 2025											
litologia-mineralogía	estratificación S0	foliación. S1, S2-Sn	Falla normal	Falla Inversa	Falla lateral d-l	Lineación	estrias n-l-d-s	veta-manto	eje b	fractura f	
					166 90 izq					340 88	
					154 90 der					45 68	
					170 90 izq					54 80	
					148 90 der					325 85	
										105 82	
										234 88	
										340 86	
										102 80	
	loc. 321738/2519188										
										155 90	
										46 90	
										112 90	
										45 90	
con calcita										170 90	
con calcita										165 90	
con calcita										160 90	
con calcita										156 90	
										226 90	
										227 90	
										94 90	
										166 90	
										222 90	

litología-mineralogía	estratificación S0	foliación. S1, S2-Sn	Falla normal	Falla Inversa	Falla lateral d-i	Lineación	estrias n-i-d-s	veta-manto	eje b	fractura f
Formacion El Abra	345 36 al bajo							272 60		
	282 30 al alto							278 38		
								285 36		
								255 63		
								295 60		
LLC25-2,	14Q 0327179/2518833									
								74 85		
					250 68		338 20 izq	60 70 brecha		
LLC25-3	14Q 0327128/2518901				208 85			218 88 ox, arc		
					20 80		350 36 nor, dex			
LLC25-4	326973/2519278 capillita San Francisco									
					30 87			190 78 brecha		
					228 88		140 14 nor, dex			
LLC25-5	14Q 0326975/2519266									
	255 45				15 80 caolin					
	283 40				170 88					
p.p San Juditas sup 200 H A.G. SLP E loc. 0327032/251909¿										
LLC25-6	327093/2519191, rebaje socabon N70 E									
					15 70					
					4 85					
					345 78 norm					
LLC25-7	327532/2518902 bajada hacia la Tapona									
	127 38							219 80		
								244 86		
	140 44				140 42					
	153 32				137 58		128 42 nor	125 54		
					160 30			155 50		
								272 30 manto		
								108 10 manto		
LLC25-8	14Q 0327870/2529399 socavon grande con caolin									
					225 58					
					228 60		168 40 nor dex			
					210 88					
					195 86		115 30 dex			
					235 88		140 26 izq			
							145 17 izq	230 70		
					227 60					
					235 57					
LLC25-9	14Q 0327823/2519343									
								203 66		
								35 64		
					6 80		100 32			