



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

*Modelo tridimensional geológico estructural de la
mina La Negra de Fosforita de México S. A., en el
municipio de Pacula, Hidalgo.*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEÓLOGA

P R E S E N T A:

MARYBETH GARRIDO HERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ

México, D. F., Cd. Universitaria, Noviembre, 2013.

*“Les tengo dos noticias,
la buena es que la mitad
de este trabajo está mal.
La mala es que no sé cuál
mitad, pero a alguno de ustedes
les tocará descubrirlo”.*

Dr. Randall Marret

Agradecimientos

A esa maravillosa luz que ha sido mi gran fuente de inspiración, fortaleza y energía para permanecer lejos de todas las personas que amo y que me ilumina cada día para realizar mis sueños.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra por todo el apoyo y las oportunidades brindadas durante estos 5 años, que me han traído hasta este momento.

Al Dr. Ricardo Padilla por cada palabra y consejo, quien me enseñó a pensar prácticamente y seguir amando lo que hago, quien me apoyó para vencer el miedo a la tecnología y todo aquello que me toca hacer, por resolver cada duda y seguirme apoyando, por confiar en mí.

Al Ing. Miguel Vera por tener la plena confianza en mi trabajo y por las enseñanzas, para no dudar jamás de lo que hago o digo.

A mis sinodales: Dr. Gustavo Tolson, Dr. Garza, Dr. Aguayo y M. en A. Gabriel Ramírez, quienes colaboraron con observaciones acertadas al escrito y me apoyaron para mejorar cada detalle.

Al Ing. Alfredo Victoria y Dr. Silva por sus especiales enseñanzas y recomendaciones para este trabajo, por compartir sus conocimientos y brindarme su apoyo cuando más lo necesité.

A todos mis profesores de Geología, quienes compartieron su conocimiento y me inspiraron a buscar nuevas cosas y a gustar de cada detalle de esta apasionante carrera.

A aquellos que brindaron la licencia académica de MOVE, para que pudiera desarrollar este modelo.

A la empresa minera La Negra de Fosforita de México S. A. de C.V. de Minerales Industriales S. A. de C. V., por permitirme hacer el análisis e interpretación de la mina de fosforita durante mi estancia profesional.

A todas de las personas que trabajan en la mina y que me brindaron su apoyo en ese periodo tan desafiante; quienes fueron grandes guías, consejeros, compañeros para todo y, sobretodo, gran fuente de la información que se maneja en este trabajo y que sólo ellos pudieron conocer con tanto detalle, en especial a: Juachín por su humildad y alegría, Don Feyo y sus anécdotas de trabajo, Don Juanito y su gran experiencia empírica, Víctor y su protección, mis paisanos (Daniel y Gilberto) por cada risa, Miguel por recordarme la importancia del trabajo multidisciplinario, Silvestre y su humor negro, Don Beto por su compañía, y Roberto, quien me hizo darme cuenta que afuera hay Pumas dispuestos a defender el nombre de nuestra Universidad.

Al Dr. Juan Carlos Mora y todo el equipo de PRiFeN, quienes me permitieron conocer el trabajo real durante el servicio social en el Instituto de Geofísica, porque tuve la oportunidad de trabajar para la

gente y pude darme cuenta que, en esta carrera, en cualquier rama, se tiene una relación directa con el bienestar de la población.

A mi familia por su amor, confianza y paciencia en todo momento: a mi hermana, por cada terapia y cada palabra que me ayudaron a crecer constantemente; a mi hermano, por el apoyo a pesar de la distancia y a mi Betito, a quien le debo todo y a quien le dedico este triunfo, por su ejemplo y fortaleza que me ayuda a levantarme cada día. Los amo.

Al resto de mi familia, por comprender cada ausencia; en especial a mi tío Pepe, quien me hizo descubrir la Geología y así encontrar lo que más amo hacer, mi camino con corazón. A esas mujeres que cada día me enseñan a seguir adelante.

A mis amigos por su apoyo, tolerancia, risas, compañía; no sólo fue increíblemente divertido estar con ustedes, sino que también aprendí grandes cosas de cada uno: a Albis porque no es fácil tener un gran amigo y mucho menos soportarlo por 5 años viviendo bajo el mismo techo a pesar de todo, a Caro por su alegre presencia y apoyo incondicional, a Eli por escuchar y demostrar una amistad tan sincera, a Norma por mostrarme la calma y la vida eterna, a Garfias por ser un gran ser humano, a Charly por ser un ejemplo en todos los sentidos, a Daniel "El Vago" por ser tolerante y un gran equipo, a Ángel por quitarme el miedo a sobresalir e impulsarme a ir siempre por más, a Uri por compartir este gran amor por la Geología, a Fernando por ser un geólogo brillante y con mucho talento, a Axel por seguir aquí, a Rosita por apoyarme para continuar y salir de la fosa en la que me encontraba. Más que nada, porque han sido como mis hermanos en este desafiante lugar y se quedaron desde el principio hasta siempre, los amo demasiado, mi nueva familia a quienes les ofrezco mi respeto y admiración incondicional.

A esta Tierra que amo, aprecio y respeto, pues gracias a la Ingeniería Geológica puedo verla de otra manera. Porque nunca dejaré de sorprenderme ni de compartir con el mundo cada bello detalle que veo a mi alrededor. Porque la entiendo, tengo el placer de poder estudiarla y trabajar para ella de ahora en adelante. Nadie me preparó para nada de esto, no sabía en lo que me metía y, aun viviendo todas esas situaciones, nunca me detuve ni siquiera por miedo; pero sí me prepararon para ser una gran Geóloga, lo demás que aprendí me hará ser mejor para esta vida de campo que elijo el día de hoy y siempre.

A cada persona que hizo posible este momento, gracias Universo por enviarlos a mi camino.

Noviembre de 2013.

CONTENIDO

Resumen.....	7
Relación de figuras.....	8
Relación de tablas.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Objetivo.....	16
1.2.1. Objetivos específicos.....	16
1.3. Trabajos previos.....	17
1.4. Área de estudio.....	19
1.5. Metodología.....	21
Capítulo 2. Generalidades.....	24
2.1. Marco geológico regional.....	25
2.2. Estratigrafía.....	28
2.2.1. Columna estratigráfica local.....	30
2.2.2. Petrografía.....	34
2.3. Carsticidad.....	40
2.4. Mapa geológico del área de la mina.....	45
Capítulo 3. Geología Estructural.....	47
3.1. Marco tectónico regional.....	48
3.2. Descripción de las estructuras.....	50
3.3. Influencia de las fracturas en la carsticidad.....	56
Capítulo 4. Origen de la formación de fosforitas.....	61
4.1. Ciclo del fósforo.....	63
4.2. Fosforita.....	66
4.3. Clasificación de la fosforita.....	67
4.3.1. Origen ígneo.....	67

4.3.2. Origen sedimentario.....	68
4.4. Ejemplos de depósitos de fosfatos.....	71
4.4.1. Proterozoico.....	71
4.4.2. Paleozoico.....	73
4.4.3. Mesozoico.....	73
4.4.4. Cenozoico.....	74
Capítulo 5. Construcción del modelo.....	77
5.1. Metodología.....	78
5.2. Modelo 3D Geológico Estructural.....	91
5.3. Comparación de este modelo con otros ambientes de formación de la fosforita.....	95
Capítulo 6. Yacimiento mineral.....	98
6.1. Explotación y tratamiento de la fosforita.....	102
6.2. Uso de la fosforita.....	103
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....	105
Referencias citadas.....	109
Anexos.....	119
I. Fotografías de petrografía.....	120
II. Fotografías de fracturas.....	123

Resumen

La fosforita es una asociación mineral con más del 18% de su contenido total de P_2O_5 , la cual se presenta en distintas formas en la naturaleza de acuerdo a su origen; la mayoría de los depósitos fosfáticos son de origen sedimentario, por lo que el paleoambiente más común es la plataforma continental aunque existen depósitos fosfáticos ígneos, enriquecidos por apatito asociados con rocas alcalinas.

En el Cretácico se conocen grandes depósitos de fosfatos a nivel mundial, debido a varios factores ambientales como los procesos de formación de carbonatos, ascensos y descensos del nivel del mar, aumento de CO_2 atmosférico, periodos de anoxia y acumulación de organismos ricos en fósforo y carbono. En ese periodo en México ocurrió la formación de plataformas carbonatadas, como la de Valles-San Luis Potosí y El Doctor, formando arrecifes en sus bordes, añadiendo periodos de meteorización mecánica a las calizas que dieron como resultado la formación del relieve cárstico estudiado en Pacula, municipio de Hidalgo. Posteriormente, estas rocas carbonatadas fueron deformadas por esfuerzos compresivos con dirección NE-SW durante la orogenia Laramide, originando fracturas de primer y segundo orden.

Las cavidades cársticas, conocidas localmente como “guatos”, alojaron restos de organismos que, en las condiciones ambientales y estructurales del Cretácico, originaron un yacimiento económicamente explotable de fosforita conocido por el nombre de mina “La Negra”, el cual, sigue un patrón de fracturamiento que le da forma a las cavidades que contienen el mineral, definido a través de un modelo tridimensional que muestra las facies litológicas que integran al yacimiento.

Relación de figuras

Capítulo 1. Introducción

- Figura I-1. Mapa que muestra la carretera para llegar a la mina.* 20
- Figura I-2. Imagen de la mina La Negra.* 20

Capítulo 2. Generalidades

- Figura II-1. Mapa geológico de la región Zimapán-El Doctor, Estados de Querétaro e Hidalgo (Suter, 1982).* 26
- Figura II-2. Localización de la plataforma Valles San Luis y la plataforma de El Doctor, principalmente, ambas achuradas con la simbología de las calizas.* 27
- Figura II-3. Columna estratigráfica para la mina La Negra.* 30
- Figura II-4. Fósil de gasterópodo expuesto en la roca.* 31
- Figura II-5. Rudistas de varios tamaños.* 32
- Figura II-6. Calizas bindstone, evidencia de la plataforma activa.* 32
- Figura II-7. La figura a muestra travertino, se encuentra sobre la wackestone de la figura b que tiene foraminíferos.* 33
- Figuras II-8. Muestra 1 de roca con una capa delgada de fosforita.* 35
- Figura II-9. Fluorita de color morado sobre calcita.* 36
- Figura II-10. Fluorita en la lámina delgada al microscopio petrográfico, vista con el objetivo de 2.5x.* 37
- Figura II-11. Fotografías de fosforita de color negro.* 38
- Figura II-12. Fotografías de la fosforita sacada de un guato en el área 2, es la misma muestra en las fotografías a y b, pero en distinta vista para la apreciación de los fósiles.* 39
- Figura II-13. Imagen donde se observan los peletes de fosfatos de color marrón.* 40
- Figura II-14. Lapiaz, ejemplo de la mina en el área 4, se encontraba relleno por fosforita terrosa.* 41
- Figura II-15. Fotografía de la entrada a la cueva ubicada en el área 4 de la mina.* 43
- Figura II-16. Mapa geológico a detalle de la mina La Negra, basado en el mapa de Carrillo y Suter (1982).* 46

Capítulo 3. Geología Estructural

- Figura III-1. Mapas que muestra la sucesión de eventos del Oxfordiano al Albiano.* 49
- Figura III-2. Mapa geológico del área extendida elegida para la mina La Negra; se observan los contactos entre unidades, las fracturas, las cabalgaduras y el sinclinal El Fraile.* 51
- Figura III-3. Estereograma donde se indica la dirección sugerida para la sección, 236°, siendo ésta paralela a la dirección de compresión ejercida sobre las formaciones.* 52

<i>Figura III-4. Sección geológica donde se colocan los esfuerzos principales ejercidos.</i>	53
<i>Figura III-5. Fotografías de pliegues; en la foto a de la izquierda se observa una anticlinal apretado erosionado de su cresta y en la foto b de la derecha se observa un anticlinal recostado al SE.</i>	54
<i>Figura III-6. Líneas que muestran la estratificación de la caliza, con echado al NE en el área 2 (flanco de anticlinal), cortado por fracturas casi verticales, representados por las líneas en color rojo.</i>	54
<i>Figura III-7. Fragmentos de organismos e intraclastos re TRABAJADOS, dos vetillas de calcita que no están unidas.</i>	55
<i>Figura III-8. Tres tipos de fractura, modos I, II y III, según la clasificación de Lawn y Wilshaw (1975). (Tomado de Fossen, H. 2010. Structural Geology, capítulo 7, fig. 7.5, pp. 122.)</i>	55
<i>Figura III-9. Esquema de la evolución paleogeográfica de la margen continental del Triásico al Jurásico.</i>	56
<i>Figura III-10. Área 2, parte noreste conocida como el Cerro de las Brujas.</i>	57
<i>Figura III-11. Área 2, parte norte.</i>	58
<i>Figura III-12. El “guato” de la figura a es de la parte más alta del área 2 y la fractura marcada con la línea va hacia NW-SE.</i>	58
<i>Figura III-13. La fotografía a muestra un “guato” vacío, las fracturas al N75°E con un m de ancho 5 de altura y 7 hacia adentro. La figura b muestra gustos expuestos, las fracturas forman parte de las paredes de los guatos. Ambos se encuentran en el área 2.</i>	59
<i>Figura III-14. Los “guatos” del área 4 que se conectan por la misma dirección de sus fracturas.</i>	60
Capítulo 4. Origen de la formación de fosforitas	
<i>Figura IV-1. Mapa de la distribución de fosfatos sedimentarios.</i>	62
<i>Figura IV-2. Esquema de Glenn et al. (1994) de los ambientes de formación de las fosforitas.</i>	64
<i>Figura IV-3. Esquema de McLane (1995) de la Formación Fosforita.</i>	65
<i>Figura IV-4. Concreciones de fosforita de la Formación La Caja, Sierra de La Caja, noreste de Mazapil, Zacatecas, México.</i>	66
<i>Figura IV-5. Esquema que representa los depósitos en la plataforma interna (tomado y traducido de Föllmi, 1996).</i>	70
<i>Figura IV-6. Distribución temporal de los depósitos de fosfatos (Cook, 1984).</i>	71
<i>Figura IV-7. Diagrama que muestra el posible origen de los fosfatos.</i>	72
Capítulo 5. Construcción del modelo	78
<i>Figura V-1. Frente de la mina en el área 2, tomada en diciembre del 2012.</i>	

<i>Figura V-2. Imagen de Move que muestra el mapa geológico inicial con contactos y con las dos cabalgaduras, la de Jiliapan al Noreste y El Volantín al suroeste.</i>	80
<i>Figura V-3. Imagen de Move con un acercamiento para ver la nube de puntos de fósiles identificados.</i>	80
<i>Figura V-4. Imagen de Move con un acercamiento para observar los símbolos de echados colocados en cada lugar según su posición de estratos y fracturas.</i>	81
<i>Figura V-5. Imagen de Move donde se indican las fracturas dibujadas en el mapa base; están las de fotogeología en color morado, las que midieron en campo de color azul marino y las direcciones de los “guatos” en color café.</i>	82
<i>Figura V-6. Imagen de Move en vista de sección A-A’, ésta contiene los contactos, fallas inversas y fracturas con sus colores asignados.</i>	84
<i>Figura V-7. Imagen de Move donde se observa la intersección de los dos planos de cabalgadura con el modelo digital de elevación.</i>	85
<i>Figura V-8. Imagen de Move donde se muestran de perfil, en una vista 3D, las fracturas de color morado terminando en la superficie de la Cabalgadura de Jiliapan.</i>	86
<i>Figura V-9. Imagen de Move en vista 3D desde arriba, donde se observan las fracturas fotogeológicas y las tomadas en campo, algunas tienen inclinación y otras son verticales.</i>	86
<i>Figura V-10. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr y Kia-wk por debajo de la Cabalgadura de Jiliapan. Estas superficies se colocaron paralelas y sin deformación, tal como se indica en la sección E-E’ de la carta geológica de Carrillo (1982).</i>	87
<i>Figura V-11. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit y Kia-md por encima de la Cabalgadura de Jiliapan (de color rojo), las cuales se encuentran ligeramente plegadas por esfuerzos compresivos suroeste-noreste.</i>	88
<i>Figura V-12. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md y Kia-gr (sin cortar con su intersección a la superficie) por encima de la Cabalgadura de Jiliapan. Este último pliegue incluido es suave y buza al sureste y por encima de éste se encuentra la unidad Kia-wk, ligeramente plegada.</i>	88
<i>Figura V-13. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr, Kia-wk por encima y por debajo de la cabalgadura de Jiliapan, En esta imagen las superficies ya están cortadas con las intersecciones con el modelo de elevación digital, es decir, quedan las capas que afloran en la superficie.</i>	89
<i>Figura V-14. Imagen de Move que muestra los nuevos contactos obtenidos a partir de las superficies creadas con el software.</i>	90
<i>Figura V-15. Imagen de Move que muestra los contactos sobre la foto aérea.</i>	90
<i>Figura V-16. Imagen que muestra las fracturas de fotogeología y las que se midieron en campo sobre la foto aérea.</i>	91

<i>Figura V-17. Imagen del modelo con las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr, Kia-wk, Da y Tr con las 2 cabalgaduras. Aunque la unidad Kss no aparece como superficie es porque aflora y su cima no es posible colocarla porque ya se erosionó y dejó un autóctono.</i>	92
<i>Figura V-18. Imagen del modelo en 3D. La capa superior, casi transparente, es el modelo digital de elevación, las unidades aparecen con sus respectivos colores y las fracturas aparecen cortando algunas de las unidades.</i>	92
<i>Figura V-19. Acercamiento al área 2 de la mina. Se observa la unidad Kia-gr que está siendo cortada por las fracturas en color azul marino, éstas, a su vez, se cruzan entre sí y se forman paredes.</i>	93
<i>Figura V-20. Mapa de la mina con la sección elegida para obtener una sección adecuada y representativa del área.</i>	94
<i>Figura V-21. Vista de la sección A-A' nueva, con los contactos corregidos y trazas de falla que respetan la geometría de los planos y de los estratos.</i>	94
<i>Figura V-22. Esquema de la idealización de un arrecife de coral maduro.</i>	95
<i>Figura V-23. Áreas de depósito de carbonatos, que se acumulan en profundidades de 30 m en la submareal, este ejemplo es de una plataforma restringida.</i>	95

Capítulo 6. Yacimiento mineral

<i>Figura VI-1. Imagen de la mina dividida por áreas según señale cada color. Cabe destacar que se marcaron únicamente las áreas recorridas durante la estancia, no es un mapa con dimensiones reales de cada zona, sólo es para ubicar elementos.</i>	99
<i>Figura VI-2. “Guato” de 2 m de ancho y 1 m de altura con una dirección de apertura, es decir, paredes de fracturas S45°W.</i>	100
<i>Figura VI-3. La figura de la izquierda muestra un “guato” excavado, con las paredes laterales bien marcadas por fracturas.</i>	100

Anexos

<i>I-A. Fotografías observadas con el objetivo de 2.5x, la fotografía izquierda se utilizan los nícoles cruzados y en la derecha con luz paralela.</i>	120
<i>I-B. Organismos con relleno de calcita, espatita primaria y lodo calcáreo, lo que puede clasificar a esta roca como una grainstone-packstone; observados con el objetivo de 2.5x. En la fotografía izquierda se ve con luz paralela y a la derecha con nícoles cruzados.</i>	120
<i>I-C. Organismo relleno de calcita y con fluorita en la parte superior. Pequeñas concentraciones de fosfatos, espatita primaria; observadas con el objetivo de 2.5x. Fotografía de la izquierda con luz paralela y en la derecha con nícoles cruzados.</i>	121
<i>I-D. Gasterópodos y fragmentos de roca retrabajados con fosfatos de relleno, espatita primaria y micrita. A la izquierda con nícoles cruzados y la derecha con luz paralela con el</i>	

<i>objetivo de 2.5x.</i>	121
<i>I-E. Clasto de color gris oscuro con fósiles en color blanco y de color marrón oscuro son fosfatos. Vista con el objetivo de 2.5x y luz paralela. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm</i>	121
<i>I-F. Organismos e intraclastos rellenos de calcita, se puede ver espatita también de relleno en la parte superior. En la fotografía de la izquierda con nícoles cruzados y a la derecha con luz paralela. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm.</i>	122
<i>I-G. Fosforita vista con el objetivo de 10x en luz paralela.</i>	122
<i>II-A. Guato del área 2 definida por una fractura NW-SE, en la parte central se cierra la cavidad, volviendo a abrirse en la misma dirección.</i>	123
<i>II-B. Fracturas en el área 3, casi verticales con estratificación horizontal.</i>	123
<i>II-C. Fracturas en el área 3 a 76° cortando y cerrando en forma de cono las cavidades.</i>	123
<i>II-D. Fracturas a 78° forman paredes en los guatos que llegan a ser de 3 m de profundidad y espaciadas por 1 m.</i>	123

Relación de tablas

Capítulo 2. Generalidades

<i>Tabla II-a. Tipos de laplaces (Sweeting, 1972)</i>	42
<i>Tabla II-b. Tipos de dolinas (las tres primeras de Cvijic, 1893 y las últimas dos de Cramer, 1941)</i>	43
<i>Tabla II-c. Tabla de la clasificación de valles y fuentes cársticos.</i>	44

Capítulo 4. Origen de la formación de fosforitas

<i>Tabla IV-a. Clasificación de fosfatitas de Slansky (1980, 1989).</i>	68
---	----

Capítulo 6. Yacimiento mineral

<i>Tabla VI-a. Clasificación de las fosforitas existentes en la mina según su contenido de P₂O₅.</i>	101
--	-----

Capítulo 1

Introducción

- 1.1. Antecedentes
 - 1.2. Objetivo
 - 1.2.1. Objetivos específicos
 - 1.3. Trabajos previos
 - 1.4. Área de estudio
 - 1.5. Metodología
-

La fosforita es uno de los principales minerales utilizados en la industria de fertilizantes, siendo de gran importancia los afloramientos naturales que puedan encontrarse, por lo que es vital conocer el origen y comportamiento del yacimiento para obtener mejores resultados en la explotación.

Todo trabajo minero requiere de una buena planeación, no sólo para la explotación, sino para cada movimiento de la planta, así como la ubicación de áreas especializadas en el tratamiento y desecho de residuos, ubicación de maquinaria y demás componentes que hacen que un proyecto minero funcione adecuadamente.

Con el trabajo de campo se consiguieron datos geológicos y estructurales por medio de una exploración superficial de las cuatro áreas de explotación que comprende la mina a cielo abierto La Negra, ubicada en el municipio de Pacula, Hidalgo. Algunos de los afloramientos de roca y mineral expuestos, presentaron direcciones preferenciales de fracturamiento, lo que puede ayudar a encontrar un patrón para la localización de la fosforita.

A diferencia de otros yacimientos de fosforita, ésta se encuentra en oquedades formadas en la roca por carstificación y dentro de éstos se depositó el mineral. En la región, conocen a estas oquedades como “guatos”, con un comportamiento geométrico único e irregular, lo que hace difícil una estimación exacta de reservas y la búsqueda de las mismas.

1.1. Antecedentes

La empresa minera Fosforita de México de Minerales Industriales S.A. de C.V. se encuentra en el Estado de Hidalgo, dividida en dos áreas en diferentes municipios; la mina La Negra se encuentra en la localidad de Jiliapan, municipio de Pacula, mientras que la planta de tratamiento del mineral está en San Pedro, Zimapán.

Aunque la mina lleva por nombre La Negra, no se extrae lo mismo que en La Negra de Querétaro de polimetálicos, pues en esta se extraen minerales no metálicos y es más conocida por el nombre de La Fósfora, pero el nombre viene del tipo de mineral que se extrae, debido a que al inicio la única fosforita que se obtenía era en concentrados minerales de gran tamaño de color negro. Posteriormente, fueron encontrándose fosforitas de colores marrón, gris, ocre y negra en diferentes formas, desde una roca oscura muy porosa, hasta la presentación de “balín” y en tamaño de arena muy fina a gruesa.

La mina lleva aproximadamente cuarenta años de haberse descubierto, a partir de 1971 con tres periodos de explotación, el primero en los años setenta, el siguiente hasta los noventa y el tercero fue por parte de la empresa Minerales Industriales desde el 2008 (Manuel Alvidrez, contacto directo, 2012).

El mineral extraído se compone de fósforo, que es uno de los elementos vitales para la agricultura y para la vida, pues es parte de los huesos de muchos organismos o de partículas esqueléticas y forma parte de un ciclo donde interviene en casi todas las reacciones químicas, ya sea en compuestos minerales como en combinaciones orgánicas.

Normalmente un suelo puede poseer fósforo para sostener la vida vegetal, pero muchas veces éste es insuficiente para la demanda de los cultivos, cada vez con mayor potencial de rendimiento, producto de la investigación y desarrollo en genética vegetal. Por esa razón, el fósforo debe agregarse como fertilizante ya que no hay otra fuente disponible en la naturaleza que, además, reponga el fósforo que se extrae por las cosechas.

La industria transforma las rocas fosfóricas que contienen el fósforo poco soluble, en formas iónicas aprovechables por las plantas que lo absorben del suelo en forma del compuesto conocido como ácido fosfórico (H_2PO_4). Latinoamérica es un importante demandante de fosfatos y su creciente importancia como proveedora de alimentos al mundo hace que se potencie el rol estratégico de la industria de

fosfatos a pesar de que sus reservas conocidas en los depósitos no son de gran magnitud comparadas con las de Estados Unidos de Norteamérica, China, Rusia, norte de África (Marruecos, Sahara Occidental, Túnez) y Asia Menor (Israel y Jordania).

Por esta razón se plantea la realización de un modelo en tres dimensiones donde se visualice la morfología del yacimiento para determinar un posible método de explotación para que su obtención esté basada en la geología del lugar. Se ha sugerido como hipótesis inicial que la mineralización que se encuentra en las oquedades sigue patrones de fracturamiento previo a la carstificación de la roca, por lo que es posible medirlos, encontrar sistemas de fracturas debidos a esfuerzos y, así, conocer las formas que rigen al yacimiento.

1.2. Objetivo

Generar un modelo tridimensional geológico estructural que muestre las discontinuidades medidas en campo, con lo que se analizará el origen y la formación del yacimiento de fosforita, para identificar cuerpos mineralizados que permitan una explotación más eficaz.

1.2.1. Objetivos específicos

- a. Realizar un trabajo de campo a detalle, para la obtención de datos geológicos y estructurales.
- b. Generar un mapa geológico de detalle del área de la mina de fosforita.
- c. Conocer y definir la estratigrafía del área, así como los espesores reales de los estratos.

- d. Combinar técnicas usadas anteriormente como fotogeología y cartografía con el uso de software especializado en geología estructural para complementar la información y obtener mejores resultados.

1.3. Trabajos previos

En la mina se realizaron, directamente, tres informes sobre las condiciones geológicas, donde se incluyen estudios con muestreos y un cuarto documento que menciona al mineral de fósforo en él, los cuales se describen a continuación:

La hoja Zimapán, realizada por Carrillo (2000), contiene una carta geológica 1:100,000 y describe las formaciones de los periodos Jurásico, Cretácico, Terciario y Cuaternario, así como las rocas intrusivas que afloran en parte de los Estados de Hidalgo y Querétaro. En este documento se incluyen breves descripciones de la estratigrafía y la geología estructural de la región, terminando con los rasgos económicos más importantes de la zona, como son la geotermia, la energía hidroeléctrica y la minería.

En la hoja Zimapán se incluyen zonas con desarrollos mineros de polimetálicos, principalmente de oro, plomo-zinc-plata y dentro de los no metálicos se explotan el caolín, ópalo, cal, mármol y la fosforita en San Francisco, municipio de Pacula. Brevemente, se describe que la fosforita se encuentra como un mineral arenoso situado en un uvala (forma cárstica) en el borde de la plataforma carbonatada Valles-San Luis Potosí.

Además, menciona el trabajo de Quintus-Bosz (1982), quien realizó un análisis del yacimiento y explica que la fosforita se produjo por la disolución de fósiles, de ahí se basó el Servicio Geológico Mexicano para hacer la descripción que se incluye en la carta geológica San Joaquín.

También se realizó un reporte que incluye el análisis de una muestra del mineral tomada aleatoriamente, el cual no es representativo para toda la mina. Este análisis fue realizado en Canadá, por lo que no se mencionan todos los tipos de fosforita que hay en formas y colores, donde el contenido de fosfatos varía notablemente, se toman en cuenta el contenido de óxidos, silicatos, carbonatos, sulfuros y otros compuestos de apatito de la muestra. Aunque no se tenga la referencia completa, se menciona para que se tome en cuenta en estudios posteriores, la importancia de un buen muestreo que pueda definir con precisión el contenido de fosfatos del mineral.

Otro reporte fue realizado para Peñoles por Bucio (1978), en donde se incluye la fisiografía, la geología, el origen de la mineralización y un análisis de los barrenos tomados en campo, con secciones geológicas y dos láminas delgadas para un estudio petrográfico descrito por Cepeda (1973). Con esto se realizó la estimación de las reservas y seis zanjas donde se muestrearon las paredes donde encontraban la mineralización.

Se incluyen las descripciones de veintitrés barrenos verticales y uno horizontal, los cuales no dieron los resultados que se esperaban por no haber sugerido una explicación al origen de esa carstificación, la cual está directamente ligada con las formas irregulares donde se deposita la fosforita. En la mayoría de las descripciones de los núcleos se tiene material arcilloso únicamente, donde esperaban fosforita en las partes más profundas, pero no se encontró en la mayoría de los casos. En la cuadrícula de interés que se trazó, no se pudo estimar exactamente la cantidad de reservas del yacimiento por ser presentar una geometría tan irregular y las secciones geológicas obtenidas no cumplen con la función de guía para la explotación del mineral.

El último informe donde se menciona un poco sobre la mina La Negra, es en el folleto-guía de la excursión geológica a la presa hidroeléctrica de Zimapán y la mina de fosforita (1986), donde cita al trabajo de Bucio (1978) y se limita al periodo donde la mina no se encontraba en actividad de explotación.

Hay otros documentos que mencionan el contenido de fósforo de estas áreas por la Formación El Abra y la plataforma Valles-San Luis Potosí, pero ha sido más relevante el estudio de los minerales metálicos en la industria minera y este yacimiento sedimentario resulta, en cierta forma, más complejo por su geometría.

1.4. Área de estudio

El área de estudio se localiza entre San Francisco y Jiliapan, municipios de Pacula (que significa lugar donde se dan muchas vueltas), Estado de Hidalgo y son propiedad de la empresa minera Fosforita de México, de Minerales Industriales S.A. de C.V.

Para llegar a ese sitio, desde el Distrito Federal, se llega a Lechería-entronque Tepetzotlán-entronque Jorobas en la carretera 057D hasta llegar a Apazco-Atitalaquia, Hidalgo en la carretera México 009, se toma la carretera federal 85 de México-Pachuca hasta llegar a San Pedro, Zimapán, Hidalgo; en este municipio se encuentra la planta de tratamiento, limpieza y empaque de la fosforita.

A unos 5 kilómetros de la planta, hay una bifurcación en la carretera, la que sigue en recta va a Tamazunchale continuación de la carretera 85; se toma la otra durante 37 kilómetros, con un tiempo estimado de 1 hora, aproximadamente. Llegando a la localidad de Jacala se toma la desviación hacia las localidades de San Francisco, El Baile y El Fraile, justo donde hay un señalamiento para el camino. Se avanza por terracería 3 kilómetros y se llega a la mina La Negra.

En las figuras I-1 y I-2 se muestran mapas obtenidos de Google Maps y Google Earth respectivamente, que muestran la ubicación de la mina La Negra.



Figura I-1. Mapa que muestra la carretera para llegar a la mina, destacando la carretera 85 de color amarillo. La mina La Negra se encuentra en donde está el señalamiento rojo marcado con una A en el mapa.



Figura I-2. Imagen de la mina La Negra tomada de Google Earth, las partes blancas se deben a los cortes que se han hecho para su explotación, los polígonos de color amarillo con números en el interior corresponde a la división aproximada de las áreas de la mina.

1.5. Metodología

Se realizó la recopilación de información, previa al trabajo de campo, donde se consiguieron imágenes de Google Earth para realizar estereoscopia y delimitar las zonas de trabajo de campo. Se llevó a cabo la consulta de las cartas geológicas y topográficas publicadas hasta la fecha para compararlas y obtener información, como fueron las cartas del Servicio Geológico, la carta topográfica San Joaquín de INEGI, la carta geológica de la Hoja Zimapán del Instituto de Geología y una investigación sobre el uso y origen de los yacimientos de fosforita.

Para definir el problema y el objetivo para esta investigación se visitó la mina, donde se planteó la hipótesis del desarrollo de la carstificación por el fracturamiento de la roca; por esta razón se llevó a cabo un estudio de gabinete por medio del análisis de imágenes aéreas, utilizando un estereoscopio y una lámpara de escritorio para marcar las estructuras principales y contactos de roca, para planear las zonas que debían ser corroboradas en campo.

El material y equipos utilizados para el trabajo de campo consistieron en una brújula tipo Brunton de medición por cuadrantes, una navaja, lupa de 15x, pica, flexómetro, faceta de acrílico, GPS Garmin, regla rumbera, libreta de campo para anotaciones y una cámara fotográfica Sony cyber-shot DSC-TX20 de 16.2 megapíxeles. Para seguir con las normas de seguridad dentro de la mina se requirió de botas de campo con casquillo, casco de seguridad, chaleco con reflejantes y lentes de seguridad.

Una vez realizada la investigación de gabinete, se realizó una estancia de un mes en La Negra donde se llevaron a cabo las siguientes actividades en campo:

- Recorrido de reconocimiento en la mina para la delimitación de áreas, así como para la organización del trabajo, medición de tiempo y aprovechamiento del mismo; Además de la consulta de datos, descripciones e información con trabajadores del lugar y algunos gambusinos, además de los trabajos previos que guardan como referencia.

- Comprobación en campo de estructuras; sistemas de fracturas, principalmente, medición e identificación de éstas, así como observación y diferenciación entre fracturas naturales y fracturas generadas por las detonaciones de la mina.
- Breve descripción de las rocas que afloran y del yacimiento mineral. Tomando en cuenta que no se podía muestrear directamente en varias áreas por la inestabilidad de la roca. Para éstas descripciones se tomaron 3 muestras para su descripción petrográfica.
- Identificación de las variedades de fosforita de la mina, ubicando las zonas donde aparecen. Días efectivos de campo: nueve, por las condiciones climáticas (neblina y lluvia).
- Mapear resultados, datos, localización de fosforita, contactos, localización de fósiles, fracturas, estratificación y otras discontinuidades.

Se obtuvo un total de 206 puntos con un GPS, tal cantidad de puntos fue determinada por los siguientes factores: la importancia de las estructuras, la estratificación, las características de la roca, la exposición del afloramiento y los riesgos presentes en cada punto. Es por eso que se realizó un análisis incompleto en el muestreo de la roca, debido a que era un riesgo muy alto para martillar en un afloramiento por las rocas que podían caer por el minado.

Posteriormente, se regresó al análisis de los datos en gabinete, realizando una selección de datos útiles para crear cartas geológicas que sirvieron como base para el modelo geológico. Generar bases de datos con toda la información recopilada para utilizarla en el software ArcGIS 10.1, obteniendo un mapa base a detalle a una escala de 1:12,500.

Teniendo el mapa geológico, se analizan y definen las secciones geológicas principales para comprobar que la columna estratigráfica esté en el orden correcto

de depósito y, una vez que así sea, se realizan varias secciones para comenzar a visualizar cómo debe ir el modelo en tres dimensiones.

Los datos estructurales obtenidos se convirtieron a azimutales pues el software Move así lo requiere, además que se les agregó la corrección por la declinación magnética debido a que, en campo, fueron tomados en cero. Con esta información se realizó un nuevo mapa geológico a detalle, con cuatro secciones principales que se colocaron en el software Move versión 2013.1 de Midland Valley Exploration, para el modelado geológico estructural, comparando la morfología de este yacimiento con otros depósitos de fosfatos del mundo.

Se analizan las muestras de roca y minerales obtenidos en campo, realizando láminas delgadas para el análisis petrográfico de algunas áreas de interés donde se encontró fluorita en caliza y de la fosforita de la variedad más común, la de color oscuro y con esto se complementa la parte del posible origen de la fluorita.

Obteniendo el modelo en tres dimensiones que muestra cortes entre planos que representan a las fracturas y la litología, se propone una morfología del yacimiento, un nuevo mapa geológico a detalle 1:25,000, además de su comparación con otros yacimientos de fosforita a nivel mundial.

Capítulo 2

Generalidades

- 2.1. Marco geológico regional
 - 2.2. Estratigrafía
 - 2.2.1. Columna estratigráfica local
 - 2.2.2. Petrografía
 - 2.3. Carsticidad
 - 2.4. Mapa geológico del área de la mina
-

En este capítulo se mencionarán aquellos aspectos geológicos importantes para la familiarización con el área de estudio que, regionalmente, abarcará la parte oriente del Estado de Querétaro y la parte occidental del Estado de Hidalgo. El municipio de Pacula, Hidalgo se sitúa entre las provincias de la Sierra Madre Oriental, la Mesa Central y el Eje Neovolcánico. Comenzando con una descripción general de los diversos factores ambientales que están directamente relacionados con la geología y la disposición actual de los afloramientos.

El clima generalmente es templado, con lluvias abundantes en verano e inviernos húmedos y con temperaturas muy bajas (hasta -3°C); por las tardes se caracteriza por ser caluroso y seco. La vegetación se compone por nogales, cedros, mezquites, pinos, pirules y encinos, es por eso que en las zonas altas habitan los venados y los gatos de monte; la vegetación baja se compone por arbustos espinosos, como las biznagas.

En esta área se tiene al río Moctezuma, formado en la unión de los ríos San Juan y Tula, localizado en el límite entre los Estados de Hidalgo y Querétaro, lo que provoca la formación de cañones profundos a través de las secuencias carbonatadas que se erosionan con mayor facilidad.

2.1. Marco geológico regional

Se utilizó la geología de la carta Zimapán que se observa en la figura II-1, donde afloran formaciones de orígenes marinos y volcánicos, describiendo brevemente sólo las más representativas a continuación: las rocas intrusivas que están en contacto con las rocas carbonatadas dan origen a las minas de Zimapán y Maconí, formadas en el Jurásico Tardío, caracterizadas por rocas granodioríticas, diques de riolita, mantos pequeños de monzonita y troncos de cuarzo-monzonita, además de cuerpos subvolcánicos del Mioceno que afectan directamente a los derrames basálticos cerca del área de Peña de Bernal.

Durante el Jurásico Superior se depositó la Formación Las Trancas, que se considera el afloramiento más antiguo cercano al banco de El Doctor; de acuerdo con Segerstrom (1961), al poniente de El Doctor define a esta unidad como secuencias pelíticas con conglomerados, pocas calizas y rocas volcánicas, mientras que al oriente del banco calcáreo describe calizas arcillosas, lutitas y lutitas con arenas finas.

Banco calcáreo El Doctor fue descrito por Wilson (1955) como una plataforma carbonatada con varios cambios de facies, formada en el Cretácico Temprano en un mar poco profundo con calizas de estratificación mayor a 70 centímetros, algunos de esos estratos presentan bandas de pedernal; también se describen calizas brechoides a las orillas de la plataforma, conocidas como facies Taninul; esta formación abarca la parte central del mapa y se consideran espesores de 800 a 1,500 metros.

La Plataforma Valles-San Luis Potosí, localizada al noreste del mapa, se caracteriza por un depósito de carbonatos con facies de plataforma interna, margen de plataforma, cuenca y talud, formada en un ambiente donde se rodeaba de mares de aguas profundas (*ver figura II-2*). La mayor parte de los fósiles depositados en ella son rudistas, foraminíferos, gasterópodos, equinodermos y corales, característicos del Cretácico medio. Este paleoambiente es considerado de gran importancia para la industria petrolera por su contenido orgánico y para la minera, por encontrarse en contacto directo con cuerpos ígneos intrusivos.

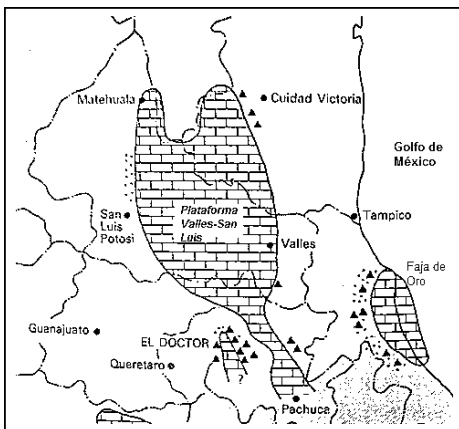


Figura II-2. Localización de las plataformas Valles-San Luis Potosí y El Doctor, ambas achuradas con la simbología de las calizas. (Tomado de Reading, H.G., Sedimentary environments and facies, 1978, fig. 11.39, pp.362).

La Formación El Morro caracterizada por un ambiente de depósito continental, discordantes a las formaciones calcáreas y volcánicas; está constituida por conglomerados con distintos tamaños y formas de clastos con una matriz arenosa e intercalada con tobas andesíticas, además de un conglomerado calcáreo con matriz arcillosa.

La Formación Las Espinas, descrita por Simons y Mapes (1956), abarca parte de la región sur del mapa, donde afloran los depósitos de origen volcánico, por lo que se dividió en varias unidades caracterizadas por la litología y formadas en varios pulsos magmáticos distintos del Oligoceno tardío al Plioceno. Estas unidades son la de basaltos y andesitas en el área de los volcanes El Apartadero y El Guaje, con tobas y escoria, la de dacitas y riolitas localizadas cerca de Cadereyta, la de basaltos con tobas, escoria y bentonita, la Unidad de toba pumítica localizada en Tequisquiapan y correlacionable con la Formación Tarango, la Unidad de andesitas y dacitas, la andesítica al sur de San Javier y la Unidad riolítico-dacítica.

Los depósitos más recientes del Cuaternario se formaron por la actividad volcánica de ese periodo, por lo que formaron conos cineríticos por fisuras; otra unidad de derrames basálticos al oeste de Tolimán y depósitos de aluvión en áreas de relieve bajo y escorrentía.

2.2. Estratigrafía

El área de estudio, geológicamente, se encuentra dentro de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, distribuida entre dos cuencas principales, la del paleogolfo de México donde se depositó la Formación Tamaulipas y al oeste la cuenca mesozoica que contiene a la Formación Cuesta del Cura. Brevemente se describe la estratigrafía que dio lugar a esta plataforma carbonatada, definida con respecto a su ambiente de formación:

La Formación Tamaulipas Superior presenta dos facies; la facies de cuenca se caracteriza por estratos de espesor variable de wackestones y mudstones con macrofósiles como *Turrilites* sp., *Ancyloceras Zacatecanum* Bose y microfósiles como *Saccocoma* sp., *Microcalamoides* sp., del Albiano-Cenomaniano con su localidad tipo en el cañón La Borrega al occidente de la Sierra de Tamaulipas, con un espesor de 200 a 350 metros medidos en Galeana y Rayones. En el Necomiano Tardío-Aptiano a la Tamaulipas Inferior se distinguió como facies de pie de talud se considera semejante a la Formación Tamabra, debido a que son brechas de pre-arrecife formadas en la zona de transición entre las plataformas por oleaje. Ambos términos fueron utilizados en la literatura por Muir (1936).

La Formación El Abra, depositada en aguas someras durante el Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano), se divide en dos facies (Aguayo, 1975), la de zona lagunar conocida como el miembro El Abra, con distinción entre las de pre-arrecife y post-arrecife, y la de zona arrecifal o miembro Taninul. Ambos miembros se componen de calizas, con variación en los espesores, dependiendo del lugar de depósito, con un espesor total medido en la localidad tipo de 1500 metros; presenta gran cantidad de fósiles, como rudistas recumbentes y restos de conchas (Scott, 1990).

La Formación Soyatal, del Cretácico Superior-Turoniano por el fósil *Inoceramus labiatus* (Wilson et al., 1965), consiste en estratos de calizas con bandas de pedernal en horizontes de margas y arcillas, localizados en el poblado de Soyatal; los estratos de mayor espesor contienen rudistas, gasterópodos y algas. Sobreyace en discordancia a la Formación Tamaulipas Superior y se encuentra por debajo de la Formación Méndez de calcarenitas, lutitas y margas; para el espesor de la Formación Soyatal se considera junto con la Méndez y forman un total de 1000 metros, medidos entre la cima de El Doctor y la cuenca de Zimapán.

2.2.1. Columna estratigráfica local

Con los datos de campo, observaciones directas y muestras de roca, de las cuales se analizaron sus láminas delgadas, se generó la columna estratigráfica de la figura II-3, utilizada como referencia para la cartografía y creación del modelo tridimensional. Los espesores de cada formación fueron tomados de la hoja Zimapán (Carrillo Martínez, 2000), es decir, de las localidades tipo establecidas para cada una, debido a que no se midió ningún espesor total de cada formación en campo. Dado el origen marino de esta área, se consideran los contactos entre las unidades por cambios de facies, por lo tanto la estratigrafía del área de la mina se sugiere de la siguiente manera:

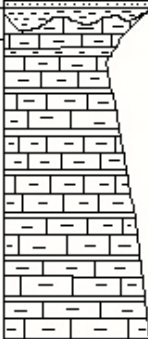





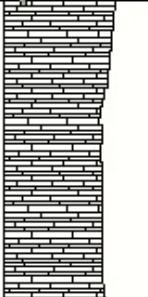
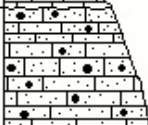

Formación	Clave de facies	Espesor (m)	Litología	Fósiles	Características
Da		10			Terreros, población, sembradíos
Tr		5			Suelo, terra rossa
Kss	M2	1000		 algas gasterópodo rudistas	Plataforma activa
Kia (wk)	Wb	300		 foraminifero	Plataforma activa, fosforita en carst
Kia (bs)	Bl	1		 	Plataforma activa, fosforita
Kia (gr)	Gr	200		 	Arrecife, fosforita
Kia (md)	Mp	1000		?	Plataforma (zona lagunar)
Kit	W-P-SS	400		 	Cuenca y talud

Figura II-3 Columna estratigráfica para la mina La Negra. Claves de facies carbonatadas propuestas por Vera (1994).

La Formación Tamaulipas Inferior (Kit) se caracteriza por depósitos de cuenca y talud, dando lugar a calizas con nódulos de pedernal y contenido fósil integrado por foraminíferos; el espesor considerado es de 400 metros. Esta formación no aflora en el área de la mina, pero su deformación se encuentra directamente relacionada con la litología sobrepuesta. Las claves de facies representan wackestones (W), packstones (P) y arenas finas (SS).

La Formación El Abra (Kia) está referida como un depósito de aguas someras, con gran contenido fósil proveniente del arrecife. Las relaciones entre unidades son por cambio de facies, porque se consideran del mismo periodo de formación en la misma paleocuenca. Esta formación es la que aflora en la mina y contiene el mineral fosfatado, por lo que para su descripción se describió en cuatro litofacies principales, considerando un espesor total de 1500 metros:

- Facies de mudstone (Kia-md). Estratos de mudstone (clave de facies Mp o mudstones con foraminíferos) de la zona de aguas someras cercanos a la plataforma; los estratos expuestos tienen espesores que van de 10 a 20 centímetros y es la unidad más plegada de la formación. Se tomó un espesor de 1000 metros, no observados directamente en campo.
- Facies de grainstone (Kia-gr). Estratos de grainstone de la parte arrecifal (clave Gr), topográficamente se encuentra en las áreas de mayor altitud, pero su extensión vertical no sobrepasa los 200 metros y lateralmente no parece aflorar al estar cubierta por depósitos recientes, la estratificación varía entre 1 y 3 metros. Es la unidad con mayor contenido fósil (*ver figuras II-4 y II-5*), con gasterópodos, equinodermos, rudistas de varios tamaños, algunos identificados como caprínidos.



Figura II-4. Fósil de gasterópodo expuesto en la roca. Localizado en el área 3 de la mina.

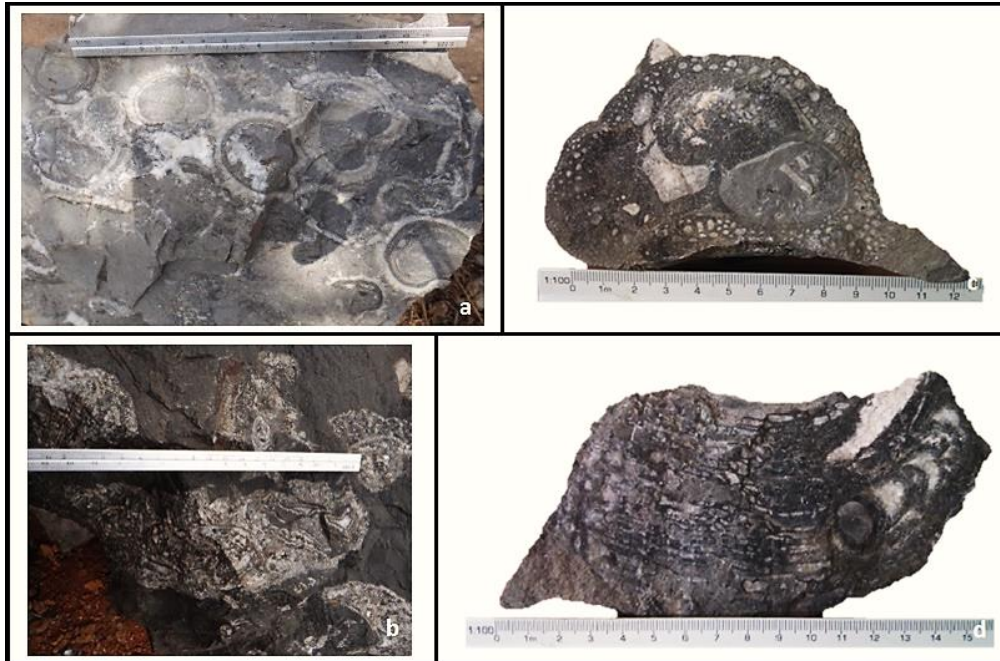


Figura II-5. Rudistas de varios tamaños, organismos formadores de arrecifes durante el Cretácico. Figuras a y b, rudistas menores a 5 centímetros de diámetro; figuras c y d fósil de rudista de 12x15 centímetros.

- Facies de bindstone (Kia-bs). Estas calizas tienen un contenido algáceo y se distinguen como laminaciones irregulares en la roca (*ver figura II-5*), lo que muestra el movimiento de corrientes de agua durante su depósito (clave de facies Bi). La figura II-6a muestra mayor irregularidad en sus laminaciones, mientras que la II-6b tiene formas esféricas menores a 1 milímetros de diámetro que dan origen a las laminaciones. En ambos casos, el espesor no excede los 2 metros y su localización fue en horizontes donde terminaba el contacto entre grainstones y mudstones.

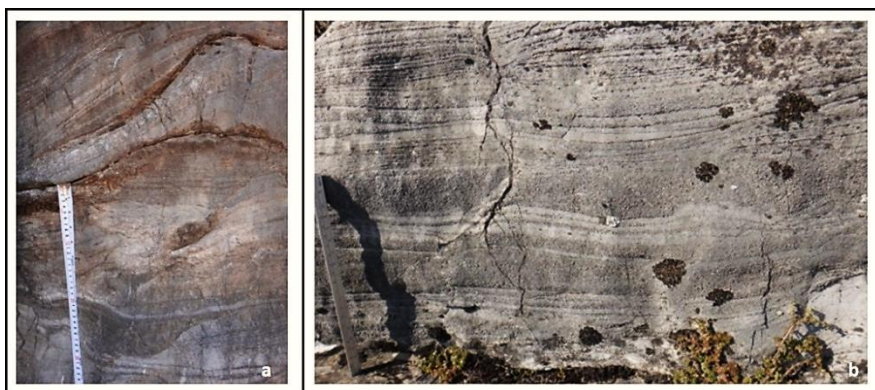


Figura II-6. Calizas bindstone, evidencia de la plataforma activa. Figura a se localiza en el área 2 de la mina (hacia el Este), la figura b se localiza en el área 3 de la mina.

- Facies de wackestones (Kia-wk). Esta roca es la de mayor exposición en los tajos, sus espesores varían entre 40 y 70 centímetros, por lo que se deforma con más facilidad que las grainstones. Su contenido fósil observable en muestra de mano es de foraminíferos (*ver figura II-7b*) y se encuentra en contacto directo con las mudstones, es decir, son parte del borde de plataforma mientras se formaba el arrecife.



Figura II-7. La figura a muestra travertino, se encuentra sobre la wackestone de la figura b que tiene foraminíferos, por eso su clave de facies es Wb o wackestone bioclástica.

La Formación Soyatal (Kss) es de calizas intercaladas con margas y bandas de pedernal, por esta razón su clave de facies es M2. Aunque no se encuentra expuesta en el área de la mina se toma en cuenta que estuvo sobre la Formación El Abra, pero no dio lugar a la formación de carst. El espesor total para esta unidad es de 1000 metros.

Los depósitos recientes se dividen en dos: un suelo y depósitos generados por el hombre:

- Terra rossa (Tr). Es un suelo de color rojizo por el contenido en hematita formada de restos insolubles de los carbonatos, por lo tanto es arcilloso, funciona como relleno de formas cársticas de las unidades de grainstones y wackestones el cual, originalmente pudo provenir depósitos clásticos. El espesor para esta unidad es de 5 metros, pero refleja variaciones en toda la

extensión. Esta combinación arcillosa con la caliza es uno de los agentes que genera algunas formas cársticas.

- Depósito reciente (Da). Este depósito es de dos orígenes, el primero marca el límite del poblado Jiliapan y sembradíos cercanos localizados sobre la Formación Soyatal. El segundo depósito se generó por los terreros de la mina, en donde colocan el material rocoso proveniente de las excavaciones y es la parte que no se aprovecha, creando niveles de depósito en estas áreas tomadas como aluvión el espesor total definido para esta unidad es de 10 metros.

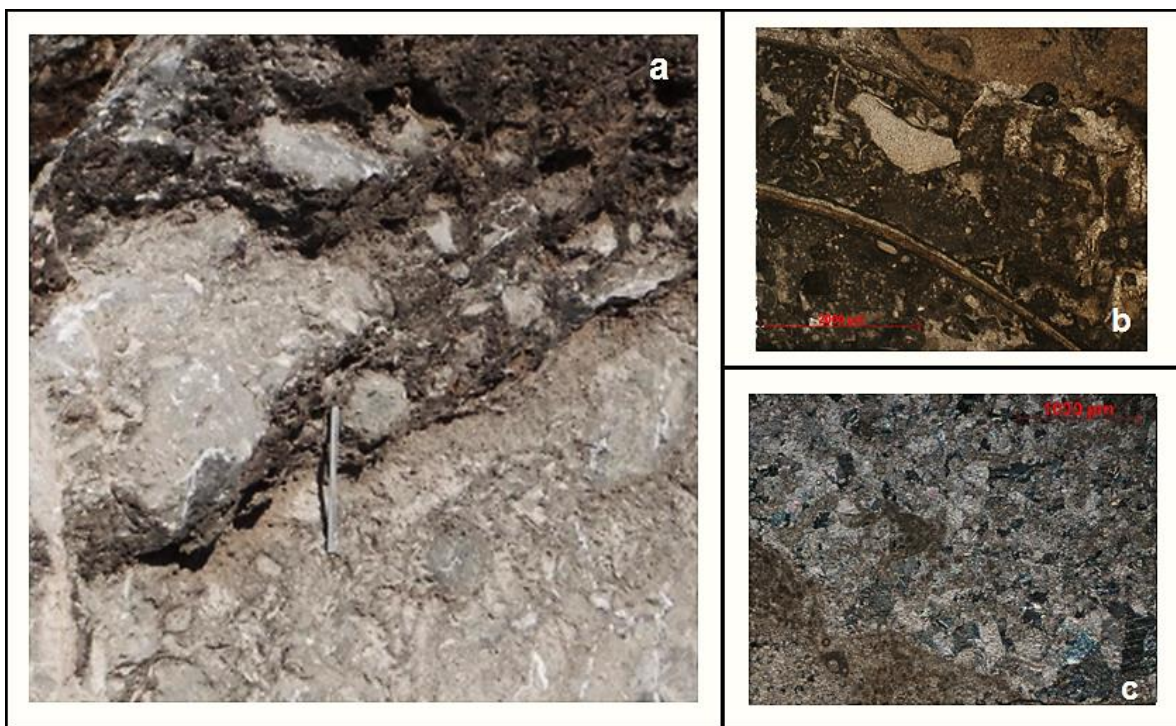
2.2.2. Petrografía

Para la corroboración de los datos de campo para las calizas, se tomaron rocas de algunas áreas para conocer su textura y contenido fósil, además de estar en contacto directo con la fosforita; también, dos muestras de fosforita y una de fluorita para su estudio en lámina delgada, observándose los siguientes resultados:

La muestra 1 (*ver figura II-8a*) es una caliza color gris claro con una capa de fosforita de color gris oscuro y muy porosa, tomada del área 4 de la mina. En la lámina delgada (*ver figuras II-8b*), se observan mejor los fósiles rotos de gasterópodos, con las cámaras de otros organismos rellenos de calcita, cementados con espatita primaria (bordes rectos) y en algunas zonas micrita.

Cuenta también con intraclastos mal seleccionados, fragmentos de corales, oolitos, espículas y peletes; lo que en conjunto indican un ambiente de energía, es decir, la plataforma activa de Valles-San Luis Potosí. Estos organismos se fragmentaron durante el depósito, pero no ocurrió ningún proceso diagenético; se considera la precipitación de la calcita presente, como en la figura II-8c relleno de espacios, pero no reemplazando fósiles. Además se describen áreas con un poco

de fosfato de color marrón y al observarlo con el objetivo de 10x parece materia orgánica; otro rasgo importante es que hay lodo calcáreo, por lo que no se puede clasificar únicamente como grainstone, aunque tenga gran cantidad de intraclastos y se asemeje a un grainstone coquinoide o a un grainstone-packstone fosilífero de origen alóctono, así que para simplificar las divisiones de unidades de la columna estratigráfica descrita se clasifica únicamente como grainstone fosilífero porque el lodo calcáreo es muy poco comparado con la cantidad de clastos que soportan a la roca.



Figuras II-8. Muestra 1 de roca del afloramiento en el área 4 con una capa delgada de fosforita en la fotografía a, en la b se muestra su lámina delgada al microscopio petrográfico utilizando el objetivo de 2.5x con luz paralela y en la figura c se observa la imagen que en b con nícoles cruzados de calcita relleno espacios, ambas figuras tienen una escala pequeña de 1000 μm .

La muestra 2 (ver figura II-9), es un fragmento de caliza de color gris claro con un cristal de fluorita de 1 centímetro de color morado, de la cual se obtuvo una lámina delgada (ver figura II-10); a simple vista, la fluorita parece estar en zonas donde hay fracturas y con calcita, aunque no se encontraron cristales mayores a 2 centímetros de tamaño en muestra de mano.

En la lámina delgada se observaron fragmentos de fósiles de varios tamaños, habiendo gasterópodos y fragmentos de conchas, cortoides, intraclastos, peletes y calcita. La fluorita de color morado y la calcita se encuentran rellendo parcialmente las cavidades y el resto tiene micrita; la espatita se ve con bordes rectos, de origen primario, también un poco de fosfato sobre los organismos, es de color marrón y se puede confundir con lodo calcáreo, pero si se observa con el objetivo de 50x se aprecian formas irregulares por el origen orgánico de los fosfatos; otro rasgo importante es la presencia de opacos, muy pocos y lejos de donde hay fluorita. Los organismos parecen estar incompletos, eso explica que pudieron fragmentarse durante su depósito en la plataforma activa.

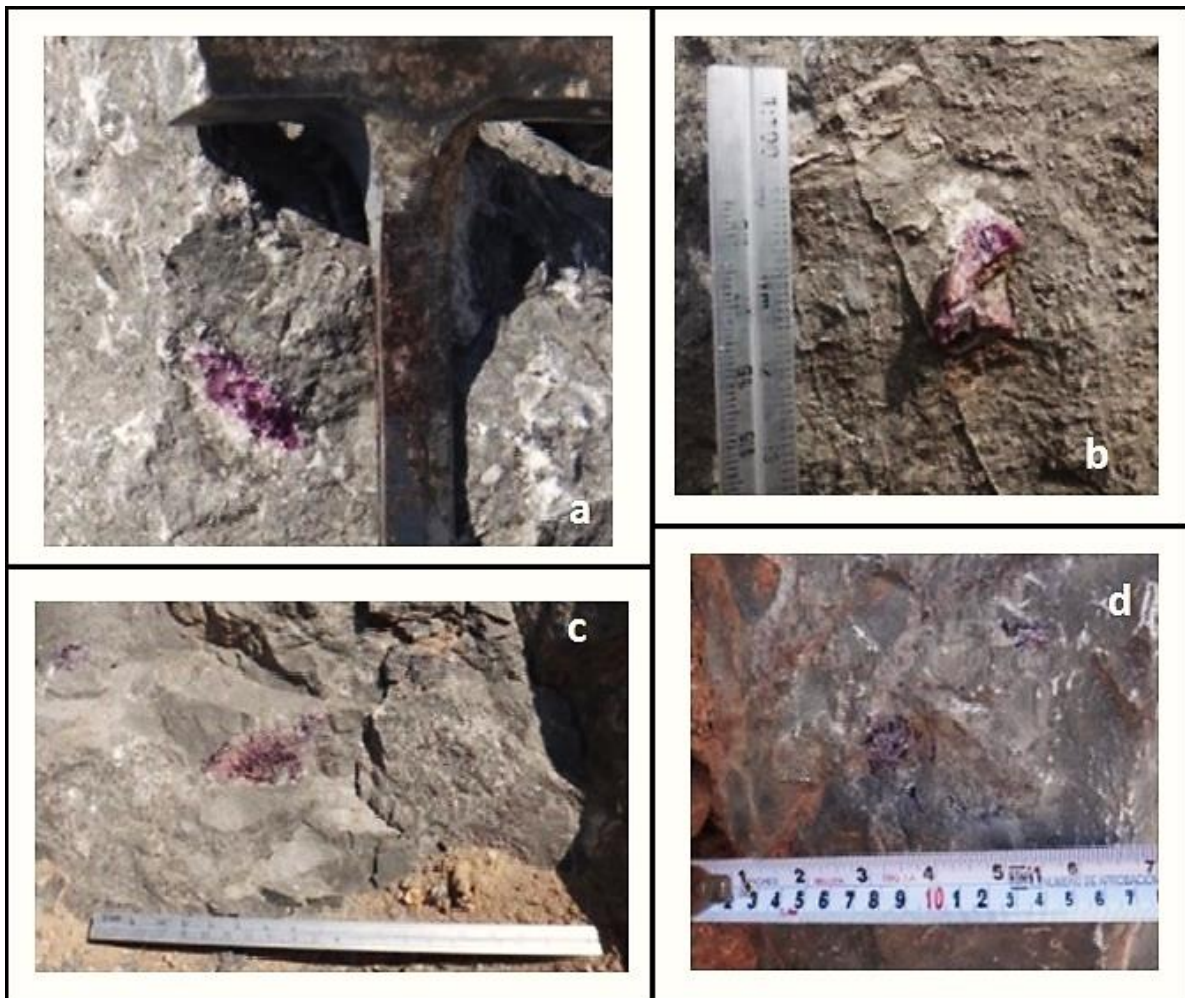


Figura II-9. Fluorita de color morado sobre calcita. En las figuras a y b, la fluorita se encuentra en rocas del área 4, mientras que en las figuras c y d en rocas del área 3.

Unos de los rasgos más importantes presentes en esta lámina son las fracturas, pues explican dos procesos por los que pasó la roca para encontrarse en esas condiciones; primero se depositaron los carbonatos y los restos de organismos, se fracturó y se rellenaron los espacios con calcita, posteriormente se volvió a fracturar en un segundo periodo y se volvieron a rellenar los espacios con calcita sin presentarse la diagénesis, porque se tiene espatita primaria (ver figuras complementarias del Anexo I). Además, en algunas de las fracturas hay restos de material oxidado, pueden ser de las arcillas o la terra rossa, siendo lo último que se integró a la roca.

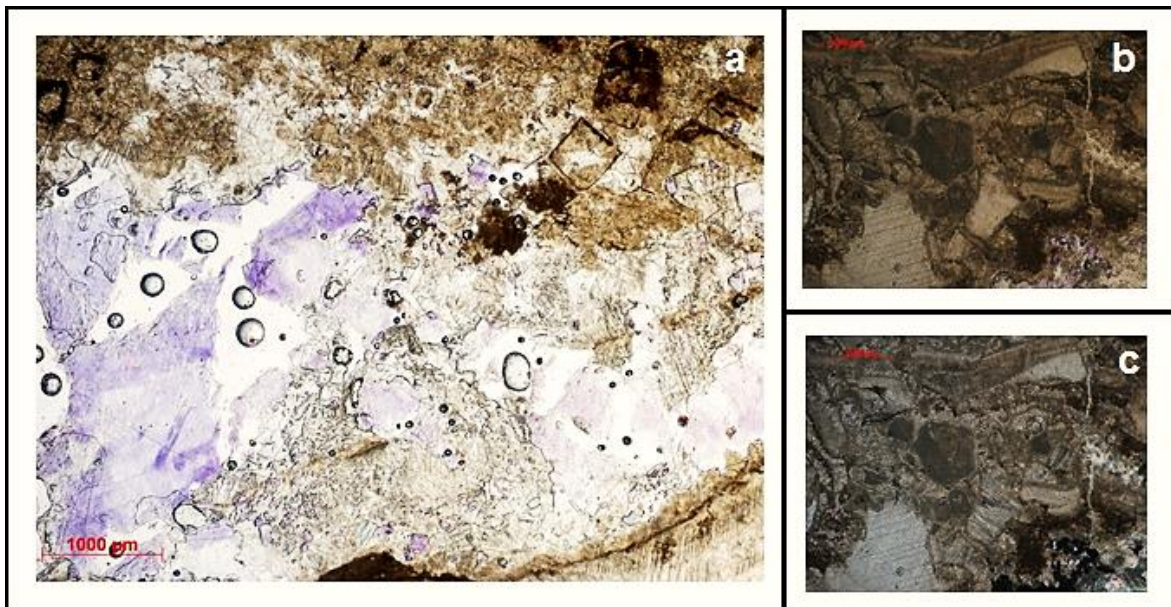


Figura II-10. Fluorita en la lámina delgada al microscopio petrográfico, vista con el objetivo de 2.5x con escala en color rojo de 1000 μm . En la figura a se observa la fluorita de color morado con luz paralela, rellenando parcialmente la cavidad junto con la calcita; las pequeñas burbujas que se observan en la lámina pueden parecer inclusiones, pero son burbujas que se quedaron de la resina utilizada en la lámina. En la figura b se ve en la esquina inferior derecha un poco de fluorita entre los intraclastos de la roca con luz paralela y en la parte baja de una fractura que atraviesa de norte a sur la lámina. En la figura c se ve la muestra la figura b con nícoles cruzados.

La muestra 3 (ver figura II-11), localizada en uno de los “guatos” del área 3 es una fosforita de color gris oscuro, muy porosa; se trata de un fragmento de 5 x 9 centímetros, cubierto por material arcilloso de color café claro; en algunas partes está redondeado, dando un aspecto exterior de transporte del área de origen hacia

estas cavidades carstificadas, además de encontrarse en los depósitos donde los fosfatos son pequeños peletes como los de la muestra 5.

En la lámina delgada (ver figuras II-11b y c) no se alcanza a distinguir ningún cristal de algún fosfato conocido; al ser criptocristalino, se vuelve isotópico, aunque se puede describir con un color marrón, poroso y en algunas partes relleno con minerales arcillosos y calcita. Cuando se observa más cerca se aprecian estructuras elipsoidales muy alargadas, semejantes a la materia orgánica; así que, al no contar con análisis químicos se clasifica esta muestra como un mineraloide de fosfato orgánico y tomando en cuenta el ambiente de formación podría tratarse de un carbonato-fluorapatito.

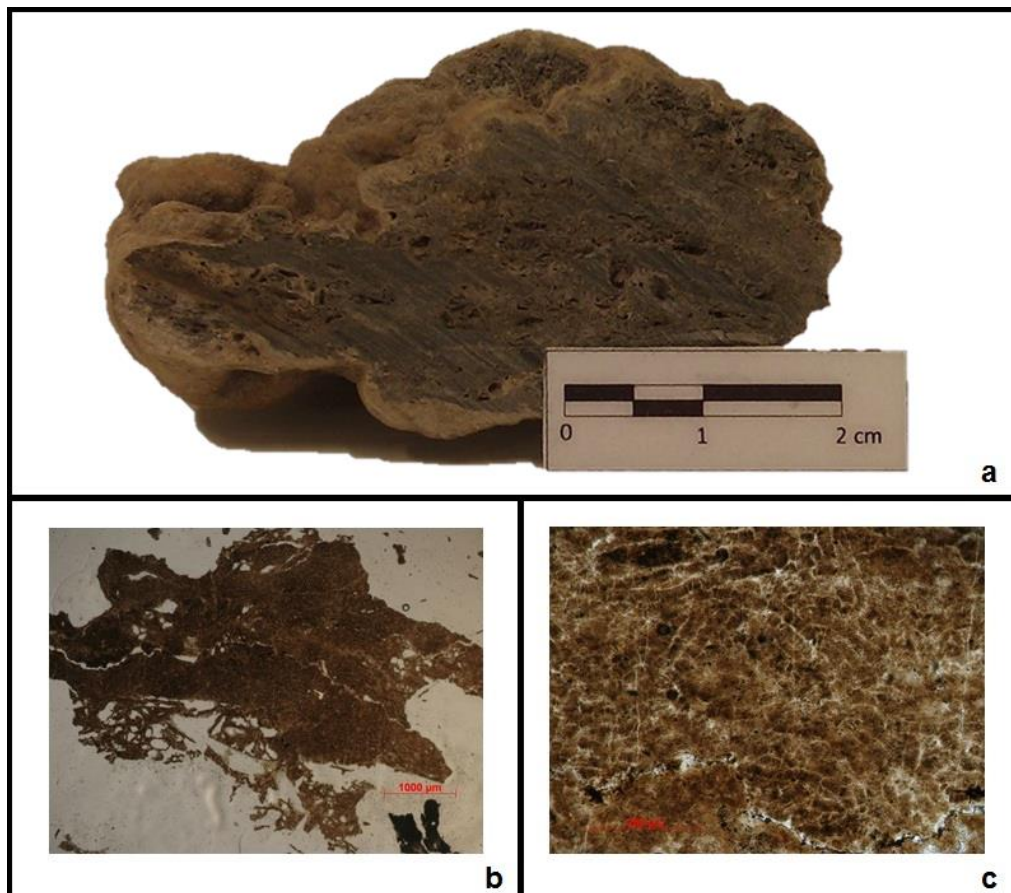


Figura II-11. Fotografías de fosforita de color gris oscuro. En la fotografía a se observa la muestra de mano, en la fotografía b se ve la imagen en lámina delgada en el microscopio petrográfico con el objetivo de 2.5x (escala 1000 µm) y en la foto c es la imagen en lámina delgada con el objetivo de 20x (escala 200 µm).

La muestra 4 (*ver figura II-12*), únicamente fue de mano; se trata de un fragmento de fosforita de color gris oscuro de 18 cm x 30 cm, la que se conoce localmente como “La Negra”. Es muy porosa, y se pueden ver los organismos que la formaron, como en la figura II-12, donde claramente se ven los rudistas y algunos fragmentos de conchas, que indican su origen arrecifal. Al observarla con una lupa se distinguen formas esféricas, parecidas a los peletes, formando parte de su estructura.

Esta muestra es la más común del área 2 y del fondo de las cavidades cársticas de las áreas 1 y 3, este mineral es de alta ley y llegan a encontrarse fragmentos de más de 1 metro de tamaño, donde las colonias de fósiles se observan mejor y se distinguen los equinodermos y los gasterópodos, además de los rudistas. El origen de este mineral se explica con detalle en el capítulo 4 aunque, por la disposición en la roca y su alto contenido orgánico, se considera el origen sedimentario de los fosfatos de la mina.



Figura II-12. Fotografías de la fosforita sacada de un “guato” en el área 2, es la misma muestra en las fotografías a y b, pero en distinta vista para la apreciación de los fósiles.

Por último, la muestra 5 se describió en campo y, no sólo existe la variedad de fosforita mostrada en la figura II-13 sino que, aparte de esta de color rojizo, hay color marrón, gris claro, gris oscuro y ocre; aunque todas estas variedades comparten una característica y es la forma terrosa o en peletes, dependiendo del área. Particularmente, esta variedad de color rojizo, encontrada en el área 3, al ser lavada en la planta tiene el núcleo de fosforita de color gris oscuro, como la del

fragmento de roca de la muestra 4, pero en menor escala (información aportada por Manuel Alvírez, contacto directo, 2013); este dato es de gran importancia porque definen a este fosfato como un depósito transportado, originado a partir del mineral íntegro y por meteorización mecánica se produjeron los peletes menores a 5 milímetros, por la alta tasa de desintegración de los fosfatos.

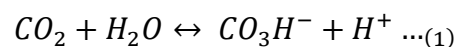


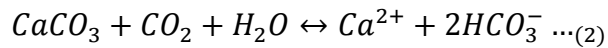
Figura II-13. Imagen donde se observan los peletes de fosfatos de color marrón.

2.3. Carsticidad

Las rocas carbonatas, principalmente calizas, contienen minerales que, con ayuda del dióxido de carbono, se pueden disolver con el agua transportada a través de la porosidad secundaria de la roca, lo que genera formas irregulares. Este proceso no es exclusivo de las calizas, también se puede dar en presencia de dolomitas y evaporitas como el yeso y la halita, pero es menos común por su baja porosidad.

La carsticidad es un término que viene de la palabra germánica carst, definido como un relieve con formas distintivas y drenaje derivado de rocas solubles en agua (Jennings, 1985). Esta disolución se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones reversibles:





La reacción (1) representa la formación de ácido carbónico, éstos sucede cuando el dióxido de carbono disponible en la atmósfera o el que está almacenado en suelo se combina con el agua, el hidrógeno como ion que queda añadido puede aumentar la solubilidad del ácido, mientras que la temperatura baja es el factor que la aumenta en el dióxido de carbono (máxima disolución 1.00 a 0°C) y va disminuyendo 1.3% por 1°C con el aumento de la temperatura. La reacción (2) es la combinación de un mineral carbonatado, calcita con el dióxido de carbono y el agua, que da como resultado ácido carbónico y un ion de calcio. Esta sucede a una velocidad de 139 milímetros/1000 años.

Para clasificar las formas del carst, en general, se describen de la siguiente manera: un carst sin recubrimiento o desnudo es aquel que se formó en áreas sin vegetación, el carst cubierto es el que fue rellenado por sedimento y el carst interstratal es que se origina entre dos formaciones no carstificables. Se pueden presentar distintas expresiones superficiales en la roca, como las que explican a continuación:

Karren, lapiaz o lenar. Oquedades de dimensiones pequeñas o medianas, separado por tabiques o paredes de roca en algunos casos agudo formadas al inicio de la disolución, por lo que aparecen agrupadas (*ver figura II-14*); cuando se forma por influencia del agua directamente sobre la roca se conoce como lapiaz libre y cuando se forma entre el suelo y la roca se conoce lapiaz cubierto. Existen varias clasificaciones para estas formas, en la tabla II-a se describen algunas.

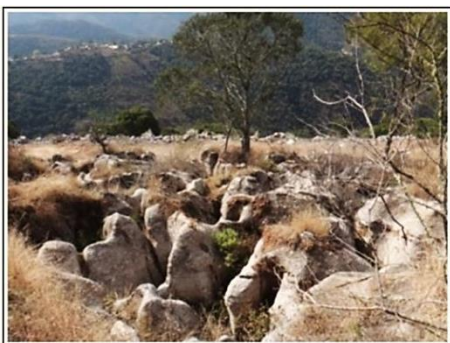


Figura II-14. Lapiaz, ejemplo de la mina en el área 4, se encontraba relleno por fosforita terrosa color marrón. Parecido a un Rinnenkarren.

Tipo	Tamaño (aprox.)	Superficie	Crestas
Rillenkarrén	1-2 cm altura 50 cm largo	Libre Inclinado	Agudas
Trittkarren	3-50 cm altura 20 de largo	Libre, semilibre Inclinado	Agudas
Rinnenkarren	50 cm profundidad 20 m largo	Libre Inclinado	Agudas, poco redondeadas, surcos
Spitzkarren	50 cm ancho 50 cm profundidad	Libre Inclinado	Agudas
Meanderkarren	50 cm profundidad 20 cm largo	Libre, semilibre Suavemente inclinada	Agudas y bases redondeadas
Rundkarren	12-50 cm profundidad 20 m largo	Cubierta Inclinada	Suavizadas
Kamenitzas	Hasta 3 m diámetro 50 cm profundidad	Libre o cubierto Horizontal	Bordes corroidos (libre) y suavizados (cubierto)
Kluftkarren	Hasta 4 m profundidad Hasta 4 m ancho	Libre o cubierta En fracturas/diaclasas	Bordes corroidos (libre) y suavizados (cubierto)
Hohlkarren	60 cm-1 m profundidad 50 cm ancho	Cubierta de turba Inclinada	Bordes y bases suavizadas
Deckenkarren	Pocos mm o cm profundidad	Cubierta por plantas Inclinadas y horizontales	Suaves o agudas

Tabla II-a. Tipos de lapiazes (Sweeting, 1972)

Uvala. Forma generada por disolución de las paredes de varias dolinas, por lo que se unen y son menores a 2 kilómetros de diámetro.

Poljes. Conocidos también como campo, piano, plans, raso, hojos, plá y navas, dependiendo del lugar, son formaciones a mayor escala, por lo que se encuentran en zonas más propensas a la disolución, donde el fondo se aplanan y las laderas son de 30°, aproximadamente.

Mogotes. Colinas empinadas causadas por que al agua disuelve grandes volúmenes de roca dejando solo las colinas expuestas.

Dolina o sinkhole. Depresión formada por la roca desgastada de forma circular o de elipse (ver tabla II-b).

Nombre	Característica	Tamaño	Bordes
Cubeta	Ninguna	Diámetro<profundidad	Suaves o escarpados
Embudo	Detritos en el fondo	Diámetro>profundidad	Suaves
Pozo	Fondo da paso a galería subterránea	Diámetro>profundidad	Suaves
Cenotes	Formadas por disolución, flexión o subsidencia	Diámetro y profundidad extensos	Suaves
Colapso	Formadas por gravedad y filtración	Diámetro y profundidad extensos	Suaves

Tabla II-b. Tipos de dolinas (las tres primeras de Cvijic, 1893 y las últimas dos de Cramer, 1941)

Simas. Conductos verticales que en ocasiones pueden ser espectaculares por sus dimensiones. Se pueden formar por hundimiento de la bóveda de algún techo, disolución exagerada en el fondo de una dolina, o erosión y corrosión en sumideros activos.

Endocarst. Es un carst subterráneo, formando cuevas que dan la entrada a cavidades de diferentes dimensiones (ver figura II-15); esto depende de la intensidad de fracturamiento de las calizas y del flujo de agua que pase a través de la roca.

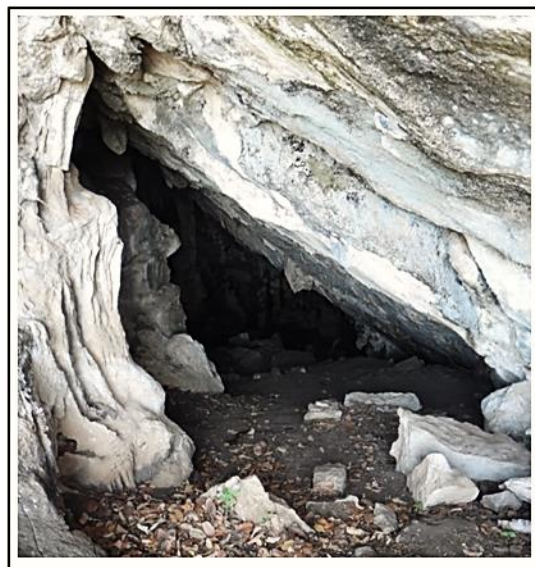


Figura II-15. Fotografía de la entrada a la cueva ubicada en el área 4 de la mina. Por dentro se identifican algunas estructuras como cortinas, estalactitas y estalagmitas.

Valle y fuentes cársticos. Formaciones complejas del paisaje cárstico, debido al flujo vertical y subterráneo del agua a través de la roca (*ver tabla II-c*).

Nombre	Característica	Resultado	Referencia
Valles alógenos	Estrechos y con vertientes escarpadas en zonas fracturadas por donde pasas grandes flujos de agua y en las zonas donde sale el agua deja residuos de carbonatos.	Marmitas Pilancones Puente natural (colapso de cavidades) Travertinos Cascada constructora (acreción)	Ehlen y Wohl, 2002 Pentecost,2005
Valles ciegos	Pérdida de flujo de agua superficial, que se introduce al interior de la roca.	Cuevas y cantiles de caliza	Sweeting, 1972
Valles semiciegos	El agua se introduce en la roca en algún punto y el flujo del agua no es constante.	Parte superior del macizo calcáreo	Sweeting, 1972
Valles en saco o de cabecera escarpada	Vuelve a ocurrir la surgencia al pie de la secuencia carbonatada.	Paredes escarpadas y acantilados en su cabecera	Sweeting, 1972
Valles secos	Localizados en las cabeceras de la red fluvial. Formados por variación paleoclimática, superposición de rocas no carbonatadas, disminución del nivel freático.	Laderas escarpadas y fondos planos	Sweeting, 1972
Fuentes cársticas	Zona donde emerge el agua del endocarst.	Flujos artesianos de agua	Smart y Worthington, 2004
Fuentes vaclusianas	Es un flujo forzado de agua que brota de las calizas que afloran.	Flujos artesianos de agua con caudal de 8-150 m ³ /s	Trombe,1974
Fuentes intermitentes	Presentan conductos irregulares y sifones.	Niveles de agua por encima del cual el agua no fluye	Trombe, 1952

Tabla II-c. Tabla de la clasificación de valles y fuentes cársticos.

Depósitos de cavidades. Superficie con gran intemperismo y, a su vez, sedimentación clástica que puede rellenar las cavidades con material arrastrado, los restos biogénicos y sedimentación química.

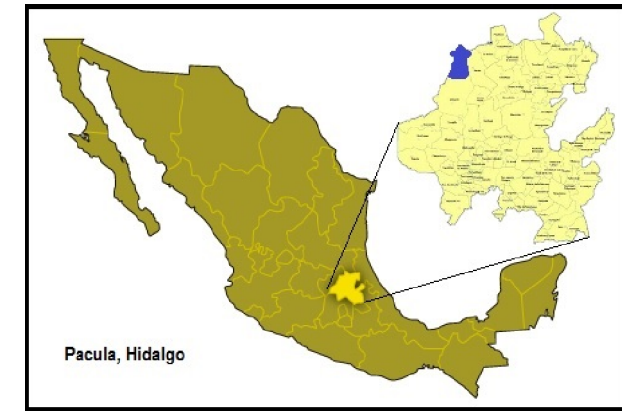
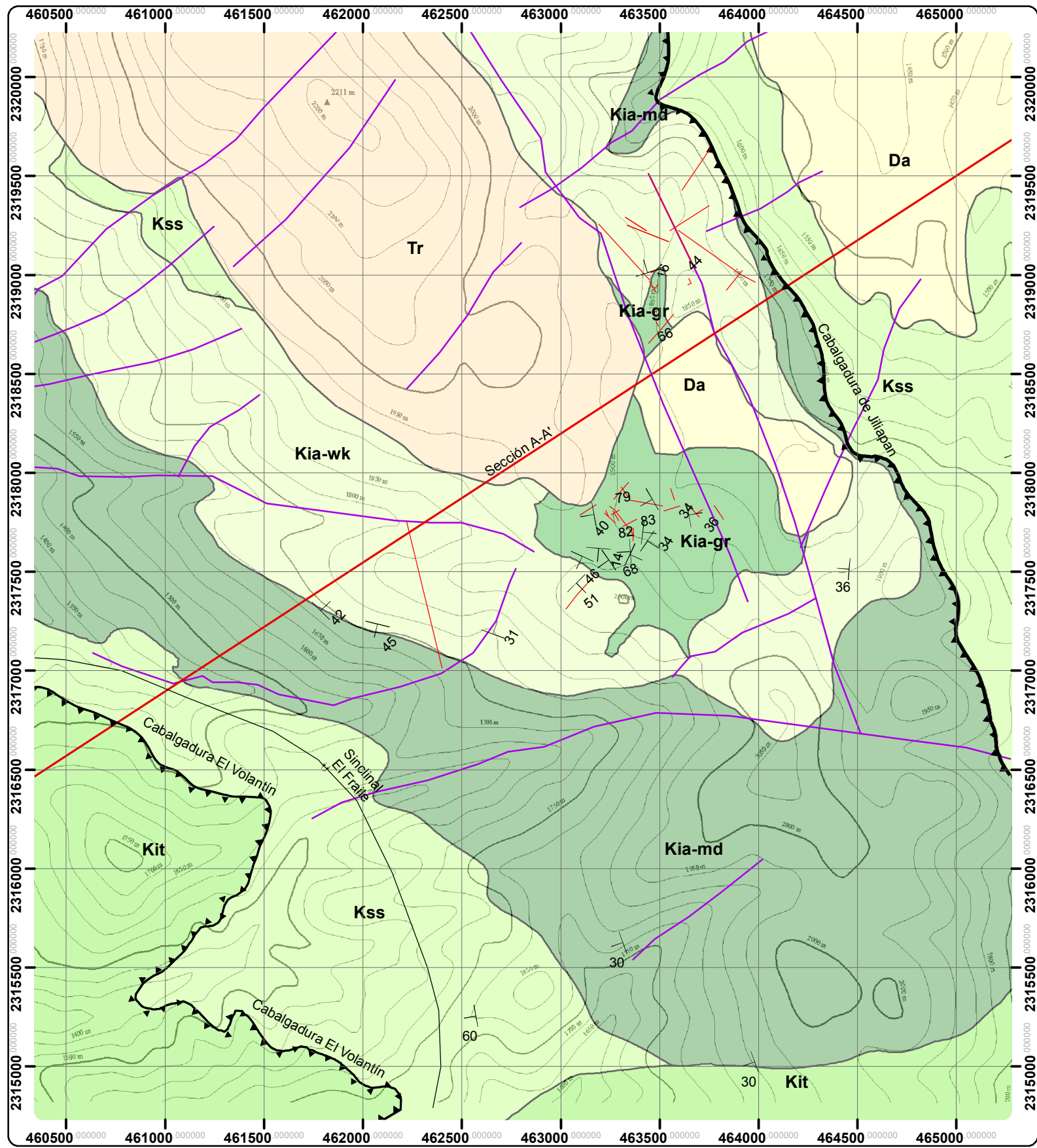
Algunas de las estructuras que conforman el interior de las curvas se describen de la siguiente manera: la estalactita comienza a crearse con una simple gota de agua con carbonato de calcio disuelto formando un estrecho tubo con capas de carbonato, cuando llega hasta el suelo y se acumula en ascenso se le conoce como estalagmita, si ambas se unen se forma una columna. Los gours son bolsas con bordes constituidos por barreras de calcita que parecen escalones. Las excéntricas o helictitas se forman por agua filtrada y da figuras muy bonitas. Las perlas de las cuevas son acreciones de calcita.

2.4. Mapa geológico del área de la mina

La mina se localiza al norte del Estado de Hidalgo, entre los límites con Querétaro y San Luis Potosí, cerca de la localidad de San Francisco y pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental, pues es la parte nororiental de la hoja Zimapán (Carillo y Suter, 1982). Al occidente se encuentra el río Moctezuma y cuenta con vegetación abundante en pinos y encinos, por lo que la altura máxima es de 2200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y la más baja es de 1200 m.s.n.m. y las condiciones del clima son variables.

Con el modelo geológico se generó un mapa geológico a detalle del área de la mina, quedando a una escala 1:25,000 para su visualización en la figura II-16, además, contiene la simbología, litología y una sección representativa. De esta forma se puede relatar la sucesión de eventos geológicos ocurridos que dieron lugar a estos afloramientos. Aunque se tomó como base la esquina noreste del mapa geológico de la hoja Zimapán de Carillo (1997), las trazas de los planos de falla cambiaron un poco con respecto al original debido a la escala utilizada, por lo tanto, los contactos de las litologías que no afloran en la mina, también cambiaron.

Mina La Negra



- Leyenda**
- SÍMBOLOS**
- Echado de los estratos
 - Fracturas medidas campo
 - Cabalgadura
 - Sinclinal recostado
 - Fracturas de fotogeología (verticales)
- Da (Depósito reciente)
 - Tr (suelo: terra rossa)
 - Kss (Fm. Soyatal)
 - Kia-wk (Fm. El Abra-wackestone)
 - Kia-gr (Fm. El Abra-grainstone)
 - Kia-md (Fm. El Abra-mudstone)
 - Kit (Fm. Tamaulipas)

1:25,000

Equidistancia entre curvas de nivel: 50 m.
 Declinación magnética: 5° E
 Datum WGS84 Proyección UTM
 Trabajo de campo en el área, enero 2013.
 Realizado por: Marybeth Garrido Hernández
 Universidad Nacional Autónoma de México,
 Facultad de Ingeniería, Ingeniería Geológica.

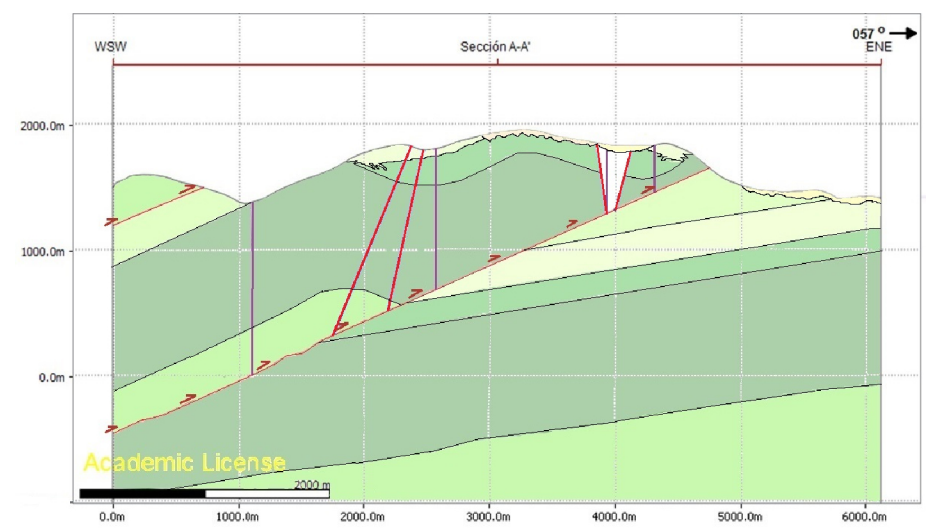


Figura II-16. Mapa geológico a detalle de la mina La Negra, basado en el mapa de Suter y Carrillo (1982).

Capítulo 3

Geología Estructural

- 3.1. Marco tectónico regional
 - 3.2. Descripción de las estructuras
 - 3.3. Influencia de las fracturas en la carsticidad
-

En este capítulo se mencionan algunos aspectos importantes de la geología estructural del área, entre ellos, los esfuerzos involucrados en la formación de las plataformas carbonatadas y su deformación, además de ubicar el área en tiempo y espacio geológico para la comprensión del origen de las estructuras. La zona de estudio se localiza en la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental.

3.1. Marco tectónico regional

Durante el Triásico Tardío se concentró la sedimentación marina de lechos rojos, pues es el comienzo de la apertura del Golfo de México, formando fallas regionales izquierdas, con series de horst y grabenes. Para el Jurásico ocurrieron las transgresiones marinas sobre las secuencias sedimentarias depositadas anteriormente (*ver figura III-1*), estas aguas pertenecían al Pacífico y avanzaban hacia el paleo-golfo de México, generando evaporitas en la parte central durante el Calloviano (Salvador, 1987).

Para el Jurásico Superior (Kimmeridgiano-Tithoniano), comenzaron a acumularse los depósitos clásticos que dieron origen a las plataformas someras, la tasa de subsidencia disminuyó y se formaron secuencias delgadas de lutitas y carbonatos, los horst permanecieron emergidos hacia el occidente del paleo-golfo de México; así comenzaron a formarse las plataformas someras de calizas arcillosas durante un periodo de estabilidad tectónica.

Los depósitos de carbonatos del Cretácico Inferior dieron origen a plataformas como la de El Doctor y Valles-San Luis Potosí, las cuales se encontraban rodeadas de cuencas a donde se dirigían los sedimentos de plataforma. En estas zonas de talud a la cuenca se originó la Formación Tamaulipas en ambas facies, además de la generación de arrecifes de rudistas, principalmente, en la Formación El Abra, evidencia de la actividad de las corrientes del mar sobre la Plataforma Valles-San Luis Potosí, durante un periodo de subsidencia de 23 millones de años seguido de transgresiones marinas por el aumento en el nivel del mar.

Del Albiano al Cenomaniano, durante la formación de arrecifes alrededor de las plataformas carbonatadas, se produjeron fallas normales y caídas de bloques por gravedad en los bordes de plataforma; Para el Cretácico Superior se deposita la Formación Soyatal sobre la Formación El Abra, correspondiendo a horizontes margo-arcillosos en las calizas, continúa la actividad volcánica y el aporte de clástico del Golfo de México, y comienza la extinción de diversas especies por el impacto del Chicxulub.

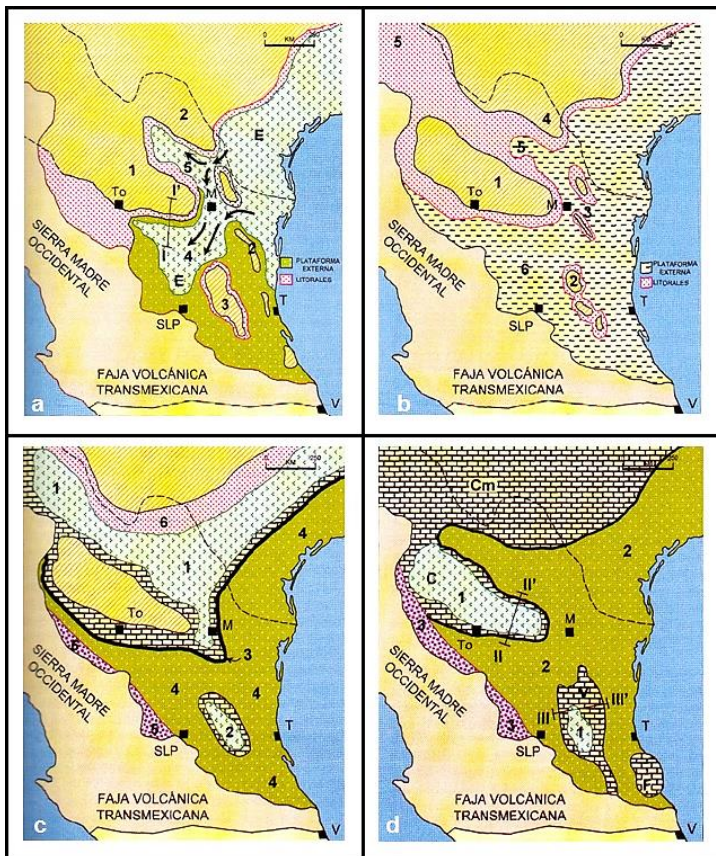


Figura III-1. Mapas que muestran la sucesión de eventos del Oxfordiano al Albiano.

Figura a. Distribución de evaporitas (E) durante el oxfordiano: península de Coahuila (1), península y archipiélago de Tamaulipas (2), Isla de Miquihuana (3), Cuenca del centro de México (4), Cuenca de Sabinas (5), ciudades de Tampico (T), Monterrey (M), Torreón (To), Veracruz (V), San Luis Potosí (SLP).

Figura b. Distribución de facies litorales y de plataforma externa en el Tithoniano: Isla de Coahuila (1), Isla de Miquihuana (2), Islas de Picachos y Terán (3), península de Tamaulipas (4), Cuenca de Chihuahua y sabinas (5), Cuenca del centro de México (6).

Figura c. Distribución de evaporitas durante el Barremiano: Formación La Virgen/Cuchillo (1), Formación Guaxacamá (2), arrecife cupido y facies de laguna (3), calizas pelágicas de la Tamaulipas Inferior (4), turbiditas (5) y clastos costeros (6).

Figura d. Distribución de evaporitas durante el Albiano, calizas pelágicas (2), turbiditas (3), Plataforma Valles-San Luis Potosí (V), Faja de Oro (F), Coahuila © y Comanche (Cm). (Tomado de Eguluz, Aranda y Marret. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, 2000).

El cinturón de pliegues y cabalgaduras que provocó la orogenia Laramide a finales del Paleoceno y principios del Eoceno, dio lugar a estructuras como la cabalgadura El Doctor, sinclinal Maconí, sinclinal El Aguacate, sinclinal El Fraile, cabalgadura de Jiliapan y la cabalgadura El Volantín localizadas en la hoja Zimapán (Carrillo, 1982). El área se sitúa en la Sierra Madre Oriental, cercano a la sierra El Volantín, formando estructuras con una dirección noroeste-sureste, la

cual es la dirección general de la deformación laramídica sobre las secuencias carbonatadas que se localizan en el área.

La Plataforma Valles-San Luis Potosí se activó durante la formación del sistema de fallas inversas y pliegues de la Sierra Madre Oriental, donde ocurrían acortamientos de 3 a 4 kilómetros y de 10 a 12 kilómetros, 35% para esta zona (modificado por Fitz, 2011), formándose donde el borde de plataforma se disponía normal al esfuerzo principal, definiendo ángulos similares a las trayectorias de este esfuerzo, creando rampas tectónicas de bajo ángulo que dieron lugar al plegamiento. El acortamiento ocurrido en las plataformas y cuencas es, aproximadamente, de 55% a 65%, con valores más altos en las cuencas que en las plataformas (Fitz y Tolson, 2012).

Las propiedades mecánicas de las rocas son las que definieron los estilos de plegamiento, también dependían de los espesores y su disposición estratigráfica, por lo que el esfuerzo se concentró en los márgenes (acortamientos de 70%), donde los estratos son de menor espesor; por tales motivos el acortamiento fue menor en la Plataforma Valles-San Luis Potosí comparada con la de El Doctor, la dolomitización de las unidades aumenta su resistencia a los esfuerzos y alcanzó hasta el doble de su espesor.

3.2. Descripción de las estructuras

Durante el Paleoceno se originaron las estructuras presentes la mina La Negra (*ver figura III-2*), las cuales se describen a continuación (Suter, 1982):

Cabalgadura El Volantín. Se encuentra al suroeste de la mina con orientación noroeste-suroeste y 23° al suroeste y pone en contacto a la Formación Tamaulipas sobre la Formación Soyatal y la plataforma Valles-San Luis Potosí.

Sinclinal El Fraile. Localizado al noreste de la cabalgadura El Volantín, este pliegue recostado deformó a las rocas de la Formación Soyatal. Este alóctono, posteriormente se erosionó, dejando expuestas las formaciones más antiguas como El Abra, esto es consecuencia de los mecanismos de plegamiento que deslizaron dichas formaciones, por lo que las forzó a formar un sinclinal y las estructuras que continúan se describen como anticlinales suaves.

Cabalgadura de Jiliapan. El noreste de la mina y del mapa geológico de la figura III-2 se localiza esta cabalgadura, la cual provocó que las rocas de la Formación El Abra de plataforma se colocaran sobre las rocas de la Formación Soyatal. Su orientación general es noroeste-sureste con 24° al suroeste y formando pliegues por propagación de falla, funcionando el plano de falla de la cabalgadura como rampa, continuando hasta la superficie lubricante de lutitas y margas de la Formación Soyatal.

Entre ambas cabalgaduras lo que se genera es una zona de desprendimiento o décollement, debido a que la unidad que se encuentra por debajo de la Formación Tamaulipas son las margas, areniscas, lutitas y calizas arcillosas de la Formación Las Trancas, generando una superficie lubricante que sirve para el deslizamiento de las unidades superiores.

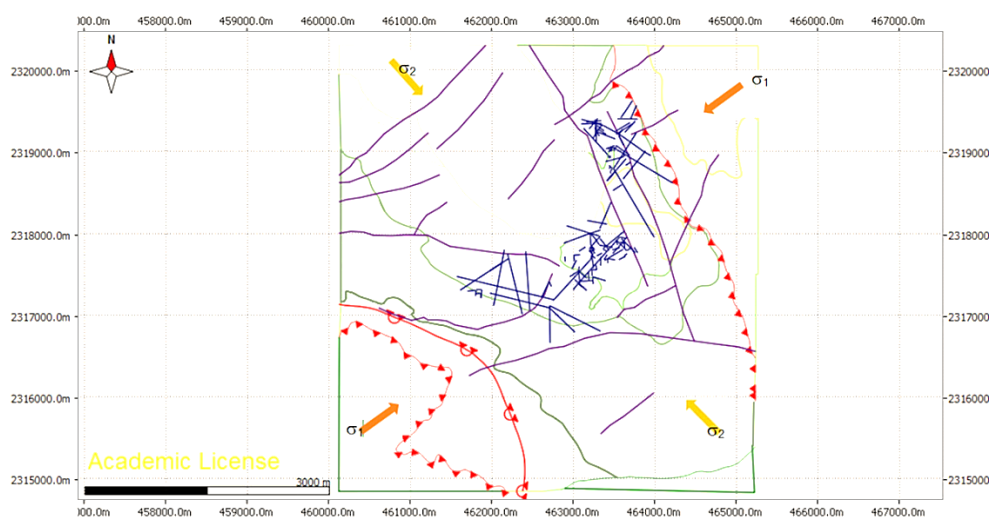


Figura III-2. Mapa geológico del área extendida elegida para la mina La Negra; se observan los contactos entre unidades, las fracturas, las cabalgaduras y el sinclinal El Fraile. Los esfuerzos σ_1 están con dirección NE-SW y los σ_2 con dirección NW-SE.

Los pliegues originados en las formaciones El Abra y Tamaulipas son suaves y paralelos, aunque no parezca que mantienen el espesor entre ellos, sí lo hacen, pero al término de cada unidad dentro de la Formación El Abra existen cambios de facies, por lo que los estratos se acuñan. Los datos estructurales medidos en campo que corresponden a pliegues y fracturas, se analizaron en una red estereográfica para estimar los esfuerzos principales de las estructuras (ver figura III-3).

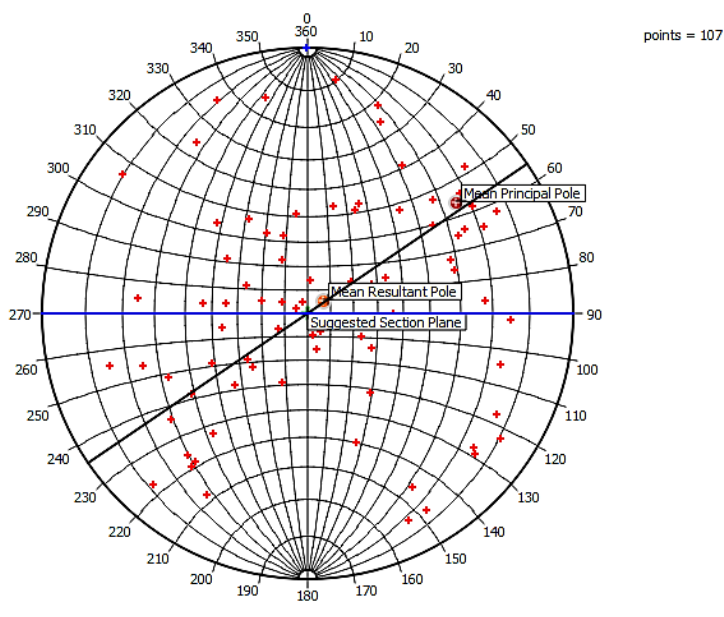


Figura III-3. Estereograma donde se indica la dirección sugerida para la sección, 236°, siendo ésta paralela a la dirección de compresión ejercida sobre las formaciones. La línea de color azul es la E-W, y se analizaron 107 puntos, como se indica en la parte superior del diagrama.

El esfuerzo principal σ_1 va con una dirección noreste-suroeste, perpendicular a la dirección de los planos de las cabalgaduras; σ_3 es normal a los planos. Las líneas de color morado son verticales y posiblemente se generaron cuando la roca pasó por un estado de recuperación elástica posterior a los esfuerzos, aunque no se asegura esto al tratarse de las fotogeológicas (ver figura III-4).

Las estructuras formadas por cizalla pura se describen de la siguiente manera: en estructuras de primer orden no se formaron pares conjugados, sólo un sistema de fracturas que originaron a las cabalgaduras a 24° con respecto a σ_1 , ejerciendo mayor compresión se forman las líneas de color azul marino, que podrían ser consideradas fracturas conjugadas de 2° orden con ángulos entre 60° y 80° con

respecto al esfuerzo σ_3 , adquiriendo la forma de la deformación por cizalla simple; esto no es posible asegurarlo, porque no se encontraron indicadores cinemáticos en campo.

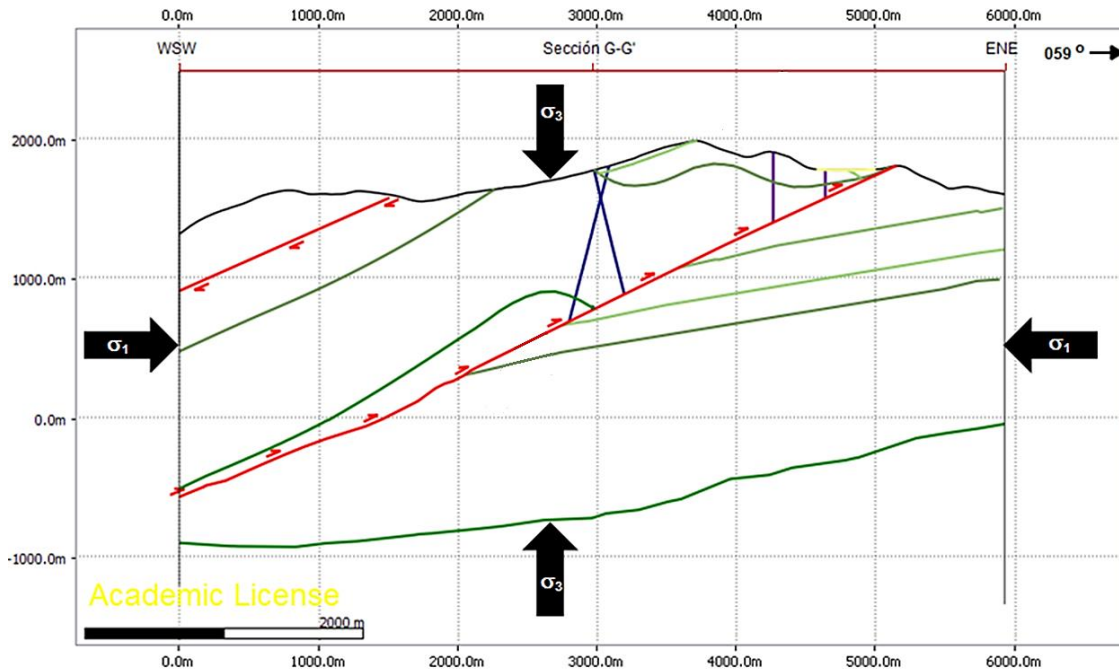


Figura III-4. Sección geológica donde se colocan los esfuerzos principales ejercidos (σ_1 es horizontal y σ_3 es vertical); se forman fallas inversas y pliegues de primer orden.

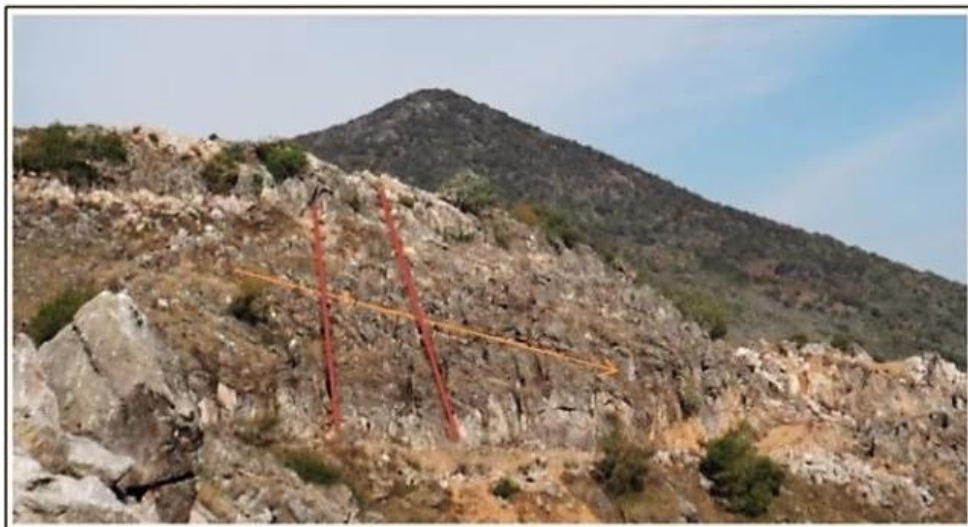
Además, se encontraron varias evidencias de pliegues secundarios formados a partir de pliegues mayores en una de las unidades donde es más probable encontrar estructuras apretadas (ver figura III-5), es decir, las wackestones, donde sus estratos oscilan entre los 30 y 60 centímetros de espesor.

Las fracturas son muy notorias en todas las áreas y al buscar el origen de las mismas se encontraron plegamientos que deformaron la roca a tal grado de fracturarla (ver figura III-6), aunque pueden explicarse como pliegues de las zonas de compresión.



Figura III-5. Fotografías de pliegues; en la foto a de la izquierda (a) se observa una anticlinal apretado erosionado de su cresta localizado en el área 3 de la mina (la línea punteada de color verde indica cómo estaba el anticlinal antes de ser erosionado) y en la foto b de la derecha se observa un anticlinal recostado al SE ubicado cerca de las oficinas.

Figura III-6. Líneas que muestran la estratificación de la caliza, con echado al NE en el área 2 (flanco de anticlinal), cortado por fracturas casi verticales, representados por las líneas en color rojo.



En la lámina delgada de la figura III-7 se puede observar una evidencia de cizalla, probablemente de modo II, al haber desplazamiento se considera una micro-falla. En esta lámina se observa cómo son afectados los componentes originales de la roca por las fracturas, en este caso se produce un movimiento que hace que el intraclasto se fracture y se desplace.

Es común encontrar este tipo de fracturas, clasificadas en tres: las de Modo I consisten en la apertura o extensión donde el desplazamiento es perpendicular a

las paredes de la fractura. Las de Modo II representan un desplazamiento perpendicular al borde de la fractura sobre el mismo plano y las de Modo III presentan un desplazamiento paralelo al borde de la fractura (ver figura III-8). Estos tipos de fracturas pueden aparecer combinados, en especial los Modos II y III, tomando el nombre de fracturas híbridas cuando se combinan las de cizalla y las de extensión.

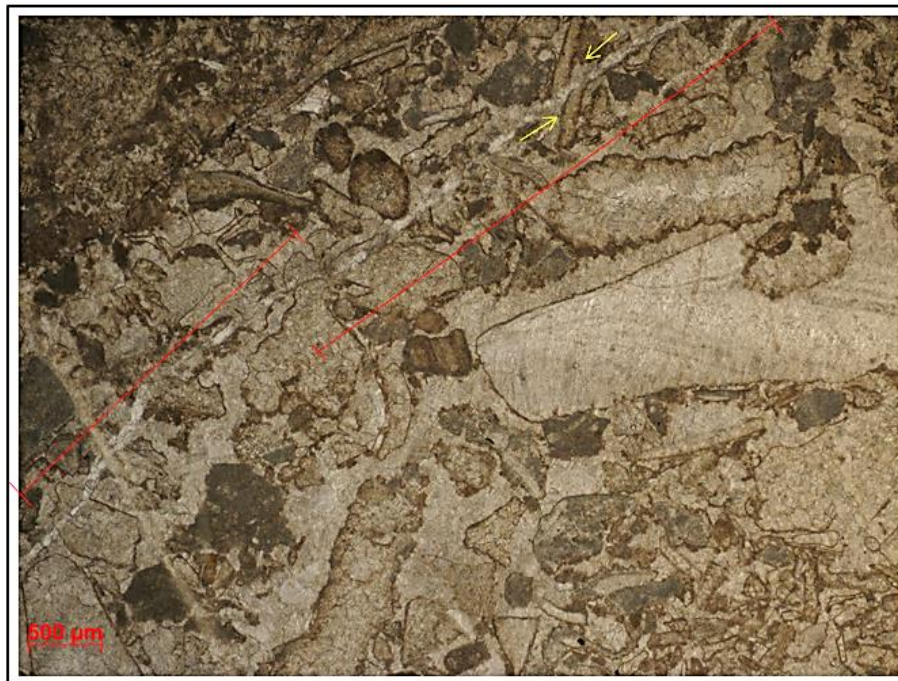


Figura III-7. Fragmentos de organismos e intraclastos reabajados, dos vetillas de calcita que no están unidas (se limitan con las líneas rojas para destacar hasta donde termina una y dónde empieza la siguiente); se observa un clasto, en la parte superior de la lámina que se desplazó por el rompimiento de la roca en general (ver flechas de color amarillo). Vista con objetivo de 2.5x y luz paralela, la escala que se encuentra en la parte inferior de color rojo indica 500 μm .

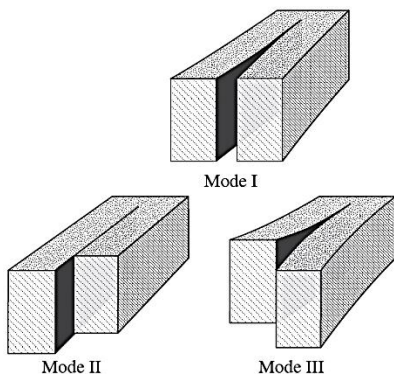


Figura III-8. Tres tipos de fractura, modos I, II y III, según la clasificación de Lawn y Wilshaw (1975). (Tomado de Fossen, H. 2010. Structural Geology, capítulo 7, fig. 7.5, pp. 122.)

3.3. Influencia de las fracturas en la carsticidad

El origen de la margen de la Plataforma Valles-San Luis Potosí sugiere un control estructural entre el sistema de plataformas, producto de un mecanismo de fallas normales y plegamientos asociados. De acuerdo con Aguayo-Camargo (1979), esto sucedió por el primer periodo de deformación sobre la plataforma, lo que la inclinó hacia el suroeste y la engrosó hacia el noreste, por lo que comenzaron a fracturarla siendo activa.

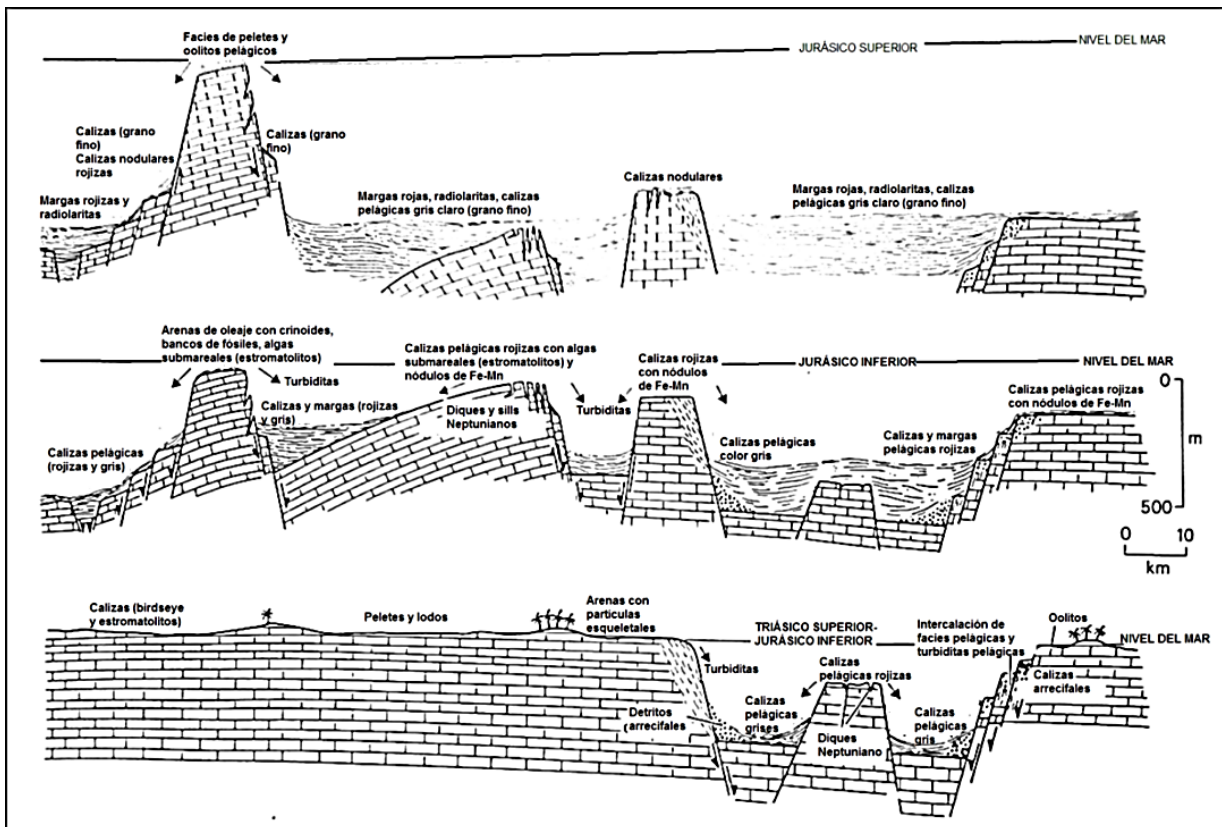


Figura III-9. Esquema de la evolución paleogeográfica de la margen continental del Triásico al Jurásico. Fallamiento en bloques y subsidencia diferencial afectaron a algunas plataformas carbonatadas, formando montes submarinos y cuencas (horst y graben) con depósitos de la misma edad; en los bordes de los bloques altos (horst) se observan un rompimiento o fracturamiento de la roca, dejándola expuesta a la meteorización mecánica o química. Algunas de estas plataformas continuaron hasta el Cretácico, dando lugar a la acumulación de oolitos (Bernoulli y Jenkyns, 1974. Tomado y traducido de Reading, H.G., *Sedimentary environments and facies*, fig. 11.38, pp.360).

En la figura anterior (*ver figura III-9*) se muestra un esquema que ejemplifica el comportamiento de una plataforma activa, destacando fracturas originadas en el periodo de depósito de carbonatos y eventos posteriores; la formación de bloques altos (horst) y bajos (graben) propicia y caída de bloque en los bordes de estos por fracturamiento o gravedad. Estas calizas quedaban expuestas a la meteorización mecánica o química que las cambiaban de forma, generando cavidades en la roca, conocidas en la mina como “guatos”, dando lugar a la carstificación.

Al mismo tiempo, seguían depositándose sedimentos en la plataforma inclinada, donde se acumularon los organismos enriquecidos en compuestos fosfatados (conchas de braquiópodos, corales) dentro de las formas irregulares de las calizas. Algunos de estos fosfatos fueron retrabajados y transportados para formar pellets de fosforita mientras la plataforma seguía activa.

Las fracturas medidas en campo presentan tendencias noroeste-sureste en el área 2 y para las áreas 1,3 y 4 fueron al norte-sur y este-oeste, en general. Fueron medidas las más importantes recorriendo cada plantilla de todas las áreas, por lo que esas fueron las tendencias generales (*ver figuras III-10*), pero éstas se repetían cada metro y sólo algunas formaron las cavidades, las demás son parte de las familias de fracturas.



Figura III-10. Área 2, parte noreste conocida como el Cerro de las Brujas. Fracturas que cortan a los estratos, se ven casi verticales pero tienen echados entre 75° y 80°, entre esos espacios se forman los “guatos”, donde se depositó el mineral.

Aunque los “guatos” se comuniquen no siempre tienen la misma profundidad, por lo que con el modelo se trata de configurar estos sistemas para visualizar las formas cársticas, siendo el agua el principal agente de depósito, transporte y meteorización que genera oquedades en las zonas menos resistentes de la roca.

Para estos casos es importante diferenciar entre fracturas generadas por esfuerzos regionales sobre la roca o las que fueron formadas después del carst, donde ocurren colapsos en las cuevas por disolución de la roca. Los “guatos” presentan fracturas paralelas a cada metro en la mayoría de los casos, aunque esta separación varía entre 50 centímetros y 1.5 metros, formando las paredes de las cavidades y son las que definen el alargamiento de los “guatos” (ver figuras III-11 y III-12).



Figura III-11. Área 2, parte norte; la figura a presenta los estratos $N32^{\circ}W$, 42° al NE cortados por fracturas con echados de 68° . En la figura b se muestra un plano de fractura $N76^{\circ}W$, 81° al NE.



Figura III-12. El “guato” de la figura a es de la parte más alta del área 2 y la fractura marcada con la línea va hacia NW-SE. En la figura b se ve el mismo “guato”, una plantillas más abajo y se aprecian tres fracturas que lo cortan y forman sus paredes (las líneas punteadas de color verde marcan las fracturas).

Algunas partes presentan diferentes profundidades de los “guatos” y hasta formas, pero con la medición de campo se observó que esta se debe a diversos sistemas de fracturas que pueden estudiarse con más detalle si se buscan indicadores cinemáticos para identificar direcciones de cizalla. Inclusive hay algunos “guatos” que tienen forma de conos pero al llegar al fondo se invierten y vuelven a abrirse nuevos “guatos”, lo que puede comprobarse con el modelo, gracias a los plegamientos encontrados (ver figura III-13).

En algunos casos se observaban fracturas radiales cercanas a las cavidades pero podían distinguirse de las demás como las que se produjeron a partir de las voladuras para retirar la roca y excavar para obtener el mineral. Otra evidencia de los dos periodos de fracturas de la roca se puede comprobar en la lámina delgada de la muestra 2 con fluorita que aparece en la figura II-10 del capítulo 2, en donde se observan vetillas de calcita que se cruzan, la de encima ocasiona una ruptura en la fractura inferior y ocurre un segundo relleno de calcita que interviene con el primer relleno en la fractura primaria.



Figura III-13. La fotografía a muestra un “guato” vacío, las fracturas al N75°E con un m de ancho 5 de altura y 7 hacia adentro. La figura b muestra gustos expuestos, las fracturas forman parte de las paredes de los “guatos”. Ambos se encuentran en el área 2.

En la tesis de Carrasco (2005), se propone una clasificación del paisaje paleocárstico con respecto al relleno de material brechado que contienen las cavidades de la roca.

Basado también en las etapas de maduración del carst (Esteban y Wilson, 1993), se proponen las etapas inicial, juvenil, madura y senil; la tercera es la más importante, porque se forman las estructuras internas más complejas del carst que puede durar entre 10,000 y 1'000,000 años sin modificación por tectónica o variación en el nivel del mar; se podría encontrar el momento exacto del relleno del paleocarst analizando con detenimiento cada variedad de fosforita.

Posiblemente, la fosforita para el área 4 y algunas partes de la 3, que se describen como depósitos generados por transporte, sean producto de este segundo periodo de deformación; pero esto se confirmaría comparando las edades de formación de cada fosfato.

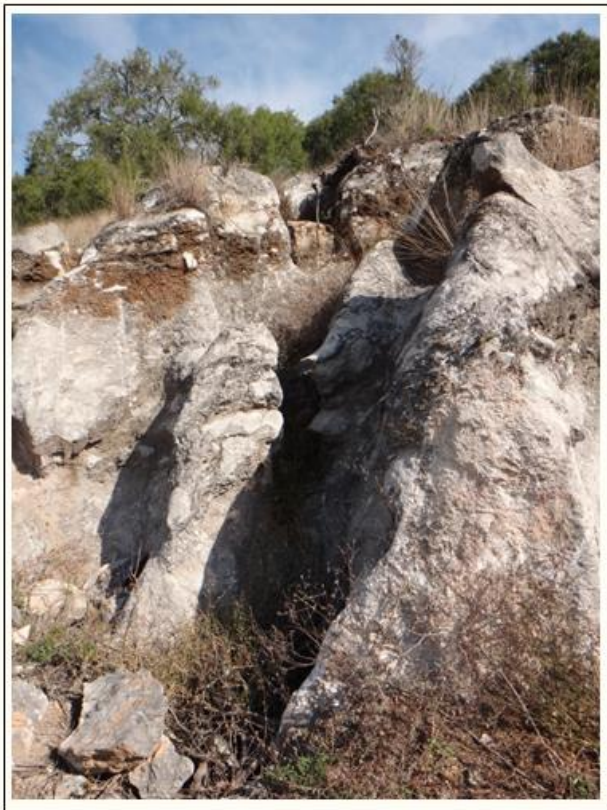


Figura III-14. Los “guatos” del área 4 que se conectan por la misma dirección de sus fracturas (estas fueron erosionadas de tal forma que no parecen fracturas, pero sí guardan el lineamiento, sólo que están cubiertas por caliche), tienen diferentes profundidades y forman lapiaces rellenos de fosforita en forma de peletes. También se distinguen unas bandas de color oscuro en la roca, esto es fosforita, de la variedad oscura, pero sólo quedó como una ligera capa en la roca.

Capítulo 4

Origen de la formación de fosforitas

- 4.1. Ciclo del fósforo
 - 4.2 Fosforita
 - 4.3. Clasificación de la fosforita
 - 4.3.1. Origen ígneo
 - 4.3.2. Origen sedimentario
 - 4.4. Ejemplos de depósitos de fosfatos
 - 4.4.1. Proterozoico
 - 4.4.2. Paleozoico
 - 4.4.3. Mesozoico
 - 4.4.4. Cenozoico
-

Las fosforitas son agregados de minerales de fósforo que aparecen frecuentemente como cuerpos estratificados formando horizontes condensados, donde la geometría y la estructura interna de los cuerpos son el producto final de la precipitación sindeposicional o diagenética temprana de minerales fosfáticos y en algunos casos un subsecuente retrabajo mecánico. La mayoría de las fosforitas económicas son depósitos granulares dispuestos en conglomerados fosfáticos o peloides fosfáticos tamaño arena.

Los depósitos de la roca fosfática localizados en diferentes áreas del mundo responden a distintos modelos genéticos (*ver figura IV-1*). La búsqueda de fosforitas está condicionada por factores paleoambientales relacionados a su vez con la posición de los continentes en determinado tiempo geológico, las características físico-químicas presentes en el área de sedimentación, la profundidad y temperatura de las aguas y las condiciones particulares de pH, Eh y organismos relacionados, por tal motivo se deben conocer las condiciones de formación para tener una explotación exitosa.

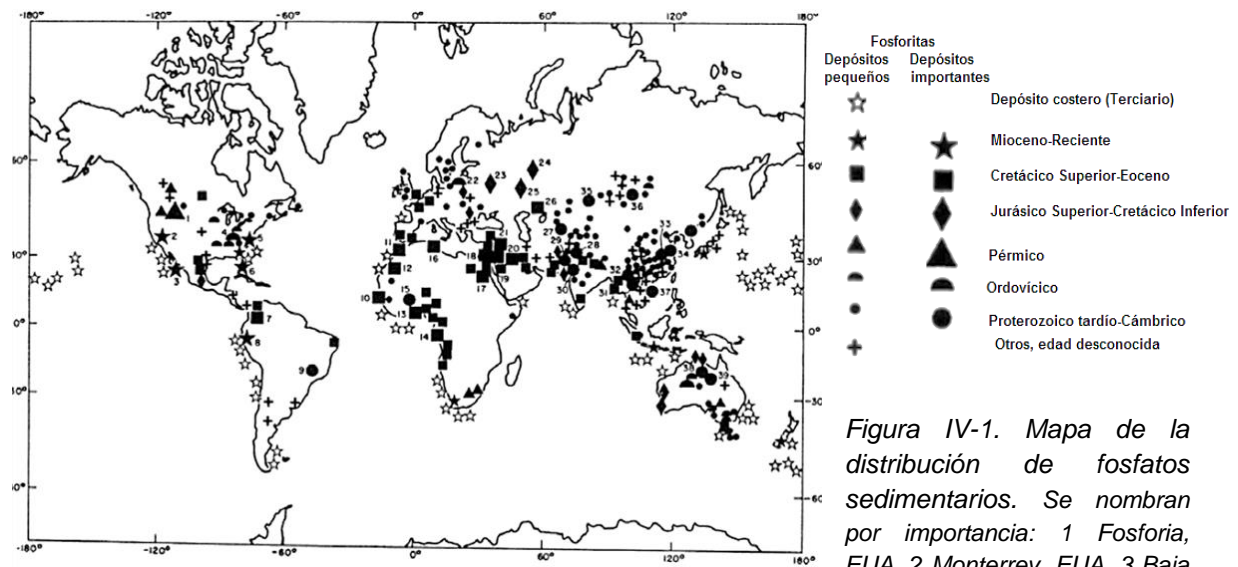


Figura IV-1. Mapa de la distribución de fosforitas sedimentarias. Se nombran por importancia: 1 Fosforia, EUA. 2 Monterrey, EUA. 3 Baja California, México. 4 Tennessee, EUA. 5 California del Norte, EUA. 6 Florida, EUA. 7 Cordillera, Colombia. 8 Sechura, Perú. 9 Bambui, Brasil. 10 Taiba, Senegal. 11 Khourigba, Morocco. 12 Bu Craa, Morocco. 13 Hahotoe, Togo. 14 Cabinda. 15 Volta y Nigeria. 16 Gafsa, Túnez. 17. Abu Tatur, Egipto. 18 Israel. 19 El Hassa, Jordania. 20 Iraq. 21 Palmira, Siria. 22 Maadu, Rusia. 23 Moscú, Rusia. 24 Yegerevsk, Rusia. 25 Rudnichny, Rusia. 26 Aktyubinsk, Rusia. 27 Karatau, Rusia. 28 Maldeota, India. 29 Hazara, Pakistán. 30 Rajasthan, India. 31 Laoky, Vietnam. 32 Kunming, China. 33 Kaiyang, China. 34 Xingyang, China. 35 Abaka, Rusia. 36 Hubsugul, Mongolia. 37 Hainan, China. 38 Australia. (Nriagu y Moore, 1984).

1 Fosforia, EUA. 2 Monterrey, EUA. 3 Baja California, México. 4 Tennessee, EUA. 5 California del Norte, EUA. 6 Florida, EUA. 7 Cordillera, Colombia. 8 Sechura, Perú. 9 Bambui, Brasil. 10 Taiba, Senegal. 11 Khourigba, Morocco. 12 Bu Craa, Morocco. 13 Hahotoe, Togo. 14 Cabinda. 15 Volta y Nigeria. 16 Gafsa, Túnez. 17. Abu Tatur, Egipto. 18 Israel. 19 El Hassa, Jordania. 20 Iraq. 21 Palmira, Siria. 22 Maadu, Rusia. 23 Moscú, Rusia. 24 Yegerevsk, Rusia. 25 Rudnichny, Rusia. 26 Aktyubinsk, Rusia. 27 Karatau, Rusia. 28 Maldeota, India. 29 Hazara, Pakistán. 30 Rajasthan, India. 31 Laoky, Vietnam. 32 Kunming, China. 33 Kaiyang, China. 34 Xingyang, China. 35 Abaka, Rusia. 36 Hubsugul, Mongolia. 37 Hainan, China. 38 Australia. (Nriagu y Moore, 1984).

4.1. Ciclo del fósforo

Algunas de las fuentes que emiten fosfatos son la actividad hidrotermal en zonas de generación de corteza oceánica, la meteorización química de suelos y rocas así como la actividad volcánica alcalina, siendo transportado por el agua o por el viento hacia lagos y el océano disuelto, aunque su biodisponibilidad es muy baja.

Los fosfatos se encuentran en la superficie marina y son capturados por organismos como el fitoplancton para llevar a cabo funciones fotosintéticas, pues lo utilizan para generar energía en forma de ATP (adenosín trifosfato, un fosfolípido esencial), se disuelve como nutriente y es incorporado a los organismos y a su vez a las plantas para iniciar el ciclo, donde otros organismos de mayor tamaño los consumirán.

Otra de las fuentes de fosfatos consiste en el enriquecimiento de oxi-hidróxidos de hierro, provenientes de zonas de generación de corteza oceánica, un poco es captado por el suelo y otra parte es transportada por corrientes marinas; una pequeña parte es llevada hasta la materia orgánica terrestre por periodos transgresivos en las costas, levantamiento de sedimentos o por bacterias que procesan los fosfatos, en donde las condiciones son anóxicas y permiten el depósito sin que se descomponga la materia, hasta que se acumula gran cantidad de residuos orgánicos; esto puede ocurrir en un ambiente transicional o en el mar (*ver figura IV-2*).

Este proceso puede considerarse como un mecanismo de remoción de fósforo y depende de la distribución espacial de las fuentes de flujo hidrotermal, pues cambia el balance de sulfatos y la precipitación de oxi-hidróxidos de hierro, cambiando las composiciones originales.

La fosfogénesis es conocida como la formación autigénica de fosfatos, incluyendo la diagénesis durante el transporte del fósforo en sedimentos marinos, la liberación de éste a partir de aguas intersticiales y su saturación para formar carbonato-fluorapatito; lo anterior está controlado por factores como la tasa de

Capítulo 4 | Origen de la formación de fosforitas

mineralización, biodisponibilidad de la materia, densidad microbiológica, permeabilidad y porosidad de los sedimentos y elementos necesarios para formar carbonato-fluorapatito.

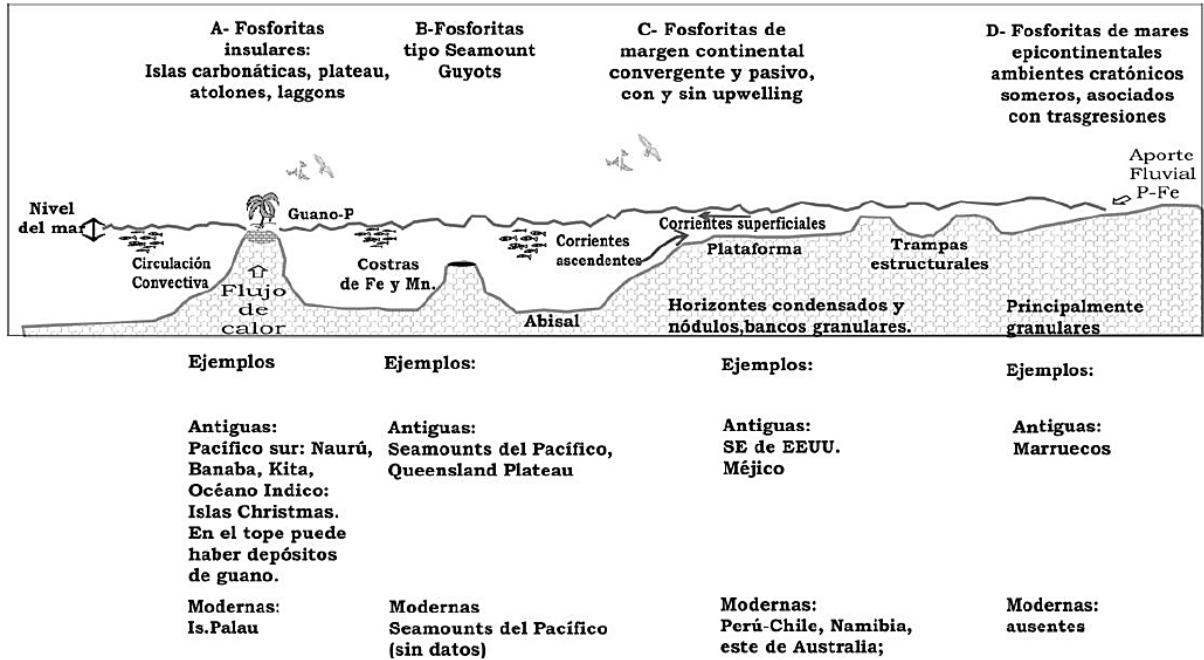


Figura IV-2. Esquema de Glenn et al. (1994) de los ambientes de formación de las fosforitas. Los ejemplos de México se localizan en el área de plataforma, la diferencia entre estos yacimientos es la forma de depósito de las fosforitas.

Por lo tanto es indispensable un ambiente con alta tasa de sedimentación y transporte, que se repita constantemente para que pueda depositar gran cantidad de fosfato y no quede expuesto para evitar la descomposición, es por eso que los depósitos más grandes de fosforitas no pueden desarrollarse en ambientes marinos profundos (ideal entre 60 y 300 metros de profundidad), porque los minerales se vuelven más solubles.

Posteriormente existe un proceso que se denomina reciclaje de fósforo, ya sea en las zonas de subducción o procesado por organismos que pertenecen a las cadenas alimenticias y obtienen el fósforo del suelo y las plantas, o con residuos orgánicos como el guano.

Las glaciaciones y el enfriamiento global pueden aumentar la circulación oceánica vertical, con la consecuente liberación de fósforo de su estadio primario en profundidad y también la conjunción de transgresión con calentamiento global origina un aumento en la meteorización química y el desarrollo de extensos sectores de agua pobres en oxígeno y este agente es indispensable para la descomposición orgánica, es decir, al no estar presente existe una gran oportunidad para que se depositen los compuestos fosfatados orgánicos.

El yacimiento tipo de fosforitas, independientemente a su origen es conocido como la Formación Fosforia, resultado de varios estratos formados en altas profundidades y con valores altos de vanadio, cadmio, selenio y uranio (*ver figura IV-3*).

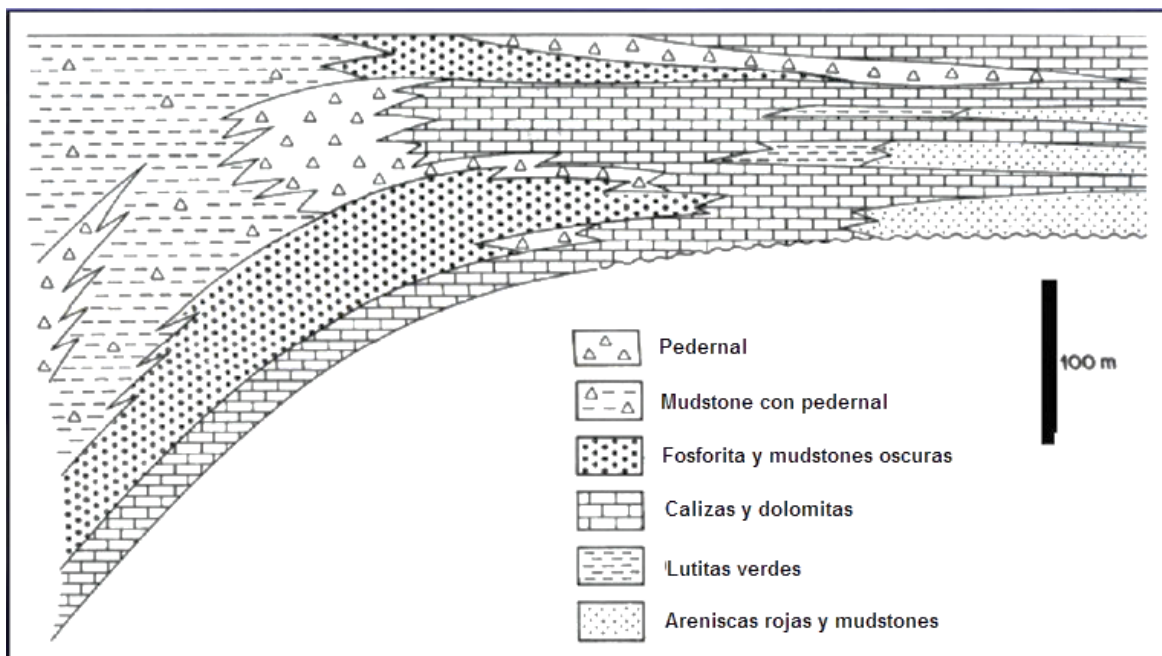


Figura IV-3. Esquema de McLane (1995) de la Formación Fosforia, California.

Como se ha explicado, varias condiciones favorecen el depósito de fósforo en distintos ambientes, por lo que hay periodos a lo largo de la historia de la Tierra donde se encuentran localizados estos depósitos considerando las siguientes características: preservación del depósito en condiciones normales, cambios intrínsecos en las cuencas o cambios a nivel mundial como el clima.

4.2. Fosforita

El fósforo (P), es un elemento importante para diversos procesos biológicos, por lo que ocupa el lugar número once en abundancia en la corteza terrestre. Viene del griego que significa *transportador de luz*, ya que es capaz de transmitir energía luminosa cuando está presente en materia sin vida; se le asocia con el calcio, sodio, flúor, aluminio, magnesio y, en algunas ocasiones, con el uranio.

Está presente en la mayoría de las rocas en pequeñas cantidades; si el contenido es de 8% se le llama roca fosfática y cuando el contenido de P_2O_5 está entre 18% y 40% la roca es denominada fosforita (Slansky, 1980). De acuerdo con el Instituto Geológico Americano (1974) se denomina fosforita a la roca compuesta por minerales fosfatados y fosfatita a la roca compuesta por minerales del grupo del apatito.

Los minerales del grupo del apatito [$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$] de origen sedimentario son microcristalinos, siguiendo sustituciones de CO_3^{2-} por PO_4 y de otros metales por el Ca^{2+} . En el caso que hayan tenido lugar estas sustituciones, con contenidos de $F > 1\%$ y CO_2 se les puede llamar carbonato-fluorapatitos (McConnell, 1973). Algunos componentes secundarios en las fosforitas son cuarzo, arcillas, carbonatos (dolomita y calcita), glauconita.

Las fosforitas pueden presentarse de varias formas, dependiendo del ambiente de formación, como peloides fosfáticos, concreciones, nódulos, estratos de espesores variables, fragmentos de organismos reemplazados por fosfatos (*ver figura IV-4*).

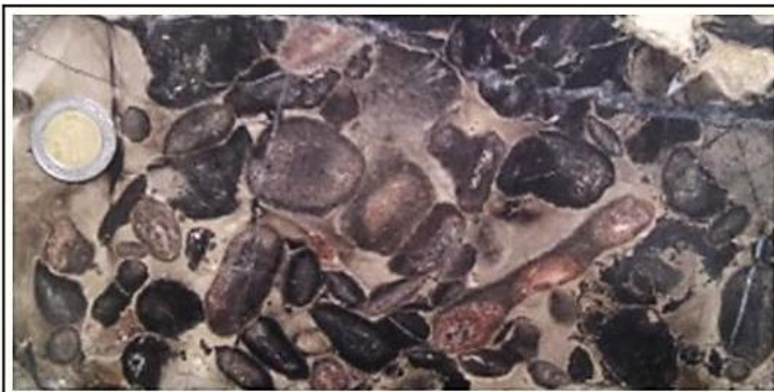


Figura IV-4. Concreciones de fosforita de la Formación La Caja, Sierra de La Caja, noreste de Mazapil, Zacatecas, México (muestra tomada por el Ing. Javier Arellano, FI, UNAM).

4.3. Clasificación de la fosforita

En general, las fosforitas se determinan por el ambiente geológico en donde se formaron, dándoles diferentes características y formas de depósito, de donde deriva su importancia económica y para esta clasificación general se propone con respecto a su origen, ya sea ígneo o sedimentario, siendo el último el más común; también se menciona un poco acerca de las de origen metamórfico, estas fosforitas se forman a partir de los depósitos sedimentarios o ígneos de fosfatos, pasando por un soterramiento profundo, lo que causa cambios texturales y mineralógicos, dando fluorapatito en lugar de carbonato-fluorapatito, pero es poco frecuente encontrar este tipo de depósitos.

4.3.1. Origen ígneo

Algunos de estos depósitos se encuentran como componente cristalino en la roca, por lo que la textura llega a ser granular debido a la meteorización mecánica y se les conoce como depósitos residuales:

- a) Depósitos de fosfatos SEDEX. Relacionados con procesos sedimentarios exhalativos con hierro y aluminio (variscita o strengita), la actividad hidrotermal de las zonas de generación de corteza oceánica disuelto en oxi-hidróxidos de hierro de un 25 a 30% del total de flujo de fosfatos y asociados a la nontronita, jarosita, baritina y pueden aparecer en peloides fosfáticos. Ejemplos: Cordilleras Costeras Catalanas (Silúrico).
- b) Complejos alcalino-carbonatíticos. Estos difieren en el contenido mineralógico como la nefelina, los feldespatos alcalinos, las micas, piroxenos, anfíboles ricos en Fe y Mg; además, su contenido de P_2O_5 es menor.
- c) Depósitos pegmatíticos. Cuando se genera suficiente apatito primario ligado a minerales de alta temperatura (50° - 100° C), asociándose a estos el fluoroapatito $[Ca_{10}(PO_4)_6F_2]$, hidroxilapatito $[Ca_{10}(PO_4)_6OH_2]$ y cloroapatito $[Ca_{10}(PO_4)_6Cl_2]$.

4.3.2. Origen sedimentario

Vinculados al incremento en el nivel del mar, más específicamente con las transgresiones marinas o suspendido en el agua marina como un ortofosfato. La mayoría de las fosforitas fueron depositadas en aguas relativamente someras en márgenes continentales, convergentes, pasivos, con o sin corrientes ascendentes o en mares epicontinentales.

Los episodios transgresivos pueden favorecer la acumulación de fosfatos en las plataformas; la acción de las olas y otras corrientes contribuyen al retrabajo y concentración de minerales autigénicos con la consecuente formación de extensos depósitos, donde es más común encontrar el carbonato-fluoroapatito, que contiene 32% de P₂O₅, 52% de CaO, 4% de F, Na, Sr, Mg, CO₂ y SO₄.

- a) Yacimientos de apatito. Pueden formarse por acumulación de esqueletos de organismos con carbonato-fluorapatito o biogénesis, por precipitación directa en medios confinados del agua de mar o por epigénesis. Pueden encontrarse minerales como cuarzo autigénico, ópalo, calcita, dolomita, glauconita (formada a profundidades de 120 a 200 metros), illita, montmorillonita, goethita (aguas someras).

Vissue (1953) propone los términos de endoganga al material no fosfatado dentro del acumulado y exoganga al material externo y Slansky (1980, 1989) propone una clasificación de las fosfatitas de acuerdo al tamaño de grano fosfatado (*ver tabla IV-a*), agregando al nombre de los componentes orgánicos y el término de Vissue, tal como en las clasificaciones de los carbonatos.

Nombre	% granos	Tamaño
Microfosfatita	<10%	10μ
Fosfalutitas	>10%	10-63 μ
Fosfarenitas	Sin restricción	63 μ a 2 mm
Fosfaruditas	Sin restricción	>2 mm

Tabla IV-a. Clasificación de fosfatitas de Slansky (1980, 1989).

- b) Depósitos en medios lacustres. No son tan comunes al tratarse de fósforo inorgánico sin apatito, sino que se describen como concreciones de fosfatos hierro-magnesio, esto depende en gran medida de las condiciones de pH y Eh del ambiente y de la cantidad de fósforo y calcio. Ejemplos de estos fosfatos son la mitridatita, foucherita, laueita/strunzita, fairfieldita y anapaita.
- c) Depósitos secundarios. Formados por la exposición del fosfato a la meteorización química y mecánica por medio de aguas meteóricas, modificando las arcillas por caolinita, el apatito recristaliza para ser más abundante en fluorapatito y son comunes en las partes superiores de los yacimientos, es decir, en estas áreas existe una lixiviación progresiva del calcio y produce un enriquecimiento en fosfatos alumínicos (menos solubles). Las aguas meteóricas ricas en fósforo y sin carbonatos circulan a través de las arcillas produciendo pérdida de alcalinidad, hidratación, aumento de la relación $(Al+Fe)/P$ y aumento en el estado de oxidación del hierro; si posee una relación alta de bario-estroncio y elementos de tierras raras es que fueron producto de alteración de las carbonatitas.
- d) Depósitos en medios cársticos. Las condiciones de formación de las calizas se presentan en climas cálidos, en las zonas de los trópicos, posteriormente los fosfatos se depositan en las oquedades, aunque rara vez son de altas leyes. Sin embargo, en la mina La Negra de Hidalgo, México, formada bajo estas condiciones, presentan leyes hasta de 32% de fosfato. La mineralización es de dahllita (Carbonato Hidroxilapatito) o carbonato-fluorapatito, acompañados con calcita, calcedonia y arcillas rojas.
- e) Guano. Estos fosfatos son producidos por los excrementos de aves que se lixivian para formar como residuo fosfatos de calcio y se acumulan en islas oceánicas.

- f) Reconcentraciones en series detríticas. Cuando el fósforo es depositado de manera alóctona en medios de transición para que no presente algún tipo de meteorización mecánica o química, por lo que su depósito es por gravedad (ver figura IV-5).

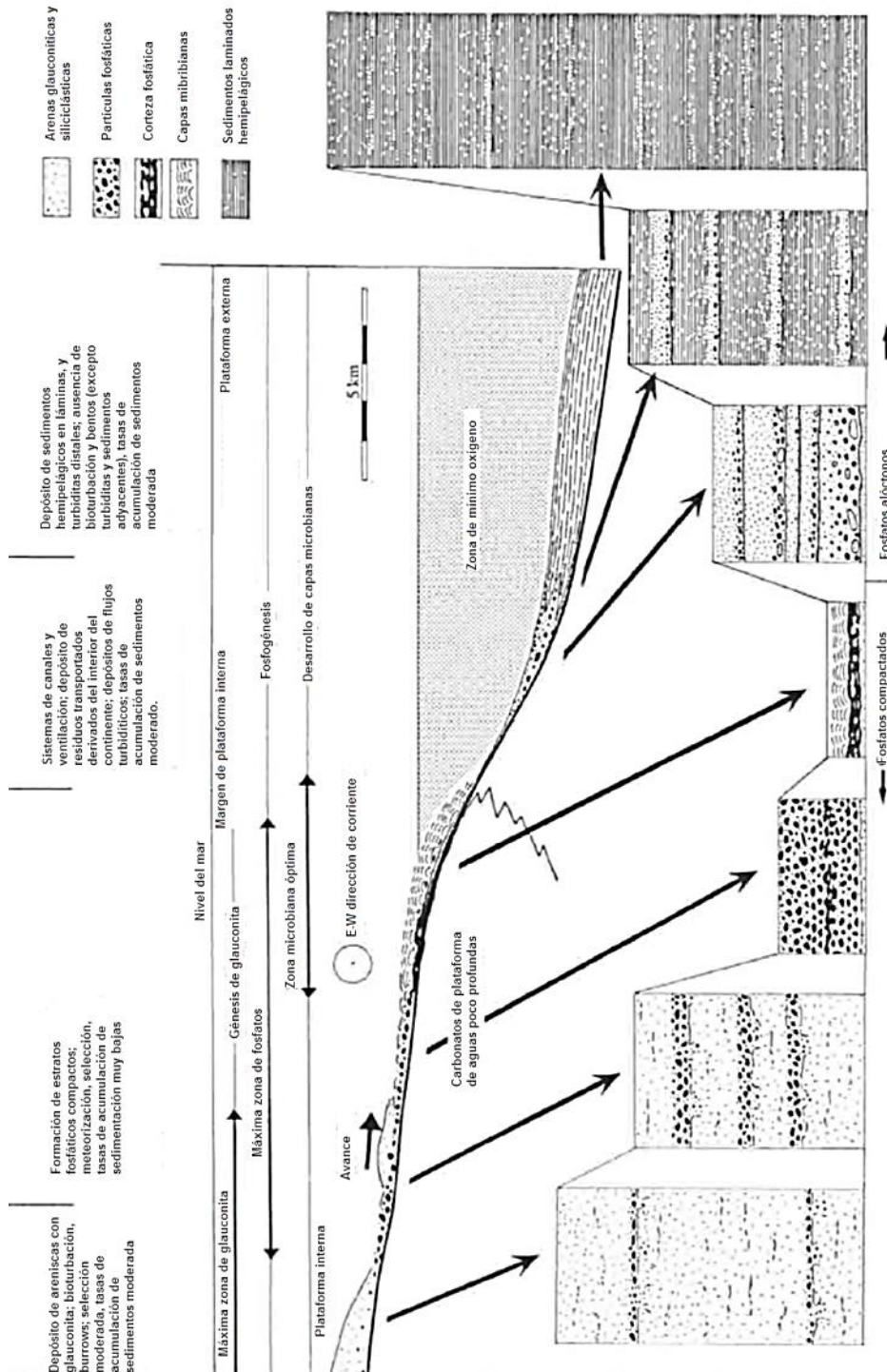


Figura IV-5. Esquema que representa los depósitos en la plataforma interna (tomado y traducido de Föllmi, 1996).

4.4. Ejemplos de depósitos de fosfatos

Los siguientes ejemplos son depósitos de fosfatos de cuatro periodos de gran importancia para la formación de fosfatos, y corresponden al Proterozoico, Paleozoico, Cretácico, Paleoceno-Mioceno y las más recientes del Holoceno (Ver figura IV-6). Cada uno de los ejemplos se describirá brevemente, considerando esquemas importantes, origen, tipo de roca, morfología y tipo de fosforita, sin entrar en detalles como la Formación a la que pertenecen o terminologías específicas para cada país; solamente se incluye información general para conocer los yacimientos de distintos países.

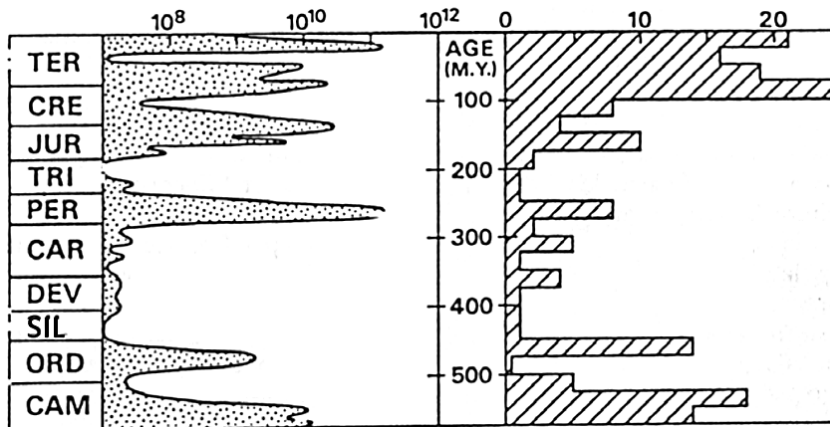


Figura IV-6. Distribución temporal de los depósitos de fosfatos (Cook, 1984). A la izquierda de la figura se mide una estimación de acuerdo con la abundancia de fosfatos medidos en toneladas de P_2O_5 y a la derecha se mide por número de depósitos.

4.4.1. Proterozoico

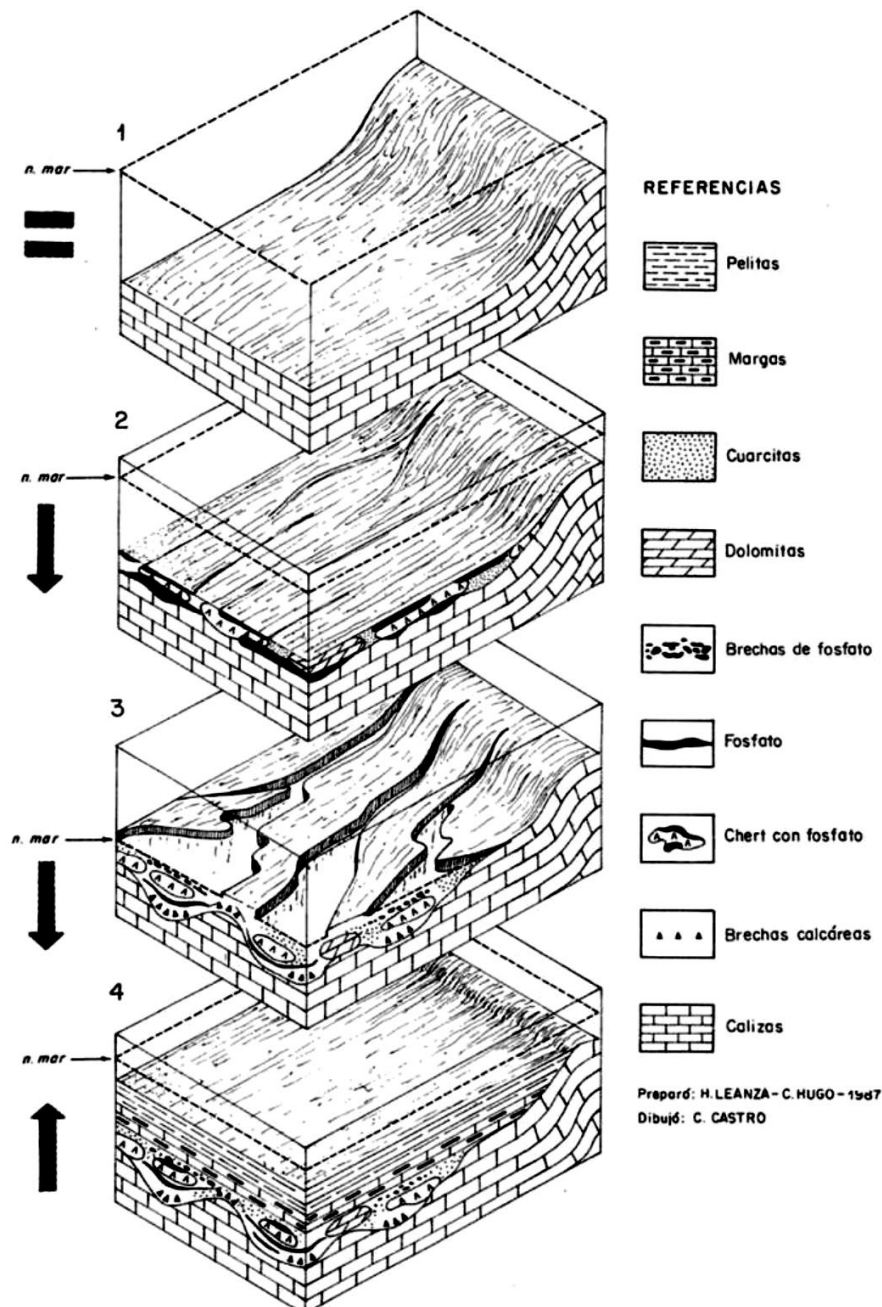
El país que presenta yacimiento en este Eón es Argentina; esto sucedió en un periodo donde aún había mucho dióxido de carbono en el ambiente, por lo que permitió la acumulación de sedimento rico en fosfatos, relacionados con glaciaciones y disminución del nivel del mar.

- Argentina. Este yacimiento se localiza en las Sierras Septentrionales de Buenos Aires, Argentina; la edad asignada por medio de un análisis de Rb-Sr (Cingolani y Rauscher, 1985) es para el Neoproterozoico.

Depositado en calizas, lutitas, margas y dolomitas como una acumulación de sedimentos de color gris oscuro con tonalidades rojizas por la presencia de hierro;

se identificó como la variedad de fluorapatito con 2.02 a 27.14% de P_2O_5 , también se describen en brechas de fosfatos y lentes de color pardo en areniscas cuarzosas fosfáticas de talud cementados por material silíceo, formando un Miembro Fosfático con estas características en un periodo transgresivo, rellenando un paleocanal y en relación discordante con la Formación superior. En la figura IV-7 se muestra el diagrama del depósito de fosforitas en Argentina, propuesto por Leanza y Hugo (1987), por medio de la formación de canales en las rocas carbonatadas.

Figura IV-7. Diagrama que muestra el posible origen de los fosfatos. En el primer esquema se depositan las rocas de la plataforma, en el segundo disminuye el nivel del mar y baja el pH para el depósito de fosfatos, la siguiente indica la formación de canales y, por último, un ascenso en el nivel del mar que provoca el depósito de margas que rellenan los canales. (Tomado de Leanza y Hugo, 1987. Descubrimiento de fosforitas sedimentarias del Proterozoico Superior de Tandilia, Buenos Aires Argentina, fig. 3, pp. 424).



4.4.2. Paleozoico

En el Cámbrico, durante un periodo de anoxia, se formaron los depósitos fosfatados en calizas con intercalaciones de lutitas, siendo parte de los organismos más simples que vivían en ese momento: las bacterias, las cuales formaron capas muy delgadas, depositándose y creando estructuras laminares similares a los estromatolitos. Estos depósitos fosfatados fueron muy comunes en esta Era, y son comparados con los de Chennai, India.

4.4.3. Mesozoico

Las fosforitas conocidas en esta era geológica se formaron, principalmente en el Cretácico, debido a los procesos de generación de corteza oceánica que dieron origen a eventos transgresivos y regresivos en las plataformas carbonatadas. Estos eventos están estrechamente ligados con la formación de lutitas negras y bitumen, es decir, con el ciclo del carbono; la materia orgánica rica en fosfatos y en carbono se acumuló durante periodos de anoxia y se formaron algunos yacimientos.

- Noroeste de Sudamérica. Estos depósitos se originaron del Cenomaniano-Santoniano (Cretácico Superior) en la plataforma que se encontraba entre la Cordillera Central de Colombia y la Cuenca de Maracaibo, Venezuela. La litología relacionada con este yacimiento son margas, calizas de plataforma, calcarenitas y lutitas, con fósiles de foraminíferos, bivalvos amonites y restos de peces, además se describen concreciones calcáreas.

En algunas Formaciones no se presentan la fosforita, pero llegan a ser comunes los estratos de 10 a 15 centímetros de espesor o en las cimas de las capas de 1 a 5 metros de espesor con esqueletos de pescados, foraminíferos y peletoides. Con esto se determinan las condiciones en las que se depositó la fosforita que fueron bajas temperaturas, salinidad baja, disminución del oxígeno ambiental y la

biodisponibilidad de nutrientes, concentrando materia orgánica, sílice enriquecida en elementos traza como bario, uranio y metales pesados.

- Ecuador. Aunque también se puede incluir en el tema del noroeste de Sudamérica, este yacimiento tiene un origen diferente y se formó en el Conaciano (Cretácico Superior) en la Cuenca Oriente de tras-arco, la cual cuenta con una reserva de aceite muy importante.

Los depósitos de fosfatos se formaron a partir de concentraciones de guano, organismos marinos y peloides fosfáticos en calizas y areniscas de grano medio, principalmente, con intercalaciones de lutitas. Al ser un ambiente de depósito de alta energía, su mayor ocurrencia es en rocas clásticas, acompañado por la precipitación de apatito en evento de surgencia, aunque la presencia de peloides fosfáticos indican un ambiente lagunar o de estuario.

4.4.4. Cenozoico

En los siguientes ejemplos se describen diferentes procesos de formación de fosfatos, por el ambiente, el clima y el lugar donde se desarrollaron, lo que resulta en diferentes variedades de fosforitas y el registro de estos depósitos ha sido más estudiado que de los más antiguos.

- Gafsa, Túnez. En la Cuenca de Gafsa, en Túnez, se formaron peloides fosfáticos de carbonato-fluorapatito proveniente de organismos marinos (dinoflagelados), con intercalaciones de lutitas y calizas de mar epicontinental en profundidades menores a 500 metros, en un ambiente reductor combinando condiciones oxigenadas y anóxicas. Su periodo de formación se estima entre el Paleoceno y el Eoceno.
- Baja California Sur, México. Estas son fosforitas oolíticas y se componen de carbonato-fluorapatito en partículas peloides fosfáticos, formadas en una

plataforma carbonatada con agua marina rica en materia orgánica, ocurriendo la fosfogénesis durante la diagénesis temprana de los sedimentos en un ambiente reductor; se sugiere una edad entre el Oligoceno y el Mioceno, debido a las constantes fluctuaciones oceánicas provocando transgresiones marinas.

- **Japón.** En la Cuenca de Kusu, localizada al norte de la isla de Kyushu en Japón, se formaron nódulos de fosforita (carbonato-fluorapatito) en un ambiente lacustre, predominantemente de mudstones con diatomeas, plantas e insectos, variando sus tamaños de 5 x 4 centímetros a 12 x 8 centímetros; posteriormente presentaron alteraciones por soluciones hidrotermales ácidas por la cercanía de depósitos de oro, algunos de los componentes principales de las fosforitas alteradas son producto de una bacteria acidófila que asimila los fosfatos del lago, dando como resultado distribuciones inusuales en los hidrocarburos del área. La fosforita que no está alterada es verdosa y la alterada se ve de color naranja o café; el contenido de P_2O_5 es de 20%.
- **Sudáfrica.** En la margen continental, al oeste de Sudáfrica se encuentra el depósito de fosfatos en forma de peletoides de color amarillo o anaranjado, pasando por procesos de surgencia y en un ambiente lagunar para que pudieran tomar esa forma. También se presentan las arenas fosfatadas formadas por precipitación directa durante el Mioceno, con altas temperaturas, para evitar que el apatito se disolviera; Tankard (1974) las describe como packstones de celofana de grano fino a medio con un contenido de P_2O_5 de 20%. La mineralogía detectada es de carbonato-fluorapatito, minerales arcillosos (caolinita-clorita) y calcita.
- **Perú.** Las fosforitas de Perú se formaron entre el Mioceno y el Cuaternario, presentándose en varias formas, sedimentos, nódulos, costras, y laminado; en lámina delgada se ven los peloides fosfáticos y esqueletos de peces producto del retrabajo y cementación de los fosfatos cerca del piso oceánico,

en donde es posible transformar el hidroxilapatito de las partículas esqueléticas como las diatomeas en carbonato-fluorapatito y un contenido de P_2O_5 de 27% a 36%.

- Chennai, India. En la margen continental de Chennai al sureste de India se formaron, en el Cuaternario, fosforitas generadas por capas de microbios que forman estratos de estromatolitos fosfatados. Las rocas en las que se encuentra son areniscas de grano medio, aumentando el contenido fosfórico en profundidades de 40 a 90 metros, resultado de la acumulación de organismos en un ambiente de alta energía con el nivel del mar bajo.
- Eppawala, Sri Lanka. Localizado al norte de Sri Lanka, Eppawala una Formación de mármoles de apatito dentro de una secuencia metasedimentaria con charnockitas, cuarcitas y migmatitas del basamento Precámbrico. Como se trata de un ambiente de alta meteorización, el suelo se enriquece con los fosfatos provenientes del mármol y su contenido de P_2O_5 varía de 10 a 40%, relacionados con fosfocretas y ooides observables en lámina delgada. Este ejemplo es de formación reciente en rocas, a partir de rocas Precámbricas.

Capítulo 5

Construcción del modelo

5.1. Metodología

5.2. Modelo 3D Geológico Estructural

5.3. Comparación de este modelo con otros
ambientes de formación de la fosforita

Para la construcción del modelo fue necesario recopilar información del área y los datos de campo de la mina La Negra (*ver figura V-1*), conocer la estratigrafía específica y los conceptos geológicos importantes para utilizar el software y para que tuviera coherencia cada superficie de roca. La hipótesis principal es comprobar si el fracturamiento interviene en algún proceso del depósito de las fosforitas, por lo que se utiliza el software Move 2013.1 (structural modelling and analysis software) para visualizar la geología y estructuras principales de la mina.



Figura V-1. Frente de la mina en el área 2, tomada en diciembre del 2012 (la explotación continúa actualmente).

5.1. Metodología

A continuación se describe cómo fue generándose el modelo tridimensional, se describe como un instructivo para mostrar las modificaciones que se hicieron en el mapa base original, además de las superficies por separado, así se explican los procesos de formación con los datos, la geología regional relacionada y el comportamiento mecánico de las rocas.

1. Generar el mapa base en 2D:

Inicialmente se trabajó con las fotos de Google Earth con relieve para realizar la estereoscopia, el modelo digital de elevación de INEGI, las fotos aéreas de la base de datos de INEGI, además de la carta topográfica 1:50,000 San Joaquín y la carta geológica 1:100,000 Zimapán del Instituto de Geología; el área de la mina es menor al área elegida para el modelo, 9 km² aproximadamente, por lo que se optó por un área mayor, de 25 km², para tener más unidades de referencia donde se pudieran generar superficies y relacionar los procesos de formación de la carstificación en mayor extensión con respecto a las dos cabalgaduras que limitan las fronteras al noreste y al suroeste.

Para tener una referencia fija se marcan las trazas de las cabalgaduras El Volatín y la de Jiliapan para que sean el límite de los contactos. Para ello se toman las trazas que vienen marcadas en la carta geológica y quedan de color rojo en el mapa de Move, además se toma la otra estructura no identificada en campo del sinclinal recostado El Fraile al noreste de la cabalgadura El Volantín.

Los contactos geológicos de esta carta fueron marcados como horizontes, complementándose con los puntos de contactos tomados en campo y, por último, haciéndolos coincidir con los fotogeológicos. Así se cerró cada unidad, donde algunas partes eran inferidas y la Formación El Abra se dividió en tres facies reconocidas en campo: grainstone, mudstone y wackestone (*ver figura V-2*), las cuales se notaban las diferencias entre ellas por el cambio de espesores entre los estratos y su comportamiento ante el plegamiento y fracturamiento.

Siguiendo con la ubicación en nubes de puntos del recorrido de campo haciendo grupos para los contactos y los fósiles (*ver figura V-3*), con el fin de encontrar una relación entre la distribución de las rocas y la ubicación de los fósiles aunque, posteriormente, este dato resultó de gran ayuda porque todos eran rudistas, de diferentes tamaños y formas, pero al final todos eran parte del arrecife y no se diferencian en batimetría, sólo cambia la distribución entre la facies 5 y 6 de Wilson.

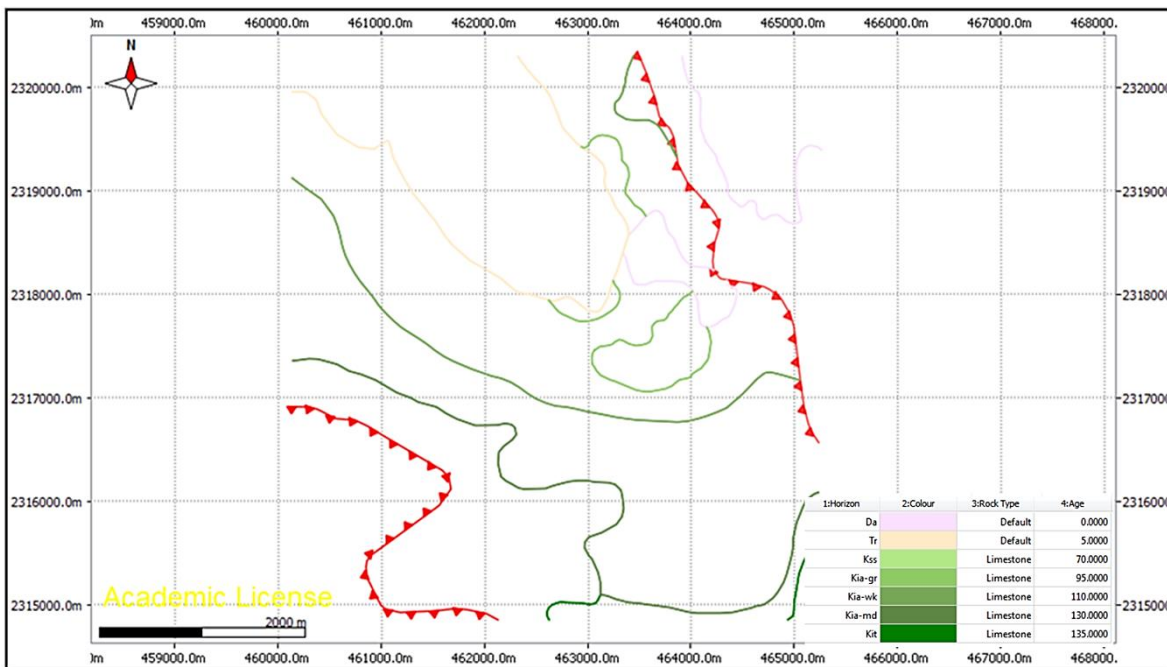


Figura V-2. Imagen de Move que muestra el mapa geológico inicial con contactos y con las dos cabalgaduras, la de Jiliapan al Noreste y El Volantín al suroeste. Se incluye la simbología de colores con una edad aproximada de formación para cada unidad, debido a que el software así lo requiere.

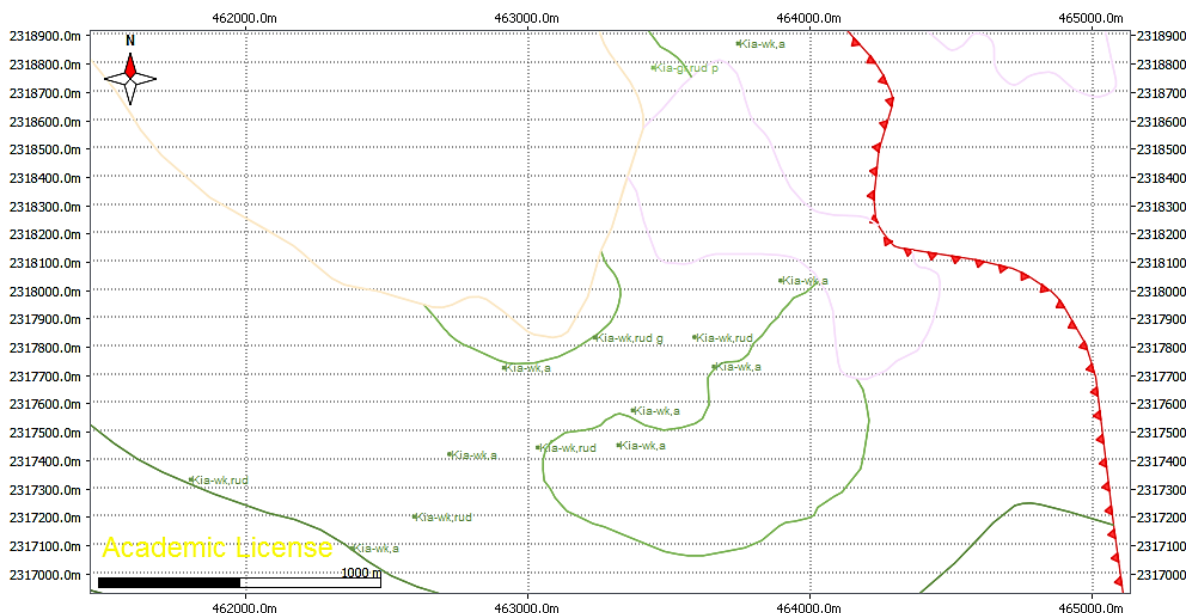


Figura V-3. Imagen de Move con un acercamiento para ver la nube de puntos de fósiles identificados con las claves de cada formación Kia-gr en color verde seguido del nombre del fósil encontrado en esa zona.

2. Marcar discontinuidades en 2D:

Se realizaron tres bases de datos diferentes, una para cada discontinuidad, donde se localizaron echados de capas, fracturas y “guatos”, además de las líneas que dieron origen a las fotogeológicas. Para realizar estas últimas se colocó de base la foto de Google Earth que fue utilizada para la fotogeología, digitalizando con un color morado las mismas estructuras marcadas que se identificaron en las fotos.

Las bases de datos utilizadas fueron con las mediciones corregidas en azimutal y utilizando la regla de la mano derecha, puesto que en campo no fue posible tomar los datos con una sola notación por la dificultad del acceso a las estructuras, por lo que quedaron los echados en tonos verdes para cada unidad de la estratificación (*ver figura V-4*), símbolos de echados en color azul marino para las fracturas y nubes de puntos para aquellas fracturas que se tomaron de 85° en adelante se tomaron completamente verticales. Otra nube de puntos se genera para los “guatos”, pues en campo se observó una tendencia hacia donde se alargaban las cavidades; estos se marcaron de un color café.

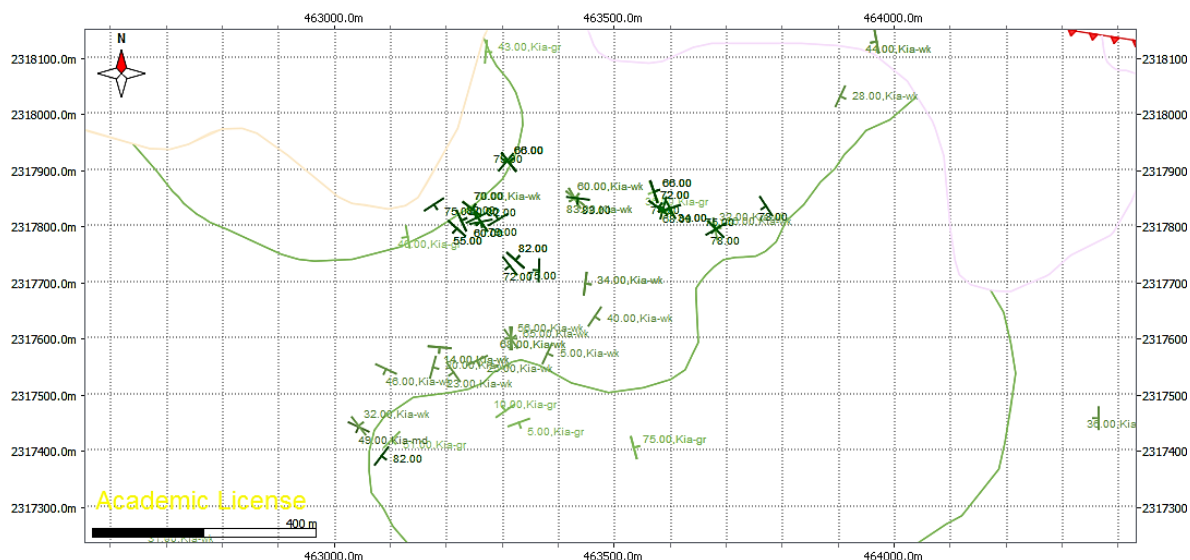


Figura V-4. Imagen de Move con un acercamiento para observar los símbolos de echados colocados en cada lugar según su posición de estratos y fracturas.

Esos puntos sirvieron como referencia para dibujar la traza de las fracturas (ver figura V-5), así que, a partir del punto se digitalizaron líneas alargadas con la extensión que fue medida en campo; había algunas muy pequeñas de dos a 5 metros, mientras que otras superan los 15 metros de longitud. En algunos casos las fracturas no se colocaron para no tener exceso de información se viera más estético el modelo, pero éstas se repetían paralelas con espaciamiento de 40 centímetros hasta 3 metros.

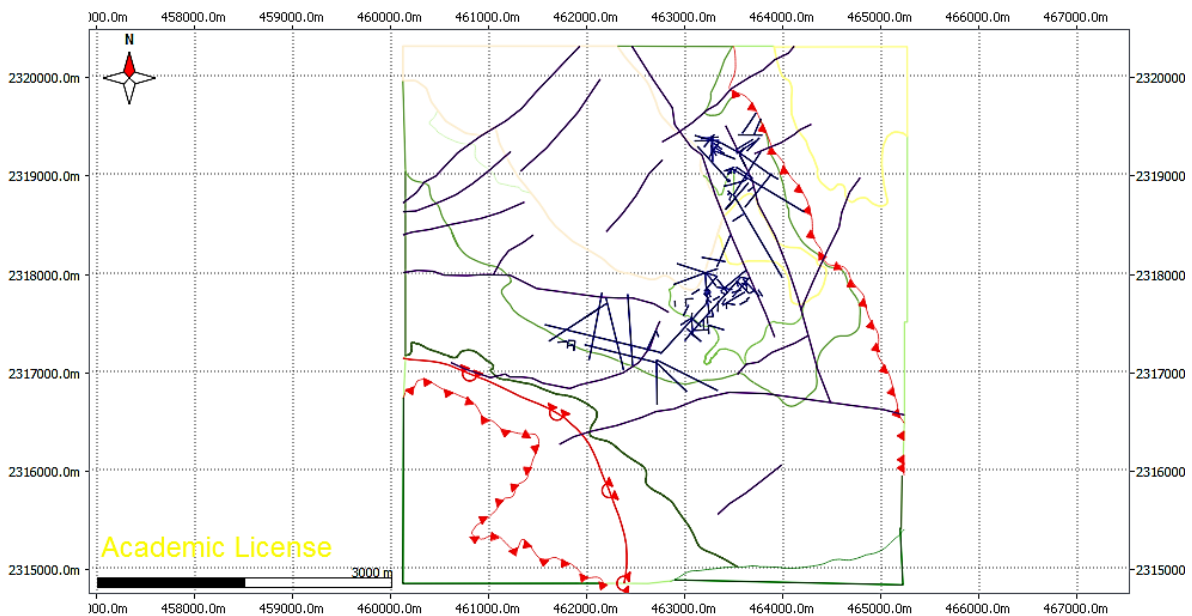


Figura V-5. Imagen de Move donde se indican las fracturas dibujadas en el mapa base; están las de fotogeología en color morado, las que se midieron en campo son de color azul marino y las direcciones de los “guatos” en color café.

Algunos de los lineamientos coincidían en rumbo, por lo que se unieron para crear fracturas continuas y de mayor tamaño, dejando las que se consideraron verticales de la misma forma. Con las nubes de puntos, se trazaron líneas de color café para marcar la dirección de los “guatos” para comprobar, posteriormente, si tienen que ver con el fracturamiento.

3. Secciones a partir del mapa obtenido:

Se utiliza la porción de la sección E-E' que está marcada en la carta geológica original, ya que se tiene como base para aquellos datos que no fueron comprobados en campo, complementándola con los contactos encontrados en el mapa geológico, nombrándola como la sección A-A'. Esta parte funciona igual que haciéndolo a mano; se coloca la intersección con la superficie del modelo digital de elevación (MDE) y se añaden los puntos de las intersecciones con el MDE, de fondo está la imagen de la parte de la sección correspondiente a esta parte.

Al trazar las líneas de referencia de la sección se detectan algunos desajustes con la original y las intersecciones marcadas, por lo que se ajustan con criterio geométrico. En estas secciones se colocan las cimas de las formaciones. Los contactos de las formaciones inferiores a la Cabalgadura de Jiliapan se ponen completamente paralelas y con echados verdaderos al suroeste correspondientes a la sección E-E' original, al no saber en qué disposición se encuentran, pero sí se conservan los espesores asignados inicialmente para la columna estratigráfica local y sin deformación.

En los contactos que pertenecen a la mina se realizó un análisis de facies y de los plegamientos observados en campo y se definieron algunas deformaciones suaves para esta área, aproximando la forma de depósito y los pegamientos de las capas inferiores que no afloran. Esto se logró generando estratos que respetaron los espesores asignados, así el modelo se vuelve más geométrico y aproximado a la realidad.

Teniendo bien definido el acomodo de las capas, se continúa con las fracturas, siguiendo el siguiente criterio: las fracturas de color morado se ponen verticales, porque son inferidas y no se encontró algún rasgo en campo que mostrara dirección de echado o desplazamientos para asignarlas como fallas. Las de color azul respetan el echado que tienen en el dato y se trazan con dicho ángulo,

cuidando las que sean de echado aparente. Y las fallas inversas se trazan con el ángulo definido en la carta de 24° , haciendo el corte de las fracturas sobre el plano de la Cabalgadura de Jiliapan (ver figura V-6). La primera sección creada sirve para generar otras secciones que servirán para la creación de las superficies.

Se realizan las secciones B-B', C-C' y D-D' para realizar las superficies con los datos asignados en cada intersección con el modelo digital de elevación tomando en cuenta todos los elementos que sean parte de cada área. Estas secciones son paralelas a la sección A-A' tratando de abarcar todo el mapa para que las superficies lleguen hasta el final.

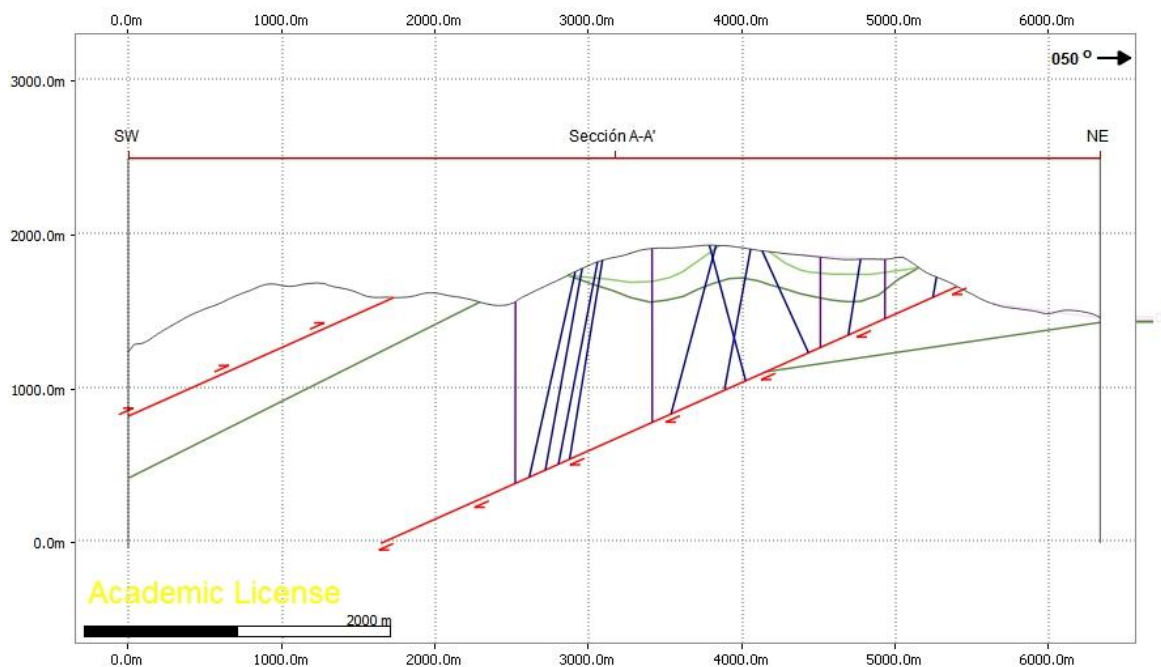


Figura V-6. Imagen de Move en vista de sección A-A', ésta contiene los contactos, fallas inversas y fracturas con sus colores asignados.

4. Creación de las superficies en 3D:

Para estas superficies se plantea que lleguen a cubrir el área completa del modelo digital de elevación, por lo que se utilizan herramientas para extender y cortarlas y que tenga una mejor presentación. Se realizan de las más sencillas a las más complejas, es decir, de las que son planas hasta las que presentan deformaciones, para esto se toman en cuenta datos generales de los estilos de

deformación, ya que los pliegues secundarios provocarían un exceso de información y no apreciaría tanto detalle.

Comenzando las superficies con las cabalgaduras (ver figura V-7) se toman las líneas creadas en las 4 secciones principales, pero se crea una superficie muy arrugada, la cual no es la característica de una falla, debido a que ésta tiene que ser plana, así que se ajustó de la mejor forma posible para respetar tanto el ángulo como la traza original pero, aun así, las trazas de ambas fallas cambiaron un poco con respecto a la original.

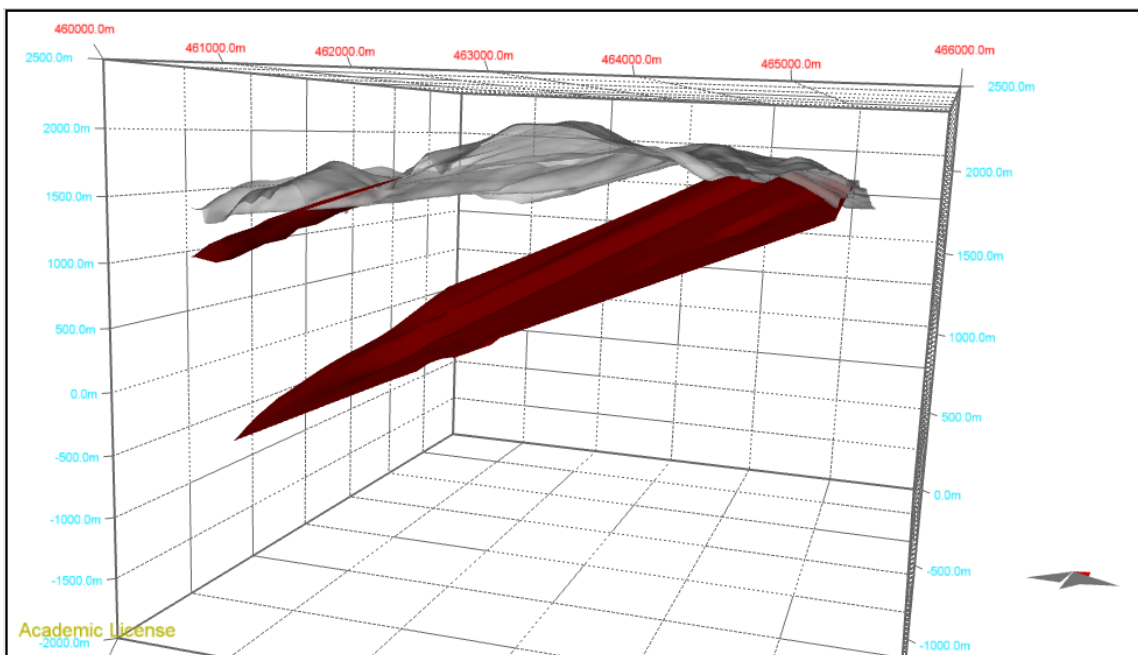


Figura V-7. Imagen de Move donde se observa la intersección de los dos planos de cabalgadura con el modelo digital de elevación.

Continuando con las superficies verticales de las fracturas fotogeológicas (ver figura V-8) y las que fueron medidas en campo (ver figura V-9), para estas últimas se respeta el echado y se trazan, prolongándolas hasta la superficie de la Cabalgadura de Jiliapan, debido a que es en ese lugar donde ocurre el corte litológico y estas fracturas son consecuencia de los esfuerzos generados sobre los estratos, es por eso que no atraviesan esa superficie.

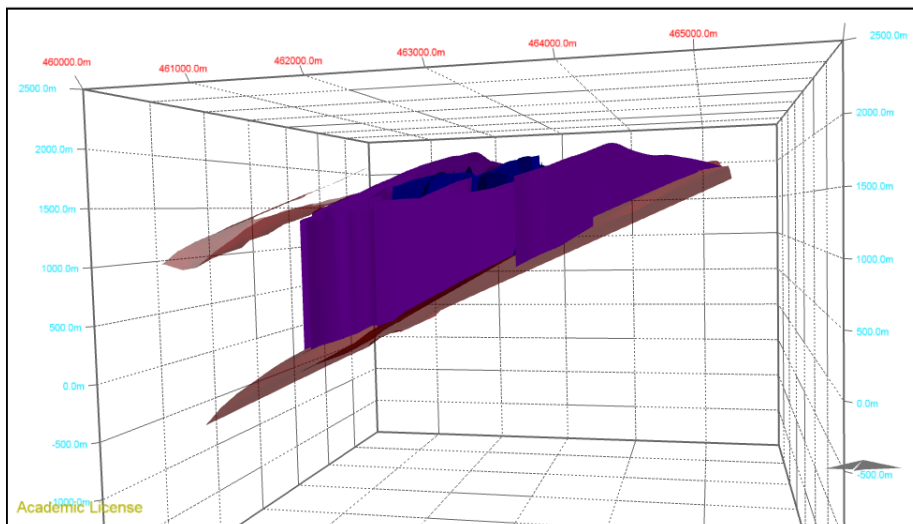


Figura V-8. Imagen de Move donde se muestran de perfil, en una vista 3D, las fracturas de color morado terminando en la superficie de la Cabalgadura de Jiliapan.

Estas fracturas son superficies irregulares, en algunos casos y en otros se dejaron planas, al estar creándolas se perdía la forma del modelo, por lo que también se depuró la información de las que fueran paralelas y repetitivas para que pudieran apreciarse mejor. Para crear superficies de fracturas medidas en campo se requieren más secciones de referencia para crear superficies precisas con diferente ángulo por lo que fue necesario crear doce secciones más en diferentes direcciones y tamaños.

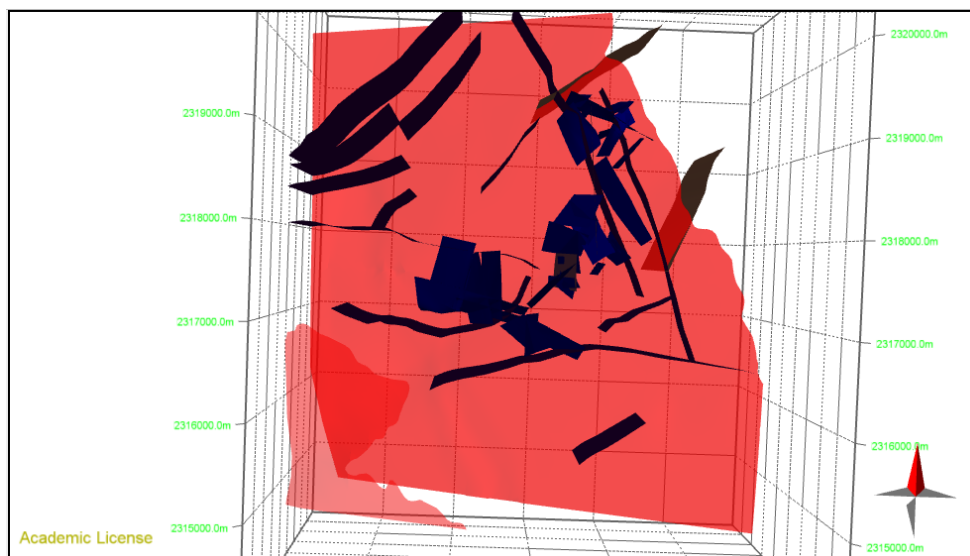


Figura V-9. Imagen de Move en vista 3D desde arriba, donde se observan las fracturas fotogeológicas y las tomadas en campo, algunas tienen inclinación y otras son verticales.

Con las nuevas trazas de las fallas la posición de los contactos varía, por lo que corrige el mapa base y se ajustan todos los contactos para que cierren bien. Por lo tanto se revisa cada sección de la A-A' a la D-D' para definir bien intersecciones y poner bien las capas para que coincidan para generar las superficies. Revisando cada una de las secciones, la ubicación de algunos contactos cambió, por lo que se modifican las secciones siguiendo el criterio de la conservación de los espesores.

Una vez comprobado esto, se realizan las superficies, de la más antigua a la más reciente, colocando como superficie la cima de cada una (*ver figuras de la V-10 a la V-13*), cada una representa diferente complejidad y se tiene mucho cuidado al crearlas para que se conserve el estilo de deformación, así que se van modificando nuevamente los espesores y hay que corregir las secciones, después de cada superficie, hasta llegar al final donde éstas intersectan con el modelo digital de elevación y, es así, donde afloran en campo.

Las superficies se comenzaron a hacer desde la más antigua a la más reciente, debido a que los cortes que se le hacen a cada contacto tienen que ver con la modificación por intemperismo más reciente.

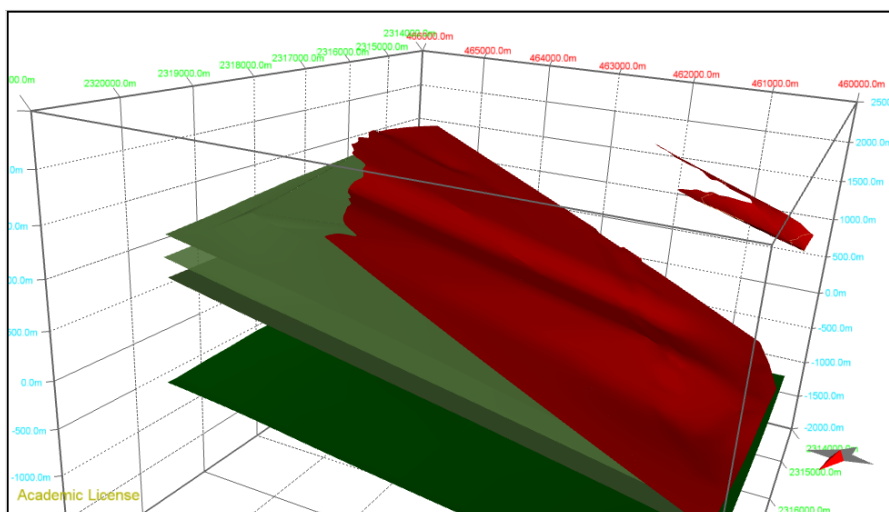


Figura V-10. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr y Kia-wk por debajo de la cabalgadura de Jiliapan. Estas superficies se colocaron paralelas y sin deformación, tal como se indica en la sección E-E' de la carta geológica de Carrillo (1982). Los colores de las unidades se respetan con respecto a los originales, por lo que todas las unidades del Cretácico varían en tonalidades de verde.

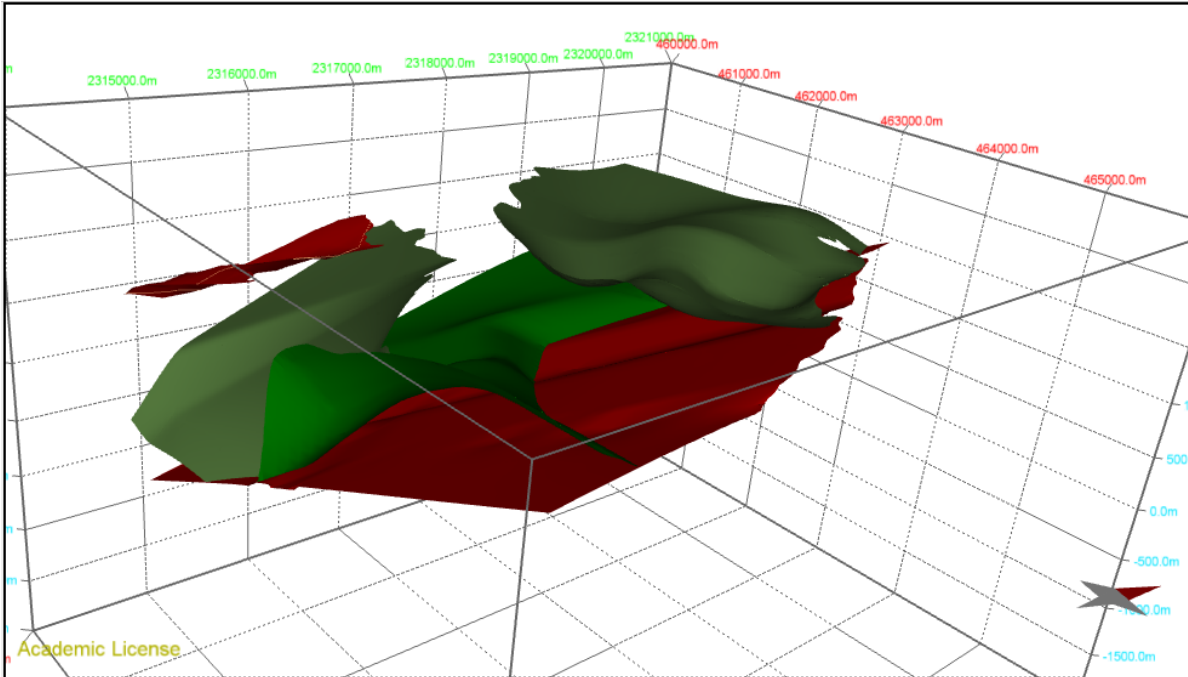


Figura V-11. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit y Kia-md por encima de la Cabalgadura de Jiliapan (de color rojo), las cuales se encuentran ligeramente plegadas por esfuerzos compresivos suroeste-noreste.

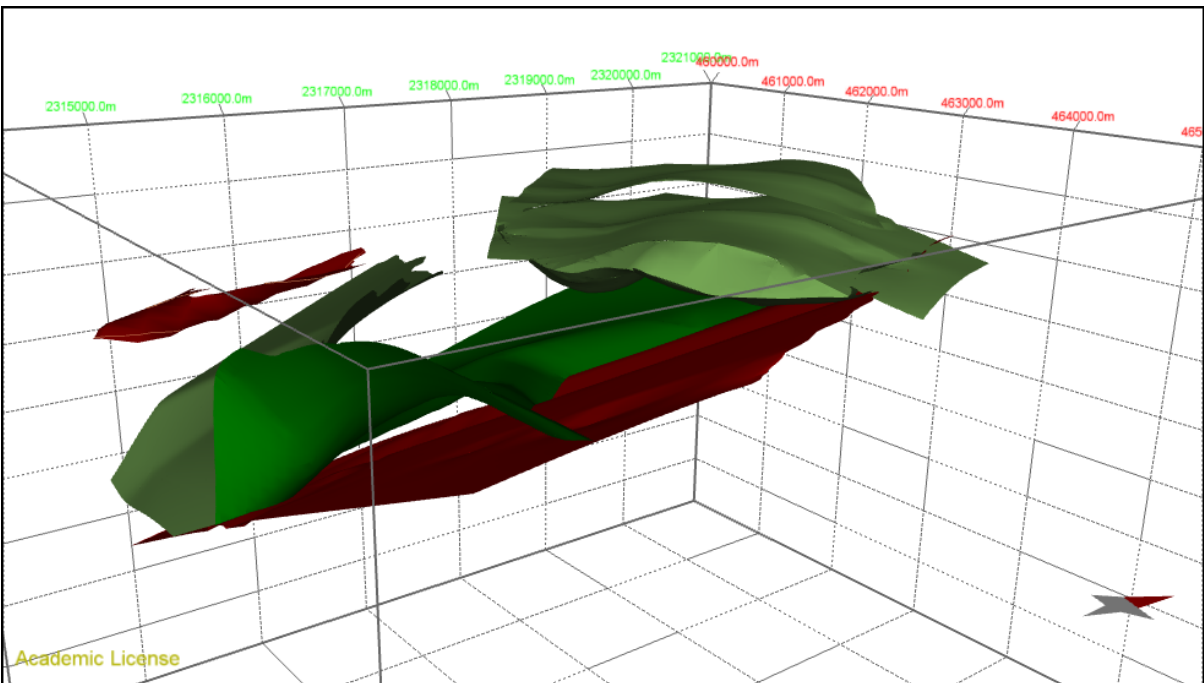


Figura V-12. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md y Kia-gr (sin cortar con su intersección a la superficie) por encima de la Cabalgadura de Jiliapan. Este último pliegue incluido es suave y buza al sureste y por encima de éste se encuentra la unidad Kia-wk, ligeramente plegada.

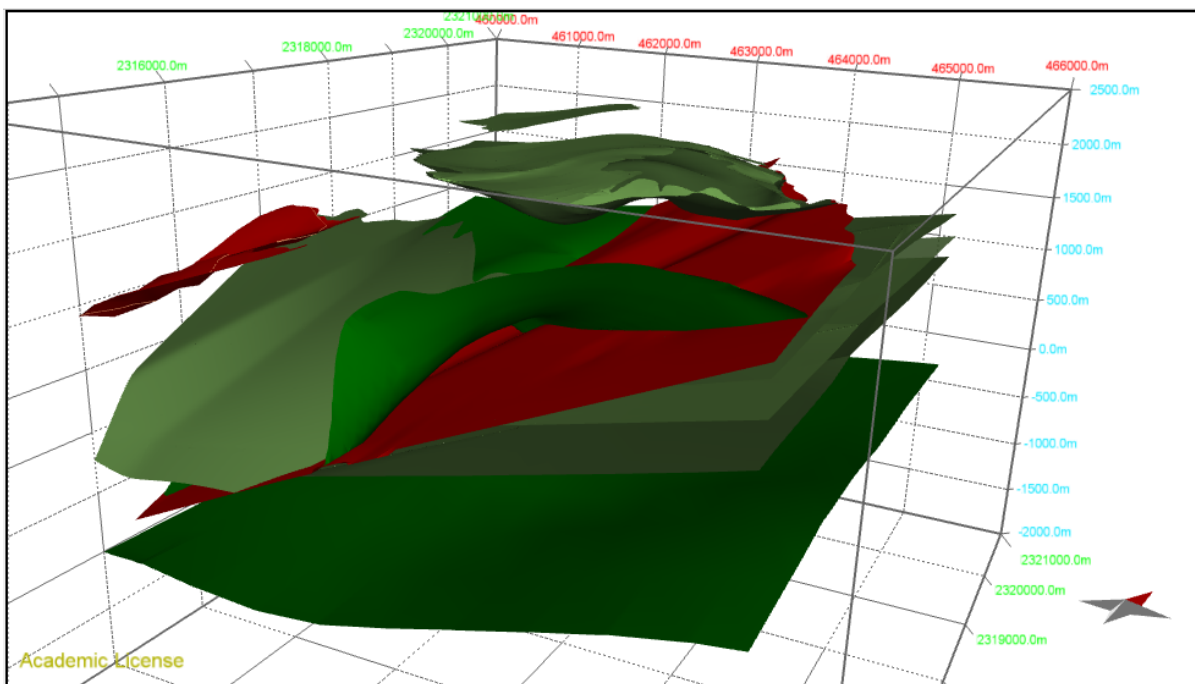


Figura V-13. Imagen de Move donde se observan las cimas de las superficies de las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr, Kia-wk por encima y por debajo de la cabalgadura de Jiliapan, En esta imagen las superficies ya están cortadas con las intersecciones con el modelo de elevación digital, es decir, quedan las capas que afloran en la superficie.

Para algunas de las superficies se discriminan ciertas líneas de las secciones, debido a que fueron deducidas con los espesores asignados en la estratigrafía, por lo que se acomodaron como mejor quedaban las superficies. Para esto también se revisan las secciones continuamente y se modificaban con base en el comportamiento de la roca, por ejemplo, se modificó más en las grainstones debido a que su espesor es mayor y su deformación disminuye.

Al crear los depósitos recientes se cortar el modelo digital de elevación con la herramienta de líneas y quedan como capas superficiales que tapan las unidades más antiguas. Por lo tanto, al terminarlas todas, se vuelven a modificar las posiciones de los contactos y queda un nuevo mapa geológico (ver figuras V-14 a la V-16), eso sucede porque la escala que se maneja es mayor comparada a la de la carta geológica de Carrillo (1982), en este mapa se tiene mayor detalle.

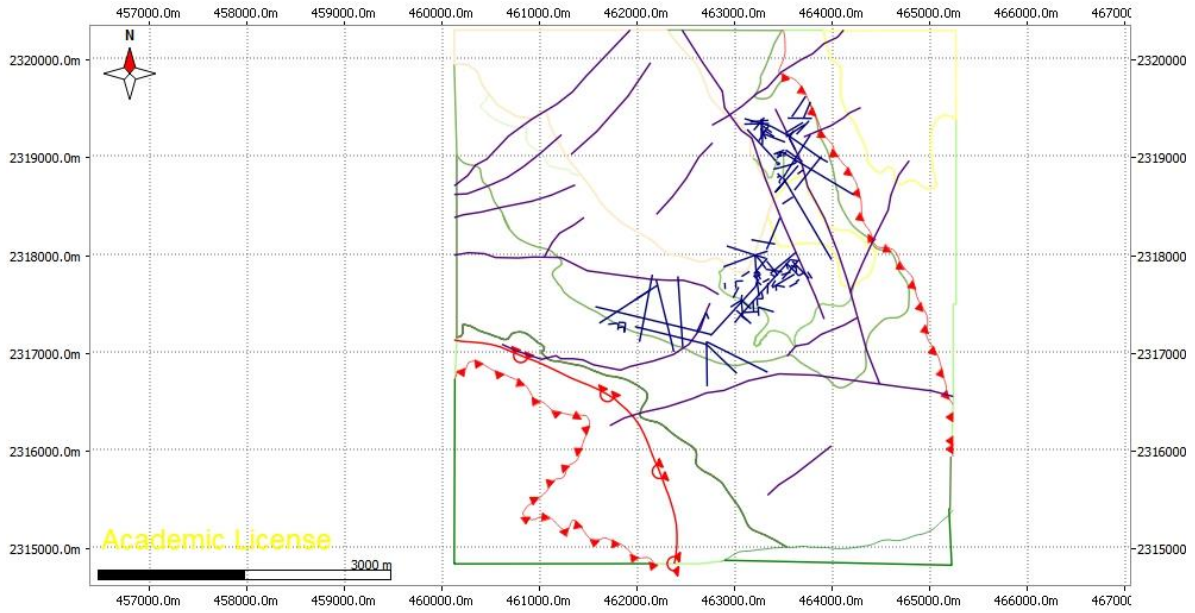


Figura V-14. Imagen de Move que muestra los nuevos contactos obtenidos a partir de las superficies creadas con el software.

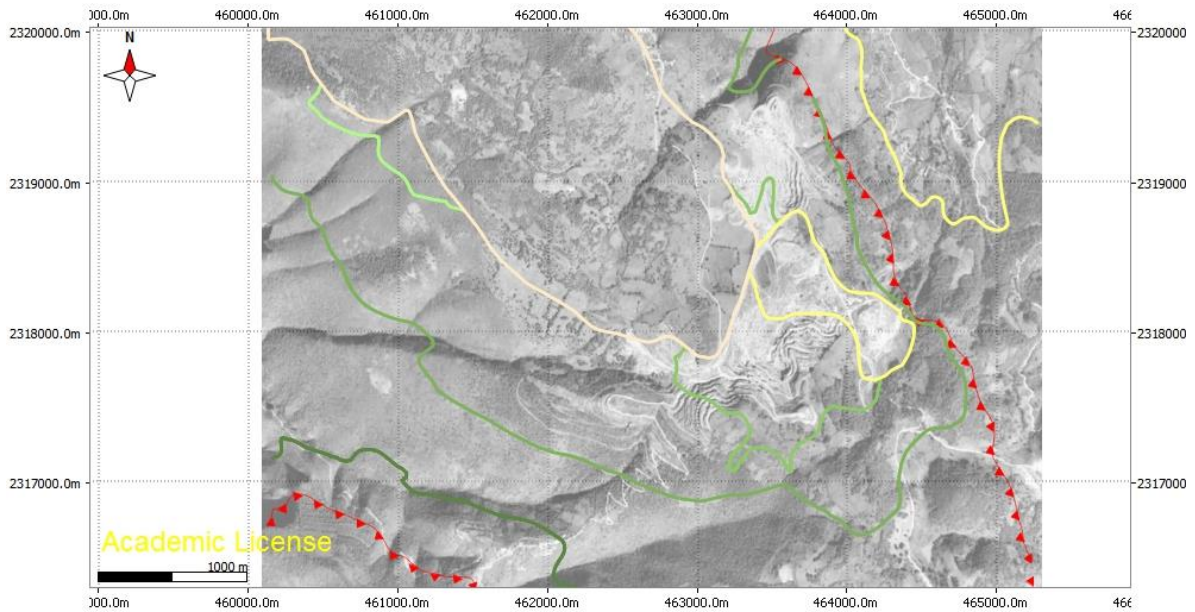


Figura V-15. Imagen de Move que muestra los contactos sobre la foto aérea donde se puede identificar la mina la Negra.

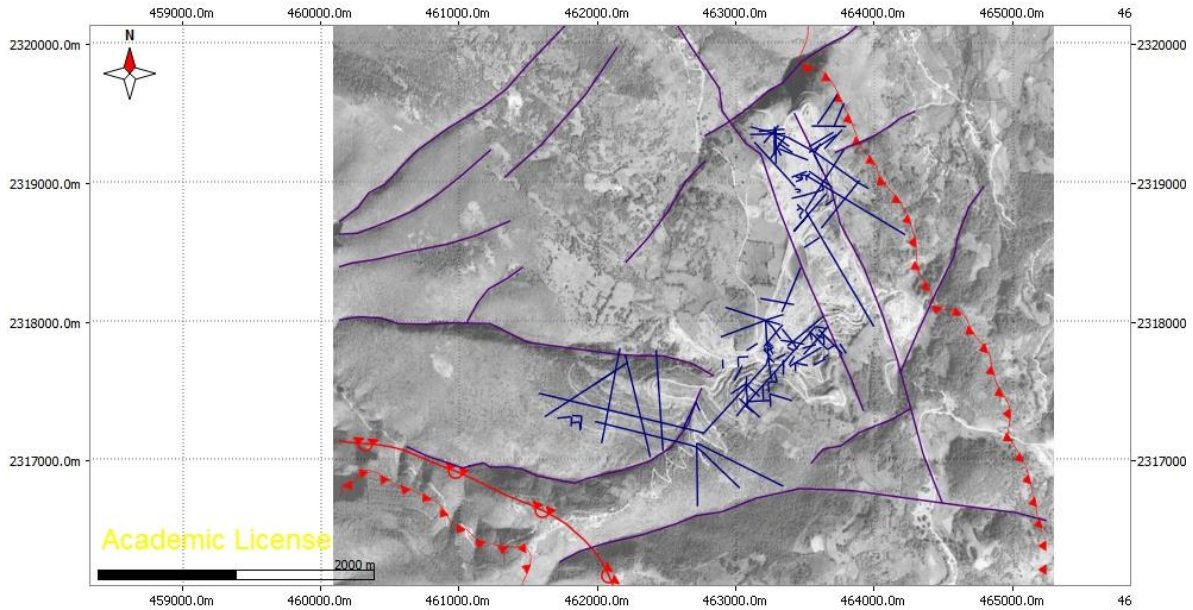


Figura V-16. Imagen que muestra las fracturas de fotogeología y las que se midieron en campo sobre la foto aérea.

5.2. Modelo 3D Geológico Estructural

A continuación, se describe el modelo geológico obtenido con todas sus superficies, dando gran detalle al mapa en 2D (ver figura V-17 y V-18). Los contactos marcados en el primer mapa que sirvieron como base para el modelo no se deberían descartar del todo, debido a que fueron delimitados, principalmente la unidad grainstone, con los cortes que ya se tenían en la mina. Por lo tanto, hay que aclarar que este modelo fue realizado como si no hubiera cortes mineros, empezando con el modelo digital de elevación, pues conserva una topografía sin cortes.

Por tal motivo los contactos de Kia-gr se ven continuos pero, en realidad, esa unidad ya casi desapareció, porque es la más rica en fósiles y es donde la fosforita concentra mayor cantidad, dejando en las orillas a la unidad Kia-wk que, aunque está fracturada de igual forma, es donde los “guatos” son más estrechos.

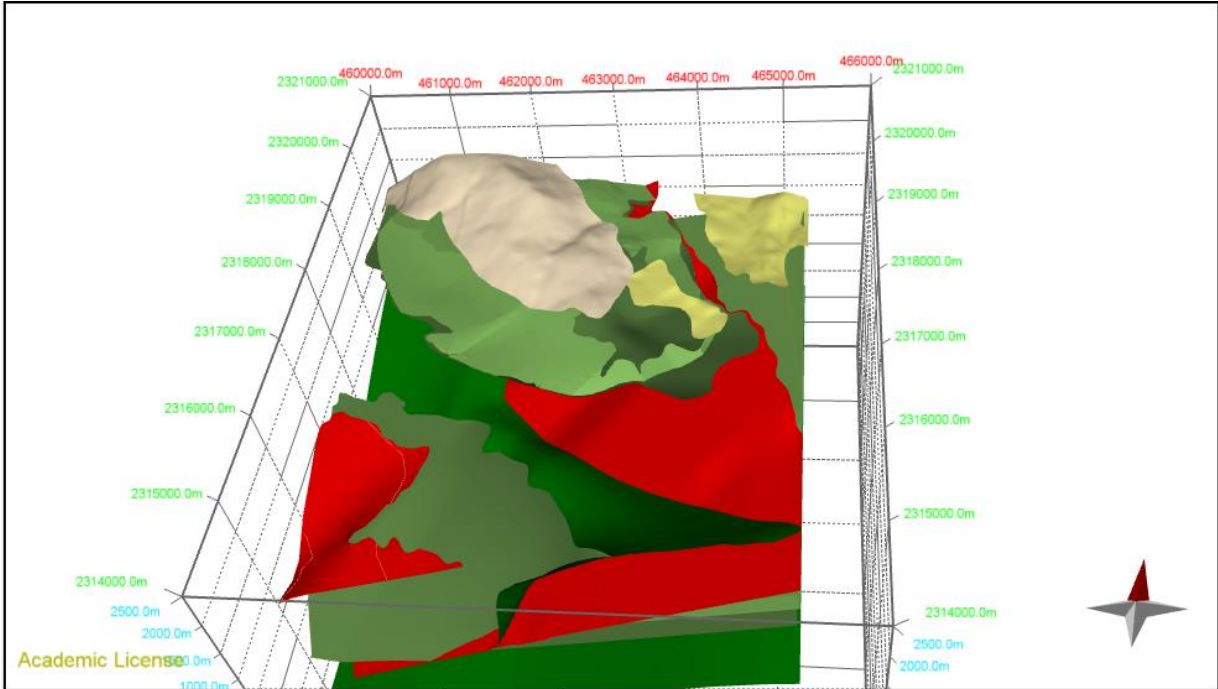


Figura V-17. Imagen del modelo con las unidades Kit, Kia-md, Kia-gr, Kia-wk, Da y Tr con las 2 cabalgaduras. Aunque la unidad Kss no aparece como superficie es porque aflora y su cima no es posible colocarla porque ya se erosionó y dejó un autóctono.

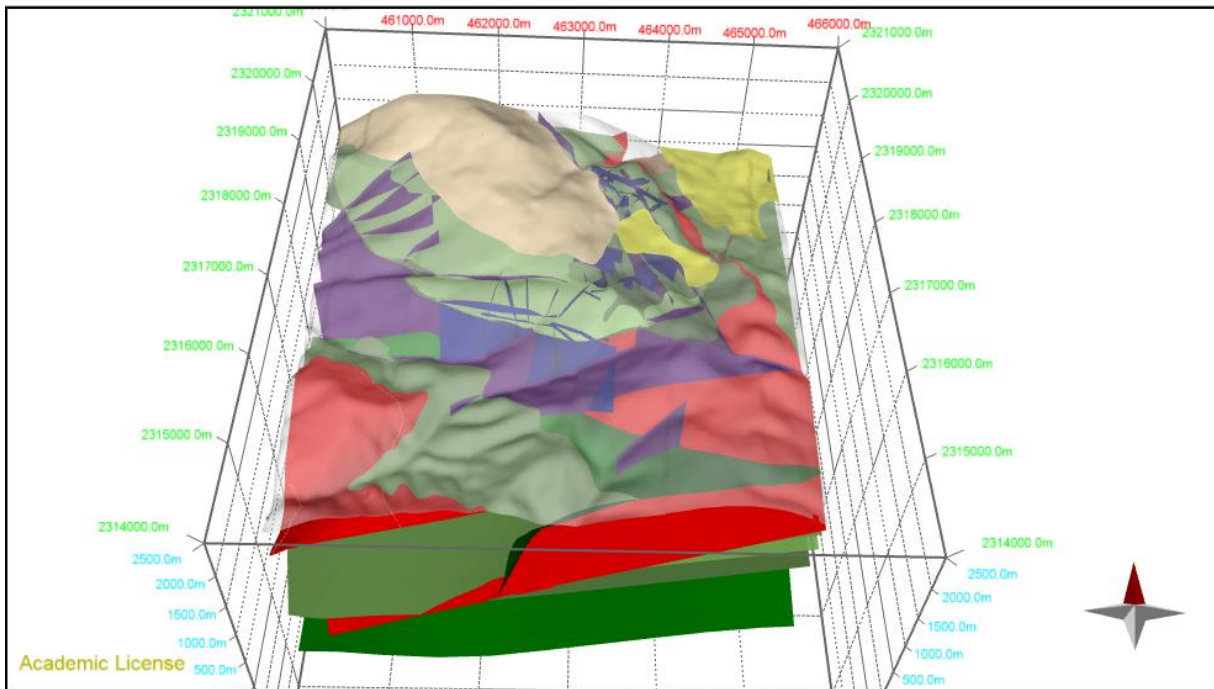


Figura V-18. Imagen del modelo en 3D. La capa superior, casi transparente, es el modelo digital de elevación, las unidades aparecen con sus respectivos colores y las fracturas aparecen cortando algunas de las unidades.

Se puede ver el comportamiento de las rocas ante los esfuerzos, más no se pueden observar las formas de cavidades o “guatos”, debido a que son formas irregulares que moldea el agua, siguiendo la tendencia del fracturamiento. Este modelo muestra cortes a través de las unidades, no las formas específicas del carst (ver figura V-19).

Para poder realizar descripciones sobre el origen del yacimiento se crea un nuevo mapa para interpretar la secuencia de eventos sucedidos, por lo que en las figuras V-20 y V-21 se muestran el mapa y la sección que sirvieron para realizar el mapa geológico de la mina del capítulo 2 (ver figura II-16), realizado en ArcGIS 10.1, donde se le pone más detalle a los contactos y los colores para que se pueda entender mejor.

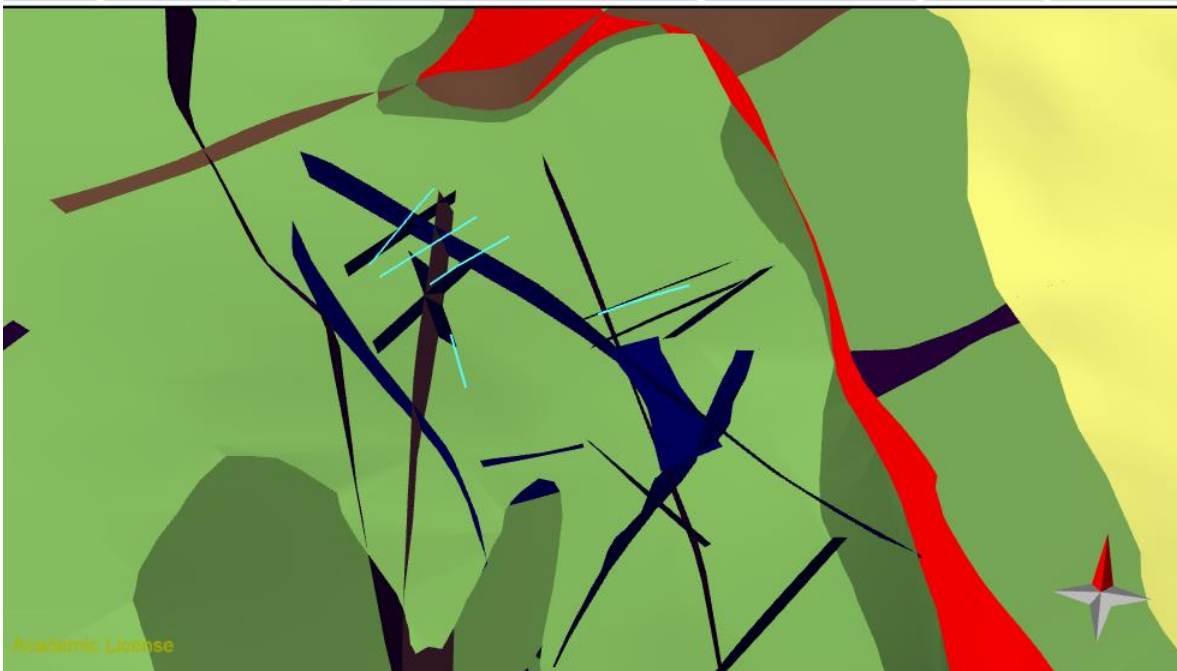


Figura V-19. Acercamiento al área 2 de la mina. Se observa la unidad Kia-gr que está siendo cortada por las fracturas en color azul marino, éstas, a su vez, se cruzan entre sí y se forman paredes. En color azul más claro se ven unas líneas rectas, las cuales fueron las direcciones de los “guatos” generadas con nubes de puntos.

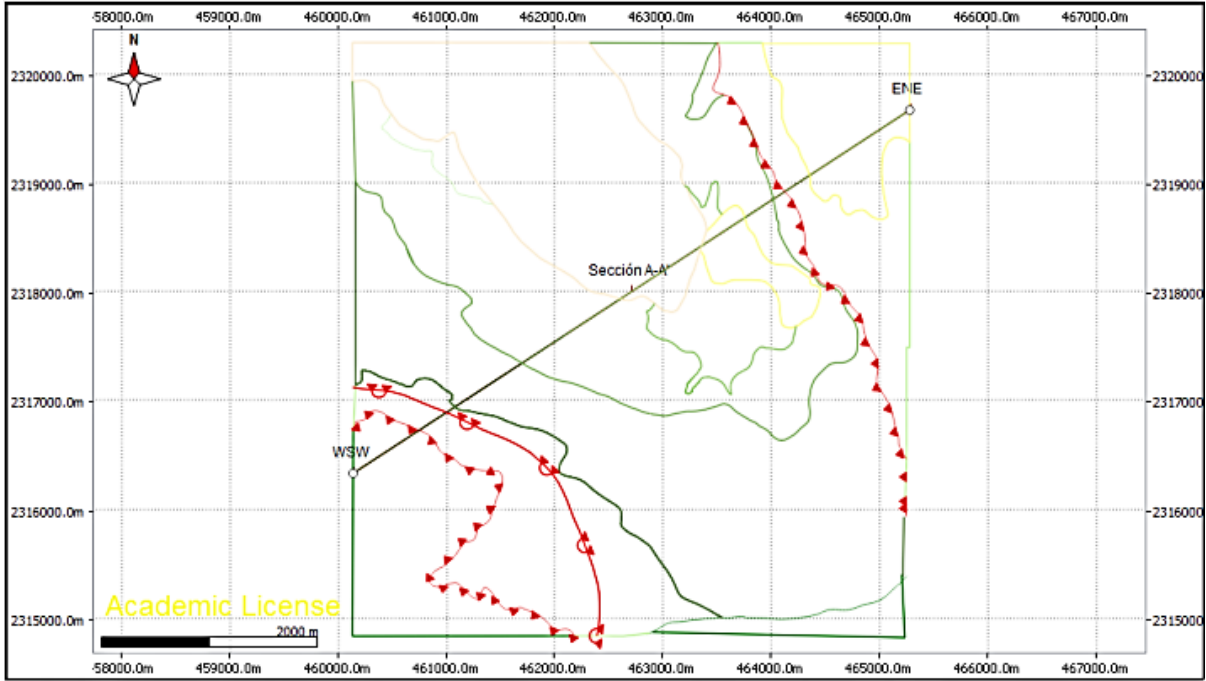


Figura V-20. Mapa de la mina con la sección elegida para obtener una sección adecuada y representativa del área.

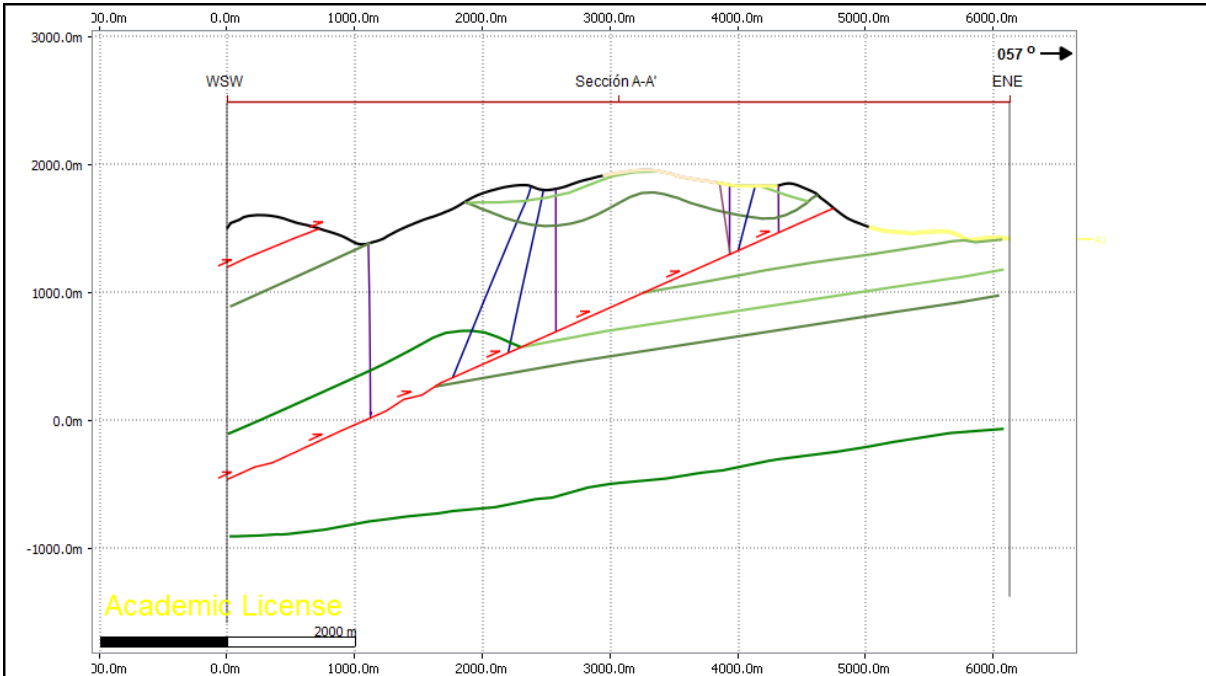


Figura V-21. Vista de la sección A-A' nueva, con los contactos corregidos y trazas de falla que respetan la geometría de los planos y de los estratos.

5.3. Comparación de este modelo con otros ambientes de formación de la fosforita

A continuación, se explica el origen del yacimiento de fosforita de la mina La Negra, explicando únicamente los procesos ocurridos:

- A. Depósito de la plataforma carbonatada Valles-San Luis Potosí, comenzado a formar un arrecife de rudistas, principalmente. Se incluyen dos figuras más con esquemas para ver cómo se estructuró la Formación El Abra; en la figura V-22 se ejemplifica la manera en la que se puede estructurar un arrecife y el de la mina cumple con estas características, compuesto por grainstones en las partes más altas y alrededor bindstones en cambios de facies.

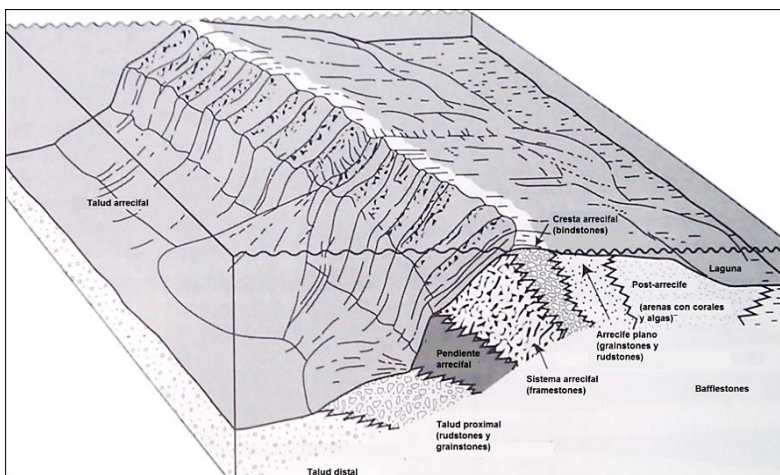


Figura V-22. Esquema de la idealización de un arrecife de coral maduro (Toomey, D.F. *European fossil reef models: Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub. 30, 2006, Fig. 10, p. 23, reprinted by permission of SEPM, Tulsa, Okla. Tomado de Boggs, Principles of sedimentology and stratigraphy, fig. 11.17, pp. 386).*

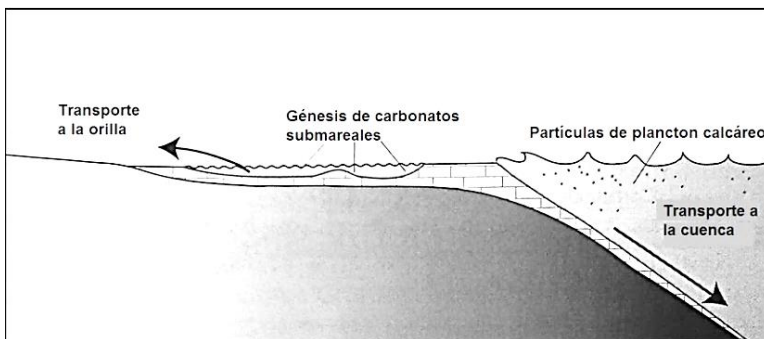


Figura V-23. Áreas de depósito de carbonatos, que se acumulan en profundidades de 30 m en la submareal, este ejemplo es de una plataforma restringida. (Imagen traducida y tomada de Boggs, *Principles of sedimentology and stratigraphy*, 2006, fig. 11.3, pp. 370).

La figura V-23 muestra el esquema de la forma de depósito de carbonatos en plataforma y esa es la que ejemplifica mejor la forma que tomó el área de la mina, es decir, aparecen las facies lagunares y las de arrecife; es decir, la parte de plataforma entre el mar y el área de la génesis de carbonatos submareales es donde se dio lugar al depósito de fosforita.

- B. Primer periodo de formación de fracturas. Posterior a la apertura del Golfo de México, la plataforma se inclina hacia el suroeste y se forman fracturas paralelas en los bordes.
- C. Formación del carst. El agua sigue las partes más débiles de la roca, que son las fracturas, diluyéndola y formando un relieve con formas cársticas.
- D. Depósito de fosfatos. Al estar cambiando el nivel del mar, se generan periodos transgresivos y regresivos, por lo que se depositan restos de organismos ricos en fosfato en las cavidades cársticas disponibles, como es un ambiente reductor, se acumulan gran cantidad de organismos.
- E. Compactación y cementación. Una vez que se da un periodo de estabilidad en la plataforma, las rocas comienzan a litificarse, y en las fracturas que quedaron expuestas cristaliza calcita y espatita. En cuanto a la fosforita, es tan irregular el depósito, que los organismos se acumulan dentro de las cavidades de la caliza que ya está litificada y este mineral no pasa a través de la compactación porque conserva espacios entre organismos depositados, por lo que queda porosa.
- F. Segundo periodo de formación de fracturas. Durante la Orogenia Laramide se generaron pliegues y cabalgaduras, así como familias de pares conjugados de fracturas de cizalla de primer y segundo orden. También se comprobó la existencia de fracturas de un segundo periodo en las láminas delgadas, que posteriormente se volvieron a rellenar de calcita.

- G. Meteorización y transporte. Las unidades más jóvenes (Formación Soyatal) dejan de formar parte de este relieve, dejando expuesta a las rocas de la Formación El Abra con el mineral fosfático, dando lugar a la meteorización mecánica; el apatito no es muy resistente a este transporte así que, los fragmentos transportados, van desgastándose hasta formar peloides fosfáticos o arenas con componentes fosfáticos, contaminado con arcillas (por lo que quedan varios tonos: marón, ocre, rojizo, gris o, en algunos casos, queda el núcleo de la roca fosfática original), este es transportado a las nuevas oquedades existentes, también dentro de los pliegues o cubriendo la fosforita de color gris oscuro.
- H. Formación de suelo. Por último se genera suelo (terra rossa) enriquecido con minerales arcillosos y rellenando los espacios sobrantes entre las cavidades.

Como se vio en el capítulo 4, cada depósito o yacimiento tiene su particularidad; cualquier detalle puede cambiar la génesis de las fosforitas, así que el yacimiento más parecido a este entre los que se mencionaron, es el de Perú, por la cantidad de procesos que se presentaron en su ambiente, lo que hizo que el mineral modificara su forma.

Sin embargo, no se puede comparar a ningún depósito de fosforita con otro aunque geográficamente se encuentre cerca, porque las condiciones cambian y eso nos da, inclusive, un contenido fosfático diferente. Son distintos en tiempo geológico, cuestiones estructurales, composición química, ambiente de formación, origen, tiempo de precipitación, localización geográfica, clima, temperatura, composición del agua, biodisponibilidad, tiempo de depósito, cada una de estas variables puede cambiar por completo la morfología del depósito.

Capítulo 6

Yacimiento mineral

6.1. Explotación y tratamiento de la fosforita

6.2. Uso de la fosforita

En este capítulo se describe de manera operativa el método de explotación y tratamiento de la fosforita en la mina La Negra, así como los usos de esta una vez que sale a la venta. Los detalles del subtema 6.1 no son incluidos, debido a que esas son decisiones las toman los Ingenieros en Minas basados en una buena recopilación y análisis de la información geológica, por lo que únicamente se mencionan de manera general (datos obtenidos de Romualdo, contacto directo, 2013).

Comenzando por las partes: se divide en 4 áreas de explotación, dos patios para colocar el mineral (el patio 1 es para dejar secando el mineral por si está húmedo aunque también se colocan los de baja ley, mientras que el patio 2 es para la preparación, es decir, se eliminan la mayor cantidad de rocas que hayan caído durante la extracción), área de cocina, oficina y dormitorios, laboratorio para el análisis de muestras, taller mecánico, área para camiones de carga y terreros para el desecho de caliza y arcillas (*ver figura VI-1*).

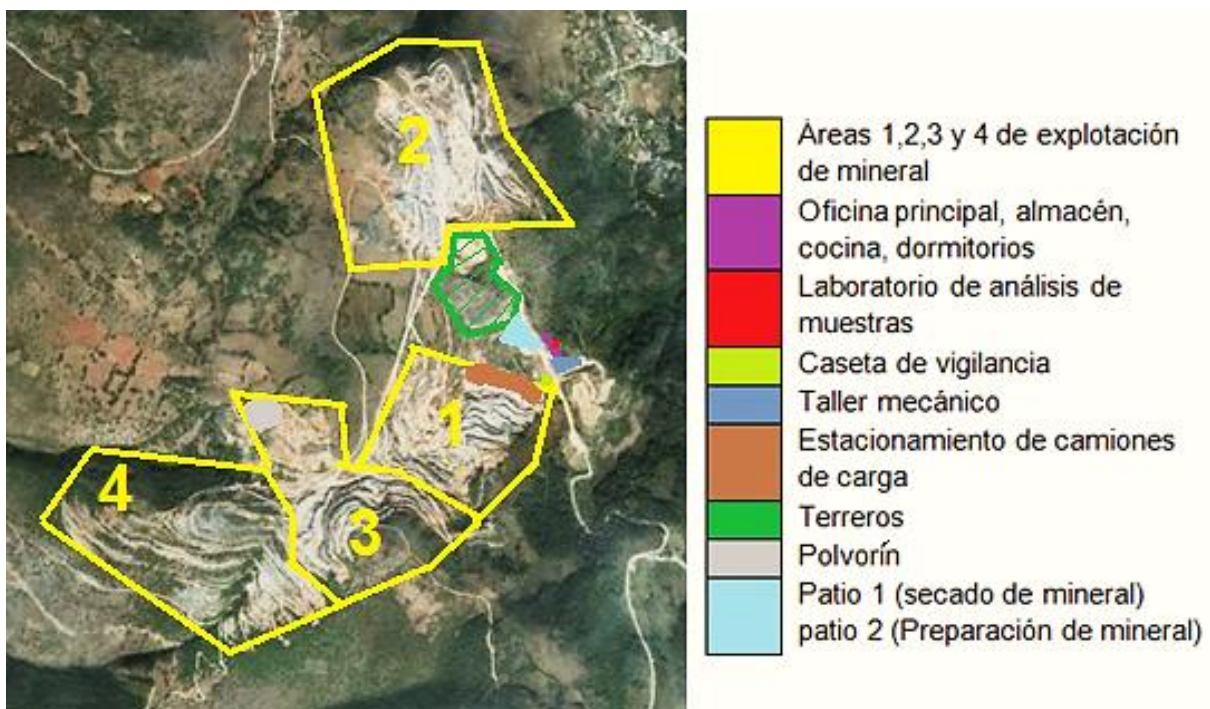


Figura VI-1. Imagen de la mina dividida por áreas según señale cada color. Cabe destacar que se marcaron únicamente las áreas recorridas durante la estancia, no es un mapa con dimensiones reales de cada zona, sólo es para ubicar elementos.

Hay zonas donde hay otras personas que sacan su propio mineral y se lo venden a la empresa, ellos son los contratistas, quienes trabajan dentro de estos límites pero el terreno sigue siendo suyo, invirtiendo con sus máquinas y trabajadores.



Figura VI-2. “Guato” de 2 m de ancho y 1 m de altura, la dirección de las fracturas es S45°W, casi verticales y paralelas, formando las paredes de los “guatos”.

El contenido de arcillas en ciertas áreas se evidencia más que en otras, por lo que también puede ayudar a ubicar el ambiente y cómo ocurrió la contaminación de las arcillas por fósforo, pues aparecen valores de éste en los componentes más fino con leyes muy bajas, pero que indican presencia de fosfatos en toda el área (ver figura VI-3).



Figura VI-3. La figura de la izquierda muestra un “guato” excavado, con las paredes laterales bien marcadas por fracturas. La figura de la derecha muestra el interior del “guato” donde se observa que puede ser la fosforita de distinto origen. La parte gris que tiene aspecto de costra es fosforita negra que se encuentra pegada a la roca (primer origen) y arriba de la pica se ve la fosforita en balín de color gris y ocre, que al lavarse tiene fragmentos de fosforita en roca, además de estar entre las fracturas como relleno.

Esto es un problema tanto para ley del mineral, disminuyéndola, como para la excavación, debido a que la humedad y las lluvias vuelven a la arcilla más plástica dificultando el paso de las máquinas. Por tal motivo las condiciones climáticas afectan al producto que se envía a la mina, además de reducir considerablemente la productividad, debido a la neblina y la lluvia, por lo que puede generar accidentes con pérdidas humanas o desgaste de equipos, así como la disminución en las ganancias mensuales de la mina.

Esta parte es la hace complejo el trabajo de selección del mineral en la mina, pues al encontrarse con muchas variedades el tratamiento es diferente y, muchas veces, no se selecciona tan bien en los patios porque quedan algunos fragmentos de caliza entre el mineral, por lo que se separan en algunas variedad según el color y su contenido de fosfatos como se indica en la tabla VI-a. Debido a la variación de las leyes del mineral entre una variedad y otra, al ser tratada se combina para mejorar la calidad y cumplir con el porcentaje indicado para su venta.

Color	% de P ₂ O ₅	Descripción
Gris claro	31-32	Roca con fósiles visibles, densidad alta, porosa, con partículas esféricas <1 mm de diámetro.
Gris oscuro (negro)	32-33	Roca con fósiles visibles, densidad baja, muy porosa, parecida a una tufa. Color oscuro y olor muy fuerte por el alto contenido en materia orgánica.
Rojiza	28-29	Peloides fosfáticos, en material arenoso de grano medio a fino, mal seleccionado. En algunas ocasiones está entre arcillas, bajando su ley. Este color puede darse por su contenido en hierro.
Ocre (amarillo)	28-29	Peloides fosfáticos en arenas de grano fino a medio.
Marrón	29-30	Peloides fosfáticos que, una vez lavados en la planta, contienen pequeños fragmentos de roca fosfática subredondeada en el centro y la cubierta es el material rojizo con fosfatos.
Gris claro	27	Arenas finas de fosfato sin oxidar.

Tabla VI-a. Clasificación de las fosforitas existentes en la mina según su contenido de P₂O₅. La variación del contenido de fosfato entre cada tipo de fosforita depende de las impurezas que contiene.

6.1. Explotación y tratamiento de la fosforita

En la mina La Negra se cuenta, aproximadamente, con 50 trabajadores, entre perforistas, operadores, ayudantes en general, mecánicos, el encargado de la mina, ingenieros (Geomático, Minas y Metalurgia, Geología, Químico) y se tienen en funcionamiento los siguientes equipos: excavadoras de 1.4 m³ y de 1.2 m³ de capacidad, retroexcavadora de 1.2 m³ de capacidad del cucharón, tractores, trascabo de 2.8 m³, cargador frontal, 4 camiones Terex de capacidad de caja de 13.8 m³, cargadores sobre oruga, compresores, 3 perforadoras neumáticas, entre otros.

Comenzado con la barrenación en las áreas para fracturar más la roca y dejar expuesto el mineral, que se rezaga. Siguiendo con el cargado y la voladura que es realizado manualmente una vez por semana, dependiendo de las condiciones climáticas y el material se acarrea con excavadoras para estabilizar el terreno y amacizar zonas. Dependiendo del área y de la variedad, la fosforita es extraída con pico y pala, es por eso que algunas de las fotografías de los “guatos” muestran las paredes limpias o con algunas capas de fosforita.

Posteriormente, se lleva a los patios de secado, donde se seleccionan los fragmentos de roca más grandes, se separan y se deja secando el mineral si está húmedo, para después cargar los camiones y llevarlos a la planta, únicamente las que tienen valores superiores al 28% de fosfato que son analizados por muestreo en el laboratorio de la mina

En la planta, localizada en Zimapán, se comienza con el tratamiento de la fosforita, que consiste en los siguientes pasos:

- 1) Materia prima: son las funciones de almacenamiento y alimentación de materias primas y consta de un depósito de roca molida, un tanque de almacenamiento de ácido fosfórico y un tanque de recuperación de efluente para alimentar agua al proceso de granulación.

2) Granulación: cumple con las funciones de acidulación y granulación que se realizan en el tambor rotatorio granulador.

3) Lavado: incluye las funciones de lavado de gases y polvos provenientes del proceso y está formada por dos lavadores del tipo Venturi-Torre Ciclónica, un tanque de recirculación de licor de lavado, un tanque sumidero, bombas y ventiladores.

4) Secado: se incluyen las funciones de combustión de gas natural y secado del producto y está formada por un horno, un secador tipo tambor rotatorio y un ciclón para abatimiento de polvo.

5) Clasificación: incluye el cribado, molienda, transporte de sólidos, captación de polvos y control de reciclo. Está formada por una criba de doble tamiz vibrante, un molino de cadenas, dos elevadores, un transportador de cinta, un ciclón y un dosificador tipo desviador.

6) Productos: Fosforita mayor al 30% de fosfatos (59344.77 toneladas en el año 2012) con la granulometría y humedad exacta, producto a granel de 28 a 29.9% de fosfato (24761.21 toneladas en el año 2012) que se procesa para que aumente el contenido de pentóxido, finos y jales resultado del lavado donde el contenido de fosfato decrece hasta un 24%.

6.2. Uso de la fosforita

El fósforo es el nutriente vegetal más importante en la agricultura mexicana tanto por la frecuencia de su deficiencia en los terrenos agrícolas, como por los volúmenes de fertilizantes fosfatados que se emplean anualmente, los cuales rebasan las 400.000 toneladas de P_2O_5 . Los fertilizantes fosfatados más usuales en México son los superfosfatos simple y triple y el fosfato diamónico.

Las fosforitas son de gran utilidad para el uso de fertilizantes, principalmente, aunque también se encuentran relacionados estos depósitos con los de hidrocarburos o con los de uranio. Dependiendo de su pureza o contenido en fósforo es como se puede utilizar en la industria, es decir, entre más concentrado y puro sea, se podrá usar directamente, dependiendo de la solubilidad en agua, la cual está relacionada con su mineralogía y sus características texturales.

Así mismo puede ser tratada con ácido sulfúrico y agua para producir ácido fosfórico el cual es materia prima para la producción de productos industriales para medicinas, detergentes, charcutería, chicles, insecticidas, explosivos, textiles, levaduras, tratamientos de agua, cremas dentales, dispersante, lodos para perforación de terrenos; o puede ser tratado con urea para producir urea fosfato el cual puede ser usado como fertilizante o en alimentación animal; o ser combinado con amoníaco para la producción de fosfato diamónico y fosfato especial como fuentes fosfatadas de fertilizantes de alta solubilidad.

La política actual de eliminación de subsidios y el alto costo del dinero, aunado al poco apoyo a las actividades agrícolas y la mayor tendencia a la globalización, hacen que las perspectivas de incremento en la producción de roca fosfórica y fertilizantes fosfatados en México no sean muy alentadoras, a pesar de disponerse de reservas de roca fosfórica nacional y de una alta capacidad instalada para la producción de fertilizantes fosfatados.

Los principales productores de fosfatos a nivel mundial son Marruecos, Estados Unidos y China, siendo el primer país mencionado un proveedor importante para México. Fosforita de México, de Minerales Industriales S.A. de C.V. produce mensualmente 6000 toneladas de mineral, es decir, por semana se obtienen de la mina, se procesan y se venden 1500 toneladas, con un precio de venta de \$1000.00/ton (para el año 2013).

Capítulo 7

Conclusiones y
Recomendaciones

En este trabajo fue empleado el trabajo de campo y de gabinete a detalle, para la recopilación de la información y su comprobación en la mina. Es importante la combinación de técnicas y herramientas en el trabajo geológico, ya que la fotogeología y la cartografía siempre serán la base de cualquier estudio especializado, requiriendo del apoyo de software que procese los datos para obtener mejores resultados, que si se utilizara únicamente la cartografía.

Los datos obtenidos en campo sirvieron para la realización de un modelo tridimensional, en el cuál se identifican las intersecciones entre las formaciones de roca y las fracturas, tanto fotogeológicas como las medidas en campo; las intersecciones indican puntos que forman una cavidad cárstica o “guato”, por lo tanto, son las zonas en donde hay mayor probabilidad de encontrar la fosforita.

La identificación de la estratigrafía fue de gran ayuda para generar el modelo, debido a que los espesores de las unidades tipo complementaron la información faltante del área; con esto se pudieron obtener las superficies adecuadas para cada unidad. Podría darse más detalle en este sentido si se realizara la petrografía de varios puntos de la mina, en donde se podrían tener con exactitud la clasificación de las calizas para hacer una identificación completa de facies, aunque esto no sería útil para el trabajo minero.

Con el modelo tridimensional creado con el software Move y la información recopilada del área de estudio se determinó el ambiente de formación de la fosforita; esto no sólo fue útil para conocer su origen, sino también para reconocer la génesis del mineral y las condiciones paleoambientales y geológicas que dominaron en el área durante el Cretácico. Por lo tanto la fosforita se formó en un ambiente arrecifal, dentro de la plataforma activa El Abra, la cual pasó a través de dos procesos de deformación que dieron forma al carst.

Las fracturas fueron las responsables de la formación del carst, ya que estas reacciones se llevaron a cabo más fácilmente a través de los espacios fracturados que si la roca hubiera estado completamente sana. Esto aceleró el proceso de

carstificación y dio tiempo para que, en las cavidades, se depositaran gran cantidad de organismos ricos en fosfatos.

Con el modelo se observó que las fracturas sí presentan tendencias con respecto a los esfuerzos aplicados sobre estas formaciones pues, tanto en los cruces, como en las intersecciones se definían las direcciones hacia donde los “guatos” se hacían más alargados.

Aun faltaría comprobar en campo algunos de los lineamientos marcados en el mapa geológico 1:25,000 con color morado, para ver si se trata de fallas o fracturas, pues eso generaría mayor detalle de los planos y las intersecciones entre todas las discontinuidades del área que puedan exponer depósito del mineral. Al encontrar los indicadores cinemáticos adecuados se podría establecer un mejor control estructural que serviría de guía para la búsqueda del mineral.

Con esta información, es difícil conocer con tanta precisión la forma de la carstificación, porque algunas formas son cónicas o de hongo, dependiendo del área, pero sí es posible seguir las fracturas principales que le dan dirección a la mayoría de las paredes y las fracturas con ángulo menor a 70° son las que provocan el cierre de algunas cavidades en profundidad.

Para establecer con mayor exactitud la composición de los fosfatos de la mina, incluyendo la fosforita en roca o la arenosa, sería útil hacer una difracción de rayos X ya que, en este trabajo de tesis, no se buscaba ese objetivo, pero con el ambiente de formación se propone que el fosfato principal que integra esta fosforita es carbonato-fluorapatito, principal formador autigénico de depósitos sedimentarios.

Por lo tanto, se proponen dos formas de depósito del mineral derivado del mismo origen sedimentario: la primera fue el depósito in situ en las cavidades y la segunda se dio por la meteorización mecánica que le dio formas de peletes fosfáticos generados en un segundo periodo compresivo del área.

Como cada variedad de fosforita presenta formas diferentes y con leyes cercanas, sería bastante útil un análisis de todos los componentes de cada apatito, porque no sólo se tienen fosfatos, sino también se cuenta con sulfuros, óxidos, silicatos y metales que pueden ser los responsables de que la ley del mineral varíe en espacios tan pequeños. No sólo ayudaría a tener los datos precisos para cada variedad de fosforita, sino que ayudarían a comprender con más detalle el origen de cada tipo de fosfato para complementar este modelo.

Un aporte para este trabajo sería que se pudiera realizar un buen estudio de mecánica de rocas, debido a que uno de los aspectos más importantes del yacimiento es la cuestión estructural, donde está directamente el comportamiento de la roca. Si se estudia a detalle se pueden definir, además de los patrones de fracturas, un estudio geotécnico útil para barrenar y realizar excavaciones sin riesgos; la roca estuvo sometida a grandes esfuerzos, por lo que las fracturas de primer y segundo orden se cierran entre sí y pueden llegar a formar cuñas que pueden ocasionar problemas en las detonaciones.

Otro lugar importante que se tendría que revisar es el denominado como “la cueva”, pues la profundidad de esta es desconocida por las personas e incluso no se sabe si se tiene agua ahí; al seguir utilizando explosivos sobre una cueva, cuando no se sabe qué tan estable es, se puede llevar al colapso de la caverna como es común en los relieves cársticos. Además, lo más probable es que se pueda encontrar algún acuífero no explorado que puede servir para el abastecimiento de agua a la mina.

Por todas estas razones es de gran importancia tomar en cuenta el aspecto geotécnico y geológico en una obra minera, no sólo en esta, sino en cualquier tipo de mina, ya sea subterránea o a cielo abierto. El comportamiento mecánico de las rocas nos indica cómo va a responder cierto tipo de roca a los esfuerzos a los que sea sometida, conociendo estas características por un estudio petrográfico a detalle o por los espesores de los estratos que componen a cada unidad litológica.

Esta situación fue la que ayudó a generar unidades más específicas utilizadas en el mapa geológico a detalle y, aunque no se describen como unidades geotécnicas, pueden servir las breves descripciones para corroborar en campo las propiedades físicas y mecánicas de cada unidad litológica propuesta en el mapa sugerido en esta tesis.

Por último, no se menciona en este trabajo algo sobre el origen y la presencia de la fluorita porque no se tienen suficientes muestras directas de afloramiento, sólo de rodados y fue sugerida la realización de un análisis de inclusiones fluidas para conocer sus componentes durante su formación y así determinar su origen preciso.

Referencias citadas

Artículos científicos
Cartas geológicas
Diapositivas
Libros
Mapas
Páginas de internet
Reportes
Tesis

Abed, A. M. and Sadaqah, R. S. (2013). *Enrichment of uranium in the uppermost Al-Hisa Phosphorite Formation, Eshidiyya basin, southern Jordan*. Elsevier, Journal of African Earth Sciences 77, pp. 31-40.

Abdel Fattah, Z. A., Gingras, M. K. and Pemberton, S. G. (2011). *Significance of hypoburrow nodule formation associated with large biogenic sedimentary structures in open-marine bay siliciclastics of the Upper Eocene Birket Qarun Formation, Wadi El-Hitan, Fayum, Egypt*. Elsevier, Sedimentary Geology 233, pp. 11-128.

Alcayde, M. y De Cserna, Z. (1982). *Libro-guía de la excursión geológica a la región de Zimapán: Mapa geológico simplificado de la región de Zimapán-El Doctor, Estados de Hidalgo y Querétaro*. Sociedad Geológica Mexicana, pp. 4-5.

Alonso Zarza, A. (2010). *Petrología sedimentaria. Notas de teoría. 12. Las rocas ferruginosas, fosfáticas y orgánicas*. Reduca (Geología), Serie Petrología sedimentaria, 2 (3), Madrid, pp. 125-134.

Arellano Gil, J. (1988). *Porción Septentrional de la Sierra de Peñón Blanco, Estados de San Luis Potosí y Zacatecas*. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., pp. 28-32.

Aydinalp, C. y Fitz, E. (2009). *Pedogénesis y características de las terras rosas desarrolladas en posición fisiográfica distinta y su clasificación*. Agrociencia 43, pp. 97-105.

Barboza-Gudiño, J.R., Hoppe, M., et al. (2004). *Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 21, núm. 3, pp. 299-319.

Baturin, G.N. (2012). *Formation and evolution of phosphorite grains and nodules on the Namibian shelf, from Recent to Pleistocene*. Society for Sedimentary Geology (SEPM), Marine authigenesis, no. 66, pp. 185-199.

Baturin, G. N. (2012). *Phosphorites of the Sea of Japan*. Pkeiades Publishing, Marine Geology, Oceanology, Vol. 52, no. 5, pp. 666-676.

Baturin, G. N. and Bezrukov P. L. (1979). *Phosphorites en the sea floor and their origin*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Marine Geology, 31, pp. 317-332.

Belayouni, H., Slanky, M. and Trichet, J. (1990). *A study of the organic matter in Tunisian phosphates series: relevance to phosphorite genesis in the Gafsa Basin (Tunisia)*. Organic Geochemistry, Great Britain, Vol. 15, no. 1, pp. 47-72.

Birch, G. F. (1979). *Phosphorite pellets and rocks from the western continental margin and adjacent coastal terrace of South Africa*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Marine Geology, 33, pp. 91-116.

Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson Prentice Hall. fourth ed., United States, pp. 223-228.

Brookfield, M. E., Hemmings, D. and Van Straaten, PP. (2009). *Palaeoenvironments and origin of the sedimentary phosphorites of the Napo Formation late Cretaceous, Oriente Basin, Ecuador*. Elsevier, Journal of South American Earth Sciences 28, pp. 180-192.

Bucio, J. L. (1978). *Informe del proyecto fosforita de Zimapán, Hidalgo*. Servicios Industriales Peñoles. México, D.F.

Cálculo de la declinación magnética.

Disponible en: <http://magnetic-declination.com/#>

Fecha de consulta: 24 de Abril del 2013.

Canet, C., González-Partida, E., Camprubí, A., et al. (2011). *The Zn-Pb-Ag skarns of Zacatecas, Northeastern Oaxaca, Mexico: A study of mineral assemblages and ore-forming fluids*. Ore Geology Reviews, Elsevier, 39, 277-290.

Carrasco Velázquez, B. (2005). *Paleokarst en rocas Cretácicas de la plataforma de Actopan, Hidalgo*. Tesis de Doctorado en Ciencias, División de estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Carrillo Martínez, M. (1997). *Mapa geológico de la hoja Zimapán 14Q-e(7)*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Escala 1:100,000.

Carrillo Martínez, M. (2000). *Resumen de la geología de la Hoja Zimapán 14Q-e7, Estados de Hidalgo y Querétaro*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Carta Geológica de México, Serie 1:100,000, núm. 24, pp. 1-33.

Carrillo Martínez, M. (1998). *Geometría estructural de la Sierra Madre Oriental, entre Pañemiller y Jalpan, Estado de Querétaro*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Vol. 9, núm. 1, pp. 62-70.

Castro, L.N. y Melgar, R.J. *Capítulo III: Fosfatos*. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 1-237.

Disponible en: http://docsfiles.com/pdf_cap_tulo_iii_fosfatos.html

Fecha de consulta: 10 de Febrero del 2013.

Colman, A. and Holland, H. (2000). *The global diagenetic flux of phosphorus from marine sediments to the oceans: redox sensitivity and the control of atmospheric oxygen levels*. Society for Sedimentary Geology, Marine Authigenesis: From Global to Microbial, Special Publication, no. 66, pp. 53-75.

Compton, J., Hodell, D., Garrido, J. and Mallinson, D. (1993). *Origin and age of phosphorite from the south-central Florida Platform: relation of phosphogenesis to sea-level fluctuations and $\delta^{13}\text{C}$ excursions*. Pergamon Press, United States, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 57, pp. 131-146.

Cosío, J. y Navarro J. (1986). *Itinerario y folleto guía de la visita a la presa hidráulica de Zimapán y mina de fosforita La Negra, Estado de Hidalgo*. VIII Convención de la Sociedad Geológica Mexicana, México, D.F.

Dahanayake, K. and Subasinghe, S. (1989). *A modern terrestrial phosphorite – an example from Sri Lanka*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, *Sedimentary Geology*, 61, pp. 311-316.

Delaney, M.L. (1998). *Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle*. Ocean sciences, University of California, Santa Cruz, *Global Biogeochemical cycles*, Vol. 12, No. 4, pp. 563-572.

Eguiluz de Antuño, S., Aranda, M. y Marret, R. (2000). *Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. LIII, pp.1-26.

Filippelli, G. M. (2011). *Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: The deep time perspective*. Elsevier, *Chemosphere* 84, Vol. 84, issue 6, pp. 759-766.

Fitz-Díaz, E., Hudleston, PP., Siebenaller, L., et al. (2011). *Insights into fluid flow and water-rock interaction during deformation of carbonate sequences in the Mexican fold-thrust belt*. Elsevier, *Journal of Structural Geology* 33, Mexico, D.F., 1237-1253.

Fitz-Díaz, E., Tolson, G., Hudleston, PP., et al. (2012). *The role of folding in the development of the Mexican fold-and-thrust belt*. Geological Society of America, *Geosphere*, v. 8, no. 4, 931-949.

Fonseca, C. (2000). *Upwelling, Sedimentation and anoxia control on deposition of phosphates in the Late Cretaceous California margin*. Society for Sedimentary Geology, *Marine Authigenesis: From Global to Microbial*, Special Publication, no. 66, pp. 455-480.

Fölmi, K.M. (1996). *The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits*. *Earth Science Reviews* 40, pp. 55-124.

Fölmi, K.B. (1993). *Phosphorus and phosphate-rich sediments, and environmental approach*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, *Geochemical Geology*, 107, pp. 375-378.

Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press, pp. 203-217.

González Sánchez, F., Puente Solís, R., et al. (2007). *Estratigrafía del noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo LIX, núm. 1, 2007, pp. 43-62. México, D.F.

Goldhammer, R.K. (1999). *Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico*. Geological Society of America, Colorado, Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-central Mexico special paper Issue 340, pp. 1-134.

Disponible en: http://books.google.com.mx/books?id=K2an9yd2aq4C&pg=PA1&lpg=PA1&dq=R.K.Goldhammer&source=bl&ots=_dLx4yBL9K&sig=1AtgEOecH0NE-Igl68yhm_ySwUs&hl=es-419&sa=X&ei=TIJMUqvTMOLtiwKQooGYDA&ved=0CEQQ6AEwAw#v=onepage&q=R.K.Goldhammer&f=false

Fecha de consulta: 02 de Julio del 2013.

Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Prentice Hall, España, pp. 176-228.

Imlay, R., Cepeda, E., Álvarez, M. and Díaz, T. (1948). *Stratigraphic relations of certain Jurassic Formations in Eastern Mexico*. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Vol. 32, no. 9, pp. 1750-1761.

INEGI. (2000). *Carta topográfica San Joaquín 14c58*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección general de Geografía. Escala 1:50,000,

Ingall, E. and Jahnke, R. (1994). *Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters*. Elsevier Science, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 58, no. 11, 2571-2575.

Jahnke, R. (1984). *The synthesis and solubility of carbonate fluorapatite*. American Journal of Science, University of California, San Diego, Vol. 284, pp. 58-78.

Jensen, H.S., Mortensen, P.B., et al. (1995). *Phosphorus Cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark*. American Society of Limnology and Oceanography, Vol. 40, no. 5, pp. 908-917.

Jiménez Romualdo, F. (2013). Trabajo previo a la tesis: *Análisis del sistema de explotación de la mina de fosforita "la Negra" ubicada en Pacula, Hidalgo y propuesta de solución para el control y la sistematización de las operaciones. Capítulo 4 Condiciones actuales de la empresa.* Basado en Proyecto de la mina La Negra, pp. 32-41.

Krajewski, K.P., Lesniak, P.M., Lacka, B. and Zawidzki, P. (2000). *Origin of phosphatic stromatolites in the Upper Cretaceous condensed sequence of the Polish Jura Chain.* Elsevier, *Sedimentary Geology* 136, pp. 89-112.

Lambooy, M. (1994). *Nanostructure and genesis of phosphorites from OPD Leg 112, the Peru margin.* Elsevier, *Marine Geology*, 118, pp. 5-22.

Leanza, H. y Hugo, C. (1987). *Descubrimiento de fosforitas sedimentarias en el Proterozoico Superior de Tandilia, Buenos Aires, Argentina.* Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, XLII (3-4), pp. 417-428.

Leanza, H. y Hugo, C. (1995). *Fundamentos para la prospección de fosforitas en la plataforma continental argentina.* Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, 50 (1-4), pp. 273-275.

Levresse, G., Tritlla, J., Villareal, J., González-Parita, E. (2006). *The "El Pilote" fluorite skarn: A crucial deposit in the understanding and interpretation of the origin and mobilization of F from northern Mexico deposits.* *Journal of Geochemical Exploration* 89, pp. 205-209.

Macellari, E. and De Vries, T. (1987). *Late Cretaceous upwelling and anoxic sedimentation in northwestern South America.* Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, *Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, pp. 279-292.

Melgarejo, J. (2003). *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada.* España, Universidad de Barcelona, pp. 323-332.

Ochoa Camarillo, H., Buitrón, B.E. y Silva Pineda, A. (1998). *Contribución al conocimiento de la bioestratografía, paleoecología y tectónica del Jurásico (antoclinorio de Huayacocotla) en la región de Molango, Hidalgo, México.* Universidad Nacional Autónoma

de México, Instituto de Geología y Sociedad Geológica Mexicana, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, México, Vol. 15, núm. 1, pp. 57-63.

Ogihara, S. and Ishitawatari, R. (1998). *Unusual distribution of hydrocarbons in a hydrothermally altered phosphorite nodule from Kusu Basin, northern Kyushu, Japan*. Elsevier Science, Organic Geochemistry, Vol. 29, no. 1-3, pp. 155-161.

Padilla y Sánchez, R. (2007). *Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo LIX, núm. 1, pp. 19-42.

Padilla y Sánchez, R. (1978). *Geología y estratigrafía (Cretácico Superior) del límite suroeste del Estado de Nuevo León*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, revista Vol. 2, núm. 1, pp. 37-44. México.

Padilla y Sánchez, R. (1982). *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo, and Monterrey, Mexico*. Doctor of philosophy Thesis of the University of Texas at Austin, pp. 59-62.

Padilla y Sánchez, R. (2013). *Geología Estructural*. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., primera edición, México, D.F., pp. 4.1-6.10, 9.1-11.15.

Pichardo Barrón, Y., Aguilar Pérez, J., Pons, J.M. and López Doncel, R. (2007). *Carbonate microfacies in the western margin of the Valles-San Luis Potosí platform, east-central Mexico*. 4th European meeting on the Paleontology and Stratigraphy of Latin America, Cuadernos del Museo Geominero, núm. 8, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 315-321.

Piper, D. (1991). *Geochemistry of a Tertiary sedimentary phosphate deposit: Baja California Sur, Mexico*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Geochemical Geology, 92, pp. 283-316.

Purnachandra Rao, V., Michard, A., Michard, A., et al. (2002). *Quaternary phosphorites off the southeast coast of India*. Elsevier, Chemical Geology 182, pp. 483-502.

Purnachandra Rao, V. and Lamboy, M. (1996). *Genesis of apatite in the phosphatized limestones of the western continental shelf of India*. Elsevier, Marine Geology 136, pp. 41-53.

Reading, H.G. (1978). *Sedimentary environments and facies*. Elsevier, New York, pp. 328-370.

Rogers, C., De Cserna, Z., et al. (1956). *General Geology and Phosphate Deposits of Concepcion del Oro District, Zacatecas Mexico*. Geologic Investigations in the American Republics, Geological Survey Bulletin 1037-A. Washington.

Ross, D., Skelton, P.P. (1993). *Rudist formations of the Cretaceous: a palaeoecological, sedimentological and stratigraphical review*. Sedimentology review 1, Blackwell Scientific Publications, Chapter 5.

Ruttenberg, K. (1992). *Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments*. American Society of Limnology and Oceanography, 37(7), pp. 1460-1482.

Schenau, S.J., Slomp, C.P. and De Lange, G.J. (2000). *Phosphogenesis and active phosphorite formation in sediments from the Arabian Sea oxygen minimum zone*. Elsevier, Marine Geology, 169, pp. 1-20.

Scholle, P.A., Bebout, D.G. & Moore, C.H. (1983). *Carbonate depositional environments*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, United States of America, 708.

Solé, J. y Pi, T. (2005). *An empirical calibration for ^4He quantification in minerals and rocks by laser fusion and noble gas mass spectrometry using Cerro de Mercado (Durango, Mexico) fluorapatite as a standard*. Analytica chimica acta 535, Elsevier, 325-330.

Stamatakis, M. and Koukouzas, N. (2001). *The occurrence of phosphate minerals in lacustrine clayey diatomite deposits, Thessaly, Central Greece*. Elsevier, *Sedimentary Geology* 139, pp. 33-47.

Suter, M. (1984). *Cordilleran deformation along the eastern edge of the Valles-San Luis Pototsí carbonate platform, Sierra Madre Oriental fold-thrust belt, east-central Mexico*. *Geological Society of America Bulletin*, 95, no. 12, pp.1387-1397.

Tromp, T. K., Van Cappellen, P. and Key, R.M. (1995). *A global model for the early diagenesis of organic carbon and organic phosphorus In marine sediments*. Elsevier Science, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 7, pp. 1259-1284.

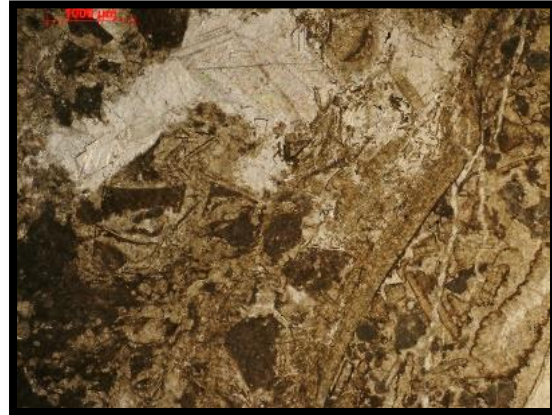
Anexos

-
- I. Fotografías de la petrografía
 - II. Fotografías de fracturas
-

I. FOTOGRAFÍAS DE LA PETROGRAFÍA

Fotografías complementarias a detalle para el capítulo 2, subtema 2.2.2

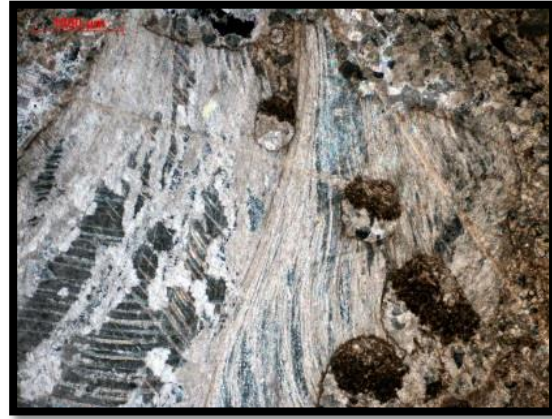
Muestra 2. Fluorita en caliza (caliza fosilífera)



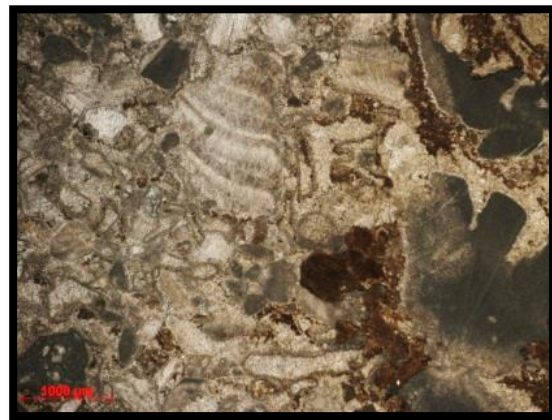
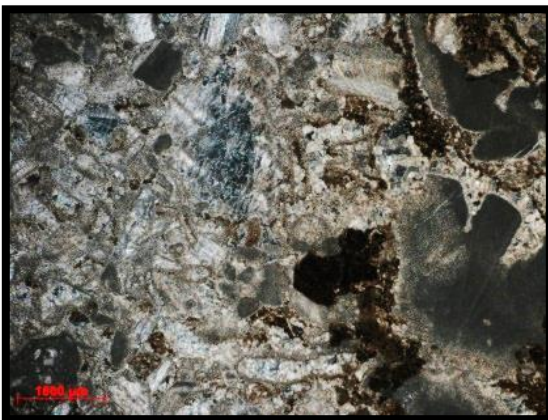
I-A. Fotografías observadas con el objetivo de 2.5x, la fotografía izquierda se utilizan los nícoles cruzados y en la derecha con luz paralela. La calcita está relleno espacios en la parte superior de la lámina, hay una fractura del lado derecho que atraviesa de norte a sur, micrita como cementante de color marrón claro, de color marrón oscuro un poco de fosfato y espatita primaria. La escala de la parte superior en color rojo indica 1000 μm .



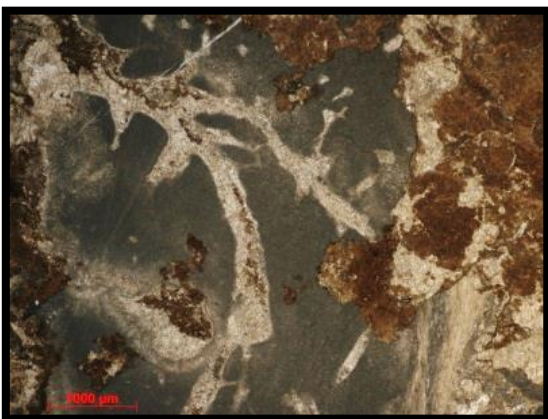
I-B. Organismos con relleno de calcita, espatita primaria y lodo calcáreo, lo que puede clasificar a esta roca como una grainstone-packstone; observados con el objetivo de 2.5x. En la fotografía izquierda se ve con luz paralela y a la derecha con nícoles cruzados. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm .



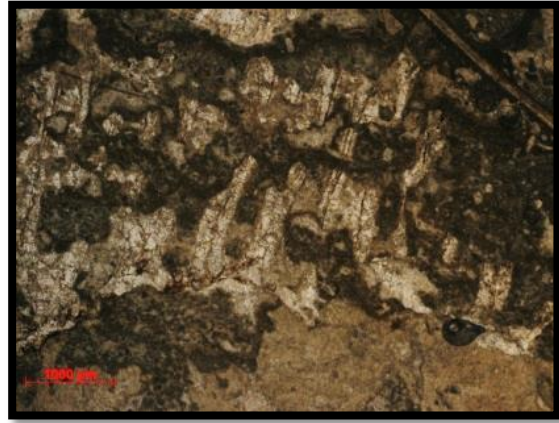
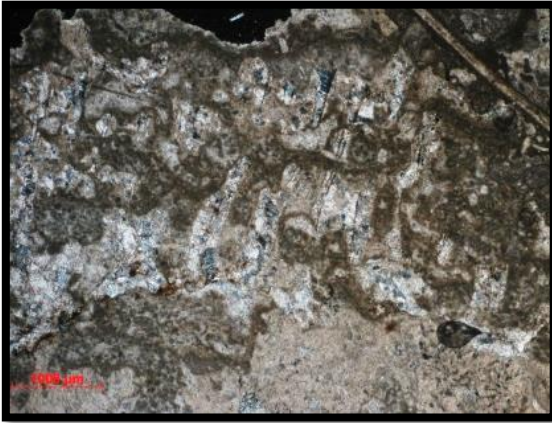
I-C. Organismo relleno de calcita y con fluorita en la parte superior. Pequeñas concentraciones de fosfatos, espatita primaria; observadas con el objetivo de 2.5x. Fotografía de la izquierda con luz paralela y en la derecha con nicoles cruzados. En estas láminas se observan las maclas de calcita al noroeste de las imágenes, producto de la deformación de la roca. La escala de la parte superior en color rojo indica 1000 μm .



I-D. Gasterópodos y fragmentos de roca retrabajados con fosfatos de relleno, espatita primaria y micrita. A la izquierda con nicoles cruzados y la derecha con luz paralela con el objetivo de 2.5x. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm .

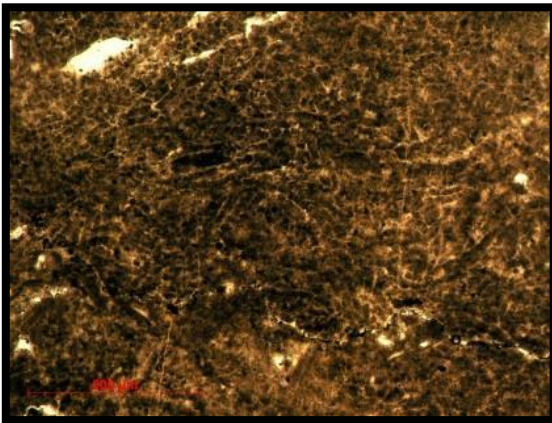


I-E. Clasto de color gris oscuro con fósiles en color blanco y de color marrón oscuro son fosfatos. Vista con el objetivo de 2.5x y luz paralela. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm .



I-F. Organismos e intraclastos rellenos de calcita, se puede ver espatita también de relleno en la parte superior. En la fotografía de la izquierda con nicoles cruzados y a la derecha con luz paralela. La escala de la parte inferior en color rojo indica 1000 μm .

Muestra 3. Fosforita



I-G. Fosforita vista con el objetivo de 10x en luz paralela. La escala de la parte inferior en color rojo indica 500 μm .

II. FOTOGRAFÍAS DE FRACTURAS

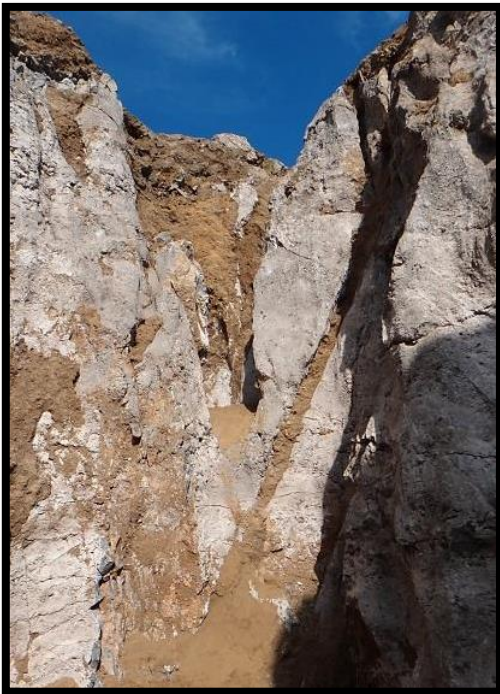
Fotografías complementarias para el capítulo 3, subtema 3.3 sobre la influencia de las fracturas en la carsticidad.



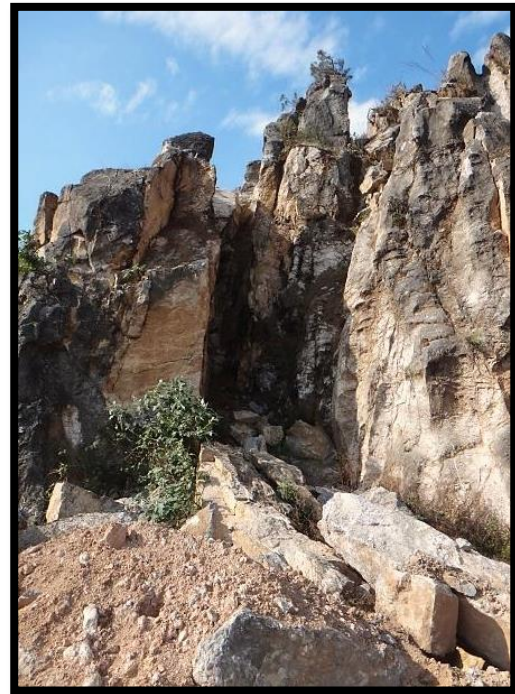
II-A. Guato del área 2 definida por una fractura NW-SE, en la parte central se cierra la cavidad, volviendo a abrirse en la misma dirección.



II-B. Fracturas en el área 3, casi verticales con estratificación horizontal.



II-C. Fracturas en el área 3 a 76° cortando y cerrando en forma de cono las cavidades.



II-D. Fracturas a 78° forman paredes en los guatos que llegan a ser de 3 m de profundidad y espaciadas por 1 m.