



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de las condiciones geológicas
del yacimiento de fosforitas de El Raíces,
Nuevo León como posible fuente de
producción y explotación de fósforo.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A N

Velasco Anaya Eric

Velázquez Sánchez Geovanni

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria

Antes que todo este trabajo de investigación se lo dedico a mi persona por el tiempo, el esfuerzo, la perseverancia y las ganas puestas para la realización de este objetivo tanto personal como profesional.

A ustedes que son mi razón de ser, mi hija Erinn que con tu llegada al mundo trajiste con ella felicidad y regocijo en mi vida y con ello la enorme responsabilidad de ser tu papá; y a mi gran amor Zayra, que es una persona muy especial en mi vida, con la cual he vivido cosas increíbles y me brinda su apoyo, amor y tiempo. Gracias por ser mi familia, por estar conmigo motivándome con su sola presencia e inyectándome energía para no rendirme y culminar estos logros a su lado.

A mi familia, en especial a mis padres Javier y Beatriz, a los cuales les debo la vida y gracias a su confianza, apoyo emocional, así como económico, amor incondicional, esfuerzo, regaños y consejos fue como pude lograr terminar mi carrera. En verdad agradezco que estén con vida y me sigan viendo cosechar mi futuro, espero algún día poder regresarles todo esto que me brindan....

Agradecimientos

Le agradezco a Dios porque sin el nada de esto sería posible, al darme vida, la sabiduría e iluminarme con ideas brillantes para poder realizar este trabajo.

A la mejor universidad de México, la Universidad Nacional Autónoma de México por ofrecerme una educación de calidad con los instrumentos necesarios para mi desarrollo profesional. A la Facultad de Ingeniería, donde pase los mejores momentos de mi vida universitaria y forje el conocimiento adquirido. A mis profesores que tuve en todo mi pasar por la universidad y me enseñaron de su conocimiento y las lecciones aprendidas, sin esperar nada a cambio.

Al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz por su tiempo, dedicación y empeño, al ser nuestro director de tesis, brindarnos su conocimiento y aportar sus precisos comentarios para la realización de este trabajo académico. ¡Muchas gracias Dr.!

A mi amigo y compañero de tesis, Geovanni, por el tiempo, el esfuerzo y la dedicación para realizar este trabajo. Te quiero, amigo.

A nuestros sinodales, Dr. Enrique González Torres, Dra. Mayumi Amparo Cabrera Ramírez, Dr. Fernando Núñez Useche, M. C. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda, muchas gracias por su tiempo y participación para la mejora de este proyecto.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería, con los cuales compartí momentos dentro o fuera de la universidad y aprendí algo de cada uno de ellos. En especial a mis amigos Rodrigo, Juan, Toledo, Fernando, muchas gracias por su amistad y buenos ratos que pasamos.

Velasco Anaya Eric

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a ti, mamá, por todo el apoyo que me brindaste durante mi transcurso por la universidad, por todo el sacrificio que realizaste y por confiar en mí muchas gracias, espero poder regresarte todo lo que has hecho por mí.

A ti, Itza, gracias por el apoyo que me brindaste, por ayudarme y apoyarme cuando lo necesite, tú fuiste uno de mis motores principales para poder terminar la carrera y no darme por vencido, gracias por haber estado ahí cuando te necesitaba.

A mi tía Lupita, mamá Herminia y papá Elías, por sus consejos y apoyo, les agradezco de todo corazón.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional en conjunto con la Facultad de Ingeniería, a los profesores que tuve quienes me enseñaron tanto sin pedir nada a cambio.

Al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz, por brindarnos su conocimiento para poder realizar este trabajo, por su tiempo, esfuerzo y apoyo, muchas gracias, siempre estaré agradecido.

A mi amigo y compañero de tesis, Eric, gracias por todo, por tus consejos y regaños, por tu esfuerzo, dedicación y por siempre motivarme, muchas gracias, te quiero, amigo.

A nuestros sinodales, Dra. Mayumi Amparo Cabrera Ramírez, Dr. Fernando Núñez Useche, Dr. Enrique González Torres, M. C. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda, por su tiempo y participación para mejorar nuestro trabajo, muchas gracias.

Gracias a mis amigos y amigas de la Facultad, a todo el Team Linces; Fredy, Raúl, Brígido, David, Clorito, Lazcano, Gohan, Eddy y Edgar, un gusto compartir la carrera a su lado, a mis amigos Geofísicos, Chavita y Rod por esas prácticas de campo inolvidables.

Velázquez Sánchez Geovanni

Índice

1. Introducción.....	7
1.1 Justificación.....	8
1.2 Hipótesis	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Antecedentes	10
1.5 Ubicación de la zona de estudio y vías de acceso.....	12
2. Depósitos de fosforitas.....	14
2.1 ¿Qué son las fosforitas?	14
2.1.1. Clasificación de las fosforitas	17
2.2 ¿Dónde se presentan las fosforitas?.....	21
2.3 ¿En qué ambientes sedimentarios se encuentran?	22
2.4 Información técnica (Normas) y usos de las fosforitas.....	23
2.5 Ejemplos de yacimientos en el mundo.....	26
3. Metodología	27
3.1 Muestreo de campo.....	27
3.2 Cartografía	28
3.3 Petrografía y análisis de facies	28
3.4 Difracción de rayos X.....	29
3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	31
3.6 Geoquímica de roca total	32
3.6.1 Fluorescencia de rayos X	33
3.6.2 Método de fusión y digestión total de plasma acoplado inductivamente (FUS-ICP y TD-ICP)	33
3.7 Modelado y cálculo de reservas.....	34
3.7.1 Criterio de selección del método de cálculo de reservas	34
3.7.2 Determinación de los datos de exploración y procedimiento para el cálculo de reservas.....	34
3.7.3 Clasificación de métodos para el cálculo de reservas.....	35
3.7.3.1 Método de secciones transversales	36
3.7.3.1.1 Método estándar.....	36
4. Marco Geológico	36
4.1 Marco tectónico regional	36

4.2 Geología Regional	39
4.3 Geología local	43
4.3.1 Secuencia estratigráfica	43
4.3.1.1 Formación Zuloaga.....	43
4.3.1.2 Formación La Casita.....	44
4.3.1.3 Formación Taraises	45
5. Depósito de fosforita	48
5.1 Estructura mineralizada y geología del yacimiento de fosforitas	48
5.2 Características del yacimiento	52
(a) Litoestratigrafía del yacimiento (contacto entre formaciones).....	52
(b) Roca encajonante	55
(c) Características texturales y fábrica del yacimiento	55
(d) Mineralogía de las fosforitas	57
5.3 Asociaciones minerales y texturas	61
5.3.1 Calcita (CaCO ₃) y carbonato-fluorapatito (Ca ₅ (PO ₄) ₃ F).....	61
5.3.2 Cuarzo (SiO ₂) y yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O).....	67
5.3.3 Arcillas, sulfuros y óxidos	68
5.4 Asociaciones de microfacies	69
- 5.4.1 - Grainstone de oncolitos (P1´).....	70
- 5.4.2 - Grainstone de intraclastos (P1).....	72
- 5.4.3 - Grainstone de ooides (P3a)	74
- 5.4.4 - Grainstone/wackestone laminado (P4a)	74
- 5.4.5 - Wackestone laminado (P5a)	75
- 5.4.6 - Grainstone de bioclastos (P5b).....	77
- 5.4.7 - Packstone de ooides (P5c)	78
- 5.4.8 - Wackestone de radiolarios (P10-Nódulos).....	80
- 5.4.9 - Wackestone (Raíces).....	80
5.5 Ambiente de depósito.....	85
6. Geoquímica del depósito de fosforitas	98
6.1 Roca total y perfiles.....	99
6.2 Matrices de correlación	104
7. Discusión.....	108
7.1 Geología.....	108

7.2 Yacimiento de fosforitas	109
7.3 Cálculo de reservas.....	113
8. Conclusiones y recomendaciones.....	120
8.1 Conclusiones.....	120
8.2 Recomendaciones.....	122
9. Bibliografía	122
Anexos	128

1. Introducción

Durante la colonia española, la explotación de minerales metálicos (oro y plata) hizo que la minería se desarrollara de manera sólida y rápida, con el paso del tiempo; el crecimiento de la población, la demanda de la industria y la necesidad de encontrar nuevas materias primas, se comenzó a explotar los minerales industriales.

Los minerales se clasifican en dos grupos principales que son (a) metálicos y (b) no metálicos. Los minerales metálicos son aquellos que están constituidos por uno o más metales dentro de su composición, estos minerales se pueden obtener de la roca mediante métodos mineros y metalúrgicos, las características que les da este nombre son la opacidad y el brillo característico, son maleables y poseen conducción térmica y eléctrica. Los minerales industriales son todos aquellos minerales no metálicos y los cuales poseen un valor económico ya que tienen una utilidad o una aplicación industrial.

Actualmente los minerales industriales han tenido un gran desarrollo, por lo que México ha sobresalido como principal productor a nivel mundial según el informe anual 2020 de la Cámara Minera de México (CAMIMEX) de algunos minerales no metálicos figurando entre ellos: fluorita (2° lugar), celestita (3° lugar), wollastonita (3° lugar), diatomita (6° lugar), barita (6° lugar), sal (8° lugar), yeso (8° lugar), grafito (11° lugar), caolín (12° lugar), feldespato (15° lugar) y fosforita (22° lugar).¹

La importancia económica de los minerales no metálicos radica en que sirven para la fabricación de bienes de uso común (casas, automóviles, puentes y carreteras, uso industrial, envases de plástico, farmacéuticos, producción de alimentos, etc.). Los factores que incrementan su viabilidad económica son el consumo, la gran

¹ Ver CAMIMEX, *Informe anual CAMIMEX, 2021, Capítulo V - Estadísticas*, p.215, https://www.camimex.org.mx/application/files/9416/3034/0997/05_info_2021.pdf

demanda que tienen dentro de la sociedad y su estabilidad en los precios a corto y largo plazo debido a la disminución en los riesgos de la inversión de capital para su extracción de estos minerales.

En la minería de los minerales no metálicos, la explotación de fosforita resalta por sus bajos costos de explotación por el método a cielo abierto y por su proceso de concentración utilizado en México, concretamente en la empresa Rofomex S. A. de C. V. ubicada en Baja California Sur, es a través de los procesos mineros de trituración y/o molienda, clasificación y flotación directa que se obtiene como producto final la fosforita. La calidad del porcentaje de pentóxido de difósforo (P_2O_5) hacen que su aplicación como fertilizante orgánico, natural y ecológico dentro del sector agrícola sea viable para su uso por la relación de precios por unidad de nutriente, pero de menor concentración y solubilidad que los fertilizantes industriales.²

La evaluación de depósitos minerales no metálicos concretamente de fosforitas para su posible minado necesita analizarse geológicamente de forma precisa para considerar todos los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales que verifiquen su potencial en cuanto a cantidad (tonelaje) y calidad (porcentaje de P_2O_5) como un yacimiento explotable dentro del país debido al poco avance en el estudio de este tipo de depósitos.

1.1 Justificación

La exploración de fósforo dentro del país como un recurso minero explotable es de suma importancia debido a que México en el año 2019 figuró como el vigésimo segundo lugar entre los países productores de fosforitas con una producción total de 831.74 miles de toneladas, por lo que para impulsar las cifras de producción y satisfacer la necesidad de consumo para el sector agrícola e industrial se necesita una adecuada prospección geológica para la búsqueda de este recurso no metálico; y así evitar el déficit de producción que

² Ver Oportimes, Rofomex, la líder en fosforita, Julio 2018, <https://www.oportimes.com/rofomex-la-lider-en-fosforita/>.

resulta desfavorable desde 2016 y continuar con la tendencia en el aumento del volumen de producción que creció de 741.68 a 831.74 miles de toneladas de fosforita durante 2018 a 2019 (SGM, 2019)³.

Este trabajo se enfocará en las fosforitas, fuente principal de fósforo y sus derivados, rocas sedimentarias de origen químico que contienen al menos un 15 % de contenido de P_2O_5 . En México la zona productora principal de fosforita se encuentra en el estado de Baja California Sur generando un volumen total de 90.86 %, por lo que resulta conveniente hallar las condiciones geológicas adecuadas para incrementar la producción de fosforita y descubrir nuevos posibles yacimientos explotables particularmente en regiones cercanas a zonas agrícolas intensivas localizadas en el centro del país. Las secuencias sedimentarias mesozoicas y miocénicas constituyen en el país formaciones con características que favorecen la presencia de rocas fosfóricas. (Carreón Diazconti y Jacques Ayala, 1989; CGM-DGDM-SE, 2012).

1.2 Hipótesis

Las características idóneas para la concentración de fósforo requieren de ciertos factores correlacionados sincrónicamente en tiempo y espacio para la formación de depósitos que sean económicamente explotables. Dentro del territorio nacional existen formaciones sedimentarias jurásicas que tienen la posibilidad de alojar fosforitas por su tipo de ambiente de depósito, actividad orgánica desarrollada y sus procesos diagenéticos que influyen en su génesis. Existen anomalías de fosforita reportadas por el SGM (2006) en la región de El Raíces por lo que se cree que la presencia de depósitos de fosforita es posible y requiere una evaluación geológica, mineralógica y análisis de facies para evidenciar las condiciones de los ambientes que expliquen la formación de las fosforitas. La evaluación económica de esta región con un modelo geológico y cálculo de reservas denotará el potencial del depósito El Raíces.

³ Ver *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*, 2019, Capítulo II - Producción Minera y Minero Metalúrgica, p.48, http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2019_Edicion_2020.pdf.

1.3 Objetivos

Principal

Determinar el contexto geológico en la zona de El Raíces, Nuevo León a través de exploración superficial, las características de las rocas sedimentarias para sugerir el origen del depósito de fosforitas. Así como cuantificar las posibles reservas de este material para su posible explotación.

Particulares

- Cartografiar la zona mineralizada en fosforitas en la región de El Raíces, Nuevo León.
- Caracterizar las asociaciones minerales y texturas de las fosforitas.
- Determinar las facies y/o ambiente sedimentario de depósito que favoreció la formación de las fosforitas.
- Cuantificar el contenido de fósforo en el depósito para la obtención de una ley promedio.
- Delimitar el cuerpo mineralizado para obtener sus límites.
- Calcular las reservas probables del recurso de fosforitas de El Raíces.

1.4 Antecedentes

La zona de estudio se encuentra en la porción sur del estado de Nuevo León, donde existen varias obras a cielo abierto y socavones con explotación de fosforita (SGM, Carta Geológico-Minera G14-C66 San José de Raíces, 2006). En la región de El Raíces se han descrito y cartografiado unidades litológicas donde afloran las siguientes formaciones:

- Formación Zuloaga (Jok)
- Formación La Casita (Jkt)
- Formación Taraises (Kbeh)
- Formación Tamaulipas Inferior (Krt)

Los únicos trabajos acerca de la mineralización de fosforitas en la región se evidencian en el mapa geológico minero del SGM (CRM, 1983⁴. COREMI, 1990⁵) donde se menciona a la Formación (Fm.) La Casita del Jurásico como roca mineralizada en fosforita denominado La Escondida con valores de P₂O₅ de 18.72 a 24.87 %.

Otro reporte que menciona la ubicación y algunas características sobre la mineralización es un informe de excursión geológica de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León por Rodríguez-Díaz (2010) donde se presume la presencia de un depósito estratoligado restringido a la Fm. La Casita, estratificada y dispuesta en un flanco de un anticlinal. La formación incluye una caliza nodular con colofano, calcita, cuarzo y bioclastos, intercalada con lutitas ricas en materia orgánica y nódulos (menores a 1 metro) de caliza mudstone.

En ninguno de los documentos se mencionan las características con detalle de la mineralización del depósito y no incluyen algún dato que evidencie claramente sus condiciones económicas.

Información del depósito

El depósito que se presume es de origen sedimentario en un ambiente marino de plataforma y de origen químico dentro de calizas (Rodríguez-Díaz, 2010). Se tienen mantos en forma pseudotabular con espesores variables que van de centímetros hasta menor o igual a 1 metro los cuales se emplazan dentro de secuencias de rocas calcáreas de limolitas, areniscas y calizas arcillosas. En el área de San José de Raíces las fosforitas se localizan en la Fm. La Casita del Jurásico Superior, la ocurrencia de dichos depósitos de roca fosfórica se da en dos geometrías distintas: una forma muestra los horizontes de fosforita con un espesor considerable

⁴ Ver Arias G. M., *Reconocimiento geológico - minero del área fosforítica La Ascensión, municipio de Aramberri, Nuevo León*, 1983.

⁵ Ver Arias G. M., *Informe de la exploración geológico-minera del proyecto regional no metálicos y estratégicos de Nuevo León*, 1990.

intercalados con estratos de rocas adyacentes que por lo regular son rocas de grano fino a medio de origen químico que fueron mencionadas anteriormente; también se exhiben en forma estratiforme dentro de esta formación pudiéndose encontrar zonas enriquecidas en zonas cercanas a núcleos de anticlinales o dentro de estos mismos (CRM, Informe de la exploración geológico-minera del proyecto regional no metálicos y estratégicos de Nuevo León, p. 7-8.).

1.5 Ubicación de la zona de estudio y vías de acceso

La zona de trabajo se localiza en la porción sur del estado de Nuevo León (Figura 1.1), se ubica a 5.5 km al suroeste de la población San José de Raíces en el límite sur de la municipalidad de Galeana, fisiográficamente la zona de estudio se encuentra en la Provincia de la Sierra Madre Oriental (SMO), al sur de la Saliente de Monterrey o Curvatura de Monterrey y al oeste del Frente de la SMO (Figura 1.1)

El acceso principal a la zona de estudio es por la carretera federal 57 Saltillo-Matehuala, cerca de la desviación al poblado San José de Raíces y el cruce de San Roberto, y entre los poblados y ejidos Salinas del Refugio, Las Fuentes y Rancho San Jorge Viejo. El depósito se ubica a 500 m de la carretera federal 57 a través de un camino sin asfaltar (Figura 1.2). Para el acceso al lugar de estudio donde se tienen las áreas de depósitos de fosforita es necesario entrar por caminos y brechas de terracería a partir de la carretera federal no. 57.



Figura 1.1 - Mapa de ubicación del área mineralizada en fosforitas, El Raíces. [Se señala la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental en verde, el frente de la Sierra Madre Oriental con una línea punteada color rojo y la zona de la curvatura de Monterrey delimitada en el recuadro azul].

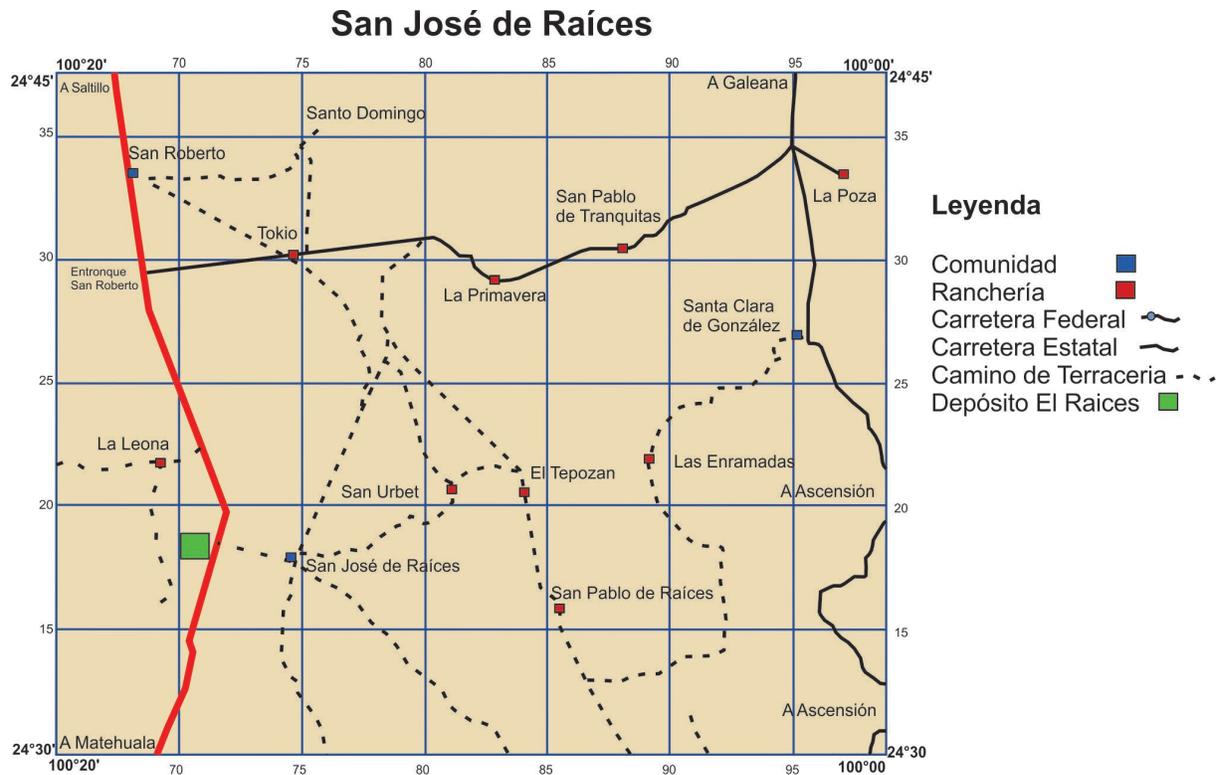


Figura 1.2 - Vías de acceso a la mineralización de fosforita El Raíces. [La carretera federal #57 se señala en color rojo. El depósito de fosforitas El Raíces se encuentra dentro del recuadro color verde].

2. Depósitos de fosforitas

2.1 ¿Qué son las fosforitas?

Las rocas fosfatadas conocidas como fosforitas están enriquecidas con fosfato y se definen como rocas sedimentarias de origen químico que para ser designadas como fosforitas necesitan tener de un 15 a 37 % de P_2O_5 (Bentor, 1980, p. 519, citado por Gleen, 2003).

En general las fosforitas presentan una textura macroscópica carbonosa y granulada; los elementos aloquímicos que componen a las fosforitas se definen en una porción menor a la matriz de la roca. Estos aloquímicos constituyentes de las fosforitas son los nódulos, la materia esquelética y las capas fosfáticas. Los estratos o capas de fosforita llegan a medir de centímetros a varios metros de espesor.

La textura carbonosa que se menciona de las fosforitas resulta complicada poder observarla a simple vista más bien esta se encuentra relacionada a un gran número de restos de organismos que se encontraban en el ambiente donde se acumularon y a otro tipo de clastos (extraclastos, oolitos, pisolitos, pellets, etc.) (Figura 2.1); otro de los factores que produce la gran cantidad de fósforo son los restos orgánicos naturalmente fosfáticos de la fauna autóctona. Generalmente, los nódulos son uno de los componentes principales y presentes en mayor cantidad dentro de las fosforitas.

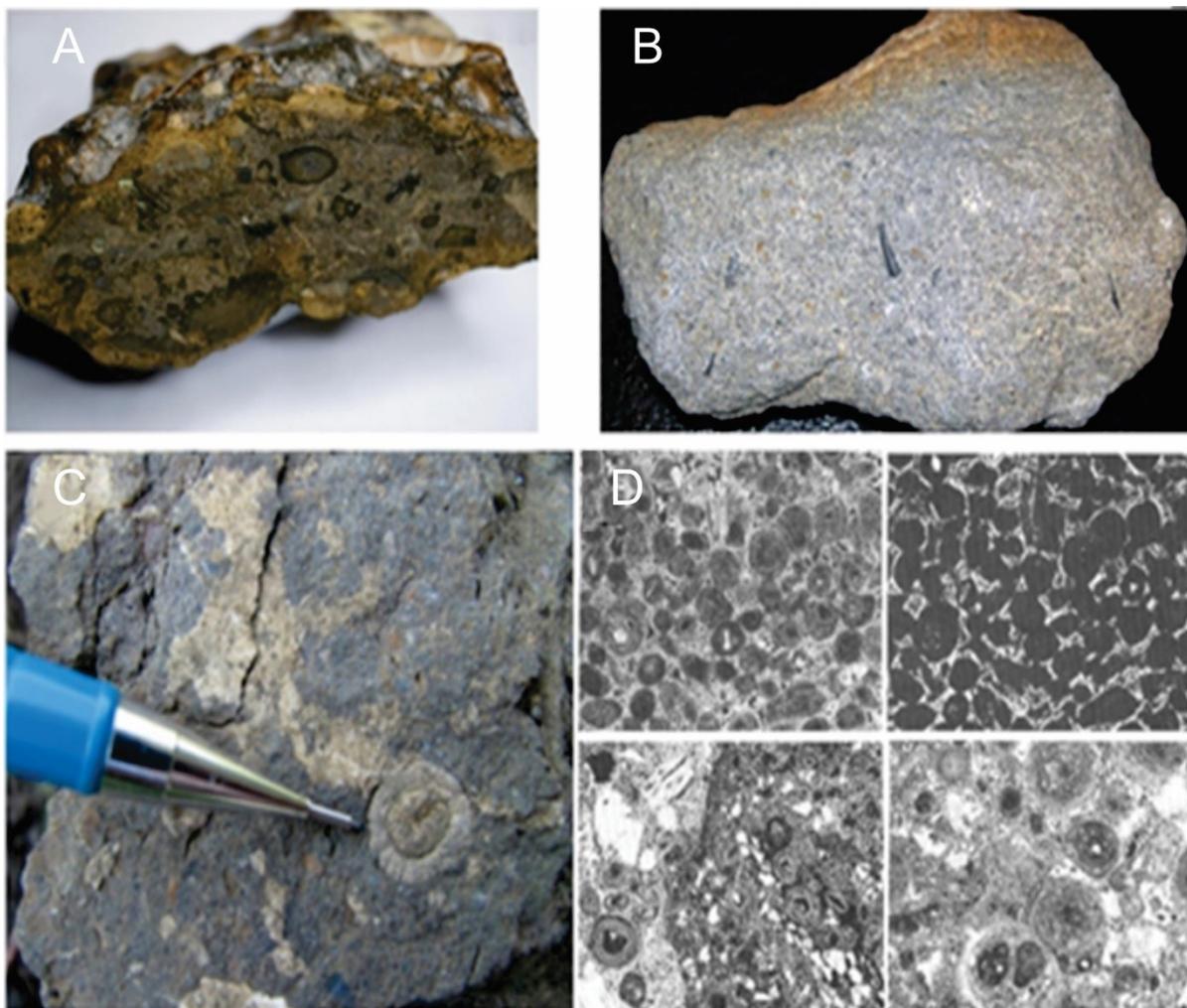


Figura 2.1 - Textura de fosforitas. A) Muestra de mano de fosforita del sur de California con sus componentes internos (<https://www.usgs.gov/media/images/phosphorite-rock>). B) Aspecto “nodular” de componentes aloquímicos en la fosforita peloidal fosilífera de la Fm. Zhujiqing del Cámbrico, Meishucun, Yunnan, China (<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/32305956148>). C) Apariencia común en fosforita con bioclastos evidentes, crinoides, etc., Fm. Fernie, Columbia Británica (https://www.researchgate.net/figure/Typical-appearance-of-phosphate-rock-containing-a-fragment-of-a-crinoid-Fernie_fig1_288833928). D) Fotomicrografías de fosforitas pliocénicas, presencia de nódulos que incluyen peloides, oolitos, pisolitos, bioclastos, procedentes de plataforma del Perú (http://www-odp.tamu.edu/publications/112_SR/VOLUME/CHAPTERS/sr112_08.pdf).

2.1.1. Clasificación de las fosforitas

El clasificar a las fosforitas dentro de rangos claramente definidos por algún atributo resulta una tarea complicada debido a los elementos que conforman las mencionadas rocas y los procesos tan variados que influyen dentro de la génesis de sus yacimientos.

El propósito de clasificar estas rocas sedimentarias se ha basado en la descripción de sus características petrológicas englobando el tipo de grano y otros elementos texturales constituyentes.

Riggs (1979a), por ejemplo, aplicó una clasificación de carbonatos genéticos de Folk modificada (1962) a las fosforitas, describiendo las fosforitas por sus componentes ortoquímicos y aloquímicos. Cook & Shergold (1986b) transmitió un esquema que se basa fundamentalmente en la clasificación de carbonatos texturales de Dunham (1962) (fosforita 'mudstone', fosforita 'wackstone', fosforita 'packstone', fosforita 'grainstone', fosforita 'boundstone'). (Glenn et al., 1994, p. 753).

El enfoque para el estudio de las fosforitas se basa en la clasificación de Dunham y Folk comúnmente utilizado en rocas de composición de CaCO_3 ; por lo que el desarrollo para sustentar una clasificación apropiada para las fosforitas seguirá basándose en esta misma forma de agruparlas dentro de una categoría o subclase pertenecientes a estos esquemas adaptados.

Glenn et al. (1994) mencionan el esquema propuesto para la clasificación de las fosforitas por Slansky (1986) combina los elementos de clasificación de Folk (1962) y Grabau (1904). Los nuevos términos que introdujo en esta clasificación fue denominar a las fosforitas como 'fosfatitas'; y algunas clases tales como 'biofosfalutita', 'intrafosfarenita' y 'oofosfarudita'. (Glenn et al., 1994).

Algunos otros trabajos que se han propuesto para los diferentes tipos de clases y sus elementos de las fosforitas son: Gimmel'farb et al. (1959), Mabie y Hess (1964), Trueman (1971), Cook (1976), Riggs (1979a), Baturin (1981), Slansky (1980, 1986) y Zanin (1987).

Recientemente Garrison y Kastner (1990) propusieron una clasificación que igual se ha utilizado para la descripción macroscópica de rocas de composición fosfática encontradas en Perú. (Garrison y Kastner, 1990, citado por Glenn et al., 1994). Las clases que se mencionan en este trabajo son las siguientes (Figura 2.2):

- F-fosfatos: Pequeños nódulos, peloides o friables laminares de color claro debido a la composición de carbonato-fluorapatito. Estos fueron llamados mudstone de colófano por Burnett et al. (1980), su consistencia varía de muy friable y no consolidada a más compacta. Presumiblemente, los fosfatos F envejecen o maduran para convertirse eventualmente en fosfatos D.
- D-fosfatos: Bien litificados, comúnmente oscuros y densos nódulos, gravas y suelos de carbonato-fluorapatito.
- P-fosfatos: Arenas fosforíticas dominadas por granos fosfáticos sin estructura y recubiertos (micro bandeados). Contienen algunos aglutinantes de huesos y dientes de peces.

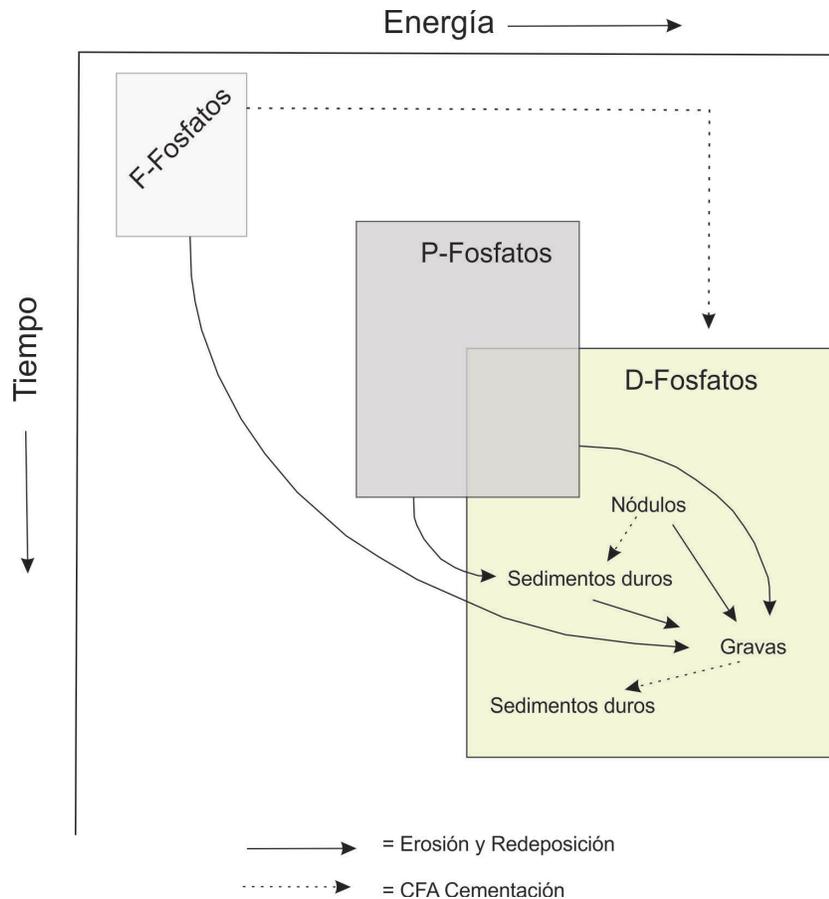


Figura 2.2 - Diagrama de clasificación de Garrison y Kastner. [Tomado de: Glenn et al., 1994, modificado de Garrison y Kastner, 1990].

Las nuevas clasificaciones para agrupar en clases a las fosforitas se han actualizado en relación con las características que son tomadas en cuenta para su organización. Los atributos que son tomados en cuenta como las estructuras sedimentarias y las propiedades de los estratos son localizados en el trabajo de campo por lo cual esta nueva forma de dar un orden resulta sencillo y práctico para el estudio de estas rocas.

Föllmi et al. (1991) propone clasificar a las fosforitas en base a sus tasas relativas de sedimentación y erosión. Se registraron tres clases o categorías en base a su interpretación genética donde se pueden ubicar a las fosforitas existentes (Figura 2.3):

- Pristina: Se describen como fosfatos que no presentan marcas de retrabajo o reelaboración.
- Condensadas: Se componen de partículas fosfáticas, láminas y capas que se han concentrado mediante el proceso de retrabajo y remodelación o bioturbación.
- Alóctonas: Son la acumulación de partículas fosfáticas que han sido arrastradas y depositadas por corrientes turbulentas y/o por gravedad (Föllmi et al., 1991, p. 521, citado por Glenn et al., 2003).

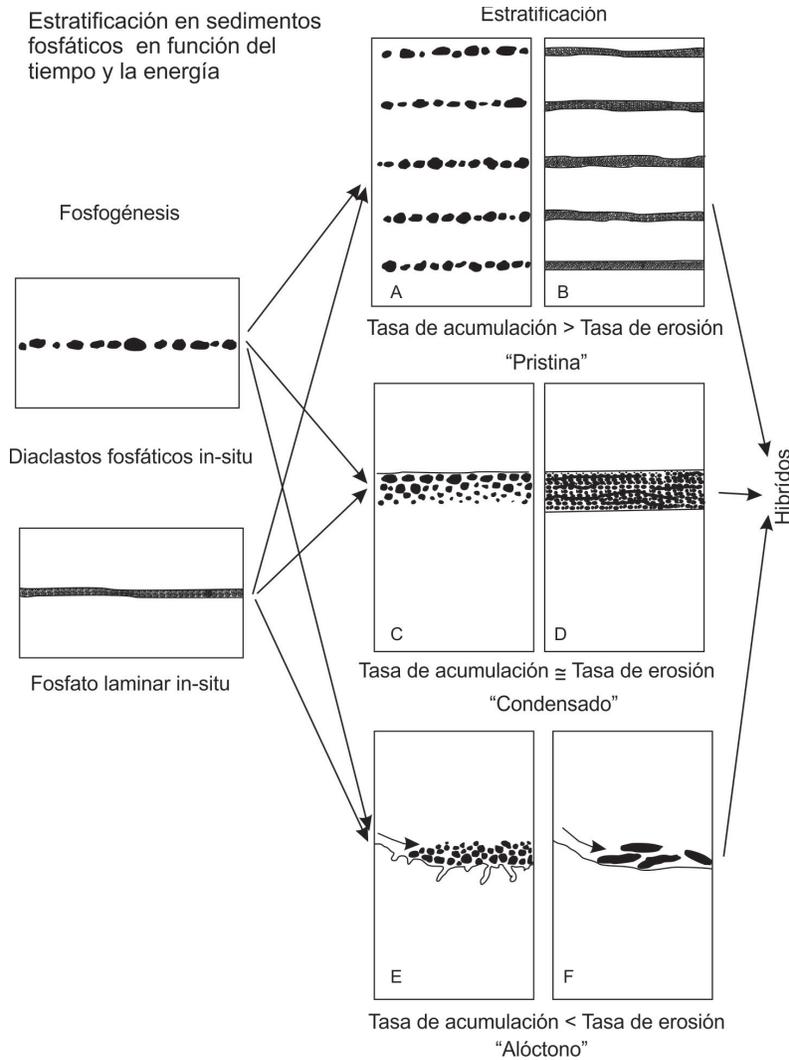


Figura 2.3 - Diagrama de clasificación genética de los tipos de estratificación propuesto por Föllmi (1991). [Tomado de: Glenn et al., 1991].

2.2 ¿Dónde se presentan las fosforitas?

“El contenido total de fósforo en la Tierra se estima en 0.27 % de P_2O_5 dentro de la corteza terrestre.” (McKelvey, 1967). El océano es el principal medio donde los fosfatos se encuentran saturados, por lo que la concentración de fosfatos puede llegar a producirse en cualquier fase del ciclo del fósforo y precipitarse con las condiciones favorables para su génesis.

Los procesos oceanográficos, químicos y biológicos son relevantes en la concentración de P_2O_5 dentro del océano; los cuales deben de conjuntarse de forma que se pueda lograr una notable acumulación que resulte económicamente explotable. La surgencia interviene al transportar las aguas ricas en fosfato hacia la zona donde ocurre la fotosíntesis; más tarde los procesos bioquímicos precipitan el fosfato que acumula pequeñas cantidades de P_2O_5 .

La meteorización que actúa en los depósitos de fósforo causa que la cantidad de P_2O_5 aumente, mucho de este aumento se favorece a partir de procesos químicos, biológicos y mecánicos.

“La oxidación de la materia orgánica, la formación de nódulos o gránulos mediante la adición diagenética o reorganización del material fosfático dentro del sedimento, y la eliminación de las partículas más ligeras y pequeñas, como la materia carbonosa y la arcilla son factores esenciales para el enriquecimiento del fósforo” (Altschuler et al., 1964, p. 9, citado por McKelvey, 1967).

Según el USGS dentro de su publicación *Geological Survey Bulletin 1252-D - Phosphate Deposits* clasifica los principales tipos de depósitos de fosfatos según su origen y localización teniendo 3 tipos o clases generales:

- Apatitas ígneas.
- Fosforitas sedimentarias.
- Guano.

2.3 ¿En qué ambientes sedimentarios se encuentran?

Establecer los procesos y elementos precursores ha sido un tema controversial puesto que los trabajos sobre el origen de las fosforitas tienen diferentes enfoques de estudio. Resaltar los trabajos que dieron la pauta para conocer los ambientes de formación de estas rocas fueron de gran utilidad para el estudio actual de las fosforitas. Uno de los primeros autores puntualiza que “la formación de fosforitas y sus productos es a causa de la surgencia que hubo en los océanos cercano a los márgenes continentales.” (Kazakov 1937, 1939, citado por Glenn et al., 1994)

Glenn et al. (1994) considera que la surgencia es clave para explicar la transferencia de fósforo a los sedimentos como partículas de materia orgánica seguido de la liberación de fósforo inorgánico en las aguas de poro y la precipitación subsecuente *in situ* de carbonato-fluorapatito.

Filippelli (2011) precisó que los ambientes sedimentarios donde se encuentran los yacimientos de fosforitas son en la zona de plataforma — talud continental donde las condiciones propicias son una alta tasa de productividad de superficie, dilución limitada por sedimentación terrígena y arrastre, y retrabajo periódico de los sedimentos (p. 763); debido a las referentes causas es posible suponer que las condiciones necesarias para la formación de las fosforitas son una tasa de media-alta energía, poca profundidad y una ubicación cercana a la línea de costa.

Los ambientes sedimentarios donde se sitúan las rocas fosfóricas son variados, aunque su afinidad depende de los elementos o causas geológicas que llevan a la génesis de estos depósitos sedimentarios.

Los entornos de deposición de depósitos de fosfato sedimentario podrían agruparse en tres categorías: depósitos marinos intraplacas, depósitos asociados con los límites de las placas activas y depósitos insulares. Los entornos de deposición marina en placa incluyen: (a) mesetas y montes submarinos; (b) taludes, plataformas y cuencas geosinclinales que incluyen depresiones

sedimentarias marginales e intracratónicas; y (c) entornos no especificados en los que tienen lugar procesos sedimentarios destructivos. Los entornos de deposición de límite de placa activa incluyen (d) entornos marinos y (e) entornos lacustres. Los entornos insulares en este esquema de clasificación incluyen (f) guano y (g) entornos secundarios con reemplazo y depósitos residuales (Riggs, 1980, p. 562, citado por Orris y Chernoff, 2004).

2.4 Información técnica (Normas) y usos de las fosforitas

Muchos países disponen de una legislación que se encarga de asegurar la calidad de los fertilizantes, el cual es el principal uso de las fosforitas; internacionalmente la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), organismo especializado de la ONU ha tratado de establecer una normatividad en cuanto a la composición y calidad de los fertilizantes.

La legislación respecto a las normas técnicas y regulatorias de las rocas fosfóricas aplicadas para fertilizantes eran escasas hasta finales de 1970; en 1976 el Consejo de las Comunidades Europeas publicó una directiva en “Official Journal of the European Communities” de las especificaciones químicas de la fosforita, la cual debía contener un mínimo de 25 % de P_2O_5 del total. En Brasil, el Ministerio de Agricultura especifica un contenido mínimo del 28 % de P_2O_5 del total de la roca; en la India las especificaciones publicadas por la “Indian Fertilizer Control Order” para 1985 en cuanto al contenido mínimo de P_2O_5 era del 18 %.

En México, las Normas Oficiales Mexicanas en conjunto con la Ley Minera Mexicana de acuerdo con el artículo 4º especifica al fosfato como mineral de uso industrial, el cual debe tener un contenido mínimo del 20 % de P_2O_5 .

Las Normas Oficiales Mexicanas que regulan el uso del fósforo en el país se muestran en el siguiente cuadro:

Clave de la Norma	Descripción ⁶
NOM-118-SCFI-2004	Industria cerillera - Cerillos y fósforos - especificaciones de seguridad (contiene la modificación publicada el 29 de septiembre de 2009 en el DOF).
NOM-104-STPS-2001	Agentes extinguidores - Polvo químico seco tipo ABC a base de fosfato mono amónico.
NMX-AA-127-SCFI-2006	Potabilización del agua para uso y consumo humano - polifosfato de sodio - Especificaciones y métodos de prueba.
NMX-BB-041-SCFI-1999	Material de laboratorio - Fosfatasa alcalina, polvo, método enzimático colorimétrico cinético con sustrato de 4-nitrofenol fosfato - Especificaciones y métodos de prueba.
NMX-F-320-S-1978	Determinación de fosfatos en embutidos.
NMX-K-450-1978	Determinación de ortofosfatos en aguas para calderas.
NMX-K-475-1983	Productos químicos - Tripolifosfato de sodio - Cromatografía de las especies de fosfatos que lo constituyen - Método de prueba.
NMX-K-486-1986	Productos para el aseo - Tripolifosfato de sodio.
NMX-L-097-1995-SCFI	Explotación del petróleo - Pirofosfato tetrasódico anhídrido empleado en perforación, reparación y terminación de pozos petroleros - Especificaciones y métodos de prueba
NMX-Q-031-1980	Detergentes domésticos - determinación del contenido de fosfatos (expresados como P ₂ O ₅).
NMX-Y-001-1987	Fertilizantes - Superfosfato simple - Especificaciones.
NMX-Y-029-1983	Fertilizantes - Superfosfato triple granulado.
NMX-Y-043-1987	Productos para uso agropecuario - Fertilizantes - Fosfato de amonio - Especificaciones.

⁶ Ver SE-DGDM, *Perfil de mercado de la fosforita*, 2017, p. 25-28.

NMX-Y-055-1970	Método de prueba para la determinación del tamaño de partícula en superfosfato triple granulado.
NMX-Y-341-SCFI-2006	Productos para uso agropecuario - Ingredientes para la alimentación animal - Fosfatos de calcio como fuentes de fósforo y calcio - Especificaciones y métodos de prueba.

Usos de las fosforitas

El uso de las rocas fosfóricas en la industria es variado y revela una compatibilidad favorable y sustentable para el medio ambiente distinguido en que uno de los usos principales del fósforo es la producción de fertilizantes químicos ya que el fósforo actúa como nutriente básico en las plantas, ayudando al crecimiento y formación de nuevas semillas por ende plantas.

En el capítulo 3.3 de (Jiménez, 2014) se mencionan algunas de las aplicaciones del fósforo dentro de la industria⁷:

- En la industria alimenticia el fósforo es de suma importancia para el desarrollo de la vida cotidiana porque se utiliza dentro del procesado de alimentos como emulsionante, acidulante o simple complemento de ingredientes.
- En productos químicos el fósforo es usado en la fabricación de cerillos, elaboración de limpiadores y retardador de fuego; el ácido fosfórico (H_3PO_4) es usado en la manufactura de la pólvora, así mismo los fosfatos son utilizados en el fosfatizado de las superficies metálicas, esto ayuda a evitar la corrosión de los metales, los aísla eléctricamente y ayuda a mejorar la fijación de la pintura.

⁷Ver Jimenez, R. F., 2014, Análisis del sistema de explotación de la mina de fosforita "La Negra" ubicada en Pacula, Hgo., y propuesta para la sistematización y control de las operaciones: Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Capítulo 3.3, pp. 21-22.

- En la industria farmacéutica el fósforo requiere de especificaciones que cumplan ciertos estándares y normas sanitarias; es utilizado para la elaboración de antibióticos y otros productos médicos, para la elaboración de pastas dentales como abrasivo y en pastas de dientes con flúor.
- El fósforo también es utilizado en el tratamiento en aguas y suavizador de aguas industriales. Evita la acumulación de masas contaminantes como los derrames de hidrocarburos o micro algas dentro del mar.

2.5 Ejemplos de yacimientos en el mundo

La ocurrencia del fósforo a nivel mundial ha sido distribuida heterogéneamente en todo el planeta a lo largo de las diferentes eras geológicas, los principales depósitos de los que se extrae se encuentran en Marruecos y el Este de Sahara, países del Norte de África, China, Estados Unidos y Rusia (Jasinski, 2011, p. 220, citado por Simandl et al., 2011).

El *‘Bulletin of the Society of Economic Geologists’* (2017) dentro de su vol. 112 - “*Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An invited paper*” mencionan algunos de los yacimientos más importantes a nivel mundial de fósforo (p. 515-516):

- Yacimiento Bu craa en el Sahara Occidental del Cretácico Superior.
- Yacimiento de la provincia fosfogénica South Tethyan del Cretácico Superior-Eoceno se localiza en los países de África del Norte.
- Yacimientos fosfogénicos en los campos de Khouribga (cuenca Oulad Abdoun) y Youssoufia en Marruecos (cuenca Ganntour), ambas del Cretácico Superior.
- Fm. Doushantuo en el área Yangtze del Ediacárico al Sur de China.
- Complejo Phosphoria (Formaciones Phosphoria, Park City y Goose Eggs) del Pérmico al Este de los Estados Unidos (Utah, Idaho, Wyoming, Montana y Nevada).

- Grupo Hawthorne, Bone Valley de mediados del Mioceno en Florida correlativo a la Fm Pungo River en Carolina del Norte.

3. Metodología

Lograr de forma apropiada la caracterización de un depósito mineral que no ha sido estudiado detalladamente en campo o del cual casi no se encuentran trabajos previos e información técnica, como lo es el depósito de fosforitas “El Raíces”; es necesario seguir ciertos procesos y/o técnicas en campo y técnicas analíticas de caracterización mineral dentro del laboratorio que nos conlleven a saber de forma certera el tonelaje de la mena por descubrir.

Se realizó una investigación bibliográfica sobre el archivo técnico del SGM, libros, artículos de revistas científicas, mapas geológicos, boletines y páginas web de la zona de San José de Raíces y/o cercanos al Municipio de Galeana, Nuevo León con lo que se podrá establecer las posibles zonas con alto porcentaje de fósforo para su explotación.

3.1 Muestreo de campo

Para la localización y el trabajo de campo realizado en el yacimiento de fosforitas “El Raíces” fue necesario utilizar la carta topográfica del SGM G14-C66 ‘San José de Raíces, Nuevo León’; escala 1:50000. El acceso al depósito de fosforitas es a través de una obra minera subterránea (socavón) de aproximadamente 2.5 metros de altura dentro de un pliegue anticlinal formado por rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Taraises y La Casita.

Durante 3 días se tomaron muestras de las unidades litológicas que componen al depósito y secciones geológicas de las unidades mineralizadas del depósito de rocas fosfatadas. El número total de las muestras de roca tomadas en campo fue de 15 muestras. La recolección se realizó por el método de muestreo de canal a cada 40 centímetros transversalmente al rumbo de la estratificación del pliegue, al frente de obra.

3.2 Cartografía

El reconocimiento geológico del depósito en estudio se realizó mediante caminamiento geológico dentro del socavón que se localiza en el eje del pliegue del anticlinal denominado El Barroso donde se puso énfasis sobre las unidades de rocas, estructuras y alteraciones relacionadas con el depósito.

El trabajo en campo consistió en la descripción y caracterización del depósito por lo cual fue necesario la toma de muestras de las unidades litológicas aflorantes y algunos datos estructurales representativos de las unidades que presentaban enriquecimiento de minerales producto de la deposición de fósforo.

Esta información fue recopilada de mapas geológicos del SGM e INEGI que más tarde fueron utilizados como base cartográfica para la elaboración del mapa del depósito El Raíces [esc 1:1000] con el software QGis v. 3.0. Las curvas de nivel del lugar se obtuvieron de los metadatos de la carta topográfica de INEGI; que más tarde se utilizaron como base para la elaboración del modelo digital de elevación.

3.3 Petrografía y análisis de facies

La identificación macroscópica de los especímenes de roca es esencial para una clasificación correcta microscópicamente, identificar las asociaciones minerales presentes, así como su textura y estructura en muestra de mano nos ofrece un panorama sobre su posible clasificación petrológica.

Las láminas delgadas de las fosforitas fueron analizadas mediante luz reflejada para identificar su mineralogía y textura debido a que se tratan de rocas sedimentarias de origen químico (calizas). En total se laminaron 10 muestras de roca de la Fm. La Casita.

Para el análisis petrográfico de las láminas delgadas de las muestras de fosforitas recolectadas en campo fue a través de un microscopio petrográfico marca Carl Zeiss modelo Axiolab del Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM, (Figura 3.1).

Fueron tomadas microfotografías digitales de la mineralogía mediante un analizador de imágenes Carl Zeiss Axiocam Emulation acoplado al microscopio de misma marca, con el software ImageFocus v. 3.0.0.2.

El análisis de microfacies se hará mediante el modelo de Flügel de plataforma bordeada que se muestra en la página 721 del libro *Microfacies of Carbonate Rocks* (2010)-

3.4 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que identifica las fases cristalinas presentes a partir de las difracciones que sufren al aplicar un haz de rayos X.

El método más preciso y utilizado es la difracción de polvo, es un método de análisis estructural mediante el cual permite identificar los minerales por su estructura cristalina (Melgarejo et al., 2010). Cada mineral tiene una celda cristalina diferente, la descripción de la celda mineral proporciona la información sobre la estructura cristalina del mineral.

El difractograma obtenido del análisis procedió de un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D del Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM. La muestra se trituró y homogeneizó en un mortero de ágata y se midió utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas). La recolección de datos y medición se realizó en el



Figura 3.1 - Microscopio Axiolab ubicado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM.

intervalo angular 2θ de 5° a 70° en escaneo por pasos con un "step scan" de 0.003° (2θ) y un tiempo de integración de 40 segundos por paso.

La técnica utilizada se basa en la ley de Bragg, esta ley de la difracción permite obtener los espaciados para cada mineral (d_{hkl}), los rayos X se reflejan sobre los planos reticulares de los cristales, los cuales se denotan mediante tres enteros "h, k y l" de acuerdo con su ángulo θ los que dependen del espaciado paralelo h, k y l de la red cristalina.

Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Donde:

n= número entero.

λ = longitud de onda de los rayos X.

d_{hkl} = valores espaciados a la sucesión de planos paralelos h,k,l.

θ = valor del ángulo de difracción obtenido de la onda de rayos X.

La fórmula de la Ley de Bragg permite obtener los valores espaciados y las intensidades reflejadas para cada mineral (datos de difracción o difractogramas), estos resultados se comparan con una base de datos digital de difracción, el grado de ordenamiento del mineral puede determinarse por la agudeza de sus picos, si la reflexión es muy aguda el grado del ordenamiento será mayor (Carretero-León y Pozo-Rodríguez, 2007).

3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Melgarejo et al. (2010) definen la microscopía electrónica de barrido o SEM por sus siglas en inglés (*Scanning Electron Microscope*) como una técnica de laboratorio que utiliza un haz de electrones de un rayo de luz que es inducido sobre una muestra para generar una imagen a partir de dichas interacciones. El barrido de la muestra provoca que se originen ciertos productos debido a la interacción de los electrones disparados y la superficie de la muestra. Los productos que se emiten al hacer el análisis con microscopía electrónica de barrido son electrones retrodispersados, electrones secundarios y rayos X característicos de los elementos que contiene la muestra (Ídem).

Melgarejo et al. (2010) explican también que el análisis dentro del SEM puede efectuarse en dos modos debido al comportamiento que exigen las interacciones elásticas e inelásticas causadas por los electrones secundarios (SE-BSE) y retrodispersados (BSE).

“El modo SE-BSE sirve para identificar la forma de materiales rugosos presentes en la muestra ya que utiliza los electrones secundarios para crear imágenes con diferentes tonalidades de iluminación mostrando la apariencia de relieve. El modo BSE es más cuantitativo ya que los electrones retrodispersados ofrecen una imagen que muestra la variación composicional en zonas puntuales de las muestras dependiendo de la cantidad de elementos pesados o ligeros que compongan los minerales de la muestra.” (Carretero-León y Pozo-Rodríguez, 2007, p. 99).

Por todo lo anterior se concluye que la microscopía electrónica de barrido es una técnica cualitativa complementaria que complementa la identificación de minerales de interés económico y sus relaciones texturales.

Para el estudio de microscopía electrónica de barrido se utilizó un equipo SEM portátil TM-1000, marca Hitachi, en el Laboratorio de Petrografía y Minerografía del Departamento de Recursos Naturales del Instituto

de Geofísica, UNAM, mediante el cual se efectuó un microanálisis de puntos por microsonda electrónica de los componentes seleccionados (matriz/cementante/aloquímicos) (Figura 3.2).

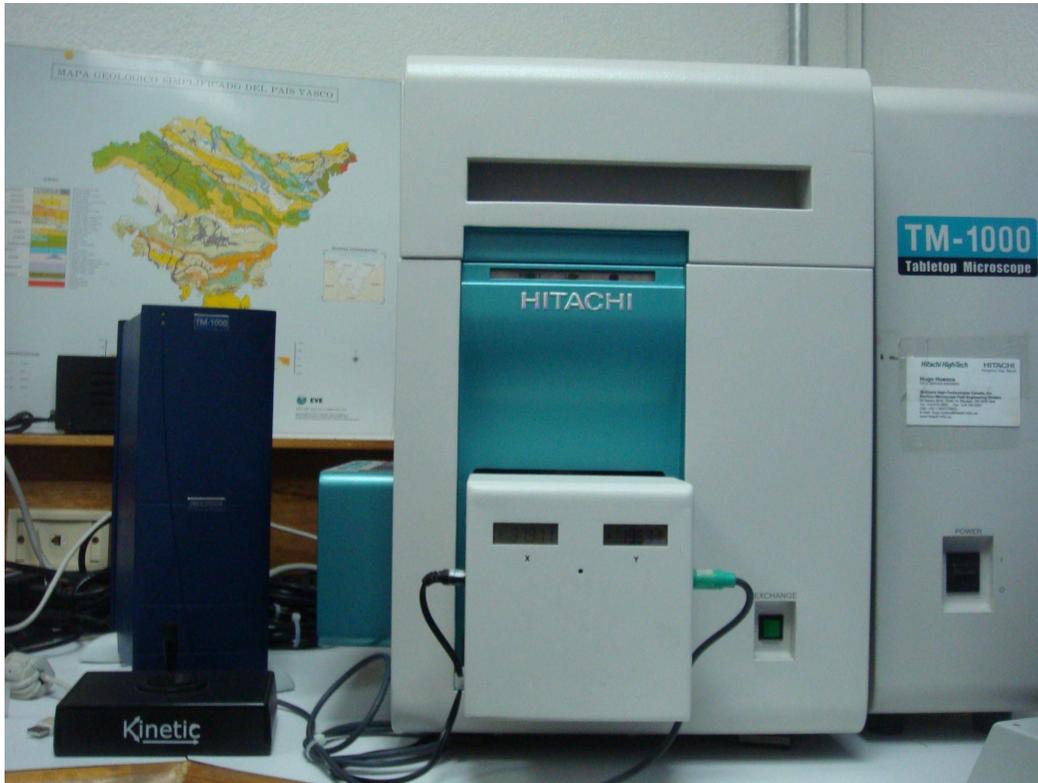


Figura 3.2 - SEM portátil TM-1000 ubicado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM.

3.6 Geoquímica de roca total

La adquisición de datos de concentración o porcentaje en peso [% W] se hizo por técnicas analíticas utilizadas comúnmente en el estudio geoquímico de rocas. En un principio se utilizó fluorescencia de rayos X (FRX) para medir la cantidad de óxidos mayores como SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{F}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5 ; algunas otras muestras fueron analizadas en su totalidad desde óxidos mayores hasta elementos traza mediante ICP nombrado así por sus siglas en inglés (*Inductively Coupled Plasma*).

3.6.1 Fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) usa dos tipos de radiación, la radiación primaria de un tubo de rayos X para excitar a la emisión secundaria de rayos X (fluorescente) de alguna muestra y la radiación emergente de esta incluye los picos de rayos X secundarios característicos de los elementos presentes en ella. (Fitton, 1997).

El espectro de los rayos X resultantes de un elemento en particular asigna un valor que refleja su concentración en la muestra (Skoog y Leary, 1994) por lo que esta técnica es útil para realizar el análisis cuantitativo de elementos mayores.

Para el ensayo de fluorescencia de rayos X se utilizó un espectrómetro de masas secuencial de FRX de la marca Siemens SRS 3000 ubicado en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM.

3.6.2 Método de fusión y digestión total de plasma acoplado inductivamente (FUS-ICP y TD-ICP)

Las técnicas analíticas que se emplearon para conocer los elementos traza presentes en algunas muestras utilizan un plasma acoplado inductivamente (ICP) que se refiere a un tipo de fuente de ionización donde la energía proviene de corrientes eléctricas originadas por inducción electromagnética que descompone completamente una muestra en sus elementos constituyentes y transforma esos elementos en iones que luego serán detectados mediante un espectrómetro de masas.⁸

Los procedimientos empleados fueron el método de fusión de plasma acoplado inductivamente (FUS-ICP) y el método digestión total de plasma acoplado inductivamente (TD-ICP). Las muestras se analizaron en el

⁸ Ver Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) Information, <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms-information.html>

laboratorio comercial ActLabs con las condiciones de calidad y certificación adecuadas para la preparación y análisis de dichas muestras.

3.7 Modelado y cálculo de reservas

Es importante conocer el volumen de un yacimiento mineral para la evaluación del depósito durante todas sus etapas desde la exploración hasta la explotación y cierre. “El propósito fundamental del cálculo de reservas de un yacimiento consiste en determinar la cantidad de mineral presente y la factibilidad de realizar la explotación comercial de los minerales metálicos y no metálicos” (López-Aburto, 2003, p. 89).

Es importante realizar el modelado y cálculo de reservas ya que de esto dependerá una explotación eficiente y productiva, al conocer el potencial del yacimiento y la distribución del mineral dentro del cuerpo tendrá como resultado el cuantificar su tamaño y el tipo de minado que se realizará. Por lo cual el cálculo de reservas es primordial en la planeación y estimación de los elementos de producción de un depósito minable.

3.7.1 Criterio de selección del método de cálculo de reservas

Los factores que se toman en cuenta para la estimación de reservas son: la geología del depósito, el método de exploración, la disponibilidad y calidad de los datos, los objetivos del proyecto y el grado de exactitud requerido.

La irregularidad que muestra el depósito, las limitadas muestras tomadas en campo, la poca variabilidad en la composición mineralógica de las muestras y la poca información disponible sobre los trabajos de exploración en el socavón o cercanos al área en estudio son factores importantes para elegir primordialmente el método estándar de secciones transversales para el cálculo de reservas.

3.7.2 Determinación de los datos de exploración y procedimiento para el cálculo de reservas

Las técnicas que se utilizan para el cálculo de reservas de un depósito mineral siguen un orden secuencial el cual es el siguiente:

- Observación geológica.
- Procedimiento de los métodos de exploración y muestreo.
- Evaluación de los datos de exploración.
- Determinación de los límites del depósito mineral.
- Selección del método adecuado para el cálculo de reservas.

3.7.3 Clasificación de métodos para el cálculo de reservas

Para realizar el cálculo de reservas de un cuerpo mineral mapeado es conveniente convertirlo a un cuerpo geométrico compuesto por uno o varios bloques (polígonos) que cubran el área máxima del cuerpo mineralizado, la construcción de estos cuerpos geométricos dependerá del método que se utilice, existen dos tipos distintos que son los convencionales y los computarizados (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 - Clasificación de los métodos de evaluación de reservas minerales.

Métodos convencionales	Métodos de pesos y áreas de influencia	Método analógico
		Método de bloques geológicos
	Métodos de bloques minables	
	Método de secciones transversales	Método estándar
		Método lineal
		Método de isolíneas
	Métodos analíticos (geométricos)	Método de triángulos
Método de polígonos		
Métodos computarizados	Métodos estadísticos	
	Métodos geoestadísticos	

3.7.3.1 Método de secciones transversales

El método de secciones transversales es el método adecuado para el cálculo de reservas en este tipo de yacimiento tabular; inicialmente el cuerpo mineral se delinea el siguiente paso consiste en dividir el cuerpo entero en bloques, por medio de la elaboración de secciones geológicas transversales ubicadas a intervalos que estarán en función de la naturaleza del depósito, de la cantidad y localización de los datos de exploración y de los propósitos requeridos. Por último, los bloques se conforman con base en algunos principios de interpretación de los datos de exploración (López-Aburto, 2003).

3.7.3.1.1 Método estándar

“Basado en la regla del cambio gradual, los bloques quedarán confinados en medio de dos secciones con superficies laterales irregulares y los bloques exteriores o finales por una sola sección también con caras laterales irregulares. Estas secciones pueden ser paralelas, no paralelas, verticales, horizontales o inclinadas.” (López-Aburto, 2003, p. 112).

4. Marco Geológico

4.1 Marco tectónico regional

La configuración regional actual del norte y noreste de México está estrechamente ligada con el proceso de formación del Golfo de México y del Orógeno Mexicano; estos procesos tectónicos ocurrieron desde principios del Jurásico inferior hasta el Paleógeno. La formación del Golfo de México está relacionada al desarrollo de una margen pasiva que se suscitó con la fragmentación del supercontinente Pangea en el Triásico tardío el cual fue uno de los eventos cruciales para la formación de fosas y pilares que tendrían el control de la depositación de las facies sedimentarias marinas (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer et al., 1991; Goldhammer, 1999, p. 255, citado por Chávez-Cabello. G. et al., 2011).

El Orógeno Mexicano fue el evento precursor que dio origen a distintos eventos geológicos a partir del Cretácico Superior al Paleoceno-Eoceno hace aproximadamente de 80-55 millones de años; los eventos geológicos más sobresalientes durante este proceso son: el cinturón plegado perdido, las montañas Rocallosas (Canadá), la cordillera norteamericana y la Sierra Madre Oriental (Fitz et al., 2018).

Fisiográficamente la SMO es una cadena orográfica de más de 1000 kilómetros de longitud, con 80 a 200 kilómetros de amplitud y un promedio de elevación de 2200 metros sobre el nivel del mar. Las condiciones geológicas de levantamiento y posteriormente de deformación que sufrieron las rocas que dieron origen a la SMO muestran distintos estilos estructurales dentro de cada área (Eguiluz et al., 2000).

Las rocas del basamento de dicho rasgo orográfico varían composicional y temporalmente debido al plegamiento y deformación que sufrieron por orogenias anteriores; los tipos de rocas que se han descrito dentro del basamento de la SMO se componen de gneisses del Precámbrico (Carrillo-Bravo, 1961; De Cserna et al., 1977; Ramírez, 1978) esquistos de edad pre oxfordiana (Kellum, 1932; Imlay, 1937; Carrillo-Bravo, 1961; Viniegra, 1963; Córdoba, 1965) y sedimentos del Paleozoico (King, 1934; Carrillo-Bravo, 1961; citado por Eguiluz et al., 2000).

Inicialmente las primeras rocas de ambiente marino que fueron depositadas son grandes secuencias de rocas evaporíticas a partir del Calloviano (Salvador, 1987, 1991; Goldhammer et al., 1991, 1999; Goldhammer y Johnson, 2001, citado por Regalet, 2011), seguido de sucesiones calcáreo-arcillosas, calcáreas y por último rocas de origen clástico intercaladas con rocas calcáreas (Chávez-Cabello et al., 2011) que finalizan el marco tectónico regional correspondiente a las rocas que contienen los depósitos de fosforitas en el noreste de México.



Figura 4.1 – Localización del yacimiento de fosforitas del anticlinal El Barroso al sur del rasgo orográfico de la curvatura de Monterrey perteneciente a la Sierra Madre Oriental. Se hace un acercamiento de la zona en un recuadro rojo donde se nombra al anticlinal como “El Barrosito”

[Modificado de: Padilla y Sánchez, 1985].

A grandes rasgos la región noreste de la Sierra Madre Oriental, donde se encuentra el anticlinal El Barroso se caracteriza en un principio por el depósito de extensas plataformas de grandes paquetes de rocas

terrígenas clásticas, seguido de rocas carbonatadas y por último secuencias evaporíticas. Las estructuras geológicas presentes en el área de San José de Raíces, Nuevo León son anticlinales y sinclinales apretados, recostados, asimétricos, la mayoría de ellos con una vergencia general hacia el NE, además esta área presenta comúnmente fallas inversas y de transcurrencia (Padilla y Sánchez, 1985).

4.2 Geología Regional

Las formaciones geológicas que componen la zona se encuentran reportadas dentro del acervo técnico del Servicio Geológico Mexicano⁹ y son las siguientes:

- Fm. Huizachal (TRs Ji Vs); nombrada por Imlay, (1948). Compuesta por rocas vulcanosedimentarias con sedimentos terrígenos; mientras que en la parte inferior de la formación se encuentran areniscas alternando con horizontes de lutitas y limolitas. Su edad corresponde al Triásico Superior-Jurásico Inferior.
- Fm. La Joya (Jm Cgp-Ar); nombrada por Mixon, (1959). Consiste en rocas sedimentarias, dentro de su base lutitas y limolitas y hacia la cima su composición es de conglomerado rojo polimíctico que varía de forma desordenada. Su edad se determinó a través de su posición estratigráfica con las formaciones adyacentes.
- Fm. Olvido (Jok Y-Cz); descrita por Heim A., (1940). Las rocas que se encuentran en esta unidad se definieron como una secuencia de anhidrita y yeso que se emplazan repetitivamente; exhiben intemperización por la presencia de arcillas que cubren dichas secuencias. Exhiben lentes de capas de caliza que varían desde mudstone hasta grainstone con diferentes espesores. Sobreyace a los

⁹ Ver SGM, Léxico Estratigráfico de México: https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#

sedimentos conglomeráticos con un contacto bien definido con la Fm. La Joya, la edad que se le atribuye a esta formación es Jurásico Superior (SGM, 2006).¹⁰

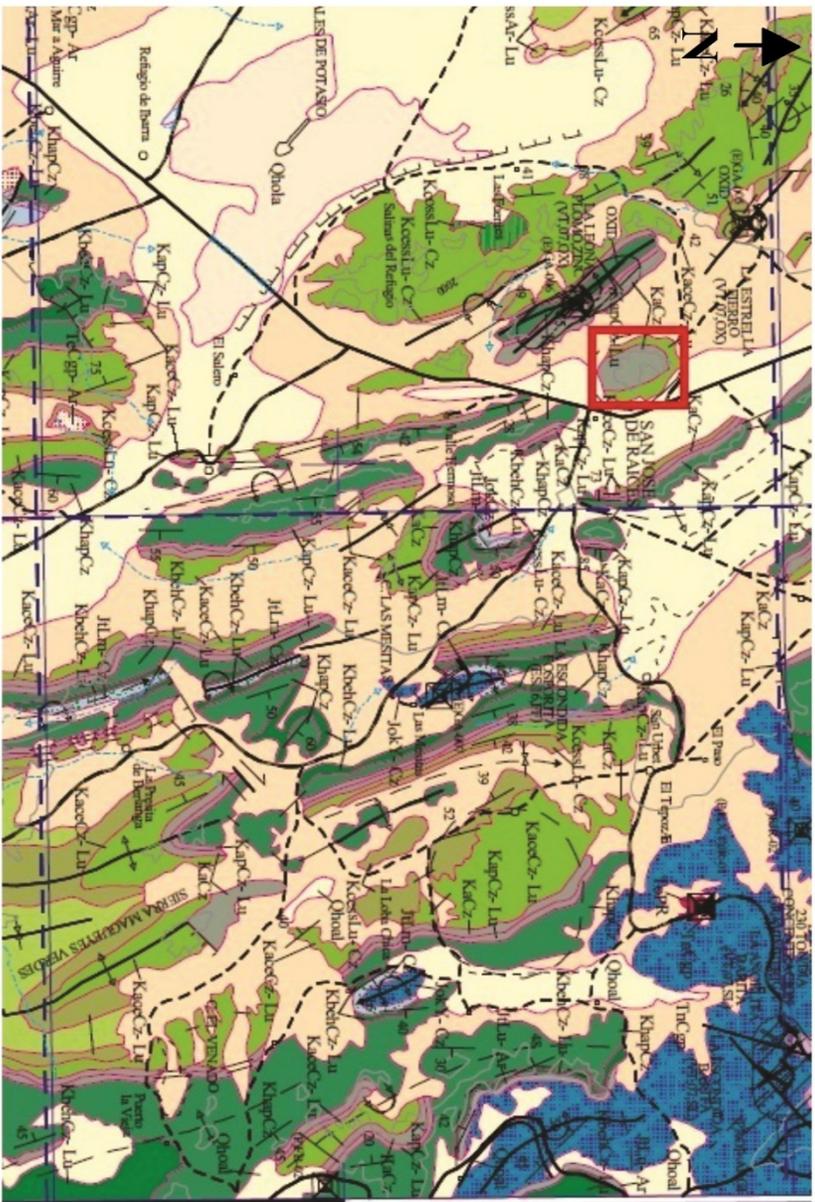
- Fm. Zuloaga (Jok Cz); nombrada por Imlay, (1938). Esta unidad litoestratigráfica se compone de calizas estratificadas que presentan bioturbación, estiliolitas, así como nódulos y lentes de pedernal. Imlay (1953) le asignó una edad correspondiente al Jurásico Superior (Oxfordiano) relacionada a su nivel estratigráfico.
- **Fm. La Casita** (Jkt Lu-Ar); definida por Imlay, (1936). Define su litología de esta formación como una secuencia de intercalaciones de arenisca, lutita, limolita y calizas de grano fino interestratificada con arenisca conglomerática. Existen horizontes y vetillas de yeso con lutitas y limolitas dentro de la base, mientras que en la cima la litología corresponde a calizas de grano grueso a medio interestratificadas con rocas clásticas de grano medio a fino. Esta unidad está por encima de la Fm. Olvido y Zuloaga; y sobreyace a la Fm. Taraises, su edad geológica corresponde al Jurásico Superior dada su posición estratigráfica y contenido faunístico.
- **Fm. Taraises** (Kbeh Cz-Lu); nombrada por Imlay, (1936). Las rocas afloran de forma continua en los flancos de las estructuras anticlinales. La litología corresponde a una secuencia de calizas de grano fino estratificadas; seguido a esto una secuencia de limolitas calcáreas y arenosas con espesores variables. Existen nódulos y lentes de pedernal, concreciones de pirita que algunas contienen hematita. Esta formación se estableció por su posición cronoestratigráfica y contenido faunístico del Berriasiano al Hauteriviano (Tristán y Torres, 1992) sobreyace en forma concordante a la Fm. La Caja y La Casita e infrayace a la Fm. Cupido.

¹⁰ Goldhammer et. al. (1999) reporta a la Fm. Olvido en los alrededores de la zona de Monterrey y Saltillo como mudstone de limos similar a la Fm. Zuloaga subyacente en tipos de granos, texturas deposicionales, facies de carbonatos y ciclos sedimentarios, que igualmente representa un régimen de rampa de carbonato.

- Fm. Cupido (Khap Cz); definida por Imlay, (1937) como calizas de color gris oscuro, formando capas con concreciones de pirita, y concreciones de pedernal gris claro. Se le ha asignado una edad de Hauteriviano tardío – Barremiano.

Las siguientes formaciones que se depositaron sucesivamente sobre estas rocas afloran en dirección norte del anticlinal y en el norte de Galeana y no se encuentran cercanas al área en estudio por lo cual sólo serán mencionadas en este trabajo en un listado para fines del conocimiento geológico dentro del área:

- Fm. La Peña (Kap Cz-Lu).
- Fm. Aurora (Ka Cz-Do).
- Fm. Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu).
- Fm. Agua Nueva (Kcet Cz-Lu).
- Fm. Indidura (Kcet Cz-Lu).
- Fm. San Felipe (Kcoss Lu-Cz).
- Fm. Caracol (Kcoss Ar-Lu).

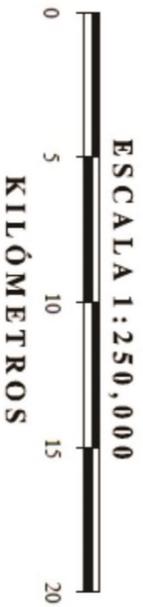


2700000

2725000

375000

375000



2700000

2725000

SIMBOLOGÍA

CUATERNARIO		TERCIARIO	
Qhsh	LACUSTRE	Ne-9g	CONGLOMERADO POLIMICTICO
Qhsl	ALUVIÓN	Tab	BASALTO
Qhsc	COLUVIÓN	PALEÓGENO	
Qhst	TRAVERTINO	Br	BRECHA RIOLITICA
		Co-1a	CONGLOMERADO POLIMICTICO-ARENISCA
CRETÁCICO		INFERIOR	
Ke-1a	LITITA-ARENISCA	Ke-1a	CALIZA-LITITA
Ke-1b	LITITA	Ke-2	CALIZA
Ke-1c	LITITA	Ke-3	CALIZA
Ke-2a	ARENISCA-LITITA	Ke-4	CALIZA-LITITA
Ke-2b	LITITA-CALIZA	Ke-5	CALIZA
Ke-2c	LITITA-CALIZA	Ke-6	CALIZA-LITITA
Ke-3a	CALIZA-LITITA	Ke-7	LITITA-ARENISCA
		Ke-8	LITITA-ARENISCA
JURÁSICO		MEDIO	
J-1	SUPERIOR	J-2	CONGLOMERADO POLIMICTICO-ARENISCA
J-2	LITITA-ARENISCA	J-3	ARENISTA-LIMOLITA
J-3	CALIZA	J-4	ARENISCA-LIMOLITA
J-4	ARENISCA-LIMOLITA		
TRIÁSICO			
T-1	LITITA-LIMOLITA		

Figura 4.2 - Mapa regional del área donde se ubica el área de San José de Raíces, Nuevo León., esc. 1:250000. [Se delimita en un recuadro color rojo la zona donde se encuentra el anticlinal el Barroso].
[Tomado de: SGM, 2000, Concepción del Oro G14-10 Carta Geológico-Minera, esc. 1:250000].

4.3 Geología local

La zona estudiada se ubica al sur de la municipalidad de Galeana, Nuevo León e incluye una obra minera de tipo socavón y terreros de material de interés económico con fosforitas. Las unidades litológicas que afloran en la zona mineralizada incluyen secuencias sedimentarias carbonatadas plegadas de la Fm. La Casita y la Fm. Taraises.

4.3.1 Secuencia estratigráfica

En el anticlinal El Barroso aflora la Fm. La Casita sobreyaciendo a la Fm. Zuloaga, y suprayaciendo a la Fm. Taraises cronológicamente estas formaciones fueron depositadas a partir del Jurásico Superior específicamente durante el Kimmeridgiano-Tithoniano (Fm. Zuloaga y La Casita) al Cretácico Inferior entre el Berriasiano y Valanginiano (Fm. Taraises).

4.3.1.1 Formación Zuloaga

Este paquete de rocas no aflora localmente en el socavón, aunque regionalmente al oeste de la zona aparece. Se compone por caliza de color gris oscuro que intemperiza a gris parduzco, estratificación de mediana a gruesa y que en ocasiones llega a ser masiva, presenta huellas de disolución, bioturbaciones y líneas estilolíticas, así como nódulos y lentes de pedernal de color negro, no observándose su base (Figura 4.3). El espesor atribuido en la carta geológica de la zona es de 250 [m] y a nivel regional es de aproximadamente 450 [m] (SGM, 2006).

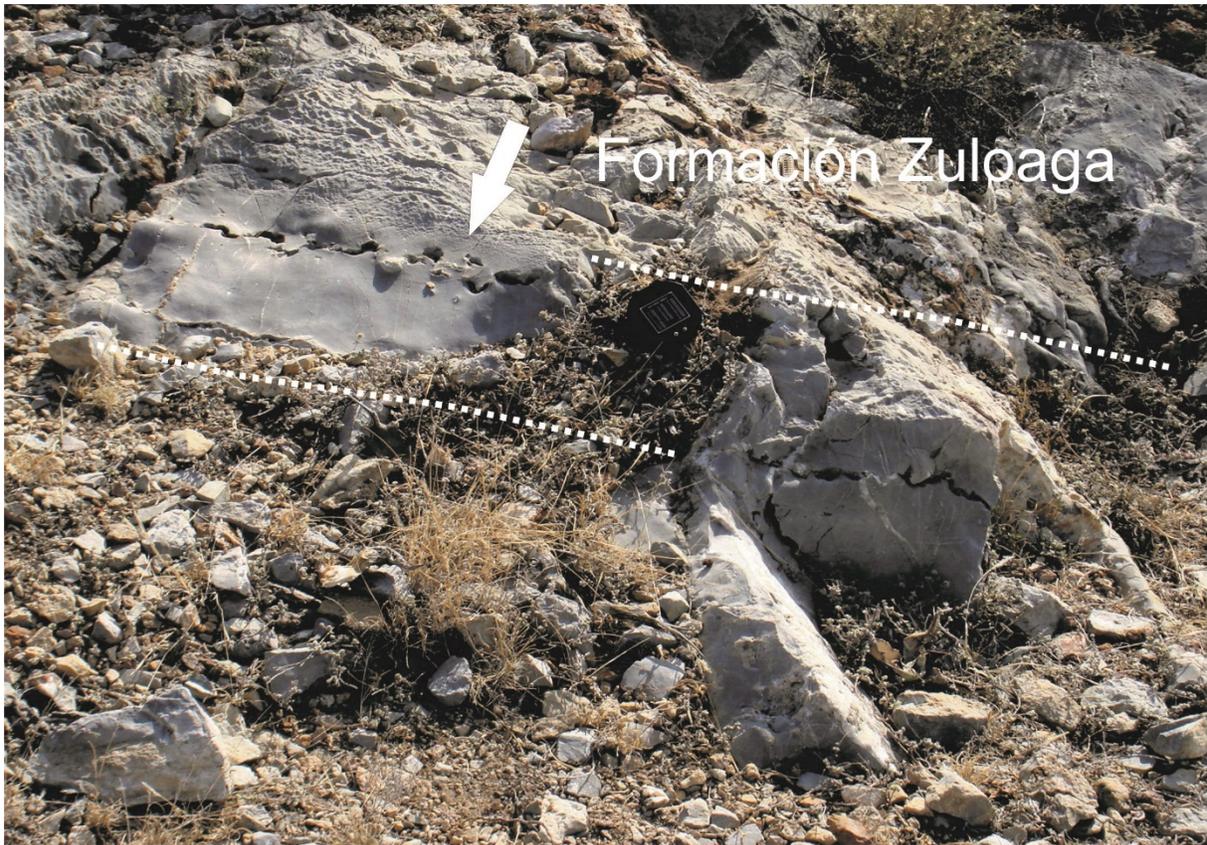


Figura 4.3 - Fm. Zuloaga. A) Estratos de caliza pertenecientes a la formación Zuloaga descubiertos en la zona del anticlinal El Barroso. [Se señala con una flecha blanca las marcas de disolución presentes en la roca].

4.3.1.2 Formación La Casita

Está constituida por una intercalación de calizas de grano medio de color gris, algunas fosilíferas de color gris oscuro y lutitas calcáreas de color gris claro a gris oscuro que intemperizan a color amarillo-ocre y en algunas partes rojizo (Figura 4.4 B). Los estratos de caliza tienen un espesor de 15 - 20 [cm] y los de lutita desde 5 [cm] hasta 40 [cm] (Figura 4.4 A); algunos de estos estratos de caliza exhiben la presencia de vetillas de calcita.



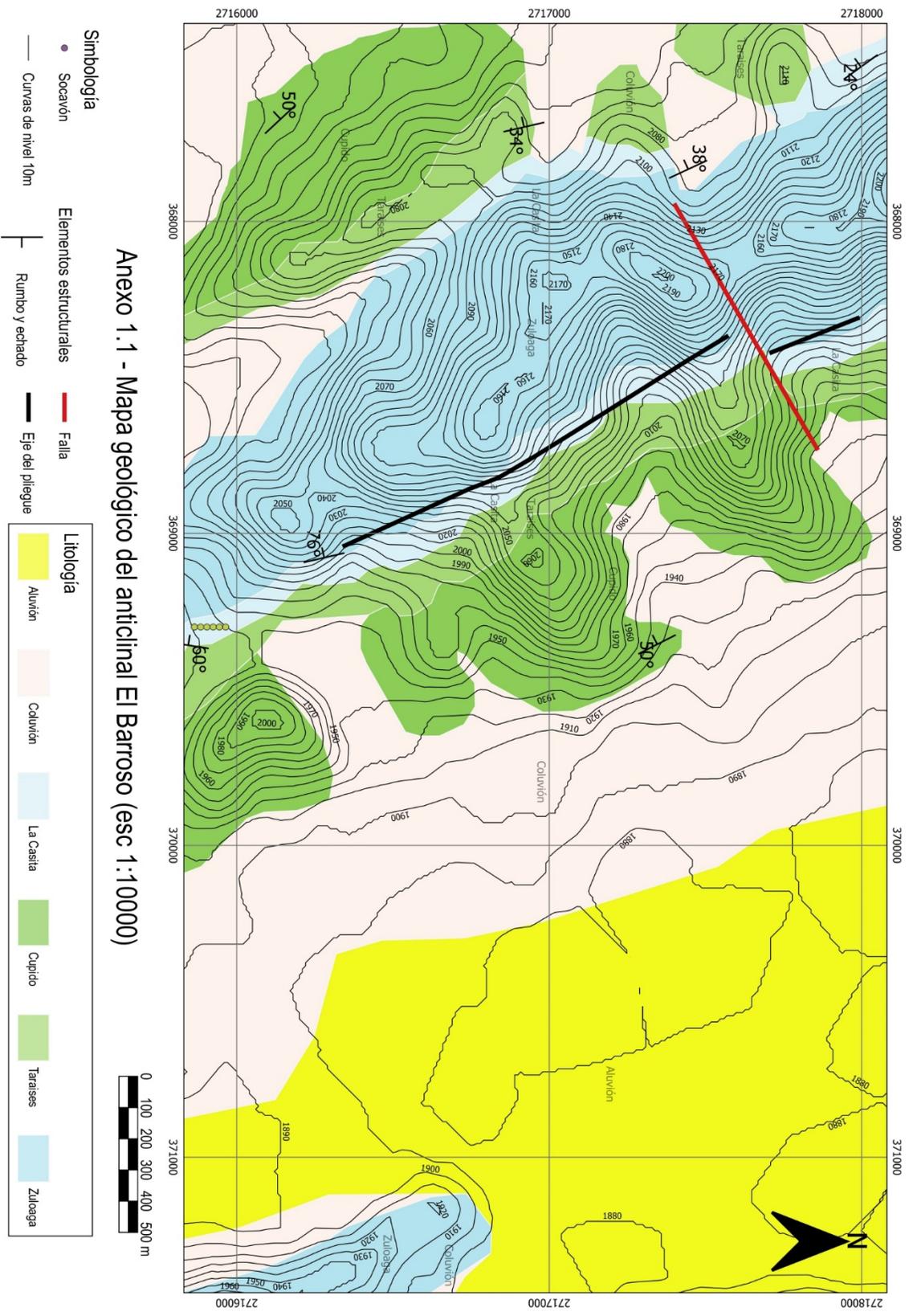
Figura 4.4 - Fm. La Casita. A) Estratos de caliza intercalados con lutitas calcáreas donde se aprecia la alternancia del tamaño de los estratos. B) Muestra de terrero de la Fm. La Casita donde se observa la intemperización color amarillo-ocre o rojizo observada al interior del socavón.

4.3.1.3 Formación Taraises

Esta formación se ha descrito como una secuencia de rocas calizas arcillosas de color gris claro estratificadas en su mayoría en capas medianas de 10 hasta 20 [cm] de espesor con ocasionales lentes de pedernal. Se meteoriza a color amarillo-ocre por lo regular; presenta abundante fracturamiento relleno de calcita. El espesor de esta unidad presenta gran variabilidad en la región dentro del socavón se estimó un espesor de 15 [m] aproximadamente, aunque se cree que pueda llegar hasta 150 [m] además este paquete de rocas aflora en los costados del anticlinal y se encuentra cubierto por coluvión.



Figura 4.5 - Fm. Taraises. A) Estratos de caliza arcillosa (mudstone) donde se aprecia la meteorización en color ocre y las fracturas presentes en la roca.



Anexo 1.1 - Mapa geológico del anticlinal El Barroso (esc 1:10000)

Simbología

- Socavón

Elementos estructurales

- Falta
- Eje del pliegue

Litología

- Aluvión
- Coluvión
- La Castia
- Cupido
- Tarasés
- Zuloaga

Curvas de nivel 10m

Rumbo y echado

Figura 4.6 - Mapa geológico local de la zona de San José de Raíces donde se encuentra el anticlinal El Barroso elaborado a partir de los datos tomados en campo y de la carta geológico-minera del SGM, San José de Raíces G14-C66, esc. 1:50000 [Véase Anexo 1.1].

5. Depósito de fosforita

5.1 Estructura mineralizada y geología del yacimiento de fosforitas

El depósito de fosforitas del anticlinal El Barroso se ubica en la porción suroeste del área mineralizada de San José de Raíces, Nuevo León (SGM, 2006), en la región sur a 100 km aproximadamente de la curvatura de Monterrey; es en esta región donde afloran rocas sedimentarias del límite Jurásico – Cretácico plegadas por los movimientos de deformación de la orogenia Laramide.

La secuencia de carbonatos que afloran en el anticlinal el Barroso pertenecen al Jurásico Superior – Cretácico Inferior, concretamente a las formaciones de interés que son La Casita (Kimmeridgiano-Tithoniano) principalmente; y Taraises (Berriasiano-Hauteriviano) para delimitar la extensión (potencia) del depósito.

El depósito de fosforita está comprendido dentro de los estratos de la Fm. La Casita y exhibe una estructura estratoconfinada, dentro de una de las facies de la formación. La mineralización de fosforita dentro de la Fm. La Casita consiste en una secuencia de rocas calizas que varían en su relación matriz-esqueleto y tamaño de grano principalmente, varían de *wackestone* a *grainstone* con alto contenido fosilífero intercaladas con lutitas arcillosas, estratificación laminar decreciente; con una geometría plegada y fracturamiento incipiente.

Los estratos muestran estructuras nodulares finas de < 1 mm y hasta 1 cm de fosforita, con potencia de capas de 10-15 cm. El contacto con la Fm. Taraises es concordante y difuso por lo cual su litología y composición mineralógica no tiene cambios significativos solamente existen diferencias que se reflejan en su textura, contenido faunístico y en la geometría de los estratos.

La entrada a la obra minera dentro del anticlinal “El Barroso” es un socavón que visto en planta tiene 2 [m] de ancho con un rumbo preferencial de NW 10° SE. Presenta un frente de explotación inactivo de 4 [m] de ancho por 2.5 [m] de altura. Esta obra minera se desarrolló de forma subterránea con fines de explotar un lente de sulfuros tipo MVT que se alojaba en el núcleo del pliegue.

La estructura que hospeda al depósito de fosforitas es una serie estratos de la Fm La Casita deformados dentro del pliegue El Barroso, que corresponde a un anticlinal recumbente o recostado donde afloran las litologías de rocas calcáreas jurásicas y cretácicas representadas por las formaciones La Casita y posteriormente Taraises; se extiende a través de 8 [km] de largo aproximadamente, con una dirección de rumbo NW-SE e inclinado hacia el NE. La estratificación dentro del socavón “El Raíces” es perpendicular al pliegue, de forma laminar con geometría planar; normalmente estratodecreciente aunque resulta difícil definir un tipo de secuencia sedimentaria debido al alto grado de deformación de la zona. Las estructuras sedimentarias observables son concreciones calcáreas que indican un régimen de descompresión dado a la interrupción de los esfuerzos que sufrió la roca durante la deformación (Figura 5.1).



Figura 5.1 - Imagen representativa sobre las estructuras sedimentarias dentro del socavón del anticlinal El Barroso. *Las flechas blancas señalan concreciones de caliza encontradas dentro del socavón.

Resulta necesario tener un buen conocimiento sobre las características estructurales del anticlinal “El Barroso” para así estimar en forma precisa la morfología del cuerpo estratoconfinado con fósforo y tener una idea clara y precisa de la alineación del trend de los estratos mineralizados y si existen posibles fallas que impliquen corrimiento de la mineralización. Los pliegues próximos al anticlinal “El Barroso” son: el sinclinal “Los Mayos” y el anticlinal “La Leona”; tienen una dirección preferencial de rumbo NW-SE, que también se corrobora en la carta geológica-minero de la zona. (SGM, 2006).

La estratificación y la alternancia de ciclos sedimentarios es una de las características que controlan esencialmente la forma de las estructuras mineralizadas dentro del pliegue de “El Barroso”. Los estratos del depósito de fosforitas son mantos tabulares que se encuentran encajonados dentro de una secuencia calcáreo-arcillosa que tienen un espesor de 0.20 [m] a 0.50 [m], y muestran alternancia de capas entre rocas de fosforita y roca estéril. Las capas se alternan de manera aleatoria aunque siguen un patrón de mineralización en relación al espesor de cada capa, encontrándose uno de mayor espesor (o ancho de capa), y dos o más capas de menor espesor (Figura 5.2).

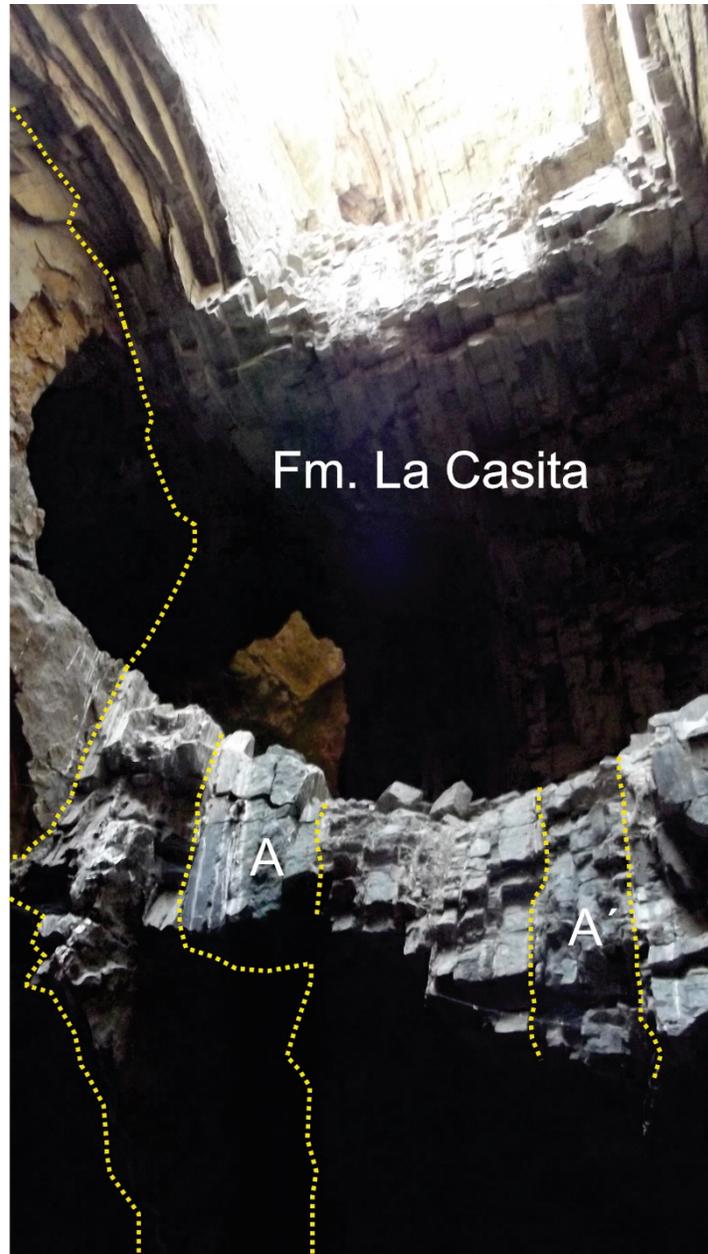


Figura 5.2 - Fotografía tomada en una lumbrera que se encuentra dentro del socavón del anticlinal El Barroso donde se aprecia la estratificación de los cuerpos tabulares de fosforita (A - A') de la Fm. La Casita.

5.2 Características del yacimiento

(a) Litoestratigrafía del yacimiento (contacto entre formaciones)

- (1) La **Fm. La Casita** está conformada por calizas oolíticas tipo *wackestone*, *packstone* y *grainstone* con procesos diagenéticos observables como cementación, reemplazamiento y deformación que subyacen a la Fm. Taraises. Dentro de la petrografía se identificaron en las muestras fósiles de radiolarios principalmente, calpionélidos, fragmentos de concha y algunos foraminíferos. (Figura 5.3 C, D). La mineralogía está compuesta en su mayoría por calcita, carbonato-fluorapatito (colofano), con cuarzo y yeso como minerales accesorios. (Figura 5.3 A, B). El aporte de materia orgánica en el ambiente de formación desarrolló las condiciones idóneas para el enriquecimiento de carbonato-fluorapatito y el reemplazamiento de colofano dentro de los aloquímicos señala varios eventos de cementación. El cambio de microfacies reflejado dentro de los horizontes texturales vistos en lámina delgada indica las condiciones físico-químicas variables que rigieron la depositación de sedimentos dentro del ambiente de plataforma en el lugar, más adelante dichas condiciones serán explicadas a detalle.

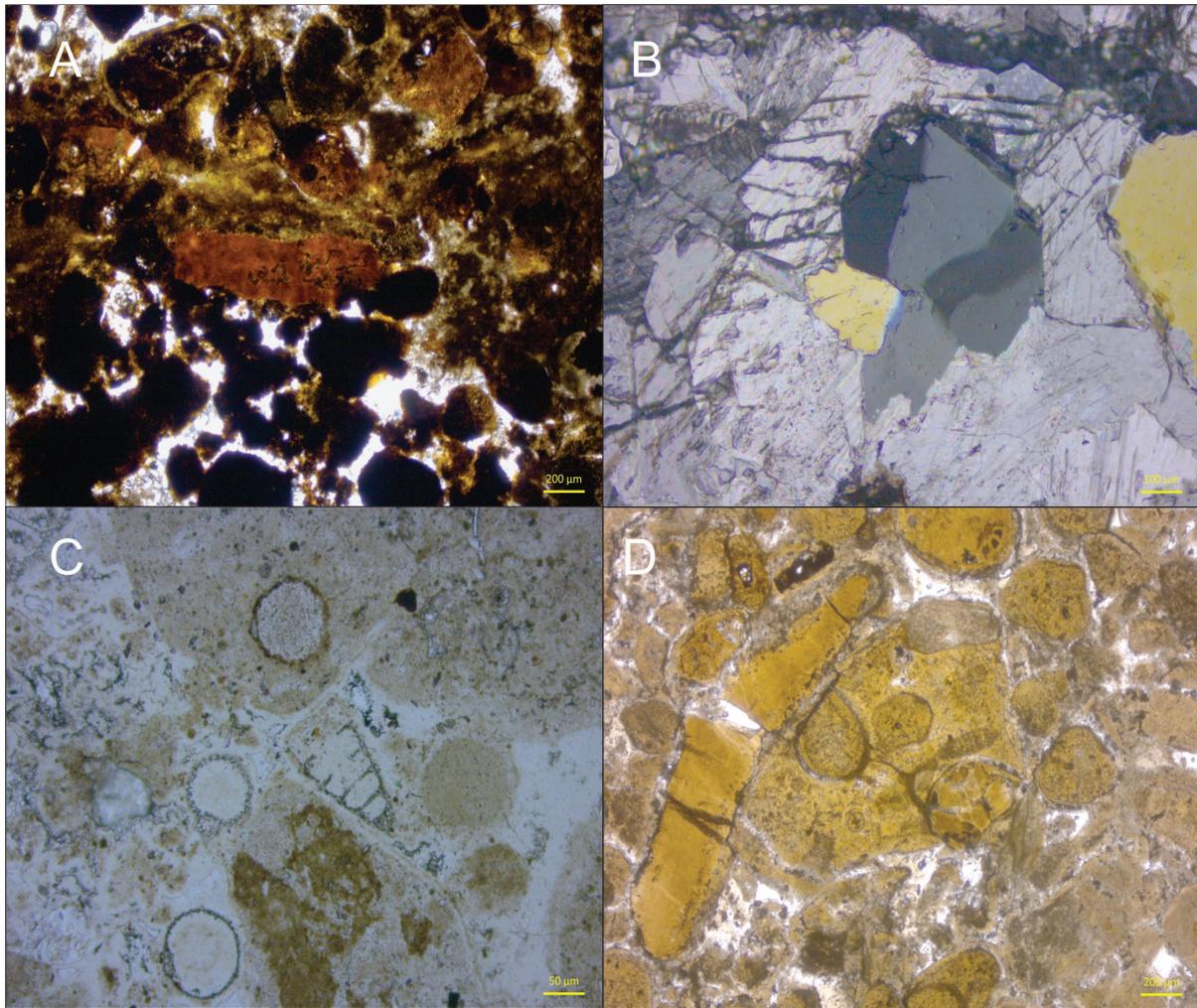


Figura 5.3 - Características petrográficas generales de la Fm. La Casita. A) Reemplazamiento de colofano en aloquímicos y cementante en textura granosoportada. B) Cuarzo de reemplazamiento al interior de un cristal de calcita (Nx). C) Radiolarios y *nazzelario* en textura grainstone. D) Fragmento de concha y grapestone compuestos de colofano con marcas de compactación.

El análisis EDS de elementos no esqueléticos como ooides, peloides y granos; así como matriz y cementante indica un enriquecimiento de porcentaje en peso [%W] de Ca en un rango >70 [%W] hasta 94 [%W], y de P <25 [%W] y >15 [%W], para análisis puntuales. El cuarzo aparece como

mineral accesorio en concentraciones de 10.6 y 14.3 [% W], usualmente relacionado a cristales de calcita y ooides.

- (2) Localmente en la zona de San José de Raíces, la **Fm. Taraises** se caracteriza a grandes rasgos por ser rocas calizas tipo mudstone y wackestone que constan de micrita recristalizada y algunas vetillas rellenas de calcita (Figura 5.4).

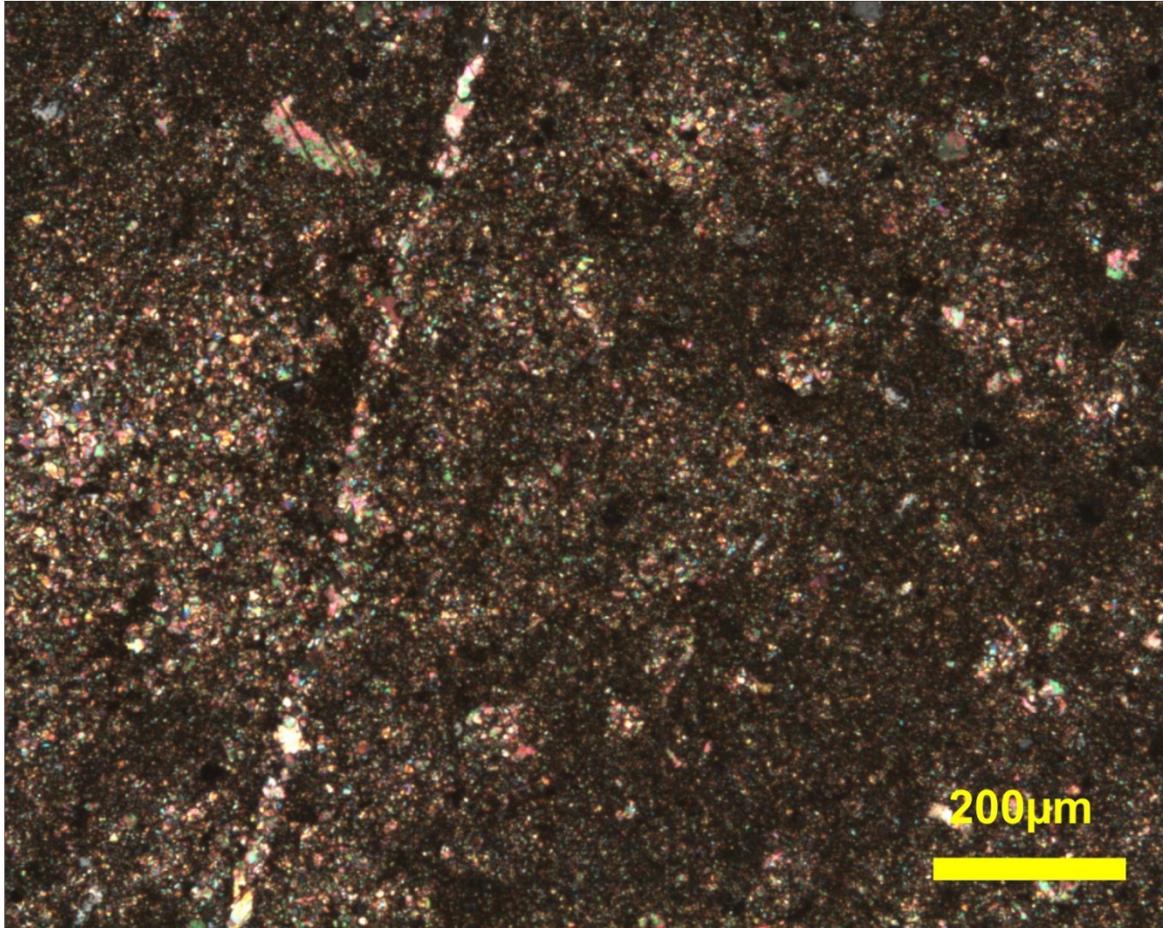


Figura 5.4 - Características petrográficas generales de la Fm. Taraises. Se observa una matriz de grano fino compuesta por micrita (Nx).

(b) Roca encajonante

La roca encajonante del depósito de fosforitas es una secuencia de rocas carbonatadas intercaladas con lutitas calcáreas en forma de estratos con espesores finos a medios de la Fm. La Casita. Los estratos son de color gris claro y algunos otros de color gris oscuro posiblemente a su alto contenido en fósforo y de materia orgánica, son altamente fracturados a causa de la deformación que originó la estructura del pliegue anticlinal. Existen vetillas rellenas de calcita y cuarzo como consecuencia de que las fracturas o fisuras presentes en la roca fueron los elementos estructurales que sirvieron como medio a los procesos diagenéticos de cementación, recristalización y reemplazamiento de minerales *a posteriori* en las calizas, sin dejar de mencionar a los procesos hidrotermales que intervinieron en la zona.

(c) Características texturales y fábrica del yacimiento

Las texturas frecuentes dentro de las rocas varían desde mudstone hasta grainstone con una microfauna fosilífera de radiolarios y foraminíferos bentónicos predominantemente y en ocasiones la existencia de calpionélidos y equinodermos.

El tamaño de grano se midió con la ayuda del software Image Pro Plus en microfotografías dentro de un análisis de puntos equidistantes tomados horizontalmente en cada lámina delgada que se analizó; posteriormente los resultados de la medición dentro del mismo software fueron agrupados de acuerdo a su clasificación correspondiente al tamaño de clase de cada uno de los aloquímicos que componen el esqueleto. Se elaboraron histogramas de distribución del tamaño de grano en Excel para conocer la frecuencia de cada clase del tamaño de grano.

El tamaño es variable en todas las láminas; las muestras P1', P1, P5b y Raíces la mayoría de las partículas no esqueletales tienen un rango promedio de clase de 0.125 a 0.25 [mm], algunas muestras como P3, P4a P5a y P5c muestran un rango promedio de 0.25 a 0.5 [mm]. Estos rangos se agrupan en la clase de arenas.

Las partículas no esqueléticas que conforman en su mayoría a las calizas de la Fm. La Casita son de origen tanto orgánico referido por los oolitos como biogénico específicamente por los oncolitos presentes.

El tamaño de grano promedio de ooides fosfatizados es variable en cada muestra y se agrupa en el rango de 0.16 a 0.28 [mm] y la media de estos elementos es de 0.22 [mm] por lo que se clasifican como arenas.

Los extraclastos e intraclastos seguidos de los bioclastos son las partículas no esqueléticas de menor ocurrencia dentro de las láminas de la Fm. La Casita. Los extraclastos e intraclastos aparecen en mayor proporción dentro de las muestras tipo grainstone y los bioclastos se componen por fragmentos de concha y microfósiles.

La proporción matriz/cementante-esqueleto medida con el software Image ProPlus dieron como resultado lo que se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 - Tabla de porcentajes de matriz/cementante - esqueleto de las microfotografías analizadas.

Láminas	Esqueleto [%]	Cementante [%]	Matriz [%]
P1'	82.52	16.91	0.55
P1	84.35	15.98	-
P3	84.22	15.93	-
P4a	77.52	16.56	5.95
P5a	-	84.77	15.23
P5b	81.74	17.72	0.52
P5c	88.46	8.76	2.77
P10-Nódulos	21.23	-	78.77
Raíces	84.31	0.78	15.27

La redondez de los clastos va de media a alta y una muy buena selección examinadas puntualmente en las fotomicrografías y comparadas con tablas de clasificación gráfica.

Las calizas de la Fm. La Casita presentan cemento carbonatado de microesparita o esparita dentro de una fábrica isótropa compuesta en su esqueleto por granos revestidos de ooides, oncolitos, intraclastos, peloides y extraclastos, a veces se distingue una fábrica planar con orientación preferencial de textura bandeada en el flujo del cementante debido al plegamiento de los estratos, se compone de colofano en su mayoría. La aparición de lodo calcáreo (micrita) de forma isótropa se da en las texturas lodosoportadas, en los núcleos recristalizados de ooides y en los bioclastos,

(d) Mineralogía de las fosforitas

Mayoritariamente las rocas de la Fm. La Casita son rocas químicas abundantes en carbonato-fluorapatito o francolita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{F}$) también llamado colofano coloquialmente, que se aloja dentro de la matriz y el esqueleto y en algunas ocasiones como cementante rellenando los espacios vacíos de la roca debido a los procesos geológicos que favorecieron el enriquecimiento de fósforo. Típicamente las fases minerales de carbonatos son micrita y esparita, esta última en mayor proporción al lodo calcáreo.

Hay que resaltar que el enriquecimiento de carbonato-fluorapatito es visible dentro del difractograma por sus altos picos de concentración (Figura 5.5). La francolita o colofano coloquialmente referido, es el mineral que aloja la mena de fósforo la cual se pudo identificar fácilmente por medio del microscopio petrográfico dentro de las secciones delgadas por su color característico pardo o marrón oscuro a negruzco y por la isotropía óptica que exhiben los cristales; cabe señalar que la calcita igualmente es uno de los minerales con mayor concentración dentro de las rocas sedimentarias de precipitación química, por lo cual es posible observar fenocristales de calcita con tamaños que llegan a 0.950 [mm] dentro de las muestras cercanas relacionadas a la Fm. Taraises. Los minerales accesorios identificados mediante petrografía fueron cuarzo,

yeso y más raramente plagioclasa detrítica. Los cristales de fluorapatito que van de subhedrales a euhedrales presentan un hábito prismático, rodeados por cementante de francolita. Además, se encontraron cristales anhedrales de yeso menores a 1.1 [mm] y de cuarzo reemplazado de 0.577 [mm] dentro de la muestra que exhibe la alteración hidrotermal que sufrió la roca.

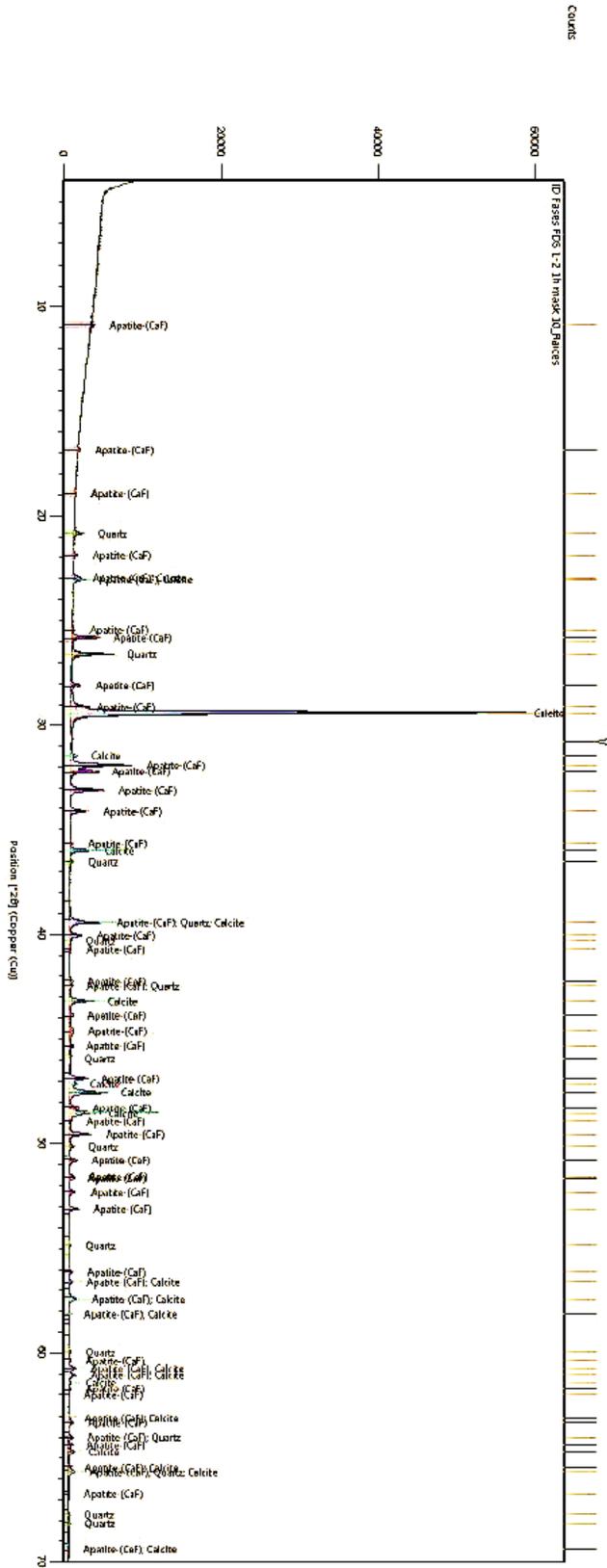


Figura 5.5 - Difractograma obtenido de la muestra Raíces 1 a partir del análisis de difracción de rayos X realizado en el Instituto de Geología, UNAM.

El análisis petrográfico mediante luz reflejada dio como resultado minerales accesorios poco comunes como pirita framboidal (píritosedros) y óxidos de Fe y Mn en las muestras P1, P1' y P5C (Figura 5.6).

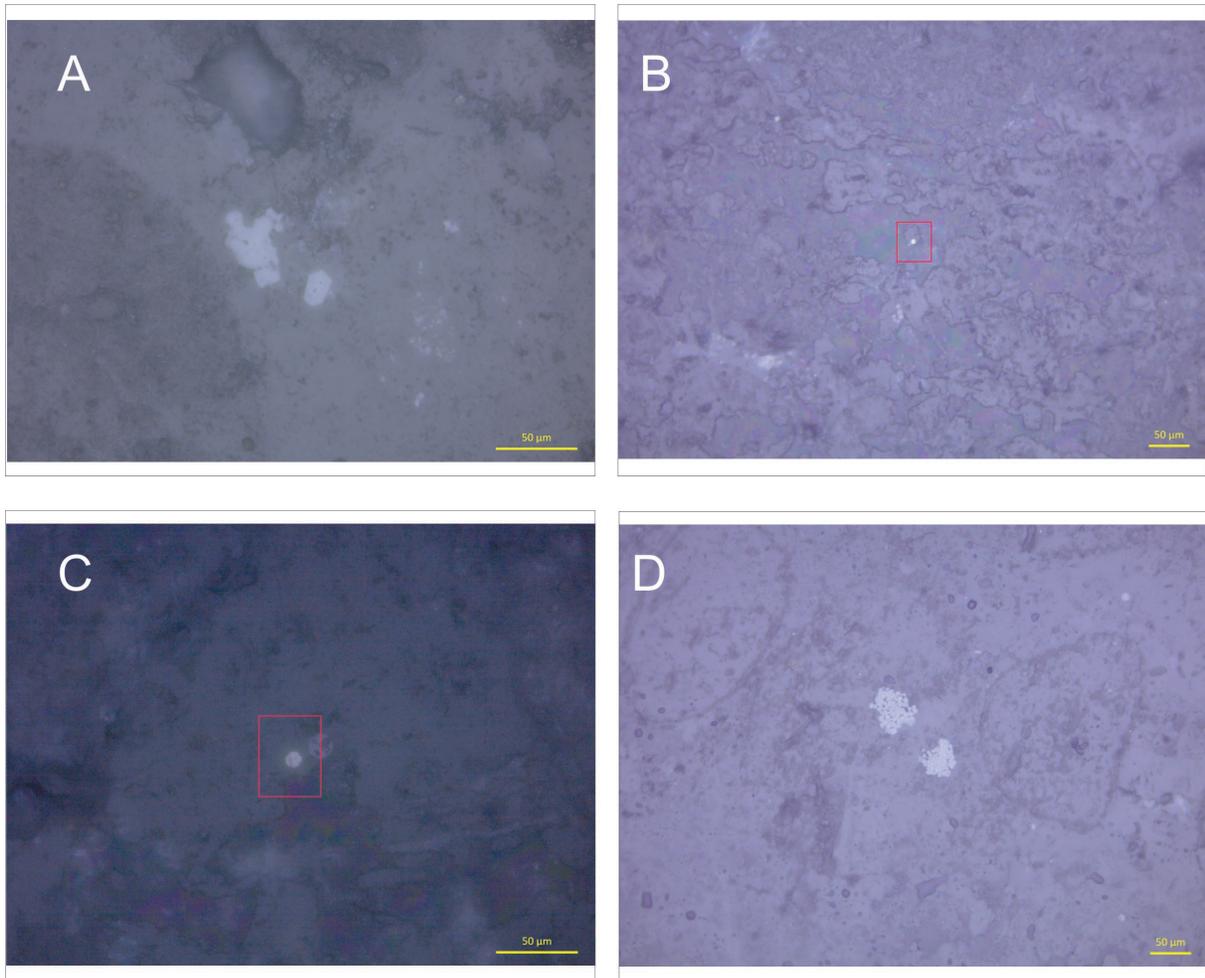


Figura 5.6 - Micrografías de minerales accesorios identificados mediante el ensayo de luz reflejada dentro del microscopio petrográfico. A) Píritosedros y framboides validados con objetivo de 40x. B) Pirita framboidal. C, D) Framboides de pirita reemplazados por óxidos de Fe y Mn.

5.3 Asociaciones minerales y texturas

La asociación mineralógica de las fosforitas de El Raíces se analizó con análisis petrográfico y microscopía electrónica de barrido dentro del laboratorio. Las asociaciones minerales presentes son frecuentes en fosforitas y a continuación se describirán detalladamente:

5.3.1 Calcita (CaCO_3) y carbonato-fluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)

Los minerales donde se encuentra alojado el P_2O_5 dentro de las fosforitas se originan a consecuencia de la precipitación de calcita (CaCO_3); su relación es sumamente estrecha para la abundancia de carbonato-fluorapatito dentro de los elementos constituyentes de la roca.

Calcita (CaCO_3): Mayormente se presenta como un mineral primario en la matriz y/o cementante; es común que el cementante de esparita tenga un hábito microcristalino con textura de flujo mientras que la matriz aparece con una textura granular compuesta por microcristales de esparita (microesparita). Los cristales de calcita bien desarrollados se observan en dos tipos de clasificación de láminas desde *grainstone* (P3 y P5b) (Figura 5.7 A, B) hasta tipo *wackestone* (Raíces) comúnmente presentes en mayor cantidad relacionado a las condiciones favorables para la precipitación de CaCO_3 ; fueron identificados por su fuerte relieve, alta birrefringencia y crucero, algunos de ellos euhedrales en forma de escalenoedro y la gran mayoría deformados por los esfuerzos que dieron lugar al pliegue (Figura 5.7 C, D).

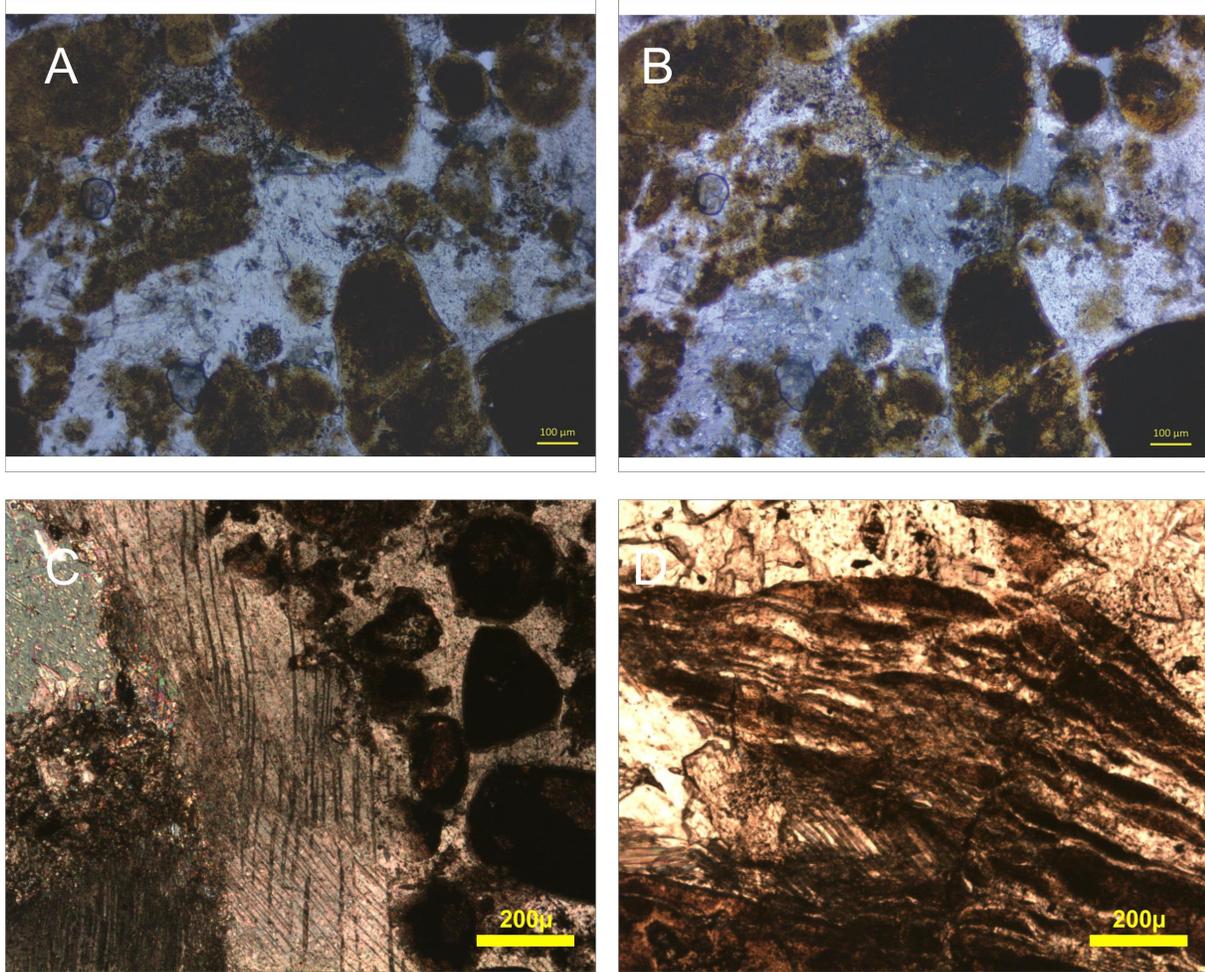


Figura 5.7 - Texturas de calcita presentes en el depósito de fosforitas. A) Cristalización de calcita dentro de matriz. B) Cristalización de calcita dentro de matriz (Nx). C) Cristales de calcita recrystalizada y masa cristalina de calcita deformada. D) Estructura de deformación por plegamiento compuesta de calcita.

Primeramente, el cementante y los clastos están compuestos principalmente por un mayor porcentaje en peso [%W] de calcio; seguido de fósforo en matriz y ooides como se observa dentro de la Tabla 5.2, en la cual se cuantificó cualitativamente los elementos constituyentes en diversos puntos dentro de la sección delgada de la muestra P5b con el barrido electrónico y análisis EDS (Figura 5.8).

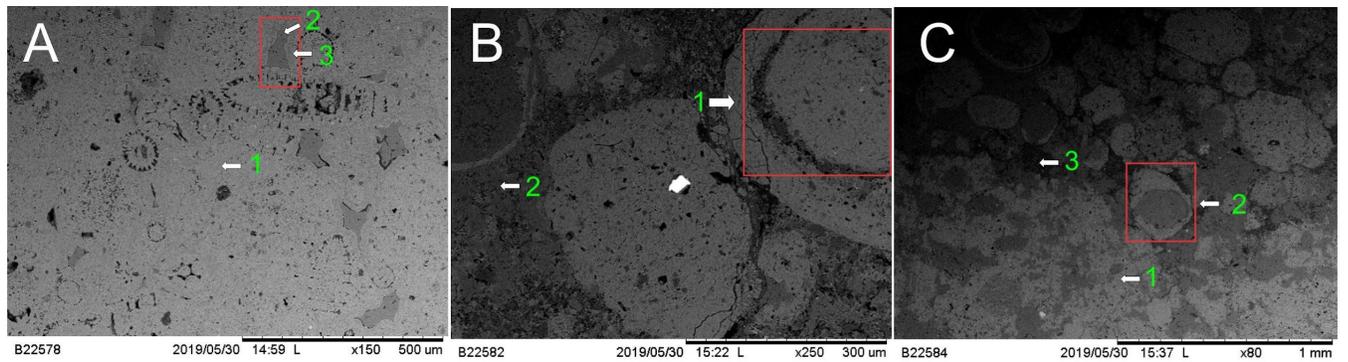


Figura 5.8 - Imágenes de microscopía electrónica de barrido dentro de la muestra P5b, con análisis puntuales. A) Matriz de grano fino compuesta por micrita y otros aloquímicos. B) Intercalación de ooide y microsparita (cementante). C) Ooide y cambio de microfacies.

Tabla 5.2 - Tabla de porcentaje en peso [%W] de los análisis puntuales de microscopía electrónica de barrido en la muestra P5b.

		[% W]		
	A	1	2	3
	Muestra	P5b Pto 1.1 - Gris (matriz)	P5b Pto 1.1 - Gris oscuro (clasto)	P5b Pto 1.1 - Gris zonado alrededor de cementante de calcita
Elemento	Ca	79.1	94.2	84.4
	P	19.7	5.8	14.2
	Si	1.3	-	1.3
	B	1	2	
	Muestra	P5b Pto X 1 - Gris (ooide)	P5b Pto X 1 - Gris oscuro (cementante)	
Elemento	Ca	78	93	

	P	19.1	3.4	
	Si	3	3.6	
	C	1	2	3
	Muestra	P5b Pto 2.1 - Gris claro (matriz)	P5b Pto 2.2 - Gris (ooide)	P5b Pto 2.3 - Gris oscuro (cementante - cambio de facie)
Elemento	Ca	82.5	81.5	95.1
	P	15	16.5	3
	Si	2.5	2	1.9

Los diferentes eventos de cementación se distinguen por la alternancia de matriz y cementante dentro de horizontes de algunas de las muestras examinadas, y de igual manera en el BSE se notan las distintas fases del cemento esparítico en un aparente sobrecrecimiento o zonación (Figura 5.9).

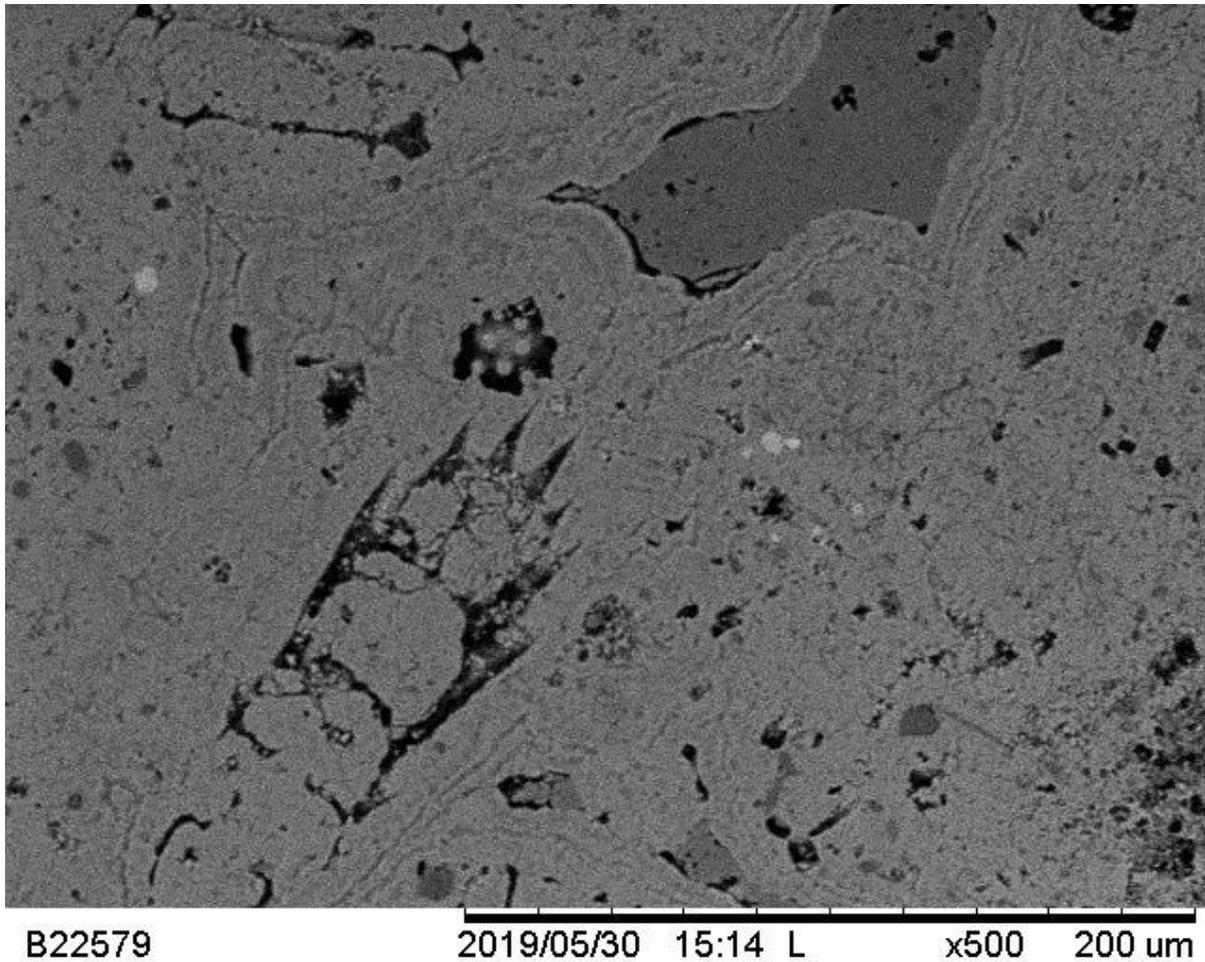


Figura 5.9 - Fotomicrografía del sobrecrecimiento o zonación alrededor de elementos no esqueléticos visto mediante la microscopía electrónica donde se evidencia los diversos eventos de cementación presentes en las rocas que conforman el anticlinal El Barroso.

Carbonato-fluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$): Regularmente es criptocristalino, aunque igual se presenta en forma masiva y granular. Los cristales subeuhedrales con hábito tabular de fluorapatito, bien desarrollados se encuentran dentro de las muestras con textura *grainstone de intraclastos* y *grainstone de bioclastos* (P1 y P5b) (Figura 5.10 C, D); tienen un tamaño variable entre 0.258 [mm] y 0.322 [mm].

Por lo común en el esqueleto y la matriz, la aparición de francolita tiene forma granular o terrosa mientras que el cementante forma bandas u horizontes de masas criptocristalinas con textura de flujo; de tamaños variables, algunas veces se encuentra presente en forma masiva, u otras alternadamente y se nota especialmente dentro de las láminas con textura *grainstone-wackestone laminado* y *grainstone* (P4a y P5a) (Figura 5.10 A, B).

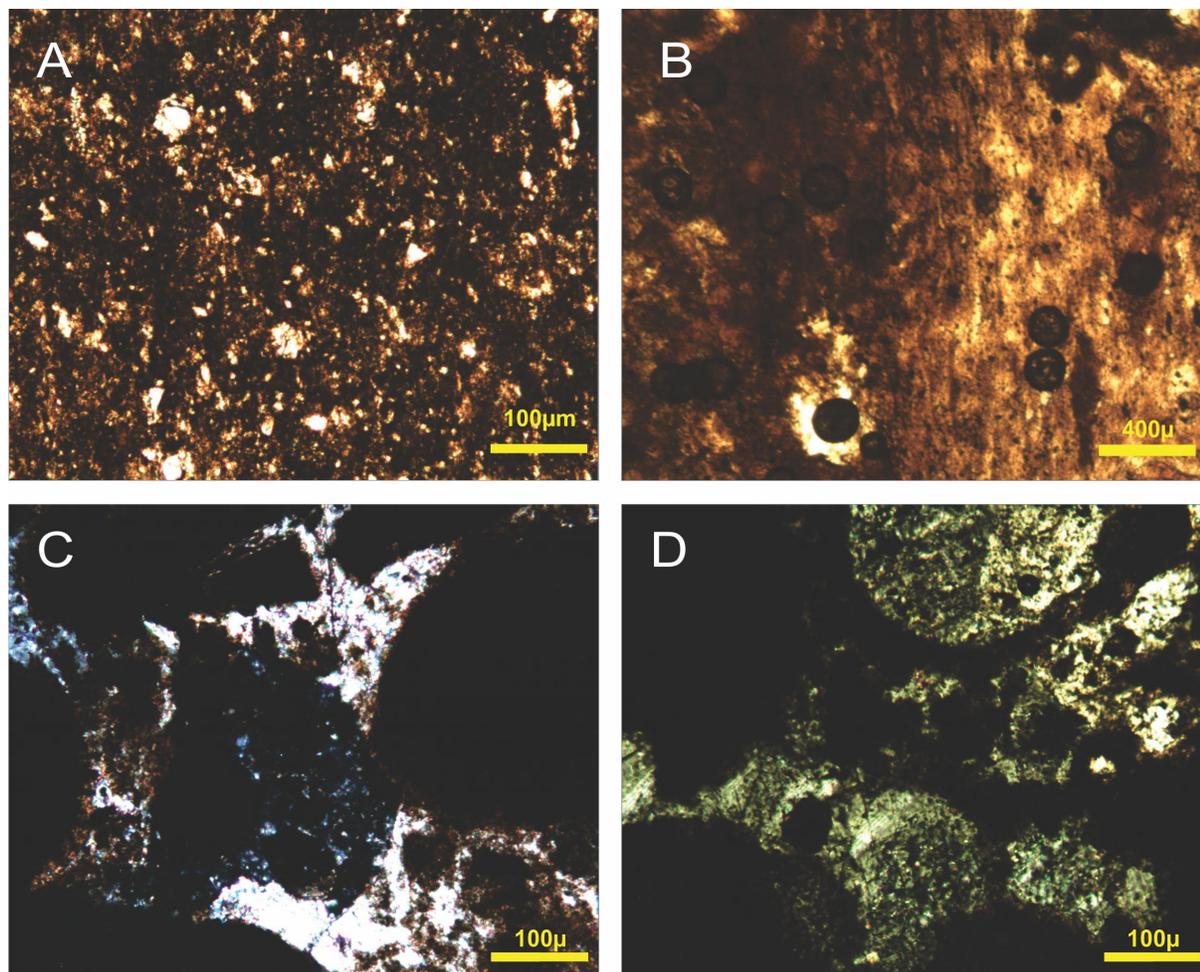


Figura 5.10 - Características texturales del carbonato-fluorapatito dentro de las fosforitas. A) Laminaciones de colofano. B) Colofano microcristalino (cementante) y esparita - cambio de microfacies. C) Cristal de fluorapatito en contacto con calcita recristalizada (Nx). D) Masas cristalinas de fluorapatito de hábito terroso intercalado con cristales de calcita bien desarrollados.

5.3.2 Cuarzo (SiO_2) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Cuarzo (SiO_2): Se encuentra en muestras con textura *packstone* y *wackestone* (P5c y P-10 Nódulos), en su mayoría aparece dentro de vetillas de sílice residual, por lo regular acompañadas de calcita y raramente en cristales de cuarzo por reemplazamiento o detritus. Los cristales son euhedrales a sub-euhedrales con un hábito prismático, bordes subangulosos a angulosos, y con tamaños variables; en algunos cristales identificados se notan ciertas características que infieren su proceso diagenético (reemplazamiento) u origen (detritus). Las vetillas y cristales se encuentran rodeados por cementante y esqueleto que compone la roca.

Yeso: La aparición de este mineral dentro de las rocas calcáreas que contienen a las fosforitas se vincula a la alteración hidrotermal que causó el emplazamiento del yacimiento tipo MVT próximo a la zona de fosforitas. Los cristales de yeso se reservan para las muestras cercanas al lente de MVT (P5c).

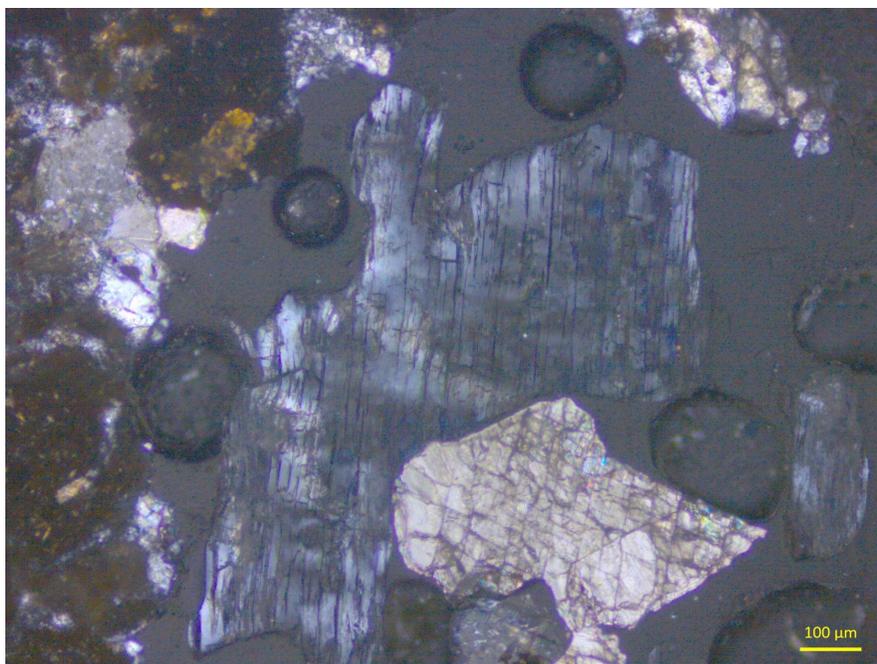


Figura 5.11 - Fotomicrografía de cristal de yeso (Nx) asociado con un lente de un depósito hidrotermal de tipo MVT en el anticlinal El Barroso.

Dichos cristales son incoloros teñidos de marrón a causa de la materia orgánica, su forma es tabular, van de subeuhedrales a anhedrales y de tamaño variable; los bordes de los cristales son engolfados o curvados con los aglutinantes (cementante/esqueleto) que los rodean (Figura 5.11).

5.3.3 Arcillas, sulfuros y óxidos

Arcillas: Aparecen únicamente en una muestra de textura *wackestone* (P5a) sobre el cementante de la roca. Se localiza dentro de las masas criptocristalinas de colofano acompañado por calcita (Figura 5.12 A, B), sus cristales alcanzan un tamaño de 0.150 [mm], con hábito acicular o fibroso, de forma subeuhedral a anhedral, con bordes angulosos. El intercrecimiento a causa de la recristalización *in-situ* es notable por la dirección de crecimiento de adentro hacia afuera de los cristales de arcillas y se debe a la meteorización que sufrió el carbonato-fluorapatito después de su depósito (Figura 5.12 C, D). Las características petrográficas y ópticas que exhiben las arcillas vistas en el microscopio indican que dichos cristales pertenecen al grupo de la caolinita.

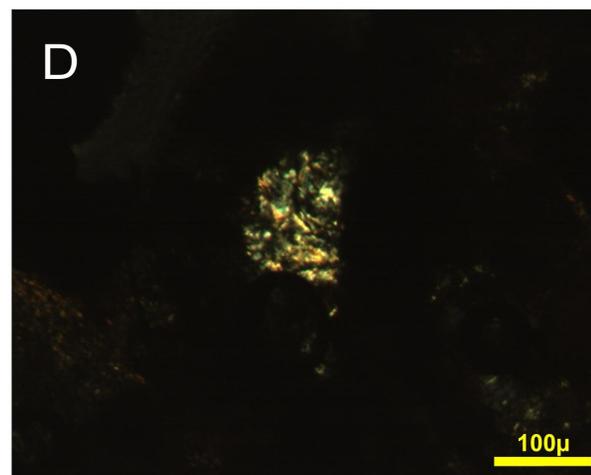
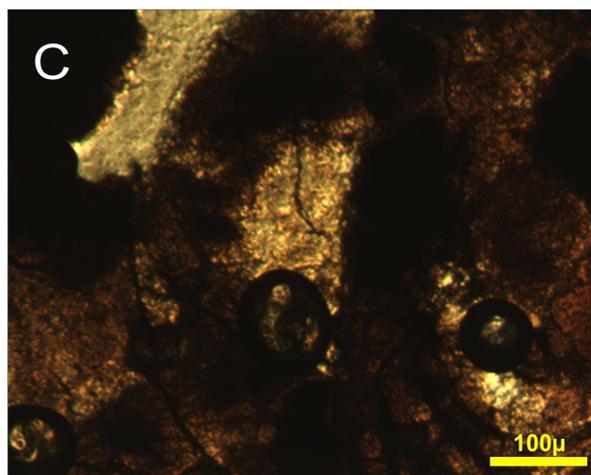
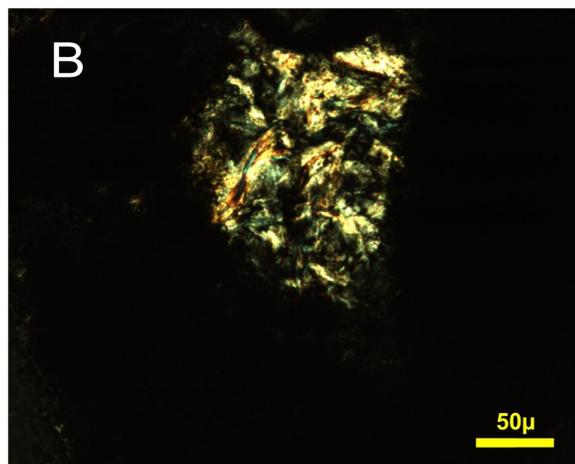
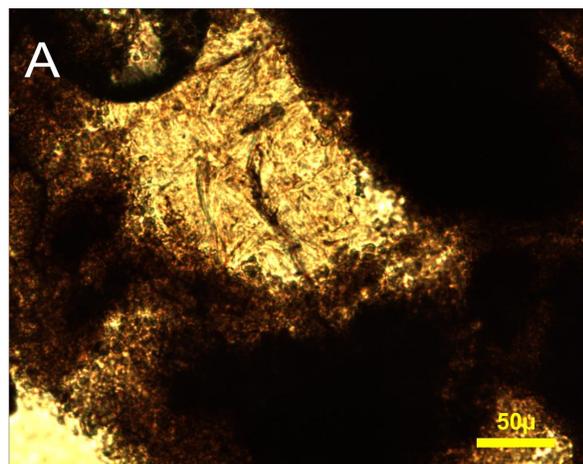


Figura 5.12 - Fotomicrografías de arcillas. A) Arcillas de caolinita dentro de la matriz. B) Arcillas de caolinita dentro de la matriz (Nx). C) Cristal de arcillas (caolinita) con intercrecimiento radial. D) Cristal de arcillas (caolinita) con intercrecimiento radial (Nx).

Sulfuros y óxidos: Las especies minerales que se identificaron mediante el ensayo petrográfico con luz reflejada (ensayos minerográficos) fueron framboides de pirita y óxidos de Fe y Mn. Los framboides de pirita se clasificaron fácilmente en esa categoría por su peculiar característica geométrica (piritoedros) y su identificación con el objetivo de 40x dentro del microscopio (Figura 5.6 A, B), mientras que los óxidos de Fe y Mn presentan agregados cristalinos con un hábito globular, forma anhedral y bordes redondeados, usualmente reemplazando a los sulfuros (Figura 5.6 C, D).

5.4 Asociaciones de microfacies

El análisis de microfacies dentro de láminas delgadas requiere un procedimiento ordenado donde las muestras se analizan en la misma secuencia como fueron tomadas en campo; los parámetros que se analizan son distintos criterios o atributos petrográficos de la roca que abarcan tipo de grano (frecuencia o asociaciones de granos), tipo de matriz, fábricas deposicionales y contenido fosilífero.

Las 9 láminas examinadas con el uso del microscopio petrográfico indican un cierto tipo de clases según la clasificación de Dunham (1962) las cuales son utilizadas para conjugar las asociaciones de microfacies que corresponden al modelo de Flügel (2004) basado anteriormente en el modelo de plataforma de Wilson (1975). A continuación, serán explicadas detalladamente las clases correspondientes a la clasificación de Dunham de

cada una de las muestras y posteriormente se conjugarán para establecer asociaciones de microfacies entre cada una de estas clases:

- 5.4.1 - *Grainstone de oncolitos (P1')* - La característica de este tipo de microfacies son rocas con textura grainstone con una fábrica granosoportada compuesta principalmente por oncoides, ooides y bioclastos de tamaño de grano fino como radiolarios, foraminíferos, fragmentos de concha y lo que se podría clasificar como

calciesferas

aparentemente. Otro

criterio que clasifica

según Flügel (2004)

este tipo de

microfacies es la

distribución bimodal

del tamaño de grano

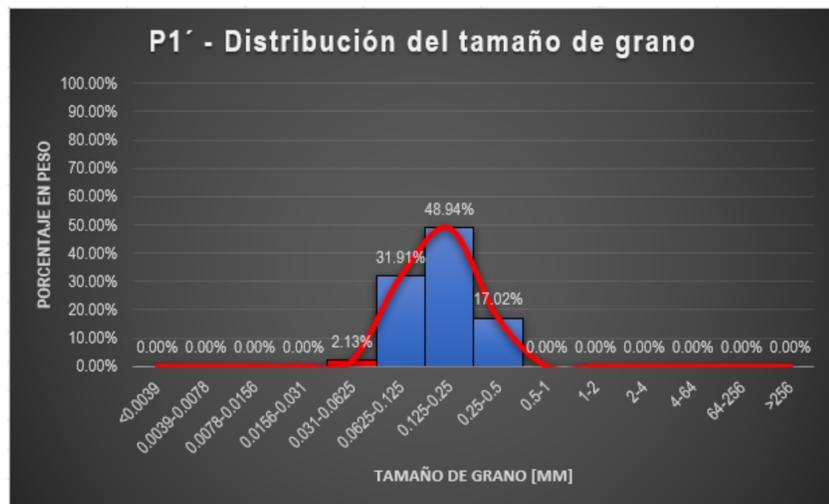


Figura 5.13 - Gráfico que muestra la distribución bimodal (limos y arenas) del tamaño de grano de P1'.

donde coincide el comportamiento de esta muestra con la distribución del tamaño de grano de este criterio citado anteriormente (Figura 5.13). El fracturamiento y posteriormente la disolución fueron los procesos diagenéticos principales que propiciaron la precipitación y cementación de la francolita (Figura 5.14).

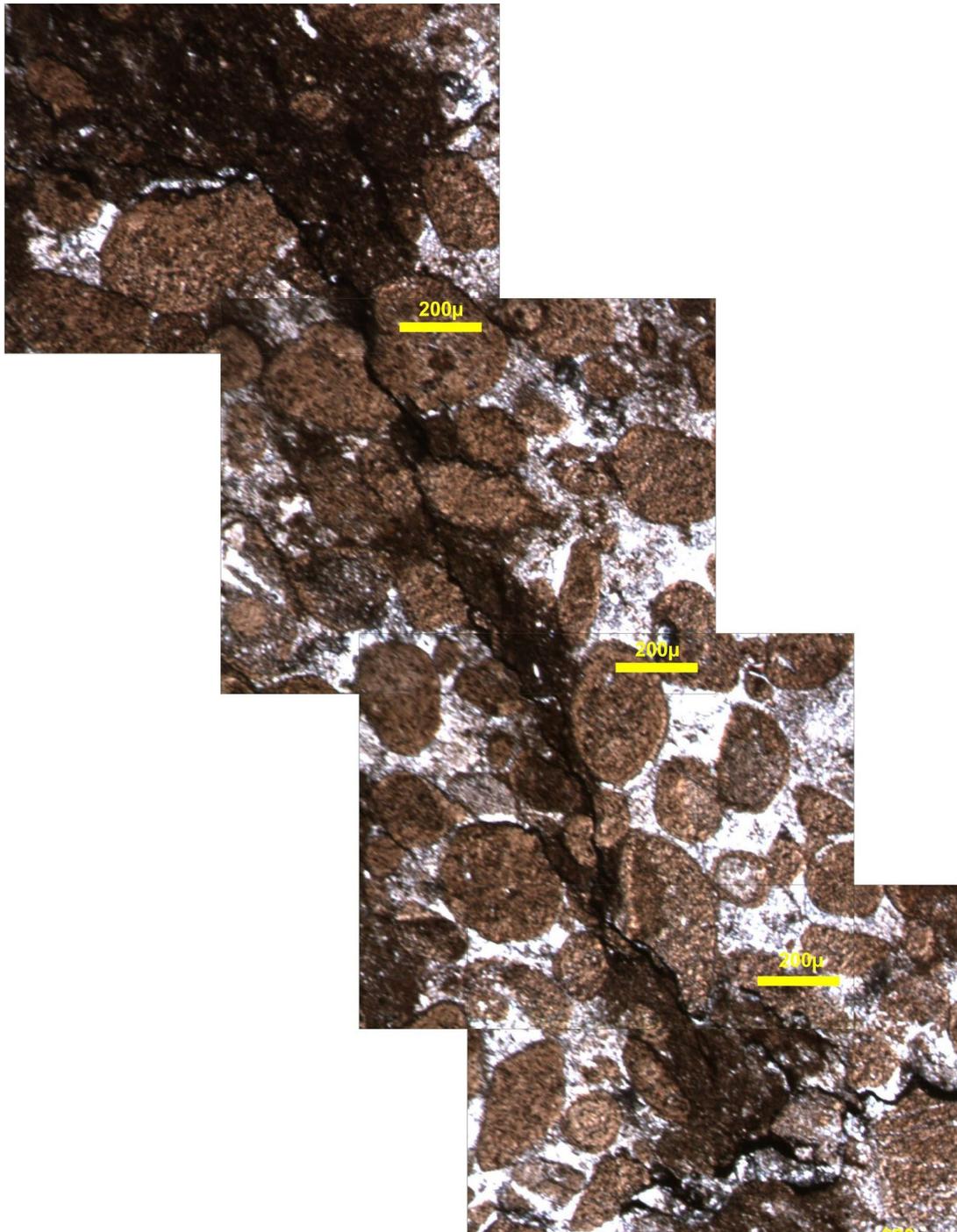


Figura 5.14 - Ensamble de fotomicrografías que muestra el fracturamiento, y posteriormente, la precipitación de colofano por disolución que afectó a la muestra P1´.

- 5.4.2 - *Grainstone de intraclastos (P1)* - Presenta una textura granosoportada en el microscopio petrográfico compuesta principalmente por un 15% de intraclastos subredondeados a angulosos del total del esqueleto. Scholle et al. (2003) menciona que los sitios más favorables para la formación de intraclastos se encuentran en arrecifes, pendientes trasarrecifales, playas carbonatadas con procesos biológicos y químicos que producen una cementación rápida o en barras costeras. La microfauna que compone esta muestra principalmente son radiolarios bien conservados que se encuentran micritizados o recristalizados por micrita sustituyendo núcleos de ooides (Figura 5.15 A, B).

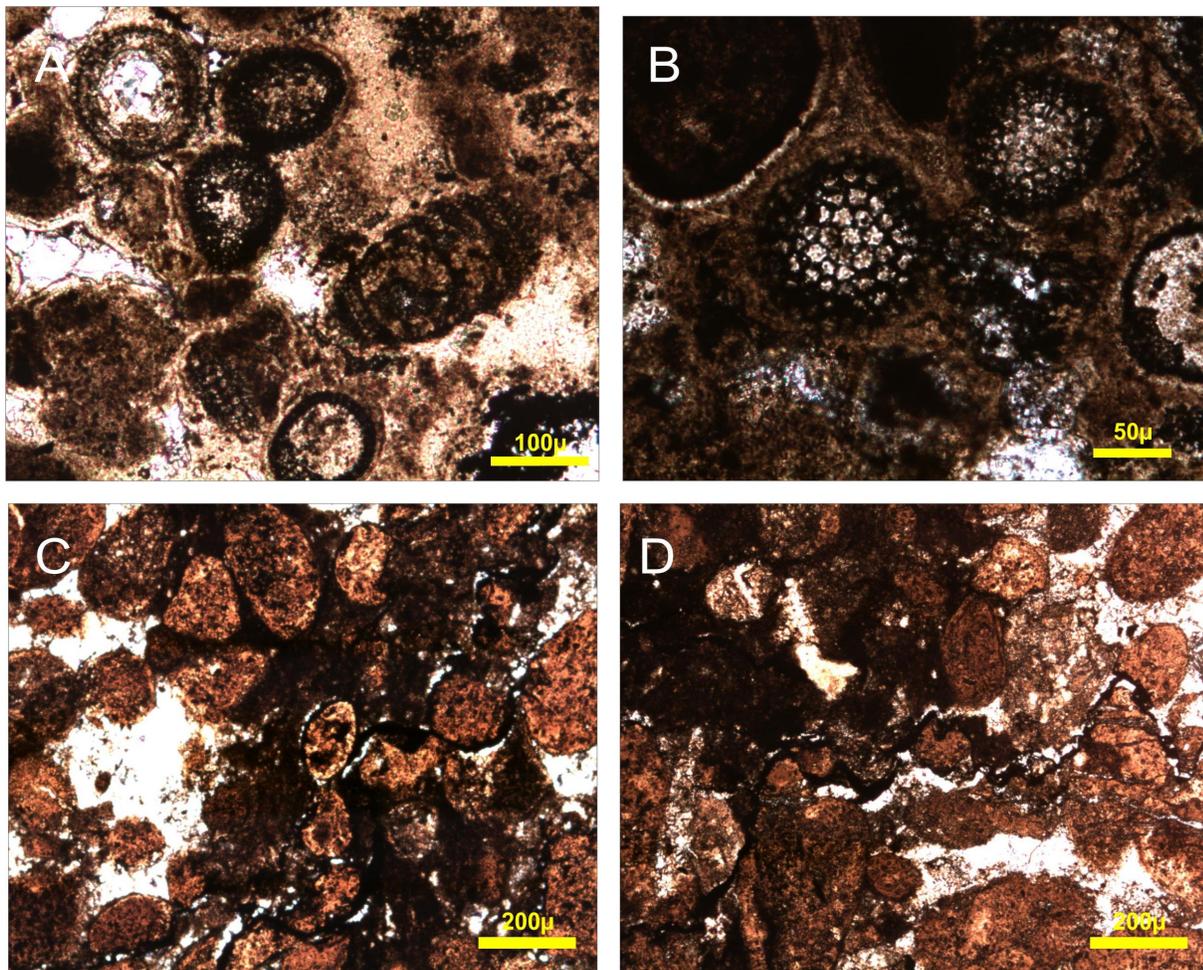


Figura 5.15 - Fotomicrografías de características petrográficas resaltantes de la muestra P1 - *Grainstone de intraclastos* para la clasificación del tipo de microfacies. A) Ooide con núcleo de

radiolario recristalizado, radiolarios y artrópodo autóctono. B) Radiolarios micritizados. C) Cementante de colofano sustituyendo microesparita. D) Microestiliolita por fracturamiento.

Otros aloquímicos que se observan son extraclastos redondeados y oncolitos; es evidente la sustitución de esparita por colofano debido al flujo cementante que se alojó tardíamente dentro de las fracturas (Figura 5.15 C). Las estructuras sedimentarias observables son microestiliolitas que denotan el fracturamiento en la roca (Figura 5.15 D), mientras que los contactos tangenciales y cóncavo-convexos muestran la compactación que sucedió en esta zona. Por último, la Tabla 5.3 muestra el análisis puntual de análisis EDS que indica cualitativamente las cantidades concentradas en porcentaje en peso [%W] de Ca y P principalmente dentro de la composición de cementante, matriz y ooides que constituyen la roca.

Tabla 5.3 - Tabla de porcentaje en peso [%W] de los análisis puntuales de microscopía electrónica de barrido en la muestra P1.

Elementos	[% W]		
	P1 - Pto 1.1	P1 - Pto 1.2	P1 - Pto 2.2
Si	10.6	10.6	14.3
P	22.5	25	22.6
Ca	66.9	64.3	63.1

Muestra	
P1 - Pto 1.1	Oolito
P1 - Pto 1.2	Calcita (Matriz)
P1 - Pto 2.2	Calcita (Matriz)

- 5.4.3 - *Grainstone de ooides (P3a)* - Son rocas tipo grainstone con una textura granosoportada formadas en mayor parte por ooides redondeados y subangulosos que se encuentran totalmente fosfatizados. Otro rasgo petrográfico significativo es la existencia de horizontes de materia orgánica (lignita) precipitados a partir del ambiente donde se formó y la poca existencia de bioclastos (Figura 5.16 A). La presencia de colofano en los aloquímicos, el sobrecrecimiento cristalino en algunos ooides, oncolitos e intraclastos y la textura de flujo del cementante son prueba de los procesos diagenéticos primarios de reemplazamiento y cementación; a diferencia las marcas de disolución son rasgos que confirman los procesos de disolución presentes (Figura 5.16 B). Los tipos de contactos entre los granos son rectos y en menor proporción cóncavos-convexos indicando una fase temprana del estado de compactación de la roca.

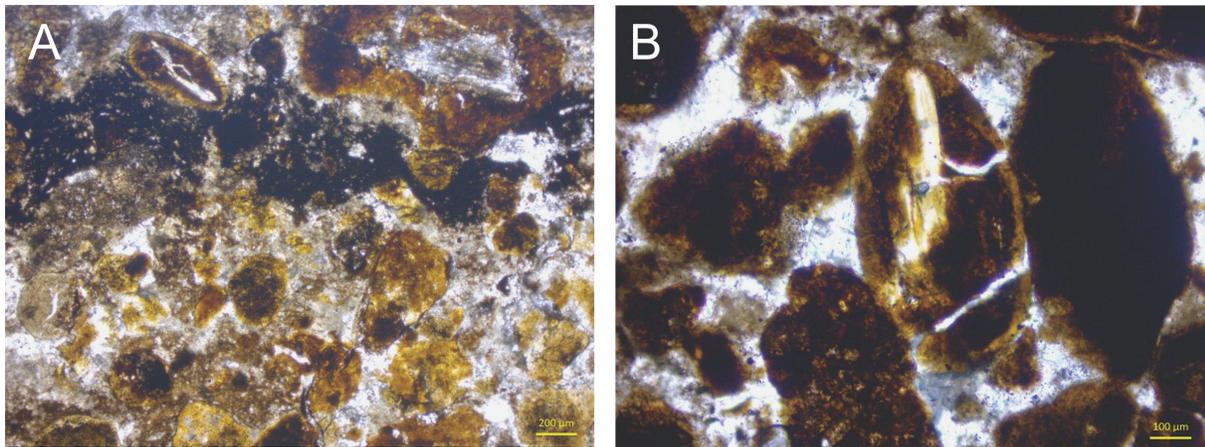


Figura 5.16 - A) Fotomicrografía de horizonte de materia orgánica intercalado con ooides, oncolitos e intraclastos. B) Fotomicrografía de intraclasto con marca de disolución.

- 5.4.4 - *Grainstone/wackestone laminado (P4a)* - Las texturas que corresponden petrográficamente a este tipo de roca son grainstone con textura lodosoportada por cementante de francólita, donde ningún aloquímico es contundente en su formación; los extraclastos están bien preservados con un mayor tamaño y redondez que los intraclastos, estas partículas no esqueléticas son predominantes pero

poco certeras para categorizar a la roca dado su origen diverso que poseen. Por lo general son ooides concéntricos que van de subredondeados a angulosos totalmente fosfatizados; deteriorados por los procesos diagenéticos de cementación y disolución (Figura 5.17 A), su origen se encuentra relacionado a la deposición suprayacente del grainstone de ooides. Otra de las texturas que exhibe es wackestone laminada de grano fino compuesta por materia orgánica con una textura criptocristalina cementada por colofano y calcita. La pobre identificación de aloquímicos y la desaparición de microfauna en este tipo de microfacies indica que los procesos de cementación, así como reemplazamiento y recristalización de colofano fueron tempranos y pervasivos en todos los componentes de la roca. Las texturas de flujo alrededor de algunos aloquímicos son prueba de que la cementación fue uno de los procesos post-diagenéticos dominantes y que este proceso tuvo una dirección preferencial en su configuración (Figura 5.17 B).

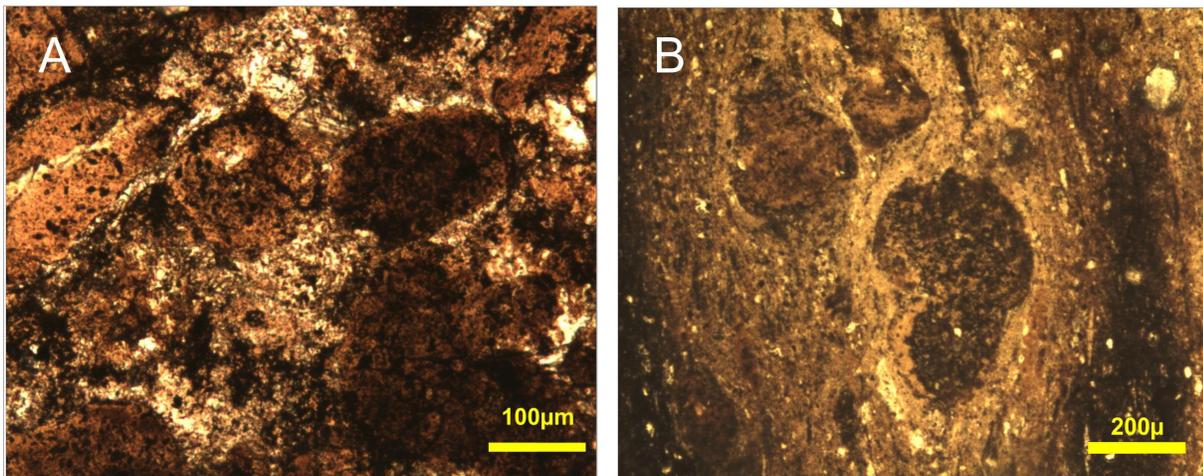


Figura 5.17 - A) Fotomicrografía de *grainstone* con textura lodosoportada compuesta por ooides deteriorados. B) Micrografía de textura de flujo alrededor de clastos totalmente fosfatizados.

- 5.4.5 - *Wackestone laminado (P5a)* - Bindstone que posee una textura criptocristalina en toda la lámina con cambios drásticos en horizontes de 0.5 a 1 [cm] en la fábrica de la roca (Figura 5.18 A, B); los eventos de cementación y reemplazamiento de colofano afectaron la estructura deposicional

original por lo cual es limitada la presencia de aloquímicos y bioclastos. La característica textural es que el cementante exhibe pequeños peloides de grano muy fino que se presentan en laminaciones con bandeamiento por una aparente dirección de flujo la cual se alterna con pelmicrita y horizontes de materia orgánica (Figura 5.18 C, D).

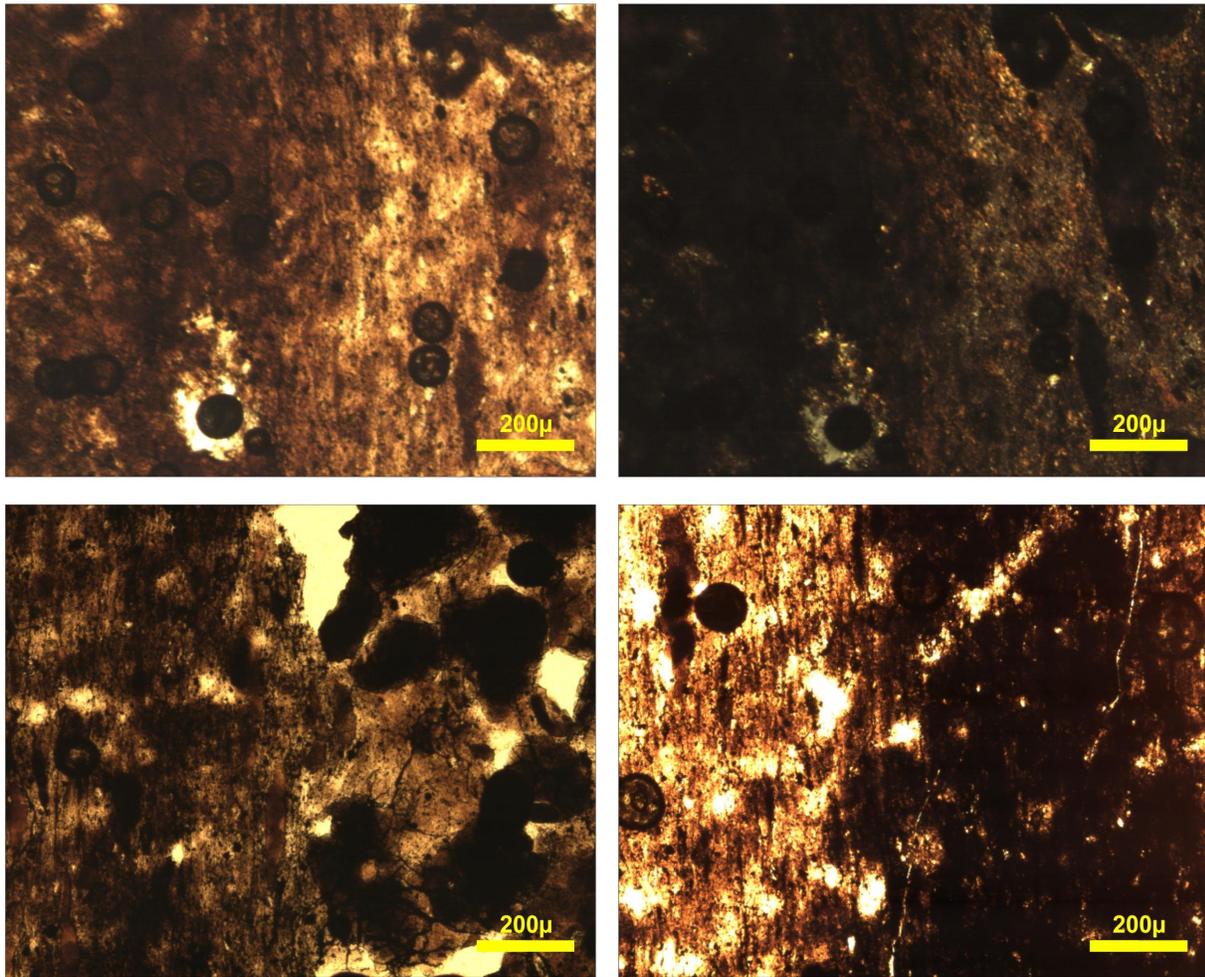


Figura 5.18 - Micrografías de atributos petrográficos texturales presentes en la muestra P5a - *Wackestone laminado (bindstone)*. A) Cambio textural de colofano criptocristalino hacia micrita. B) Cambio textural de colofano criptocristalino hacia micrita (Nx). C) Cambio textural de colofano a pelmicrita. D) Horizonte de materia orgánica intercalado con pelmicrita.

- 5.4.6 - *Grainstone de bioclastos (P5b)* - Los bioclastos que se pudieron identificar claramente en el ensayo petrográfico fueron equinodermos, radiolarios y calpionélidos de grano fino con rasgos de micrita o recristalizados por esta (Figura 5.19 B); bien preservados y a veces formando agregados o cúmulos de granos (Figura 5.19 A). Los otros elementos aglutinantes como ooides, intra- y extraclastos se encuentran en proporciones similares dentro de la muestra con una buena selección y una redondez de media a alta según el ensayo petrográfico dentro del laboratorio; es importante también señalar que el porcentaje de fósforo medido puntualmente mediante el SEM-EDS de matriz y cementante no muestran un patrón similar de enriquecimiento en fósforo (Tabla 5.2), mientras que la mayoría de los ooides y clastos tienen un alto porcentaje en fósforo.

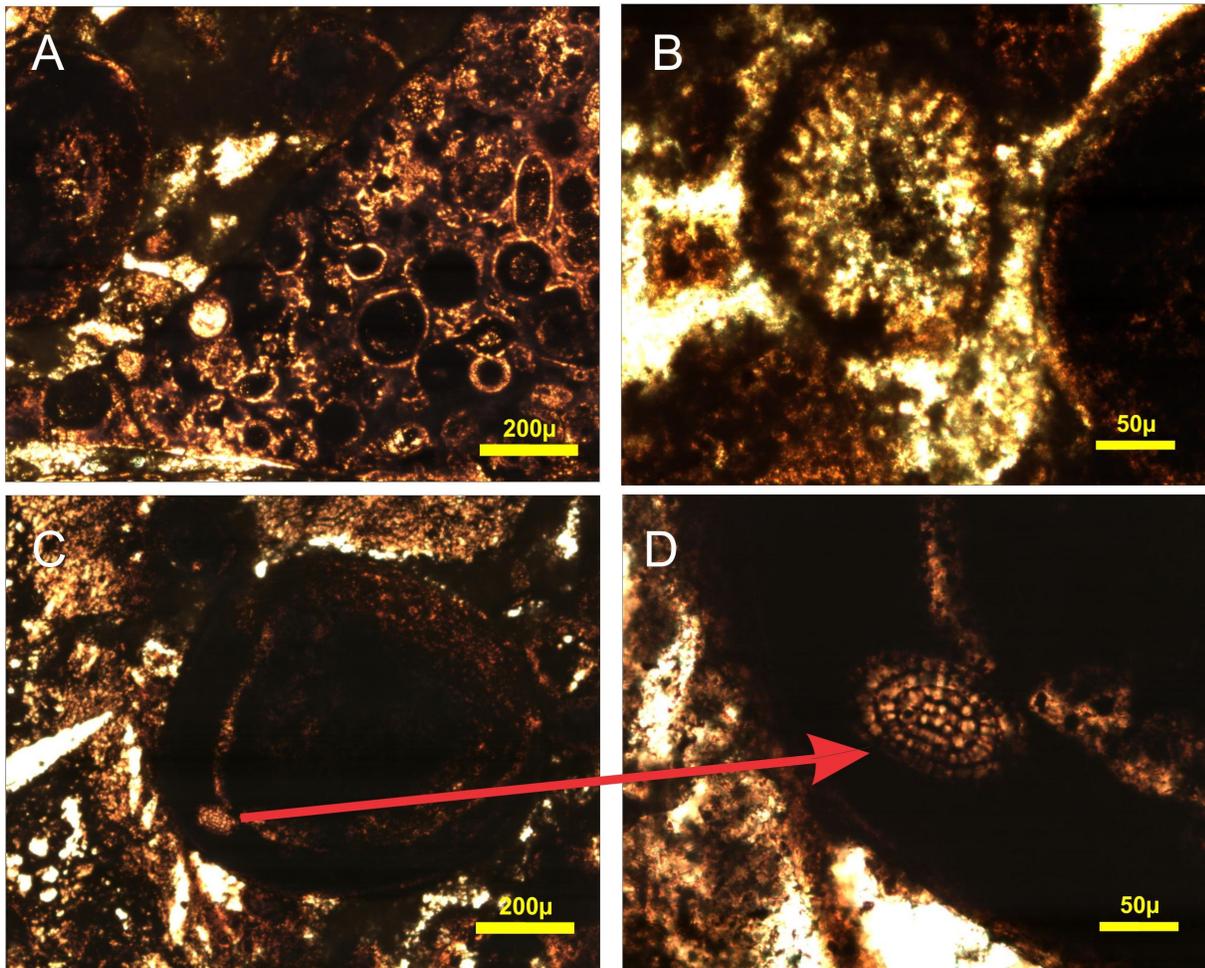


Figura 5.19 - Micrografías de microfauna correspondiente a la muestra P5b - *Grainstone bioclástica*.

A) Calpionélidos y peloides en agregado cristalino alrededor de ooides fosfatizados. B) Radiolario en corte longitudinal. C) Espina de *equinoideo* en capa de ooide compuesto fosfatizado (objetivo 5x). D)

Espina de *equinoideo* en capa de ooide compuesto fosfatizado (objetivo 20x).

Algunos atributos texturales que determinan la cementación como uno de los procesos diagenéticos que actuaron sobre estas rocas para posteriormente ser reemplazado por colofano; es encontrar capas cementadas de ooides con equinodermos dentro de ooides y totalmente fosfatizados (Figura 5.19 C, D).

Particularmente dentro de esta muestra se identificaron cristales subhedrales a euhedrales de fluorapatito, de aspecto oscuro microgranulado o terroso con hábito tabular y extinción recta; acompañados por cristales de calcita recristalizada (Figura 5.10 D). Melgarejo et al. (1997) menciona al fluorapatito como “un componente esencial de los depósitos primarios de fosfatos sedimentarios marinos con carbonatos, minerales de la arcilla y glauconita”.

- **5.4.7 - *Packstone de ooides (P5c)*** - Se trata de una *packstone* que se atribuyó a esta clase de la clasificación de Dunham (1967) por su textura granosoportada y por la aparición de una matriz de grano fino de micrita. Las partículas que predominan en el cuerpo del esqueleto son ooides concéntricos tangenciales y extraclastos redondeados en su mayoría (Figura 5.20 A), seguidos de intraclastos y por último bioclastos y oncolitos. Las pruebas concretas sobre el grado de compactación son visibles en las microfotografías de esta muestra donde se observan los contactos entre los granos que son tangenciales y netos, así como los pocos espacios donde se alojó la micrita y los bioclastos fracturados (Figura 5.20 B).

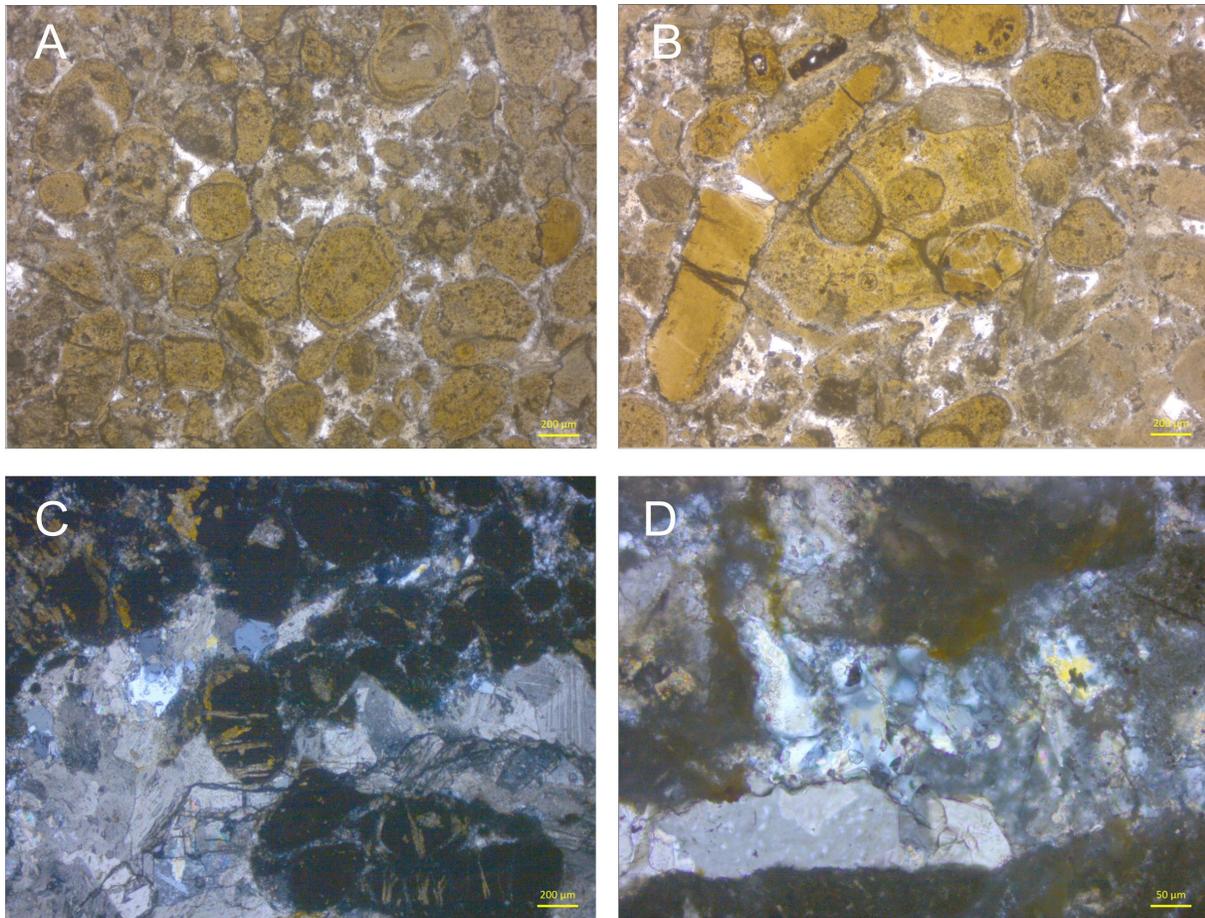


Figura 5.20 - Micrografías de atributos petrográficos correspondientes a la muestra P5c - *Packstone de ooides*. A) Ooides superficiales fosfatizados. B) Grapestone y fragmento de concha fracturado por compactación. C) Alteración hidrotermal en el interior de nódulos (Nx). D) Cuarzo detrítico con alteración hidrotermal (Nx).

Esta muestra se encuentra cercana al depósito hidrotermal de un lente de tipo MVT por lo que existen rasgos de alteración hidrotermal dentro de algunos nódulos y cristales de cuarzo detrítico (Figura 5.20 C, D); también las vetillas de sílice y la aparición de yeso son otra demostración del evento hidrotermal que suscitó en la zona. (Figura 5.11)

- 5.4.8 - *Wackestone de radiolarios (P10-Nódulos)* - La micrita se exhibe como uno de los componentes principales dentro de este tipo de microfacies. El análisis mineralógico de la roca indica dos fases de calcita: Primeramente, la micrita aparece dentro de la matriz con una textura lodosoportada bioclástica fina, esencial para limitar este tipo de microfacies y la otra característica importante es la pelmicrita recristalizada en nódulos que se presenta específicamente en un cierto tipo de fauna, en este caso radiolarios bien conservados (Figura 5.21 A).

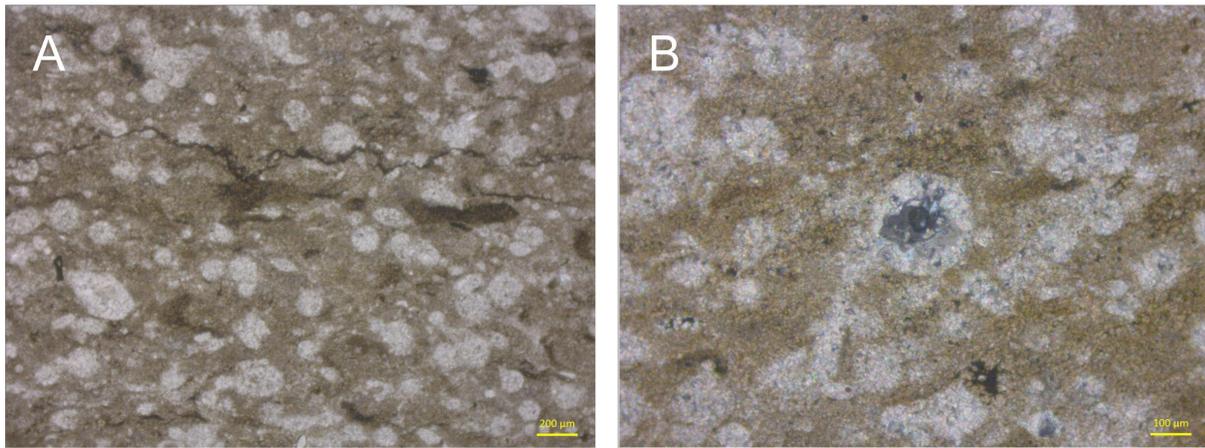


Figura 5.21 - Fotomicrografías de rasgos petrográficos pertenecientes a la muestra P10-Nódulos - *Wackestone de radiolarios*. A) Textura nodular de radiolarios recristalizados acompañado de fracturamiento. B) Peloides post-recristalizado de calcita.

El fracturamiento es notable dentro de los cristales que forman la matriz y esqueleto; algunas de las fracturas se encuentran totalmente rellenas de calcita y cuarzo, y algunos peloides muestran rasgos de recristalización tardía (Figura 5.21 B) por lo cual indica que los eventos post-diagenéticos tardíos sobresalientes fueron la cementación y recristalización.

- 5.4.9 - *Wackestone (Raíces)* - Esta muestra tiene una textura lodosoportada por una matriz de micrita con un porcentaje mayor del 10% de contenido en granos; la mayoría de estos granos son extraclastos, ooides y oncolitos. La aparición de foraminíferos bentónicos (Figura 5.22 C, D), pocos

radiolarios y la bioturbación que exhiben dentro de la muestra infieren un ambiente de depósito superficial y/o restringido. Los cristales deformados de calcita muestran claramente que la deformación fue el principal proceso diagenético que actuó en esta roca. (Figura 5.22 A, B)

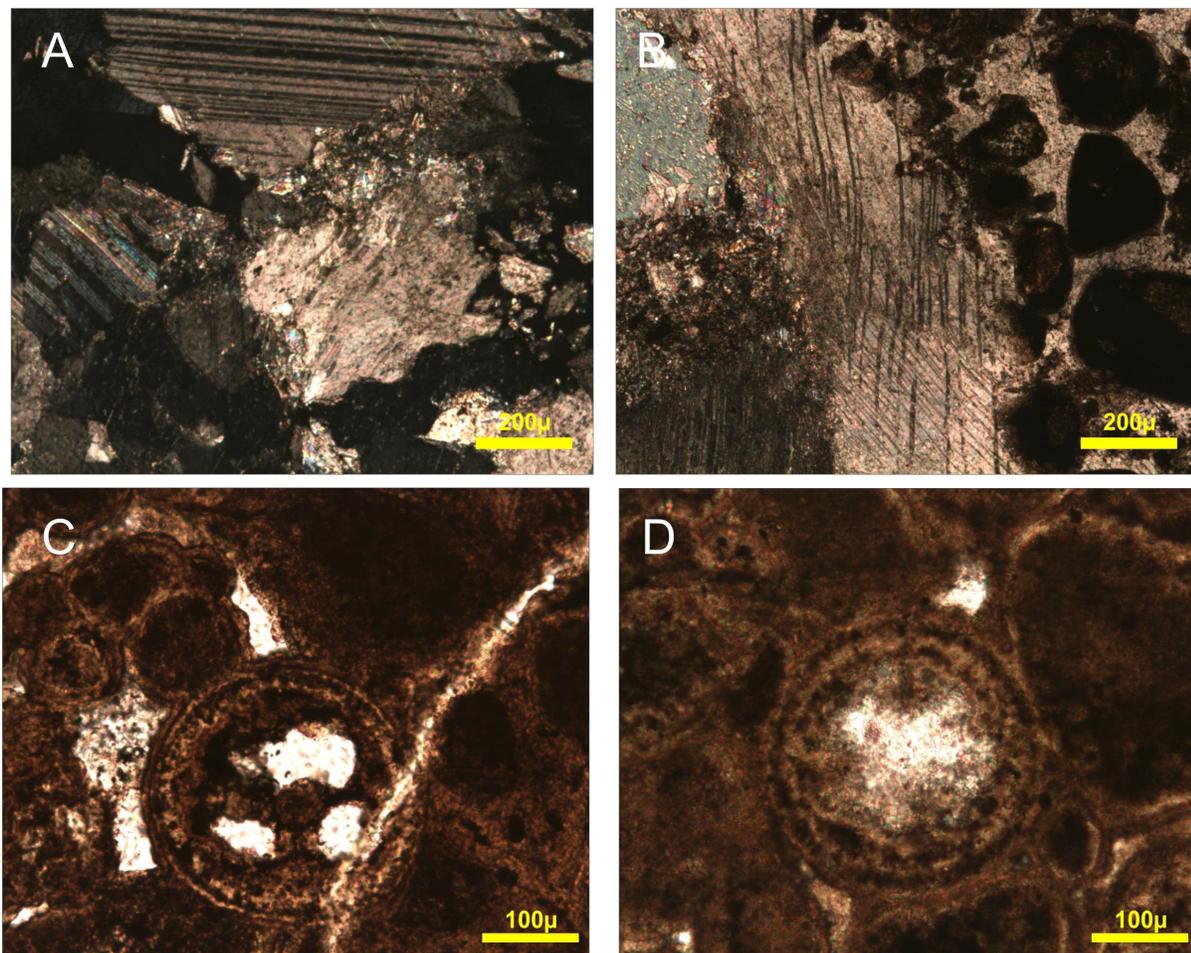


Figura 5.22 - Micrografías de rasgos petrográficos correspondientes a la muestra Raíces - Wackestone. A) Escalenoedros de calcita en asociación de calcita deformada (Nx). B) Calcita deformada (Nx). C) Foraminífero bentónico fracturado. D) Foraminífero bentónico micritizado.

Al tener un panorama amplio sobre el conjunto de texturas deposicionales y fósiles que forman la secuencia calcárea del pliegue, se pueden formar asociaciones de microfacies y establecer relaciones que muestren un ambiente de depósito más conciso sobre las condiciones de formación del depósito de fosforitas.

Por lo cual se utilizarán los siguientes elementos: en primer lugar se relaciona el contenido fosilífero con el tipo de microfacies estándar (SMF) acoplado al modelo de Flügel (2004) (Figura 5.23), y en segundo lugar cada clase de la clasificación de Dunham se asoció a su tipo de SMF (Tabla 5.4) de cada una de las muestras.

Figura 5.23 - Diagrama donde se relaciona cada una de las muestras con su contenido fosilífero y la clasificación del tipo de microfacies estándar (SMF).

Tabla 5.4 - Relación de la clasificación del tipo de microfacies estándar con la clasificación de Dunham de cada una de las muestras.

Muestras	Tipo de microfacies estándar (SMF)	Clasificación de Dunham
P1'	SMF 13	Grainstone de oncolitos
P1	SMF 11	Grainstone de intraclastos
P3	SMF 15-C	Grainstone de ooides
P4a	SMF 15-C/SMF 16	Grainstone/Wackestone laminado
P5a	SMF 16	Wackestone laminado
P5b	SMF 11	Grainstone de bioclastos
P5c	SMF 15-C	Packstone de ooides
P10-Nódulos	SMF 8	Wackestone de radiolarios
Raíces	SMF 9	Wackestone

A partir del orden sistemático del muestreo de canal realizado en campo, el reconocimiento de la clasificación textural de cada muestra y sus tipos de SMF que propone Flügel (2004) que conjugan las rocas en estudio, es posible correlacionar una secuencia deposicional de las muestras tomadas, de más antiguo a más reciente, y agruparlas por etapas de depósito en la siguiente forma:

Tabla 5.5 - Relación entre la clasificación de Dunham y su etapa de depósito de las muestras del anticlinal El Barroso.

Muestra	Clasificación de Dunham	Etapas de depósito
---------	-------------------------	--------------------

P3	Grainstone de ooides	Primera
P4a	Grainstone/Wackestone laminado	
P5a	Wackestone laminado	
P1	Grainstone de intraclastos	Segunda
P5b	Grainstone de bioclastos	
P1'	Grainstone de oncolitos	
P5c	Packstone de ooides	
P10-Nódulos	Wackestone de radiolarios	Tercera
Raíces	Wackestone	

5.5 Ambiente de depósito

El ambiente deposicional de las rocas que componen a las fosforitas se da dentro de una plataforma bordeada donde el nivel de energía, microorganismos y el aporte de materia orgánica fueron las condiciones fluctuantes que propiciaron la formación de P_2O_5 .

Primeramente uno de los procesos in situ primordiales para la existencia de fósforo es la posición en la plataforma continental donde se depositaron cada una de las capas de rocas que componen el anticlinal, por lo cual la metodología propuesta para sostener una hipótesis del ambiente sedimentario de depósito es la que se muestra continuación: analizar ordenadamente la secuencia deposicional por etapas propuesta y definir sus características referentes al lugar de depósito que propone el modelo de Flügel (2004) para cada tipo de microfacies estándar (SMF), ya catalogadas anteriormente; asimismo establecer su secuencia cronoestratigráfica con la información recabada anteriormente de cada una de las muestras y a partir de la secuencia de tipos de microfacies (SMF) establecer las etapas de regresiones y transgresiones marinas que afectaron las rocas en base a la sucesión de la clasificación textural considerando el total de las muestras tomadas al interior del socavón.

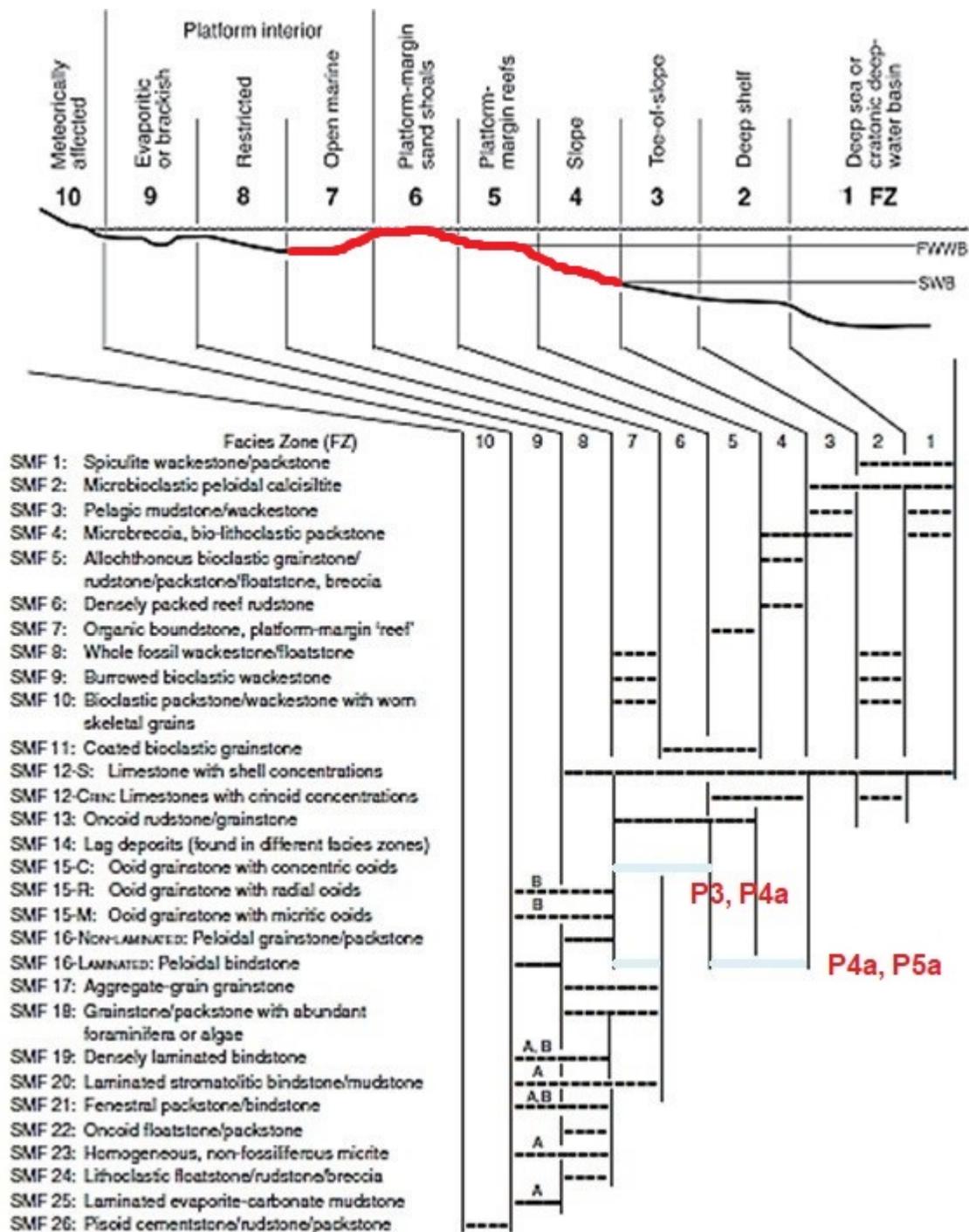


Figura 5.24 - Diagrama de distribución de los tipos de SMF en las zonas de facies (FZ) de un modelo de plataforma bordeada de carbonato durante la primera etapa de depósito. (Tomada de: Flügel, 2010)

Las asociaciones de microfacies de *grainstone* con intercalaciones de *wackestone laminado* fue la primera secuencia de depósito y ocupó un área extensa dentro del diagrama de plataforma de Flügel (2004) (Figura 5.24) que se establece de la parte marina abierta de la plataforma interior hasta el talud continental; donde las condiciones ambientales de depósito fueron inestables prueba de ello son los horizontes de cambios de microfacies que ocurren dentro de la muestra P4a. Cabe señalar que la presencia de materia orgánica (lignita) es muestra de la ausencia de oxígeno en el ambiente y la aparición de cuarzo detrítico afirma el aporte de terrígenos de las fuentes proximales al depósito de fosforitas del anticlinal El Barroso.

La variación de horizontes entre textura *grainstone/wackestone laminado* en esta asociación de microfacies denotan que las condiciones ambientales fueron variantes en relación al nivel de energía o agitación porque la textura granosoportada y los clastos subredondeados indican un ambiente con condiciones caóticas de alta energía, en tanto que las laminaciones con peloides de grano fino son de un ambiente de baja energía, sin dejar de mencionar la disparidad de los procesos diagenéticos que intervinieron en la formación de cada uno

de los horizontes de cambios de microfacias.

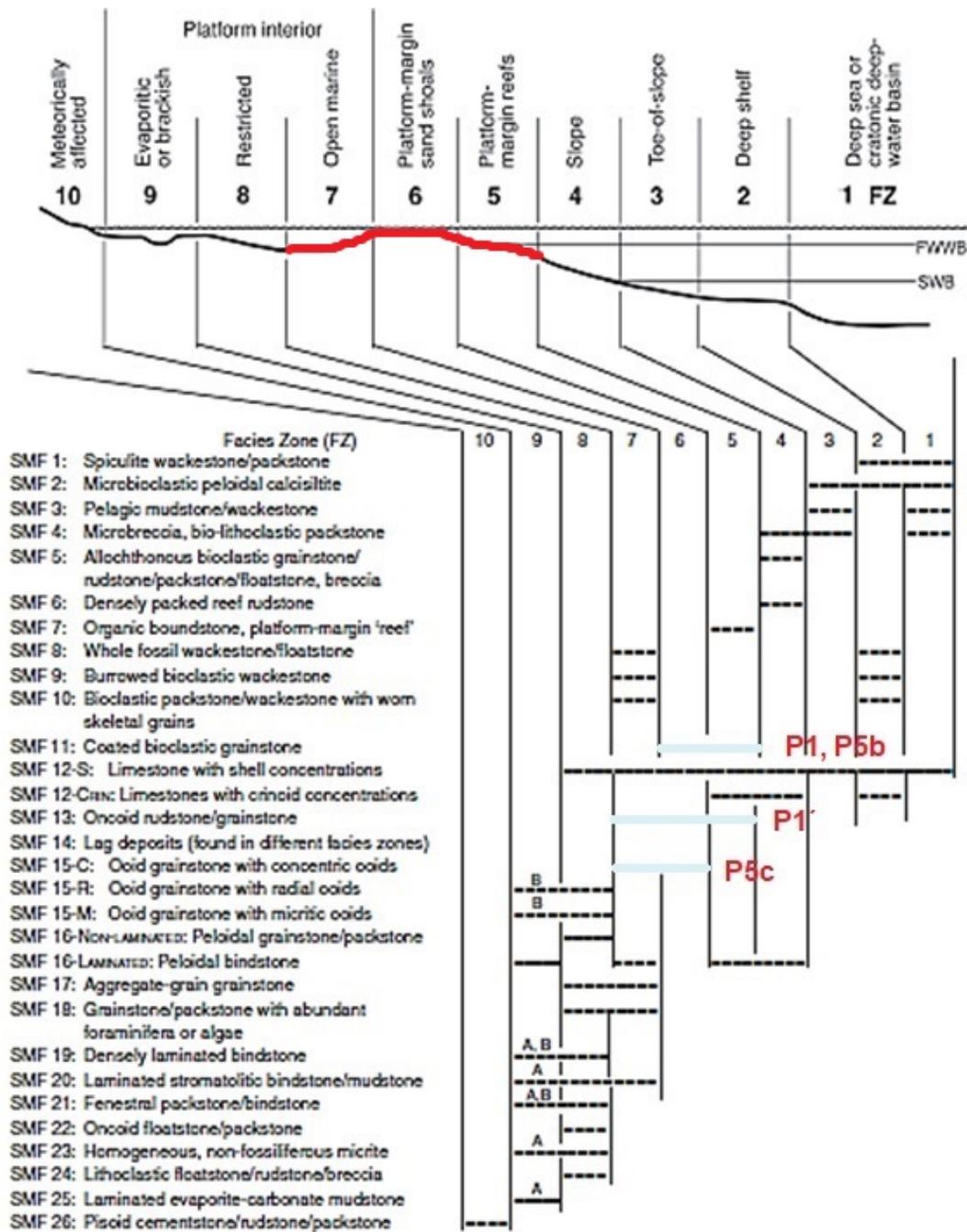


Figura 5.25 - Diagrama de distribución de los tipos de SMF en las zonas de facies (FZ) de un modelo de plataforma bordeada de carbonato durante la segunda etapa de depósito. (Tomada de:

Flügel, 2010)

En la segunda etapa de depósito, las texturas dominantes fueron granosoportadas se clasifican desde grainstone hasta packstone; agrupadas mediante la clasificación de Dunham en las siguientes clases: *grainstone de intraclastos* (P1) - *grainstone de bioclastos* (P5b) donde la variabilidad en el porcentaje de aloquímicos presentes fue el atributo textural que separó las anteriores clases. La característica textural en común es el recubrimiento abundante que exhiben los bioclastos ya sea totalmente micritizados o en 'patinas' de micrita relacionado a la precipitación de calcita dentro de un ambiente somero; además se le suma existencia de elementos no esqueléticos como ooides y oncolitos que confirman un ambiente de formación de alta energía y superficial.

La microfauna de la muestra P5b es de gran ayuda para establecer implicaciones paleoambientales concisas dado que Scholle et al. (2003) señala que los radiolarios son comunes a poca profundidad en aguas someras y áreas de surgencia; y también expone que la clase de *equinoides* pertenecientes a los equinodermos son fósiles habituales en ambientes marinos normales porque tiene un limitado rango de tolerancia a la salinidad y son comunes en las áreas arenosas de la plataforma tanto en aguas templadas como frías; de la misma manera menciona que la clave para el reconocimiento petrográfico de las espinas de *equinoideos* es por sus poros que exhiben una simetría radial y en consecuencia dentro de la sección transversal son lobulados o con un aspecto de flor por lo cual estas estructuras fueron una llave rápida para la identificación de estos fósiles en la muestra P5b (Figura 5.19 C, B).

Establecer una posición bioestratigráfica para esta muestra es posible debido a la microfauna que se localiza en esta capa especialmente por los calpionélidos los cuales son empleados como fósiles índices según Scholle et al. (2003) reconoce un rango de edad para los calpionélidos de Jurásico superior (Titoniano) a Cretácico inferior (Valanginiano; posiblemente en Albiano).

Las capas de roca contiguas fueron: *grainstone de oncolitos* (P1') - *packstone de ooides* (P5c); donde la capa de rocas cambia de oeste a este su clasificación textural de *grainstone* a *packstone* por los procesos de cementación inherentes a la etapa posterior. Primeramente dicha capa tiene los siguientes atributos texturales que son el alto porcentaje de oncooides en el esqueleto por lo que se clasificó como SMF 13 en el diagrama de microfacies estándar de Flügel (2004) (Figura 5.25), la asociación de ooides en su esqueleto y la existencia de *grapestones* son las pruebas precisas de un ambiente de alta energía; también una de las características importantes es la aparición y buena preservación de bioclastos (fragmentos de concha, radiolarios - *nazzelarios*, foraminíferos bentónicos) indicio del transporte breve del esqueleto antes de su depósito en la plataforma.

Las rocas pertenecientes al *packstone de ooides* son la continuación de este paquete de rocas con textura granosoportada agrupadas en esta clase por la aparición de una matriz de micrita que se debe a la subsecuente precipitación de carbonato microcristalino en la sucesión de estas calizas. La clasificación de ooides dentro de la muestra es primordial para clasificar este tipo de microfacies estándar en SMF 15-C (Figura 5.25), por lo que su análisis puntual de cortezas en el microscopio arrojó como resultado una mayoría de ooides tangenciales y superficiales poniendo en si las condiciones existentes de profundidad somera en el ambiente deposicional y las condiciones imperantes de alta energía.

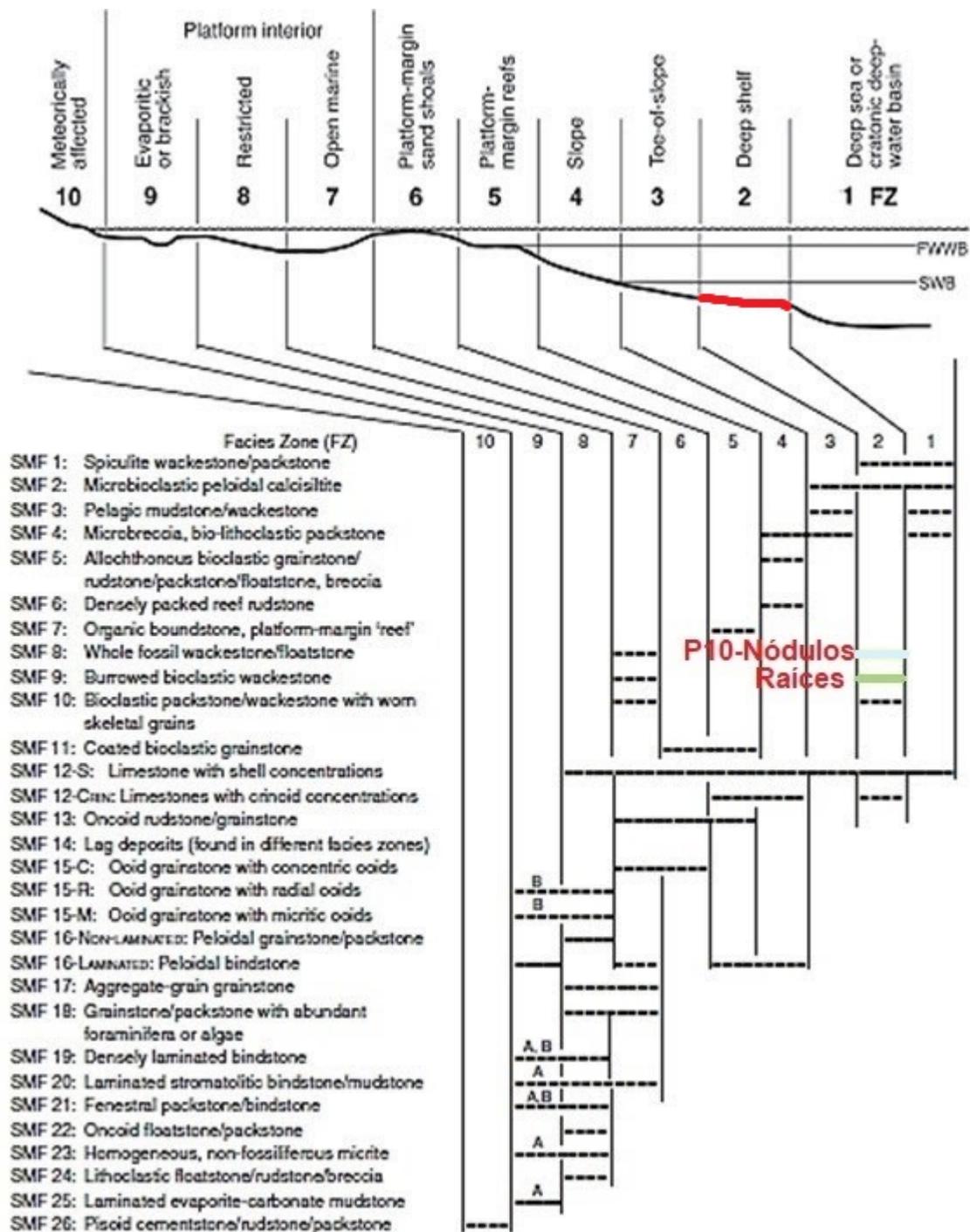


Figura 5.26 - Diagrama de distribución de los tipos de SMF en las zonas de facies (FZ) de un modelo de plataforma bordeada de carbonato durante la tercera etapa de depósito. (Tomada de: Flügel, 2010)

La última y tercera etapa de depósito de esta secuencia calcárea fueron las rocas que se caracterizan por tener una textura lodosoportada y una matriz microcristalina de micrita; la primera de ellas asignada como *wackestone de radiolarios* (P10-Nódulos) está compuesta por nódulos recristalizados conformados de radiolarios y peloides y dentro del modelo de Flügel (2004) se clasifica como SMF 8 (Figura 5.26). La subsecuente capa de rocas (Raíces) se clasificó como una *wackestone* de grano fino formada por extraclastos, ooides y oncolitos que conforman su esqueleto. La presencia de madrigueras y bioclastos micritizados así como deteriorados atribuyen su clasificación al tipo SMF 9 del modelo de microfacies estándar de Flügel (2004) (Figura 5.26). Exhibe una microfauna similar a las muestras subyacentes que se configura por radiolarios reemplazados por colofano y algunos foraminíferos bentónicos micritizados.

En el siguiente diagrama se correlaciona cada una de las muestras con su registro cronoestratigráfico correspondiente, su estratigrafía de secuencias (regresiones y transgresiones) que se delimitan con la clasificación textural de Dunham asignada (Figura 5.27):

Muestra	Era	Periodo	Época Piso	Hacia la plataforma Hacia la cuenca				Estratigrafía de secuencias	Ma
				Grainstone	Packstone	Wackestone	Mudstone		
	Mesozoico	Cretácico	C. Inf	Albiano					112
				Aptiano					125
				Barremiano					130
				Hauteriviano					136
				Valanginiano					140
Loma			Berriasiano				Transgresión	145.5	
Raíces							Transgresión		
P10-Nódulos							Transgresión		
P1' P5c			Tithoniano				Transgresión	151	
P1 P5b							Regresión		
P5a	Jurásico	J. Sup					Transgresión		
P4a							Transgresión		
P3							Regresión		
			Kimmeridgiano					156	

Figura 5.27 - Tabla cronoestratigráfica donde se relaciona la clasificación de Dunham y la estratigrafía de secuencias de cada una de las muestras del anticlinal El Barroso.

***Nota: Se incluye la muestra "Loma" correspondiente a la Fm. Taraises la cual no fue tomada en cuenta dentro de este trabajo; sólo se consideró como una muestra de correlación geológica en el área cercana al anticlinal El Barroso.**

Al conocer concretamente la posición y características ambientales prevalecientes donde se depositaron las muestras dentro de la plataforma, así como la cronoestratigrafía y las secuencias estratigráficas correspondientes y considerar los indicadores paleoambientales es posible conjugar una hipótesis semejante al lugar de depósito y más tarde establecer las condiciones geológicas suscitadas para la existencia del fósforo.

La primera etapa de depósito en el anticlinal El Barroso fue una sucesión de *grainstone/wackestone laminado* alojada en la parte media de la Fm. La Casita que señala como rasgo principal las condiciones fluctuantes de energía o nivel de agitación mencionado ya anteriormente; la conjunción de texturas también designa un ambiente de depósito donde la profundidad y nivel del mar jugaron un papel importante en la precipitación de colofano. Dado que la asignación de estos tipos de SMF de estas muestras ocupa una gran área del diagrama de zonas de facies y los rasgos petrográficos como textura, aglutinantes no esqueléticos, porcentaje de esqueleto y matriz no son constantes en estas muestras por lo que resulta ambiguo delimitar un sitio de depósito específico para esta capa aunque dentro del diagrama de microfacies pertenece a la zona de plataforma — talud continental (Figura 5.23).

Al parecer las regresiones y transgresiones en esta etapa fueron sucesivamente ensambladas por el cambio del nivel del mar ya sea por fenómenos oceanográficos como surgencia marina, o climáticos como lluvias torrenciales o huracanes, o fenómenos geológicos como tectonismo o aumento en la tasa de

sedimentación; una prueba real consistente a estos procesos geológicos fueron los cambios de microfacies notablemente distintos en horizontes microscópicamente visibles que modifican la identificación original del tipo de microfacies estándar y por ende su lugar inicial de depósito.

En la siguiente etapa de depósito la clasificación textural frecuentemente se compone de texturas granosportadas señalando la naturaleza caótica del ambiente de depósito desde las condiciones de energía hasta el incremento de las fuentes de aporte. La secuencia de depósito tiene un patrón de regresión hacia la plataforma relacionado a la dominante clasificación textural de *grainstone* asignada a cada uno de los ejemplares pertenecientes a esta etapa de depósito.

La primera secuencia de estas rocas calcáreas tipo *grainstone* son las muestras P1 y P5b donde la precipitación de matriz calcárea (micrita) en bioclastos establece el vínculo principal de unión de este tipo de microfacies SMF 11 nombrada como *grainstone bioclástica recubierta con cemento fragmentado*. Dos de los indicadores paleoambientales similares en ambas muestras de profundidad y lugar del ambiente de depósito mencionados ya anteriormente son los radiolarios puesto que se depositan en aguas someras y áreas de surgencia; y a la par Flügel (1982) menciona que la formación de la mayoría de intraclastos necesita de zonas de ruptura física del sedimento penecontemporáneo por olas normales, olas de tormenta o corrientes, algunos intraclastos pueden formarse por otros mecanismos (Flügel, 1982, p. 334, citado por Boggs, 2009).

Las características requeridas para las pruebas paleoambientales explicadas en el párrafo anterior también se relacionan estrechamente con los lugares de depósito que propone Flügel (2004) donde se refiere a lugares cercanos al borde de la plataforma como zonas de arenas de borde aventadas o arrecifales o cercanas a arrecifes.

Las rocas analizadas subsecuentemente tienen un cambio en su textura donde la precipitación de cemento microcristalino y la diversidad de los constituyentes en el esqueleto fueron los factores principales de

disparidad entre ambas muestras. En la muestra P1', los oncoides son indicadores de un ambiente de depósito de alta energía y la abundante cantidad de bioclastos bien desarrollados demuestra la producción elevada de materia orgánica para el sustento de la microfauna en el ambiente. Las zonas de facies propuestas por Flügel (2004) donde se depositan grainstone oncoidales son áreas de arenas aventadas de mar abierto, lagunas al interior de la plataforma o en algunas ocasiones alrededor de parches arrecifales o trasarrecifales (p. 696); la identificación petrográfica de un núcleo de coral en un ooide ratifica la hipótesis sobre el área de depósito (Figura 5.28).

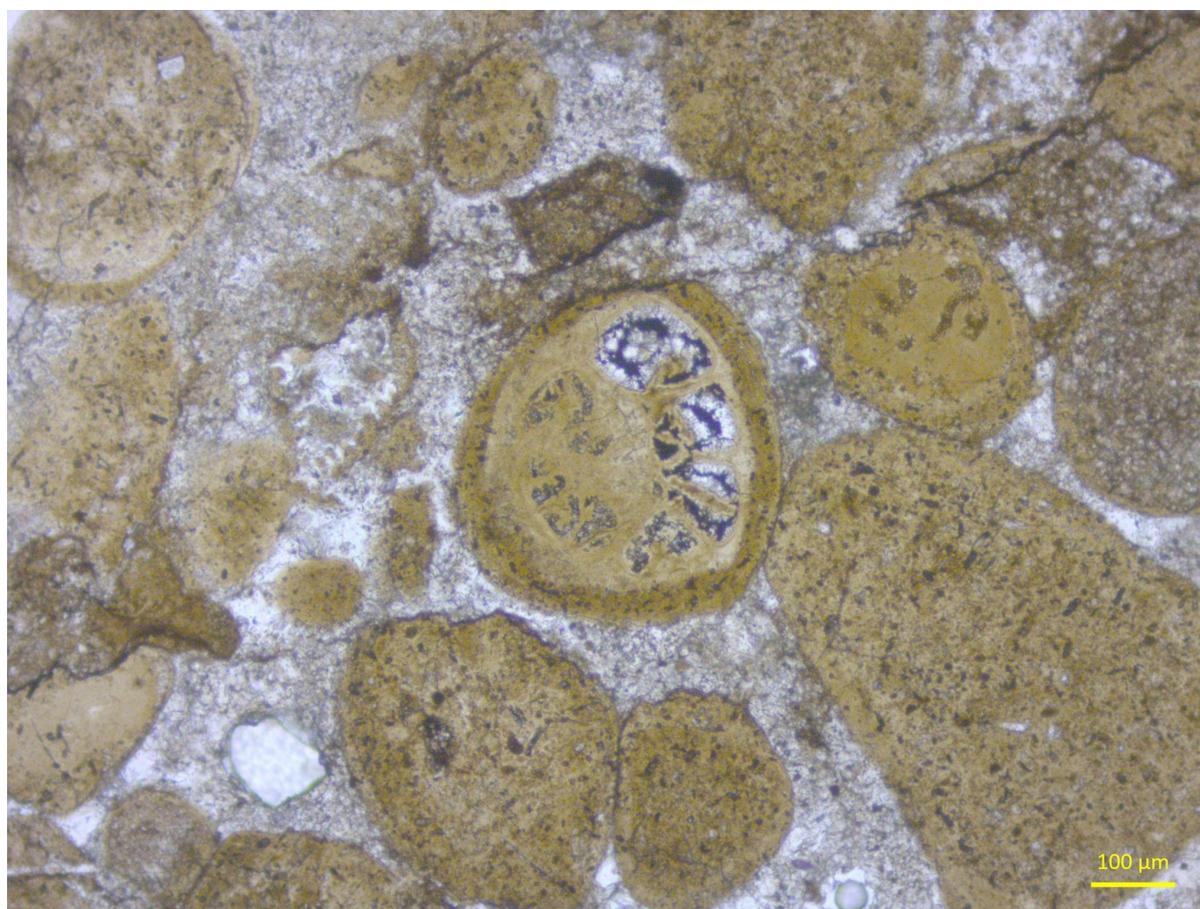


Figura 5.28 - Ooide con núcleo de coral observado en la muestra P1'.

La siguiente etapa transgresiva del Jurásico Superior comenzó con el depósito de *packstone de ooides* (P5c) donde la cementación inicial de micrita demuestra la transición de las condiciones idóneas para la subsecuente precipitación de carbonato de calcio microcristalino. Los elementos comunes del esqueleto en esta muestra fueron ooides superficiales con cortezas tangenciales al núcleo (Figura 5.20 A) asociados a las capas de rocas subyacentes; adicionalmente Boggs (2009) menciona la importancia del nivel de agitación del agua para el crecimiento de estos ooides y las plataformas carbonatadas poco profundas como los sitios donde ocurre con mayor frecuencia su depósito. Flügel (2004) considera diferencias significativas en la microfábrica de las cortezas ooides donde los ooides concéntricos con láminas compuestas de cristales dispuestos tangencialmente se originan comúnmente en entornos marinos de alta energía en bancos de arena oolíticos, barras mareales y playas.

Una de las propiedades petrográficas similares con la muestra P1' para considerar como un indicio sobre el nivel de energía es la presencia de granos agregados; "Winland y Matthews (1974) sugieren que los granos agregados se forman bajo condiciones en las que hay un firme suministro de granos de carbonato, turbulencia de agua desigual, altas tasas de circulación de agua y tasas de sedimentación muy bajas." (Boggs, 2009, p. 337).

Finalmente, la muestra P10-Nódulos se trata de un límite de secuencia compuesto por wackestone con textura lodosoportada donde su matriz de grano fino indica el bajo nivel de energía para su formación. Goldhammer (1999) define la ocurrencia de una superficie de inundación máxima como "el punto máximo de retrogradación de facies, teóricamente coincidente con la tasa máxima de aumento del nivel del mar." (p. 39); de tal forma que la aparición de micrita tanto en la matriz y esqueleto en lugar del cementante dentro de esta capa corrobora esta idea sobre esta superficie delimitadora al interior de una secuencia deposicional.

Flügel (2004) menciona que las fábricas nodulares son comunes en ambientes profundos marinos y de talud aunque podrían formarse también en entornos poco profundos y no marinos (p. 198). Asimismo, la aparición de radiolarios recristalizados asocia el ambiente de depósito con áreas de surgencia o poco profundas aunque probablemente pudieron haber sido transportados desde zonas sublitorales hasta zonas profundas. Los entornos de baja energía debajo de la base de olas cercanos a la plataforma profunda son ideales para la ocurrencia de este tipo de SMF.

La precipitación de calcita microcristalina se da bajo las condiciones de depósito prevalecientes cuando aumentó el nivel del mar durante los límites del Jurásico superior — Cretácico inferior a causa de la expansión del Golfo de México y fijaron las condiciones de baja energía y tirante de agua; dicho de otro modo, estableció la profundidad requerida para la precipitación de una matriz calcárea de grano fino (micrita). Aparentemente estas condiciones paleoambientales favorables se establecieron en esta etapa de depósito para los múltiples eventos de cementación de carbonato de calcio porque en la muestra Raíces se observan pruebas como una textura lodosoportada, algunos foraminíferos micritizados, además de cristalización de calcita bien desarrollada y sobrecrecimiento alrededor de partículas no esqueletales. Además de que la textura microcristalina presente en la muestra 'Loma' tomada como referencia geológica confirma la etapa de transgresión de dicha etapa de depósito.

6. Geoquímica del depósito de fosforitas

El análisis geoquímico permitirá conocer la cantidad de P_2O_5 y otros óxidos mayores, así como de elementos traza en las muestras, servirá para calcular una ley promedio para el yacimiento de fosforitas, encontrar las facies favorables para la acumulación de fósforo y mostrar la correlación proporcional o inversamente proporcional entre los óxidos presentes en las rocas.

Para el estudio geoquímico se utilizaron 4 ejemplares analizados con el microscopio petrográfico. Las muestras empleadas para el análisis geoquímico fueron P001 (P1), P003 (P3a), P004 (P4a), P005 (P5a) y Raíces donde la última muestra se tomó de montículos y terreros de la explotación.

Las técnicas analíticas empleadas fueron fluorescencia de rayos X (FRX) para óxidos mayores y para la concentración de elementos traza se utilizaron las pruebas de FUS-MS y TD-ICP como ya se había mencionado en el apartado 3.6 – *Geoquímica de roca total*.

6.1 Roca total y perfiles

Los datos de concentración de óxidos mayores obtenidos de los ensayos se muestran en la Tabla 6.1 a partir de ellos se conformó el diagrama de roca total (Figura 6.1); enseguida por su parte la concentración de elementos traza se muestra en la Tabla 6.2 con su respectivo diagrama (Figura 6.2).

Tabla 6.1 - Tabla de concentración de óxidos mayores.

Óxidos mayores	Muestra					
	P001 (FRX)	P003 (FRX)	P004 (FRX)	P005 (FRX)	Raíces (FRX)	Raíces std (FRX)
SiO ₂	12.55	24.155	28.34	33.727	8.153	8.52
TiO ₂	0.093	0.131	0.113	0.192	<0.001	<0.001
Al ₂ O ₃	2.18	1.387	3.08	4.278	0.69	0.545
F ₂ O ₃ T	0.7	1.256	0.93	1.293	0.192	0.158
MnO	0.025	0.002	0.019	0.002	0.108	0.094
MgO	0.36	0.139	0.59	0.661	0.323	0.293
CaO	46.57	34.878	36.4	31.928	68.64	66.35
Na ₂ O	0.12	0.134	0.1	0.098	0.197	0.081

K ₂ O	0.44	0.905	0.72	1.669	0.257	0.101
P ₂ O ₅	22.24	11.26	12.41	11.31	18.82	21.16
PXC	13.47	13.85	16.14	13.21	1.583	1.707
Total	98.748	88.092	98.842	98.368	98.963	99.007

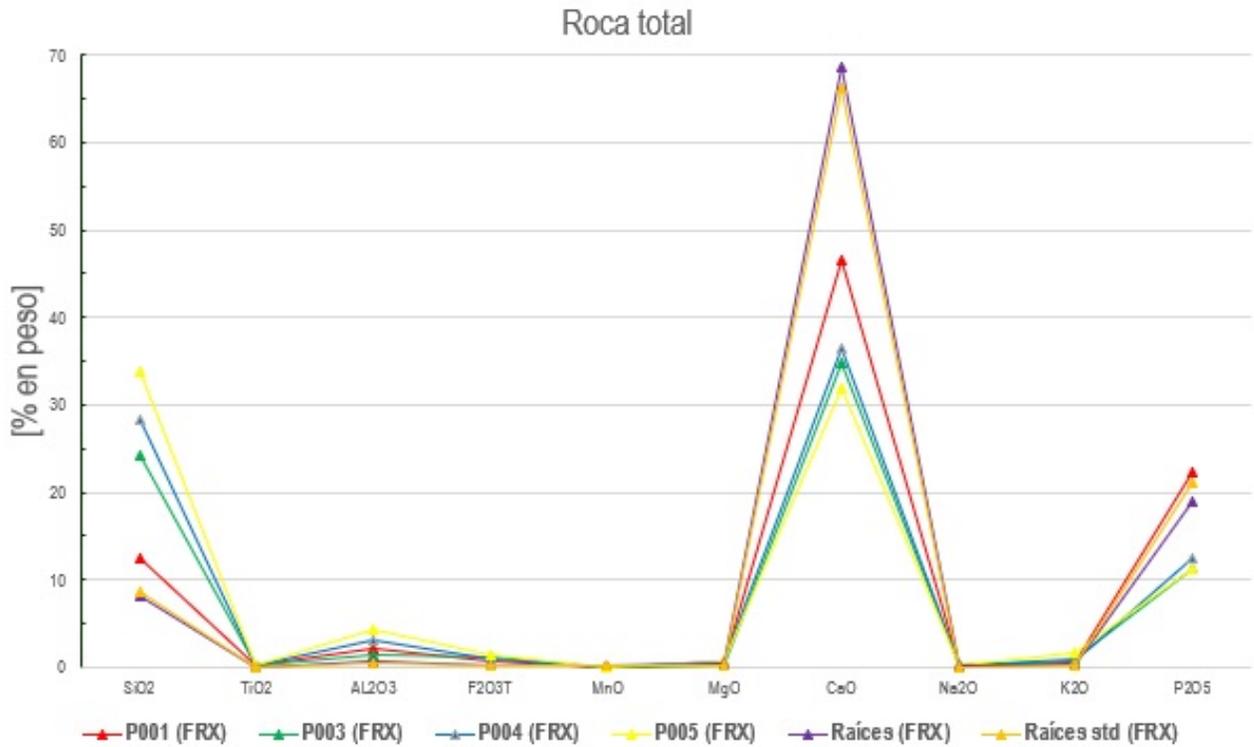


Figura 6.1 - Diagrama de roca total.

Tabla 6.2 - Tabla de concentración de elementos traza.

Elementos traza	P001 (FUS-MS)	P004 (FUS-MS)	Raíces (TD-ICP)
Ag	<0.5	<0.5	1.3
Al	-	-	0.34

As	7	<5	8
Ba	643	470	230
Be	<1	<1	<1
Bi	<0.4	<0.4	<2
Cd	-	-	8.1
Co	<1	<1	<1
Cr	110	80	36
Cu	50	30	15
Fe	-	-	0.1
Ga	5	4	1
Hg	-	-	<1
Mo	29	13	8
Na	-	-	0.04
Ni	160	70	40
Pb	<5	6	<3
S	-	-	0.09
Sb	2	1.2	<5
Sc	5	5	<4
Sr	913	1206	988
Tl	2.1	0.8	<5
U	28.5	26.8	33
V	1075	440	249
W	6	8	6
Y	65	96	41

Zn	530	390	286
Zr	48	43	<5

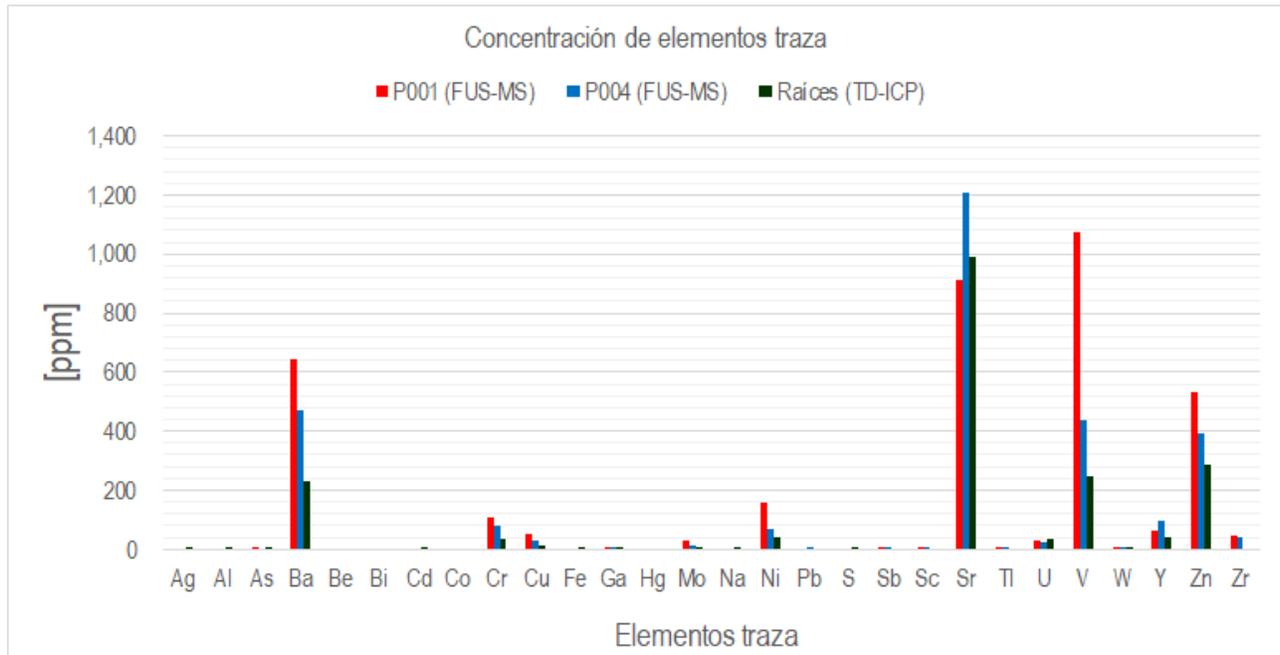


Figura 6.2 - Diagrama de concentración de elementos traza.

La concentración más alta es de CaO (46.57 [% en peso]) entre los óxidos mayores de las muestras recolectadas del anticlinal, seguido de SiO₂ (33.727 [% en peso]), P₂O₅ (22.24 [% en peso]), Al₂O₃ (4.278 [% en peso]) y las concentraciones de óxidos restantes son inferiores al 1 [% en peso].

En tanto las barras de concentración que resaltan en el diagrama de concentración de elementos traza están enriquecidas en Ba, Sr, V y Zn y con cantidades mayores a 200 [ppm] hasta 1206 [ppm]; los elementos traza restantes varían en su concentración con cantidades menores al máximo absoluto de 160 [ppm] concerniente a Ni en la muestra P001. El ensayo de las muestras 'Raíces' y 'Raíces std' fueron discriminados para el análisis geoquímico dado que su recolección en campo no fue sistematizada correctamente con el

objetivo de estudio; solamente se incluyen para relacionar cuantitativamente el porcentaje de concentración de P_2O_5 con la viabilidad del depósito de fosforitas.

Al conocer los lugares de ocurrencia de las fosforitas, la precipitación de P_2O_5 está asociada a la presencia de materia orgánica y a su vez a la precipitación de microfauna rica en fósforo al fondo oceánico compuesta de $CaCO_3$ en el depósito. La reacción de descomposición química de la calcita ($CaCO_3$)_s se descompone en óxido de calcio (CaO)_s + dióxido de carbono (CO_2)_g; por ello al comparar brevemente el comportamiento de los vectores de concentración de CaO con la abundancia de P_2O_5 en el diagrama de roca total se observa que es proporcional en las muestras P001 y P004. Otro aspecto por resaltar es la relación guardada entre los valores de concentración de SiO_2 y CaO donde el comportamiento es inversamente proporcional en dos muestras de dicha relación.

Los perfiles geoquímicos de P_2O_5 y CaO se muestran a continuación debido a la importancia que guardan en la génesis de las fosforitas (Figura 6.3). El enriquecimiento de fósforo en el anticlinal El Raíces se refleja en la concentración de P_2O_5 correspondiente a las muestras P001, P003, P004 y P005 que tienen la siguiente concentración: 22.24 [% en peso], 11.25 [% en peso], 12.41 [% en peso] y 11.31 [% en peso] respectivamente. Por otra parte, los altos valores de concentración de CaO son para P001 (46.57 [% en peso]), P003 (34.878 [% en peso]), P004 (36.4 [% en peso]) y P005 (31.928 [% en peso]) donde se evidencia la abundancia de $CaCO_3$ en la composición química de las rocas calizas que regularmente presentan los depósitos de fósforo.

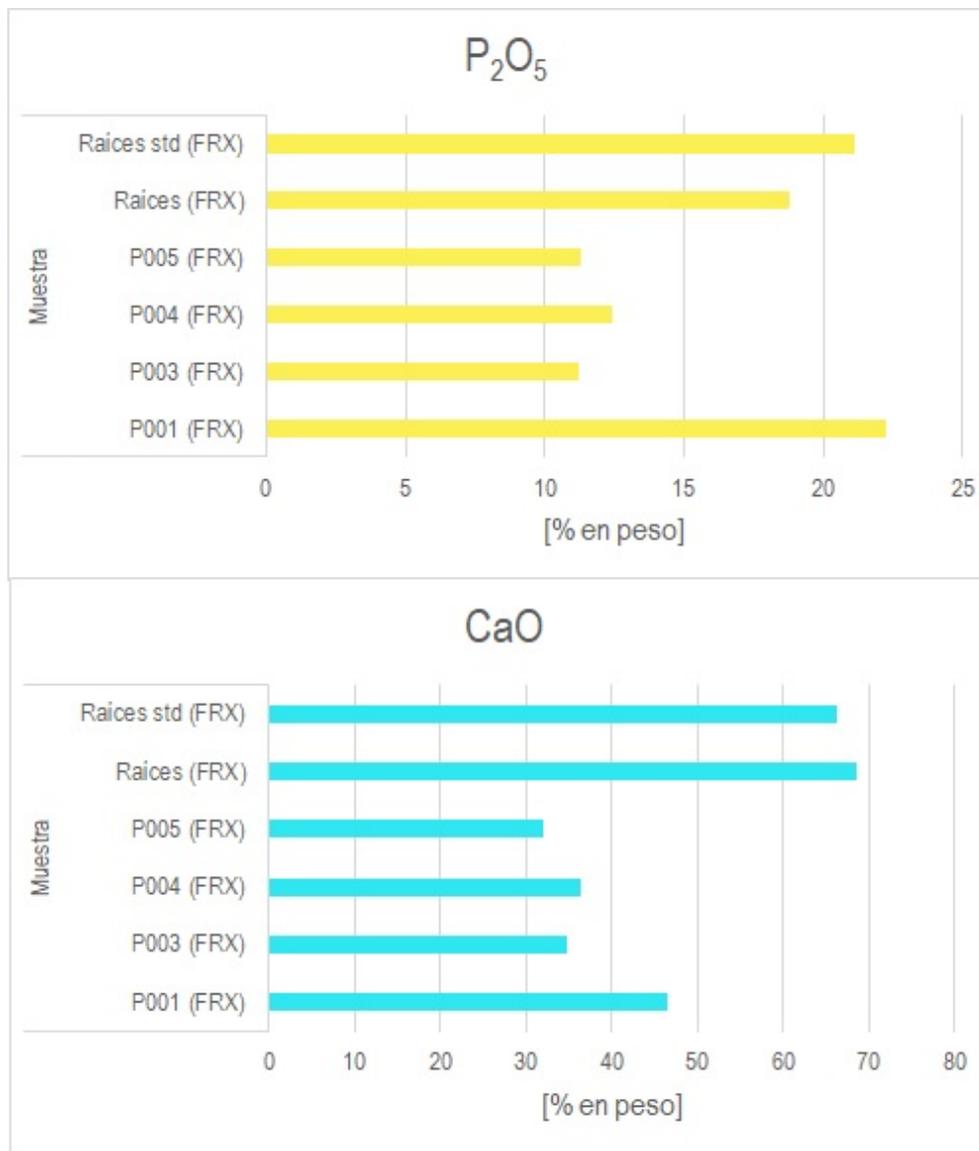


Figura 6.3 - Perfiles geoquímicos de P₂O₅ y CaO.

***Nota: Se incluyen los ensayos de fluorescencia de rayos X ‘Raíces’ y ‘Raíces std’ como pruebas de correlación geoquímica con el depósito de fosforitas en el anticlinal ‘El Barroso’.**

6.2 Matrices de correlación

Los resultados de los datos geoquímicos referentes a la concentración de óxidos mayores pueden compararse entre sí mismos mediante la matriz de correlación que sirve para cuantificar el grado de relación

entre cada uno de ellos a través de su coeficiente de correlación existente entre cada una de las variables relacionadas. El coeficiente de correlación r utiliza la siguiente fórmula para su cálculo (Figura 6.4):

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde :

\bar{x} = Media de la muestra x.

\bar{y} = Media de la muestra y.

$x_i - \bar{x}$ = Diferencia entre cada dato puntual de x y su media \bar{x} .

$y_i - \bar{y}$ = Diferencia entre cada dato puntual de y y su media \bar{y} .

Figura 6.4 - Fórmula estadística que denota el coeficiente de correlación r .

Al interpretar el coeficiente de correlación r hay que tener en cuenta las siguientes afirmaciones:

- Los valores positivos de r señalan una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos.
- Los valores negativos de r muestran una correlación negativa, es decir que los valores de una variable tienden a incrementarse mientras que los valores de la otra variable disminuyen.
- Al aproximarse los valores de r a cero, indican que la relación lineal es débil o nula.¹¹

	SiO ₂	TiO ₂	AL ₂ O ₃	F ₂ O ₃ T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1									
TiO ₂	0.82090	1								
AL ₂ O ₃	0.67648	0.68464	1							

¹¹ Ver JMP, Portal de formación estadística, coeficiente de coorelación, https://www.jmp.com/es_mx/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html

F ₂ O ₃ T	0.77551	0.83857	0.23818	1						
MnO	-0.68227	-0.81249	-0.15352	-0.98999	1					
MgO	0.57534	0.45537	0.95530	0.00821	0.09657	1				
CaO	-0.95019	-0.81451	-0.44220	-0.91815	0.85304	-0.29498	1			
Na ₂ O	-0.60287	-0.43015	-0.93560	-0.01440	-0.09870	-0.99573	0.32453	1		
K ₂ O	0.83622	0.99950	0.70067	0.83425	-0.80380	0.47752	-0.82294	-0.45421	1	
P ₂ O ₅	-0.89692	-0.66001	-0.28109	-0.86880	0.79839	-0.17544	0.97307	0.22296	-0.67027	1

Figura 6.5 - Matriz de correlación para óxidos mayores.

En la Figura 6.5 se señalan en negritas las relaciones de óxidos que guardan una buena correlación, los coeficientes de correlación positivos indican una relación de proporcionalidad entre ellos mientras que los negativos una relación inversamente proporcional.

Los diagramas de dispersión que se analizaron fueron CaO / P₂O₅, SiO₂ / P₂O₅ y SiO₂ / CaO por ser los óxidos mayores que están relacionados con la aparición de los minerales primarios (francolita, calcita y cuarzo) presentes en las láminas analizadas petrográficamente (Figura 6.6). El diagrama de dispersión de CaO / P₂O₅ tiene un coeficiente de correlación positivo cercano a 1 por lo que las variables parecen tener reciprocidad y dependencia en su incremento, contrariamente la relación de SiO₂ / P₂O₅ y de SiO₂ / CaO son negativas ambas por lo que el aumento de CaO y P₂O₅ tendrá como consecuencia una disminución de SiO₂.

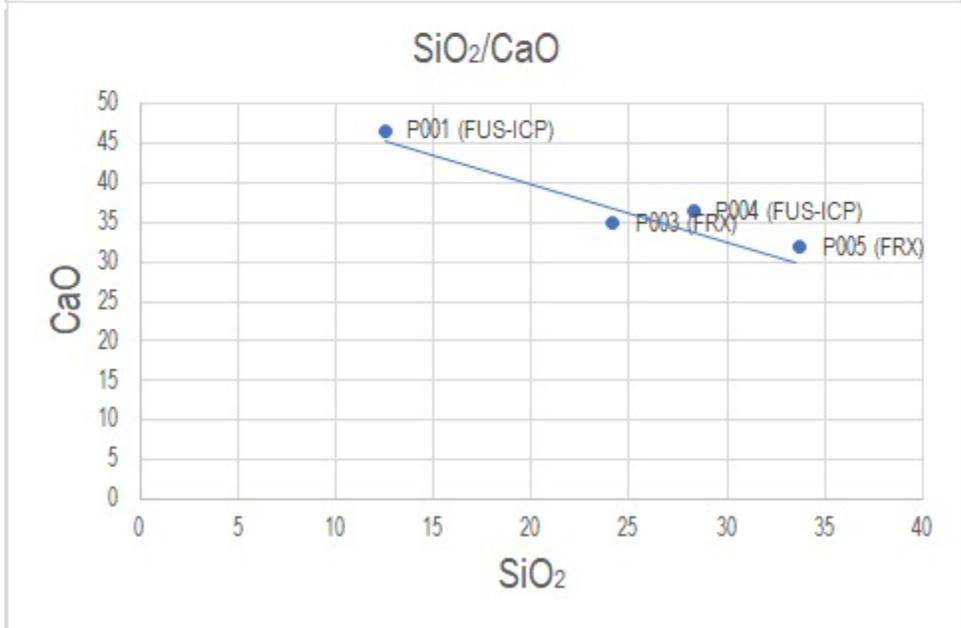
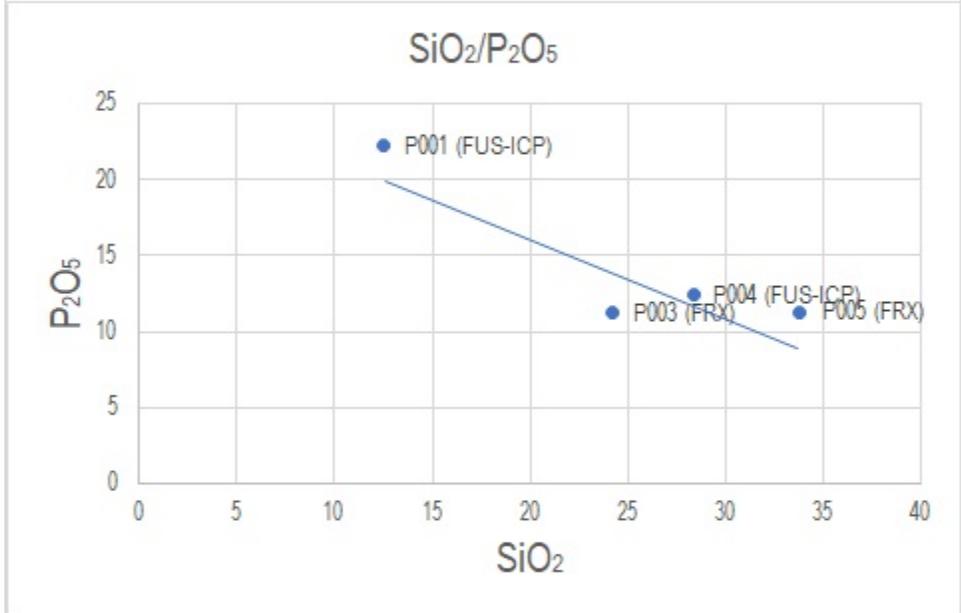
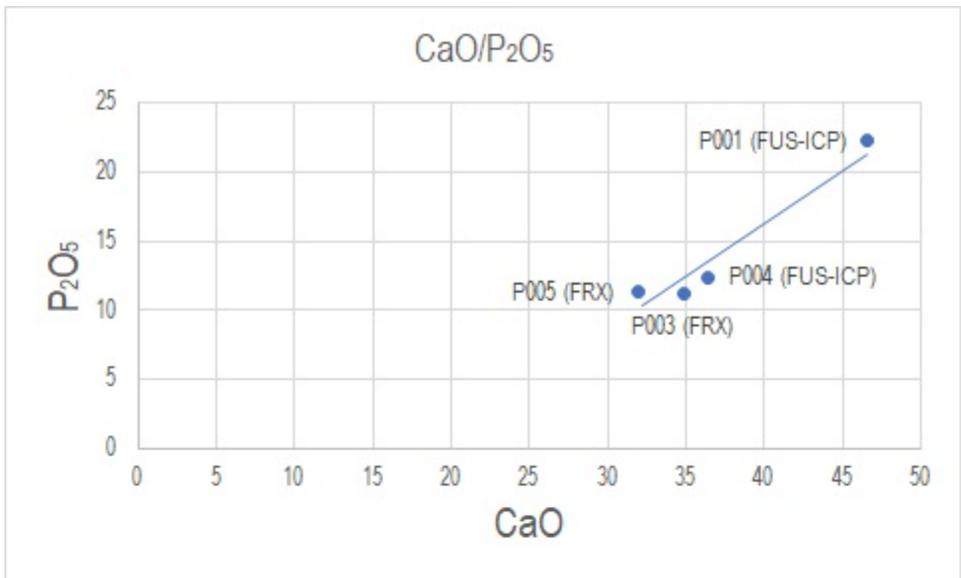


Figura 6.6 - Diagramas de dispersión entre CaO / P₂O₅, SiO₂ / P₂O₅ y SiO₂ / CaO que muestran sus líneas de tendencia de cada relación.

7. Discusión

7.1 Geología

La zona donde se encuentra el anticlinal El Barroso está definida por la siguiente columna geológica en este orden:

- El basamento se compone por la Fm. Huizachal del Triásico Superior - Jurásico Inferior. Este grupo igualmente engloba a la Fm. La Joya del Oxfordiano - Pre-Calloviano compuesta de rocas sedimentarias siliciclásticas no marinas a marginales; el siguiente paquete de rocas es la Fm. Olvido litológicamente descrita como yeso y anhidrita con lentes de caliza.
- La Fm. Zuloaga aflora en el área cercana al socavón y se definió como rocas calizas estratificadas o a veces masivas con huellas de disolución, bioturbaciones y líneas estilolíticas; los nódulos y lentes de pedernal son comunes en este paquete de rocas; esta definición coincide en lo reportado por Imlay (1938, 1953), Rogers et al. (1957), Pérez-Rul (1967), Goldhammer (1999).
- Las rocas en estudio que afloran al interior del socavón son de La Fm. La Casita las cuales se describieron como rocas calizas fosilíferas abundantes en carbonato-fluorapatito del Jurásico - Cretácico con textura wackestone a grainstone con un alto contenido de fósiles entre los que destacan radiolarios, calpionélidos y foraminíferos; particularmente esta descripción se adapta mejor a lo reportado en la carta geológico-minera de San José de Raíces (G14-C66) como una unidad de estratos de caliza con textura wackestone a packstone intercaladas con lutitas de grano fino cementadas por calcita (SGM, 2006), asimismo la definición de Golhammer (1999) propuesta para la parte superior de La Casita como limolitas y areniscas interestratificadas o excavadas intercaladas

con carbonatos delgados podría ajustarse a las rocas en estudio. Su descripción litológica difiere en su localidad tipo según lo reportado por Imlay (1936), aunque otra descripción con una ligera similitud hecha por Imlay (1937) menciona que en el miembro superior se encontraron calizas arenosas y nódulos de caliza.

- La Fm. Taraises aflora al exterior del socavón del anticlinal, estas rocas fueron descritas como rocas calcáreas de grano fino con textura mudstone y wackestone, cementadas por CaCO_3 microcristalino con presencia de vetillas de calcita y cuarzo, se sobrepone a la Fm. La Casita y su contacto es concordante; consistentemente coincide con la primera definición propuesta por Imlay (1936).
- Por último, las rocas por encima a la Fm. Taraises que finalizan la secuencia de rocas calcáreas expuestas son descritas como calizas de estratificación delgada a media de color gris oscuro, con presencia de pedernal y vetillas rellenas de calcita de la Fm. Cupido.

7.2 Yacimiento de fosforitas

El socavón del anticlinal El Barroso presenta rocas de origen químico que varían composicionalmente en su cantidad de carbonato de calcio y en los aloquímicos que la integran. Estas rocas de la Fm. La Casita guardan una posición estratigráfica normal y afloran infrayaciendo a la Fm. Taraises concordantemente; esta descripción coincide con lo reportado por Fortunato y Ward (1982) y Gamper (1977); el contacto entre estas unidades es difuso por los atributos texturales macroscópicos parecidos y los procesos de meteorización presentes en las rocas. La región de San José de Raíces específicamente donde se encuentra el anticlinal El Barroso presenta deformación donde las estructuras ocasionadas por el Orógeno Mexicano durante el Paleoceno tardío – Eoceno temprano consisten principalmente de anticlinales y sinclinales, apretados, recostados y la mayoría asimétricos (Padilla Sánchez, 1985) apareciendo morfológicamente en valles y crestas de la zona.

La roca encajonante está formada por una secuencia de calizas arenosas fosilíferas de media densidad, de color gris oscuro debido a su alto contenido en fósforo y materia orgánica, estas se encuentran intercaladas con lutitas calcáreas; la aparición de fracturas y vetillas rellenas de calcita y cuarzo es observable en menor cantidad. Adicionalmente los depósitos de fosforitas sedimentarios marinos por lo común aparecen en márgenes pasivos dentro de plataformas continentales que se extienden por superficies más limitadas, con tamaño de decenas a cientos de kilómetros cuadrados dentro de áreas grandes donde las areniscas y carbonatos son las rocas huéspedes de este tipo de depósitos (Orris y Chernoff, 2004).

La estructura mineralizada del yacimiento de fosforitas es de tipo estratoconfinada, tabular alojada en la Fm. La Casita localmente en el área de San José de Raíces se encuentra dentro del núcleo del anticlinal recumbente conocido como El Barroso, su disposición de estratos es hacia el SW-NE. La distribución del fósforo dentro del anticlinal El Barroso se relaciona con la sucesión de las secuencias de rocas sedimentarias marinas y las estructuras geológicas como anticlinales y sinclinales presentes en la zona de estudio son definidas por el estilo tectónico-estructural ya mencionado anteriormente. En el anticlinal El Barroso, los estratos relacionados a la Fm. La Casita dispuestos verticalmente presumen continuidad a profundidad y por su considerable extensión son puntos importantes para considerarlo como un depósito de fosforitas económicamente explotable.

Las texturas observadas dentro de las secciones delgadas de la roca huésped van de una sucesión de *grainstone* hasta *wackestone*. Es importante mencionar que las muestras analizadas mediante la microsonda electrónica reflejan un enriquecimiento de fósforo en ooides y dentro de la matriz calcárea principalmente, por lo cual las muestras P1 y P5b con textura *grainstone* tienen un enriquecimiento de fósforo por la abundancia de estos elementos (Tabla 5.3 y 5.2).

El tipo de fábrica de la roca encajonante es laminar, nodular, bandeada y masiva (Figura 7.2). Los detalles de la fábrica exhiben laminaciones, presencia de pirita framboidal (Figura 5.6 A, B), bandeamiento coloforme y criptocristalino (Figura 5.17 B).



Figura 7.2 - Fábrica de la roca encajonante. A) Laminaciones gruesas de francolita alrededor de un cristal de fluorapatito con alto contenido de materia orgánica. B) Matriz carbonatada estilo-nodular con radiolarios recristalizados. C) Bandeamiento masivo compuesto de colofano con horizontes de cambio de microfacies.

Las laminaciones observadas consisten en láminas formadas por peloides intercalados y láminas de colofano desarrolladas a partir de cemento microcristalino; estas características están presentes en la sucesión de *grainstone/wackestone laminado* clasificadas como SMF 15 C y 16 dentro del modelo de microfacies, lo cual indica que la intercalación de diferentes tamaños de grano se asocia a un entorno de depósito donde el flujo de corriente varía considerablemente. El bandeamiento coloforme y criptocristalino del colofano está relacionado a los procesos diagenéticos de cementación que sufrió la roca. Estas características de la fábrica del yacimiento de fosforitas del anticlinal El Barroso podrían atribuirse particularmente a las texturas deposicionales de la precipitación de carbonato-fluorapatito *in situ*.

La mineralización de francolita o colofano podría asumirse que ocurrió simultáneamente a la precipitación de las calizas que alojan el yacimiento de fosforitas a causa de la morfología estratoconfinada que presenta y a que generalmente el carbonato-fluorapatito es el único fosfato primario en los yacimientos sedimentarios de apatito en un medio marino (McClellan y Van Kauwenbergh, 1990). La precipitación directa o fosfogénesis primaria es uno de los mecanismos de formación de apatito sedimentario en el depósito de fosforitas El Barroso y consiste en la precipitación de apatito dentro de los sedimentos a partir del agua marina (Glenn et al., 1994), generalmente en medios confinados; algunos otros procesos son biogénesis y epigénesis (Slansky, 1980).

Los minerales principales que componen el yacimiento de fosforitas son carbonatos como calcita (esparita/micrita) y francolita o colofano (carbonato-fluorapatito); sulfuros como pirita framboidal, algunos óxidos de Fe y Mn posiblemente hematita, goethita y/o pirolusita. Otros minerales identificados son cuarzo, minerales de la arcilla, posiblemente illita o montmorillonita; y yeso. A través del análisis SEM-EDS dentro de las fosforitas pudo reconocerse algunos microcristales de carbonato-fluorapatito rico en U (Figura 7.3).

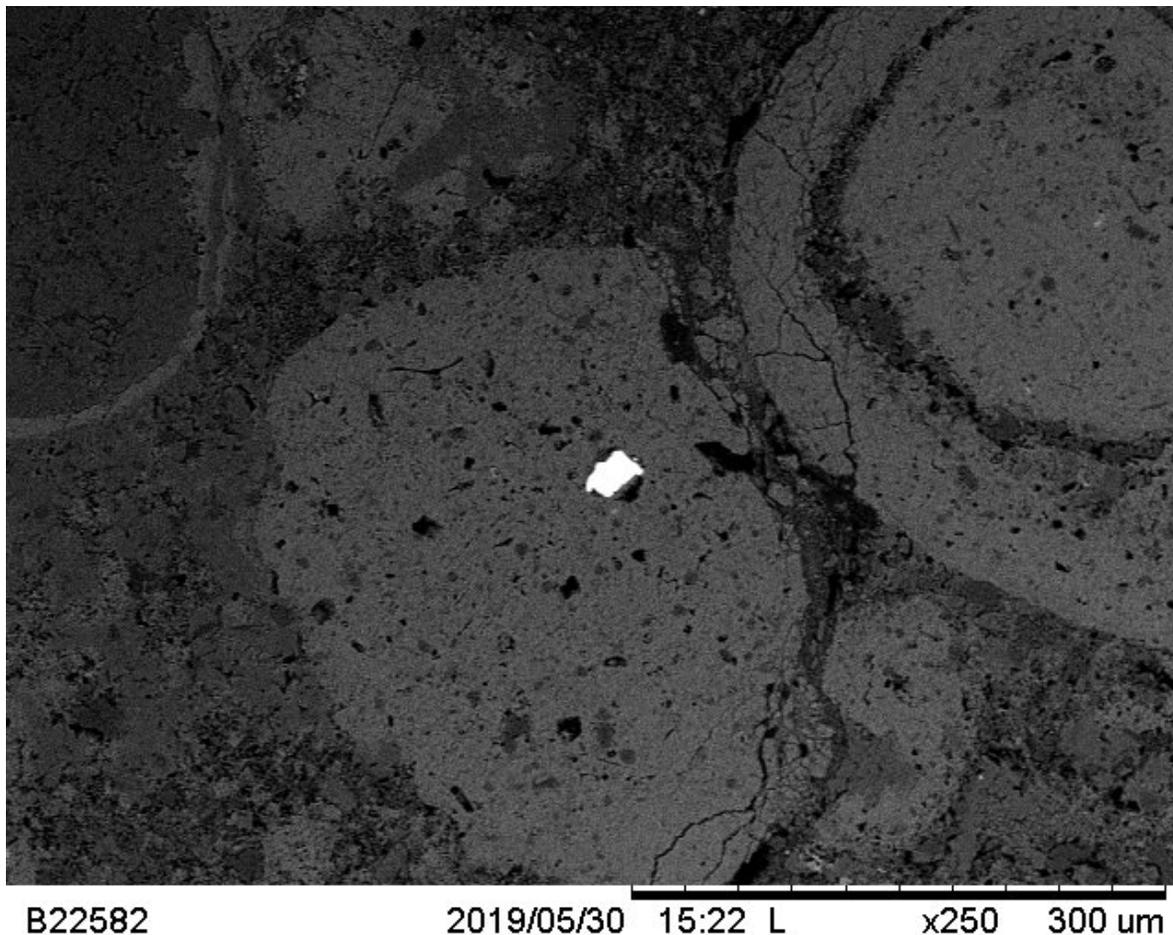


Figura 7.3 – Microcristal de carbonato-fluorapatito rico en U presente en la muestra P5b.

7.3 Cálculo de reservas

Con anterioridad al cálculo de reservas fue necesario realizar un mapeo geológico local de la zona (véase Anexo 1.1) y una caracterización del depósito a través del estudio de microfacies para la suposición de su extensión en la vertical.

Las etapas de depósito definidas mediante el análisis de microfacies claramente son una sucesión de grainstone/wackestone laminado, seguido de un grupo de grainstone de diferente composición y una gradación de carácter calcáreo que va de packstone a wackestone hasta finalizar en mudstone o calizas de la Fm. Taraises.

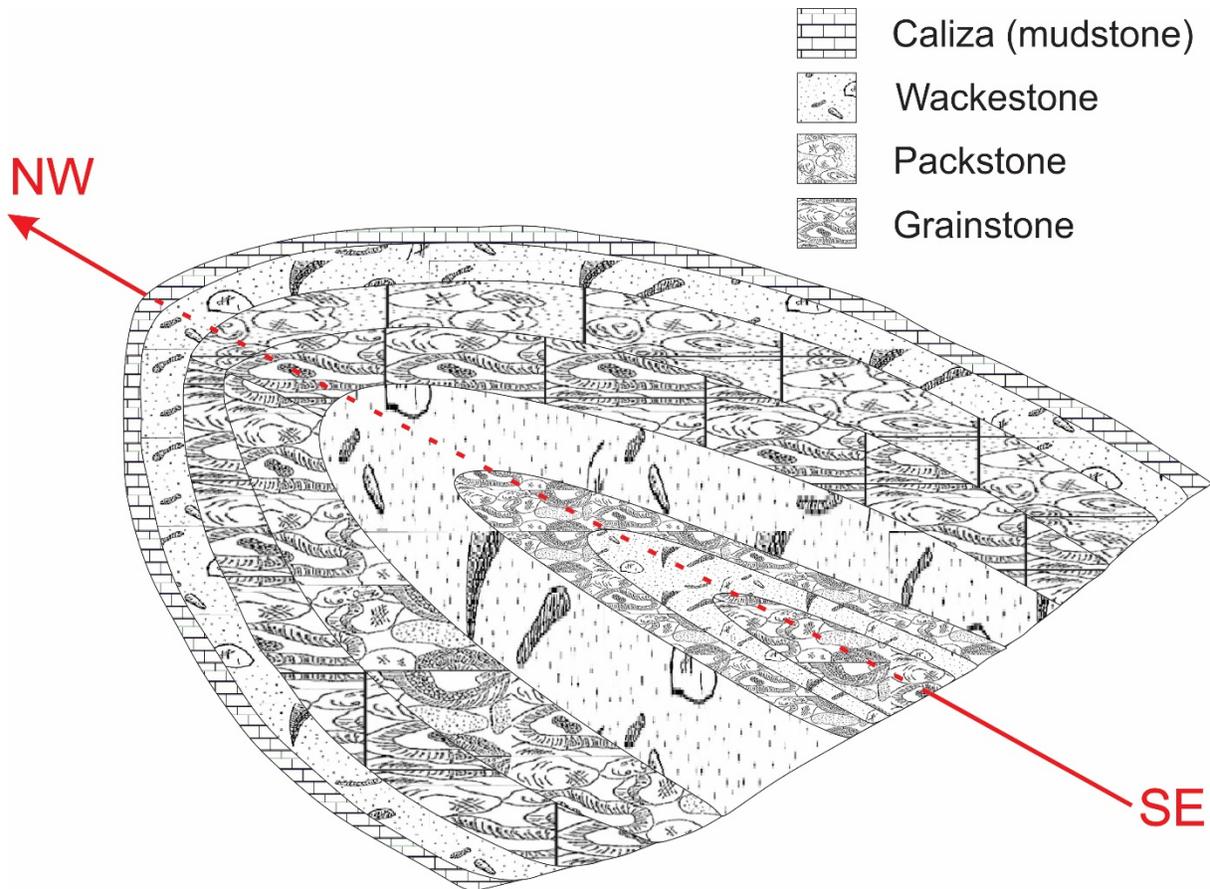


Figura 7.4 - Esquema transversal al rumbo del anticlinal El Barroso donde se observa la secuencia de depósito del yacimiento de fosforitas a partir de las clasificaciones de Dunham asignadas.

El método elegido para elaborar el cálculo de reservas es el método estándar de secciones transversales como se mencionó en el apartado 3.7.1 – *Criterio de selección del método de cálculo de reservas.*

Para estimar el volumen de cada bloque por el método de secciones transversales se utilizará la siguiente expresión algebraica:

$$Vol_i = A_i \times D_i$$

Donde:

A_i = Área correspondiente de cada sección.

D_i = Distancia de separación entre cada sección.

*Nota: Este método considera una corrección para la primera y última sección asignar la mitad de la distancia para el cálculo del volumen correctamente debido a que cada bloque de reservas es estimado a la mitad de la distancia entre cada sección.¹²

Se determinó una ley promedio del yacimiento a través de la media aritmética del porcentaje en peso de P_2O_5 obtenido de cada ensayo geoquímico (Tabla 7.1) y se calculó en Excel algunas medidas de dispersión de los ensayos geoquímicos dando como resultado 5.11 y 26.13 para desviación estándar y varianza respectivamente (Tabla 7. 2); estos valores indican un comportamiento irregular del yacimiento y variabilidad en la ley mineral de P_2O_5 .

Tabla 7.1 - Tabla de concentración de P_2O_5 de los ensayos geoquímicos analizados y ley promedio.

	P001 (FRX)	P003 (FRX)	P004 (FRX)	P005 (FRX)	Raíces (FRX)	Raíces std (FRX)
P_2O_5 [% en peso]	22.24	11.26	12.41	11.31	18.82	21.16
Ley promedio	16.20					

Tabla 7.2 - Medidas estadísticas de dispersión de las muestras geoquímicas obtenidas.

Desviación estándar	Varianza
5.11	26.13

Inicialmente se consideró una extensión en profundidad de 100 [m] por lo que se elaboraron 6 secciones geológicas transversales en el software Autocad 2020 (véase Anexo 1.2) de rumbo W-E del anticlinal El Barroso separadas a una distancia de 20 [m] entre cada sección, considerando una distancia de 10 [m] para la primera y última sección como lo dicta este método.

Se delimitó el yacimiento de fosforitas teniendo en cuenta que el frente de obra del socavón tiene cerca de 4 [m] de longitud, una altura de 2.5 [m]; y por cortes topográficos se calcula un espesor de techo de 1.5 [m]

¹² Ver López A. V. M., 2003, Fundamentos para la explotación de minas, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, p. 112.

aproximadamente, con lo que se obtuvo un área total de 16 [m²]. A continuación, se muestran las cifras para el cálculo de reservas en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3 - Cálculo de reservas minerales mediante el método de secciones en el anticlinal El Barroso.

	Distancia [m]	Área [m ²]	Volumen [m ³]	Densidad Caliza [Ton/m ³]	Reservas de calizas con mena [Ton]
Sección A-A'	10	16	160	2.5	400
Sección B-B'	20	16	320	2.5	800
Sección C-C'	20	16	320	2.5	800
Sección D-D'	20	16	320	2.5	800
Sección E-E'	20	16	320	2.5	800
Sección F-F'	10	16	160	2.5	400
Total			1600		4000

El conjunto de secciones transversales realizadas para el cálculo de reservas junto con la ayuda del mapeo geológico elaborado en campo del anticlinal El Barroso, hizo posible elaborar un modelo geológico del anticlinal El Barroso de la parte considerada en el software Autocad 2020 con el fin de caracterizar gráficamente la Fm. La Casita donde se alberga el yacimiento de fosforitas (Figura 7.4).

Anexo 1.3 - Modelo geológico del anticlinal El Barroso (Vista SW)

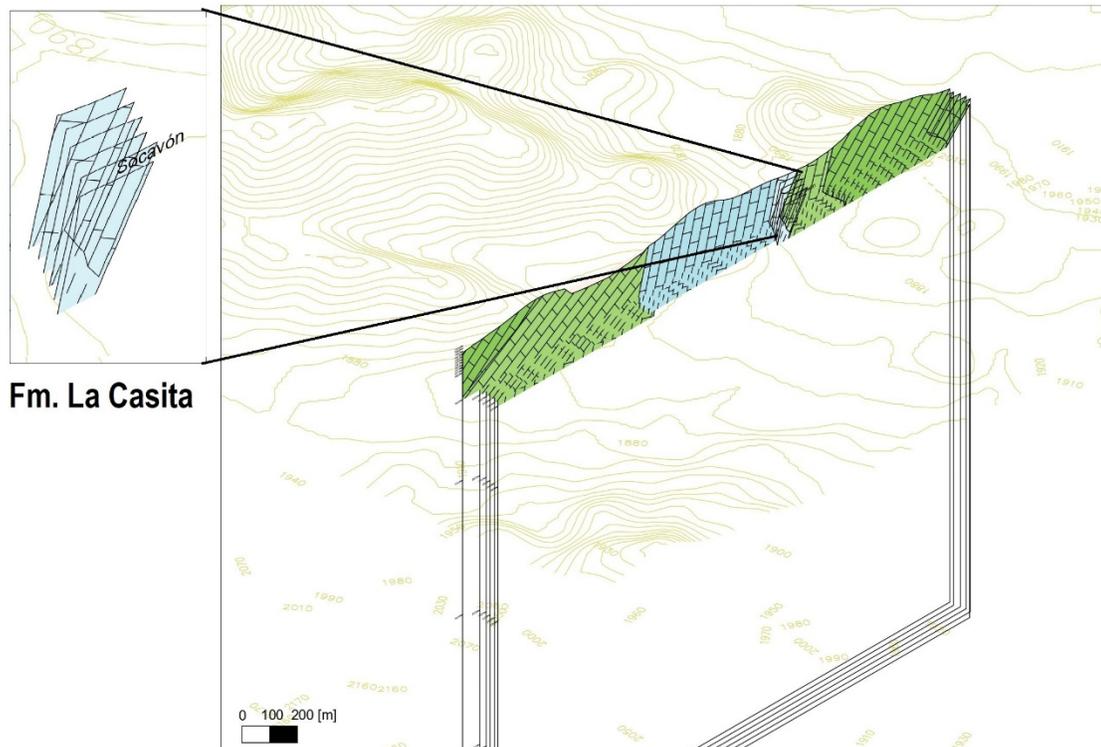


Figura 7.5 - Modelo 3D del anticlinal El Barroso (Vista SW). (Se señala a la izquierda la Fm. La Casita donde se aloja el yacimiento de fosforitas) [Véase Anexo 1.3].

Antes que nada al empezar con el análisis sobre el cálculo de reservas mineras del anticlinal El Barroso es necesario precisar que según la Oficina de Minas de EE. UU., en conjunto con el USGS en su publicación *"Principles of a Resource/Reserve Classification for Minerals"* señala que un recurso se refiere a una concentración de forma natural que ocurre de algún material en o sobre la corteza terrestre en tal forma y cantidad que la extracción económica de un 'commodity' de la concentración sea potencialmente factible; por otro lado las reservas mineras se definen como la parte de un recurso identificado que cumple con los criterios físicos y químicos mínimos especificados relacionados con las prácticas actuales de extracción y producción, incluidas las de grado, calidad, espesor y profundidad. En esta misma publicación, se categorizan los recursos en medidos, indicados e inferidos donde la principal diferencia entre recursos medidos e indicados está en

función del espaciamiento de los sitios de inspección, muestreo y medición; acompañado del grado de certeza sobre las condiciones geológicas para establecer el tamaño, la forma, la profundidad y el contenido mineral del recurso. Y por último, los recursos inferidos se refieren a aquellos que pueden o no estar respaldados por muestras o mediciones.

Teniendo en cuenta estas definiciones podemos afirmar que los datos para una estimación real son insuficientes por lo cual estas cifras deben ser consideradas como recursos mineros porque sólo ofrecen un panorama preliminar del porcentaje de P_2O_5 y del volumen del yacimiento; no son certeras en cuanto a los estándares de cantidad, calidad, espesor y profundidad que se requieren para ser consideradas como reservas mineras económicamente explotables.

La clasificación de recursos del anticlinal El Barroso en función a los muestreos hechos en campo y la información geológica analizada será la siguiente:

Tabla 7.4 - Clasificación de recursos en medidos, indicados o inferidos en el anticlinal El Barroso.

	Clasificación del recurso
Sección A-A'	Medido
Sección B-B'	Inferido
Sección C-C'	Inferido
Sección D-D'	Inferido
Sección E-E'	Inferido

Al efectuar un análisis sobre las cifras del cálculo de recursos del yacimiento de fosforitas hay que considerar algunos factores de importancia para su posible extracción con fines económicos:

- Método de explotación. Para la remoción del material con fosforitas del anticlinal El Barroso considerando que el frente del socavón existente tiene un área de 16 [m²] y se aloja dentro de la Fm. La Casita y que el espesor de techo incrementara en relación con la profundidad explotada en el yacimiento. Se recomienda en un principio para reducir costos de planeación y operativos el método de minería artesanal debido al bajo costo y uso de herramientas comunes como rototaladros y cargadores frontales de bajo perfil. En la siguiente etapa de explotación se recomienda hacer una explotación de cámara frontal o “surco” en dirección al rumbo del socavón con equipo de excavación como retroexcavadoras tipo “mano de chango” y camiones de volteo para la extracción de mena. Por último, el método de minería a cielo abierto seria en la etapa final del proyecto según la suposición de mena en toda la extensión del pliegue, a los objetivos planteados y al avance de la operación minera. Según la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable del Departamento de Energía de EE. UU.; el método principal de extracción y exploración de fosforita es la minería a cielo abierto. La minería a cielo abierto consiste en limpiar el sitio, remoción inicial de la capa superior del suelo, remoción de mineral y recuperación.
- Proceso de beneficio. La ley promedio de 16.20 g/t, casi en el límite, considera de calidad a la mena de este yacimiento de fosforitas; por lo que su uso directo para fertilizantes orgánicos o en las plantas de beneficio para la producción de fósforo y sus derivados que incluyen sulfuros y haluros de fósforo, pentóxido de fósforo y ácido fosfórico es factible.¹³

¹³ Ver Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry, Cap 8: Phosphates, <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/itp-mining-energy-and-environmental-profile-us-mining-industry-december-2002>

- Valor económico del mineral dentro del mercado. El precio de tonelada por peso mexicano a mayo de 2021 es de 2048.68 con referencia a los estándares de calidad de producción de las fosforitas provenientes de Marruecos (fas. Casablanca).¹⁴

Algunas afirmaciones para considerar al depósito de fosforitas del anticlinal El Barroso como un yacimiento viable para su extracción son: las condiciones geológicas idóneas para la concentración de fósforo, el porcentaje de ley promedio de 16.20 g/t de P₂O₅ en las 6 muestras analizadas geoquímicamente, la baja concentración de elementos traza como As, Cd, Pb, Hg y S, el volumen estimado de 4000 [Ton] de material con mineral de mena, su extensión geográfica así como los bajos costos de explotación y producción de fósforo.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- La roca encajonante del yacimiento de fosforitas son calizas arenosas con un alto contenido de materia orgánica intercaladas con lutitas calcáreas, además de mostrar un fuerte fracturamiento donde las fracturas son rellenadas por calcita y cuarzo; correspondientes a la Formación La Casita del Jurásico Superior (Kimmeridgiano-Tithoniano).
- La morfología del yacimiento es tabular de tipo estratoconfinada con una disposición de estratos comúnmente inclinados hacia el NE, con alto ángulo de inclinación.
- La asociación mineral está compuesta por calcita + francolita + cuarzo + yeso + pirita + hematita + goethita y/o pirolusita + arcillas (illita o montmorillonita) y algunos microcristales de mena no identificados muestran una composición de uranio.

¹⁴ Ver indexmundi, Precios de mercado, Fosforita, <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=fosforita&meses=60&moneda=mxn>

- La mineralización de francolita se piensa que sucedió a la par de la sedimentación de las calizas debido a la abundante presencia en los aloquímicos, matriz y cementante, además de que las condiciones favorables para la precipitación directa de carbonato-fluorapatito requiere de la sedimentación de materia orgánica rica en fósforo en el fondo oceánico y por su morfología estraconfinada de los cuerpos de fosforita.
- Las calizas que contienen el yacimiento de fosforitas presentan texturas variadas que van desde mudstone hasta grainstone, según los ensayos geoquímicos de FRX indican un porcentaje de fosforo de 22.24, 11.26, 12.41, 11.31, 18.82 y 21.16 para las muestras P001, P003, P004, P005, Raíces y Raíces std respectivamente, por lo cual la mayor concentración de fósforo ocurre en las texturas de tipo grainstone y packstone (clasificadas como SMF 11, 13 y 15-C de acuerdo al modelo de plataforma de Flügel) dentro de la Fm. La Casita.
- La roca encajonante presenta una fábrica laminar y nodular compuesta principalmente por aloquímicos como ooides, oncolitos y bioclastos revestidos de francolita, así como una fábrica bandeada y masiva debido a la cementación y compactación que afectó a la roca.
- La presencia de calpionélidos y radiolarios indican las condiciones de un ambiente marino pelágico es decir que la plataforma continental se encontraba comunicada con el océano abierto. Además de que los radiolarios y *grapestones* sugieren un ambiente de depósito donde la surgencia fue parte fundamental para la formación del yacimiento de fosforitas.
- La Fm. La Casita comprende microfacies de ambientes sublitorales interpretado como un régimen de regresiones y transgresiones con variaciones en su nivel de energía, abarcando ambientes de plataforma - talud continental, zonas de arenas de borde aventadas o trasarrecifales; posiblemente un ambiente nerítico como una barra mareal, playas, un complejo abanico – delta, etc; una buena oxigenación para la existencia de microfauna rica en fósforo que permita su acumulación y un aporte

de materia orgánica importante para la transferencia de fósforo a las aguas de poro y ocasionar la precipitación de carbonato-fluorapatito.

- La mena está conformada por francolita en su totalidad que se encuentra en todas las láminas analizadas petrográficamente de la Fm. La Casita.

8.2 Recomendaciones

- Realizar un mapeo de microfacies más extenso del anticlinal El Barroso para estimar las áreas que contengan una mayor cantidad de fósforo.
- Elaborar estudios paleoambientales para conocer concretamente las condiciones de depósito que causaron la acumulación de P_2O_5 en las rocas y conocer su posible afinidad como un yacimiento no convencional de hidrocarburos debido al alto contenido de lignita observado petrográficamente.
- Hacer un estricto control de leyes en los estratos de la estructura mineralizada debido a las leyes minerales variables y a la irregularidad del depósito, además de realizar un muestreo geoquímico más detallado para generar una mayor cantidad de datos para el cálculo de reservas minerales y estimar de forma más específica el contenido de P_2O_5 .
- Llevar a cabo trabajos de exploración superficial en las áreas cercanas al socavón del anticlinal El Barroso y sondeos de perforación a diamante; para así conocer el espesor verdadero de la Fm. La Casita y Taraises y su comportamiento de la mena en profundidad.

9. Bibliografía

- Baturin, G. N., 1981, Phosphorites on the Sea Floor: Developments in Sedimentology 33, Elsevier, Amsterdam.
- Boggs, S. Jr., 2009, Petrology of Sedimentary Rocks: Cambridge University Press, 600 p.
- Burnett, W. C., Veeh, H. H. y Soutar, A., 1980, U-series, oceanographic and sedimentary evidence in support of recent formation of phosphate nodules off Peru: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 29, pp. 61-71.

- Carreón-Diazconti, C. y C. Jacques-Ayala, 1989. Características petrográficas de la capa fosfórica Humboldt, San Juan de la Costa, Baja California Sur, y sus efectos en el proceso de recuperación de la fosforita: Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, vol. 6 (n.º 1 y 2), pp. 23-38.
- Carretero-León M. I. y Pozo Rodríguez M., 2007, Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente: Paraninfo, 406 p.
- Carrillo-Bravo, J., 1961, Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, vol. 13 (1 y 2), pp.1-98.
- CGM-DGDM-SE, 2012, Perfil del mercado de la fosforita.
- Chávez-Cabello., G. et al., 2011, Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 63 (2), pp. 253-270.
- Cook, P. J., 1976, Sedimentary phosphate deposits: Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits (Ed. Wolf, K. H.), Elsevier, Amsterdam, pp. 505-535.
- Cook, P.J. y Shergold, J.H., 1986b, Proterozoic and Cambrian phosphorites - an introduction: Phosphate Deposits of the World, vol. 1, Cambridge University Press, pp. 1-8.
- Córdoba, D. A., 1965, Hoja Apizolaya 13 R-1 (9), Geología de los Estados de Zacatecas y Durango: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México serie 1:1000000, 1 mapa con texto.
- COREMI, 1990, Arias G. M., Informe de la exploración geológico-minera del proyecto regional no metálicos y estratégicos de Nuevo León.
- CRM, 1983, Arias G. M., Reconocimiento geológico - minero del área fosforítica La Ascensión, municipio de Aramberri, Nuevo León.
- CRM, 1990, Informe de la exploración geológico-minera del proyecto regional no metálicos y estratégicos de Nuevo León.
- De Cserna, Z. et al., 1977, Alóctono del Paleozoico inferior de la región de Cd. Victoria, Estado de Tamaulipas: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, vol.1, pp. 33-43.
- Dunham, R. J., 1962: Classification of carbonate rocks according to depositional textures: Classification of Carbonate Rocks (Ed. Ham, W. E.), American Association of Petroleum Geologists Memoir, n.º 1, pp. 108-121.
- Eguiluz de Antuñano, S. et al., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 53, pp. 1-26.
- F. Zapata y R. N. Roy, 2007, Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible: Boletín FAO Fertilizantes y Nutrición Vegetal, vol. 13, p. 147.
- Filippelli, G. M., 2011, Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: The deep time perspective: Chemosphere 84, pp. 759-766.

- Fitton G., 1997, Chapter 6: X-ray Fluorescence Spectrometry: Modern Analytical Geochemistry. An introduction to quantitative chemical analysis techniques for Earth, environmental and materials scientists, Ed: Gill, R., pp. 87-116.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T.M., Juárez-Arriaga, E. y Chávez-Cabello, G., 2018, The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics: *Earth-Science Reviews*, 183, pp. 56-84.
- Flügel, E., 1982, *Microfacies Analysis of Limestones*: Springer-Verlag, Berlin.
- Flügel, E., 2004, *Microfacies Analysis of Limestones: Analysis, Interpretation and Application*: ed. 2, 2010, Springer Verlag. NY, USA, 633 p.
- Folk, R. L., 1962, Spectral subdivision of limestone types: Classification of Carbonate Rocks (Ed. Ham, W. E.), *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, n.º 1, pp. 62-84.
- Föllmi, K. B., Garrison, R. E. y Grimm, K. A., 1991, Stratification in phosphatic sediments: Cycles and Events in Stratigraphy, Springer-Verlag, pp. 492-507.
- Fortunato, K. S. y Ward, W.C., 1982, Upper Jurassic–Lower Cretaceous fan–delta complex, La Casita Formation of the Saltillo area, Coahuila, Mexico: *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 32, pp. 473–482.
- Gamper, M. A., 1977, Estratigrafía y Microfacies Cretácicas del Anticlinorio Huizachal-Peregrina (Sierra Madre Oriental): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 38 (2), pp.1-17.
- Garrison, R. E. y Kastner, M., 1990, Phosphatic sediments and rocks recovered from the Peru margin during ODP Leg 112: *Proc. ODP, Sci. Results 112* (Ed. Suess, E. y Von Huene, et al.), pp. 111-134.
- Gimmel'farb B. M., Krasil'nikova, N. A. y Tushina, A. M., 1959, Classification of phosphorites: *Dokl. (Proc.) Acad. Sci. U.S.S.R.* 128, pp. 1024-1026.
- Gleen C. R. y Garrison R. E., 2003, Phosporites: *Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks*, Springer Netherlands, pp. 519-526.
- Glenn, C. R., Föllmi, K. B., Riggs, S. R., Baturin, G. N., Grimm, K. A., Trappe, J., Abed, A. M., Galli-Olivier, C., Garrison, R. E., Ilyin, A., Jehl, C., Rohrllich, V., Sadaqah, R. M., Schidlowski, M., Shelton, R. E., y Siegmund, H., 1994, Phosphorus and phosphorites: sedimentology and environments of formation: *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 87, pp. 747-788.
- Goldhammer, R. K. et al., 1991, Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico: Houston, Texas - New Orleans, Louisiana, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 85 p.
- Goldhammer, R. K. y Johnson, C. A., 2001, Middle Jurassic-Upper Cretaceous Paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of México rim, en Bartolini, C., Buffler, R. T., Cantú-Chapa, A., (eds.), *The western Gulf of México Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, n.º 75, pp. 45-81.
- Goldhammer, R. K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico: *Geological Society of America, Special Paper 340*, pp. 1-58.

- Grabau, A. W., 1904, On the classification of sedimentary rocks: *American Geologist* vol. 33, pp. 228-247.
- Heim, A., 1940, The Front Ranges of Sierra Madre Oriental, Mexico, from Ciudad Victoria to Tamazunchale: *Eclogae Geologicae Helvetiae*, n.º 33 (2), pp. 313-352.
- Imlay, R. W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV Geology of the Western part of the Sierra de Parras: *Geological Society of America Bulletin*, vol. 47 (7), pp. 1091-1152.
- Imlay, R. W., 1937, Lower Neocomian fossils from the Miquihuana region, Mexico: *Journal of Paleontology*, vol. 11, pp. 552-574.
- Imlay, R. W., 1938, Studies of the Mexican Geosyncline: *Geological Society of America Bulletin*, vol. 49, pp. 1651-1694.
- Imlay, R. W., 1953, Las Formaciones Jurásicas de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 16 (1), pp. 1-65.
- Imlay, R. W., Cepeda D. L. C. E., Álvarez, M. y Díaz, G. T., 1948 Stratigraphic Relations of Certain Jurassic Formations in Eastern México: *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, vol. 2 (9), pp. 1750-1761.
- Jasinski, S. M., 2011, Phosphate rock: Commodity Summaries; US Geological Survey, pp. 118-119.
- Kazakov, A. V., 1937, The phosphorite facies and the genesis of phosphorites: *Trans. Sci. Fertil. Insecto-fungicides* (in Russian) 142, pp. 95-113.
- Kazakov, A. V., 1939, The phosphate facies: Origin of the phosphorites and the geologic factors of formation of the deposits: *Proc. Sci. Inst. Fertil. Insecto-fungicides* 145, pp. 1-106.
- Kellum, L. B., 1932, Reconnaissance studies in the Sierra de Jimulco, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, vol. 43, pp. 541-564.
- King, R. E., 1934, The Permian of southwestern Coahuila: *American Journal of Science*, vol. 27, pp. 98-112.
- López Aburto, V. M., 2003, *Fundamentos para la explotación de minas*, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 503 p.
- Mabie, C. P. y Hess, H. D., 1964, *Petrographic Study and Classification of Western Phosphate Ores*: Bureau of Mines, Report of Investigations, 6468 (Washington).
- McClellan, G. y Kauwenbergh, S., 1990, Mineralogy of sedimentary apatites: *Geological Society of London, Special Publications*. n.º 52, pp. 23-31.
- McKelvey, V. E., 1967, *Phosphate Deposits*: US Geological Survey, Geological Survey Bulletin, Washington, 27 p.
- Melgarejo, J. C., et al., 1997, Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada: 2 vol., Capítulo 21. Asociaciones minerales de rocas fosfatadas sedimentarias y sus derivados meteóricos y metamórficos, Universitat Barcelona, pp. 323-330.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., y Llovet, X., 2010, Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 62, 1, pp. 1-23.

- Michalzik, D. y Schumann, D., 1994, Lithofacies relations and palaeology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of north-east Mexico: *Sedimentology*, 41, pp. 463-477.
- Mixon, R. B. et al., 1959, Age and Correlation of Huizachal group (Mesozoic), state of Tamaulipas, Mexico: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 43 (4), pp. 757-771.
- Orris, G. J. y Chernoff, C. B., 2004, Review of World Sedimentary Phosphate Deposits and Occurrences: *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, vol. 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 559-573.
- Orris, G. J. y Chernoff, C.B., 2004, Chapter 20-Review of world sedimentary phosphate deposits and occurrences: *Life Cycle of the Phosphoria Formation: From Deposition to Post-Mining Environment*, pp. 559-573.
- Padilla Sánchez., R. J., 1982, Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico: Austin, Univ. Texas at Austin, disertación doctoral, 217 p.
- Padilla Sánchez., R. J., 1985, Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí: *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, Instituto de Geología, UNAM, vol. 6, pp. 1-20.
- Pérez-Rul, F. A. M., 1967, Hoja Viesca 13R-1 (5), Resumen de la Geología de la Hoja Viesca, estados de Coahuila y Durango: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México serie de 1:100000, 1 mapa con texto.
- Pufahl, P. K. y Groat, L. A., 2017, Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An invited paper: *Bulletin of the Society of Economic Geologists*, vol. 112, n.º 3, pp.483-516.
- Ramírez-Ramírez, C., 1978, Reinterpretación tectónica del esquisto Granjeno de Ciudad Victoria, Tamaulipas: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, vol. 2, pp. 31-36.
- Regalet Figueroa., J. I., 2011, Bioestratigrafía, Análisis Microfacial y Geoquímico de la Formación La Casita, Jurásico tardío (Kimmeridgiano-Tithoniano) en Potrero Prieto Galeana, Nuevo León, México: (Tesis de maestría), Linares, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, 93 p.
- Riggs, S. R., 1979a, Petrology of the Tertiary phosphorite system of Florida: *Economic Geology*, vol. 74, pp. 195-220.
- Riggs, S. R., 1980, Tectonic model of phosphate genesis: Fertilizer Mineral Potential in Asia and the Pacific, East-West Resource Systems Institute, Honolulu, Hawaii, pp. 15-190.
- Rodríguez-Díaz, A. A., 2010. Informe de práctica de campo a región mineralizada MVT de San Roberto y de fosforitas El Raíces, Galeana, Nuevo León: Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. Informe técnico. 10 p.
- Rogers, C. L., et al., 1957, Geología general y depósitos de fosfatos del Distrito de Concepción del Oro, Estado de Zacatecas: Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, Boletín #38, 129 p.

- Salvador, A., 1987, Late Triassic–Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico Basin: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 71, pp. 419–451.
- Salvador, A., 1991a, Origin and development of the Gulf of Mexico basin, en Salvador, A. (ed.), The Gulf of Mexico Basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, vol. J, pp. 389-444.
- Scholle, P. A. y Ulmer-Scholle, D. S., 2003, A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis: American Association of Petroleum Geologists Memoir, n.º 77 459 p.
- SGM, 2006, Informe de la carta geológico-minera San José de Raíces, G14-C66, escala 1:50000, estado de Nuevo León. México, 72 p.
- Simandl, G. J., Paradis, S. y Fajber, R., 2011, Sedimentary Phosphate Deposits. Mineral Deposit Profile F07: Geological Fieldwork, Paper 2012-1, pp. 217-222.
- Skoog, D. A. y Leary, J. J., 1994, Análisis instrumental: McGraw-Hill, ed. 4ª.
- Slansky, 1980, Géologie des phosphates sédimentaires: Mémoire du Bureau de recherches géologiques et minières, 92 p.
- Slansky, M., 1980, Geologie des phosphates sedimentaires: Mem. Bur. Rech. Geol. Min., vol. 114.
- Slansky, M., 1986, Geology of sedimentary phosphates: (Traducido de Slansky, 1980), North Oxford Academic.
- Trueman, N. A., 1971, A petrological study of some sedimentary phosphorite deposits: Aust. Mineral. Develop. Lab. Bulletin., vol. 11, pp. 1-72.
- Viniestra, F., 1963, Geología del Macizo de Teziutlán y de la Cuenca Cenozoica de Veracruz: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, vol. 18, pp. 145-171.
- Wilson, J.L., 1975, Carbonate facies in geologic history: Berlin (Springer), 471 p.
- Winland, H. D. y R. K. Matthews, 1974, Origin and significance of grapestone, Bahama Island: J. Sediment. Petrol, 44, pp. 921–927.
- Zanin, Y., 1987, Ultramicrostructures of Phosphorites (Atlas of Pictures): - Nauka (Moskov).

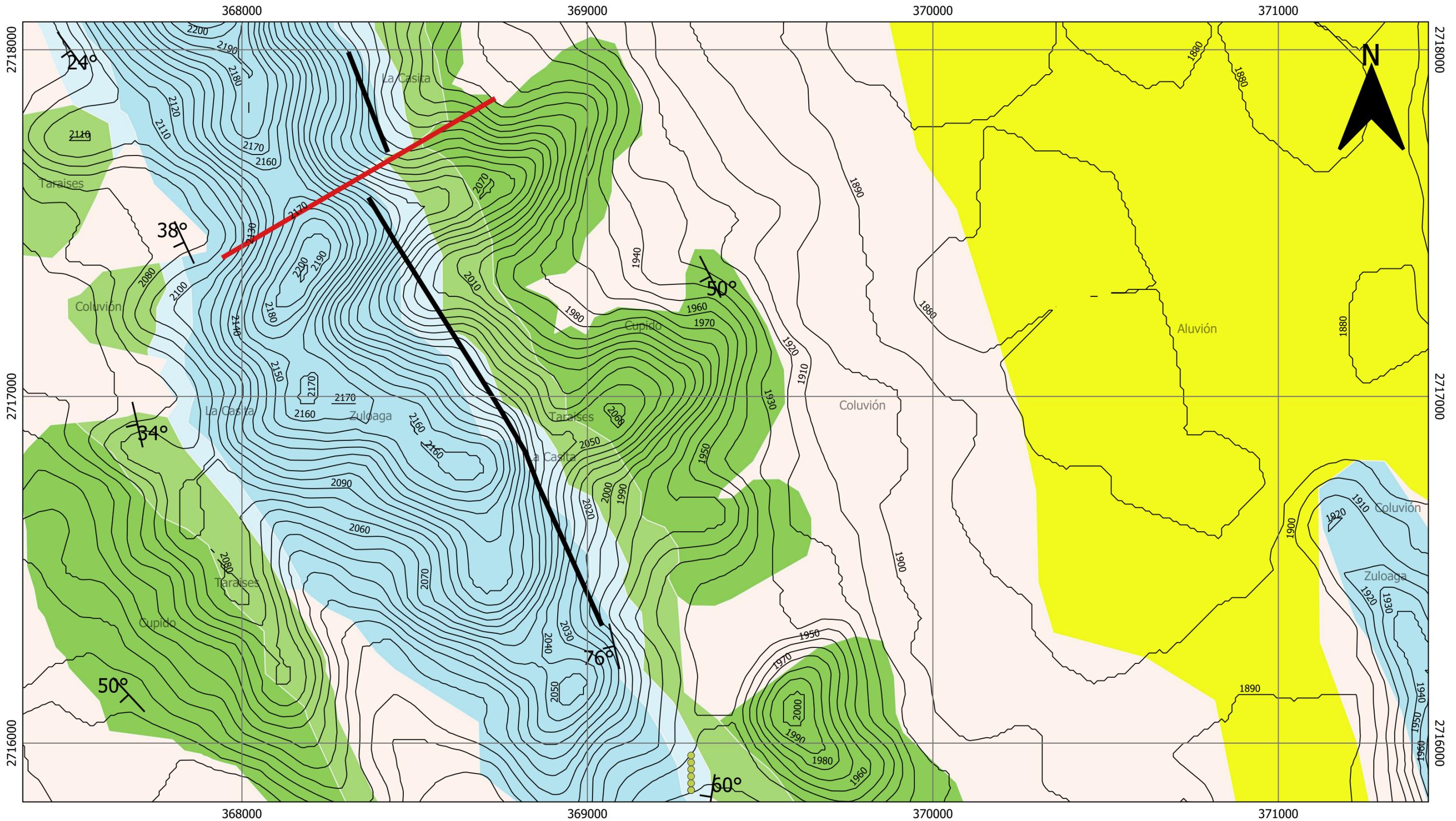
Referencias electrónicas

- CAMIMEX, Informe anual CAMIMEX, 2021, Capítulo V - Estadísticas, p.215, https://www.camimex.org.mx/application/files/9416/3034/0997/05_info_2021.pdf
- indexmundi, Precios de mercado, Fosforita, <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=fosforita&meses=60&moneda=mxn>
- Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) Information, What is inductively coupled plasma?, <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms-information.html>
- Jiménez Romualdo, F., 2014, Análisis del sistema de explotación de la mina de fosforita “La Negra” ubicada en Pacula, Hgo., y propuesta para la sistematización y control de las operaciones: (Tesis de

Licenciatura). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/328406>.

- JMP, Portal de formación estadística, coeficiente de coorelación, https://www.jmp.com/es_mx/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html
- Opportimes, Rofomex, la líder en fosforita, Julio 2018, <https://www.opportimes.com/rofomex-la-lider-en-fosforita/>.
- SGM, 2019, Anuario estadístico de la minería mexicana: ed. 2020, http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2019_Edicion_2020.pdf
- SGM, Léxico Estratigráfico de México: https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#
- U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2002, Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry, Cap 8: Phosphates, <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/itp-mining-energy-and-environmental-profile-us-mining-industry-december-2002>

Anexos



Anexo 1.1 - Mapa geológico del anticlinal El Barroso (esc 1:10000)



Simbología

● Socavón

— Curvas de nivel 10m

Elementos estructurales

└ Rumbo y echado

— Falla

— Eje del pliegue

Litología

Aluvión

Coluvión

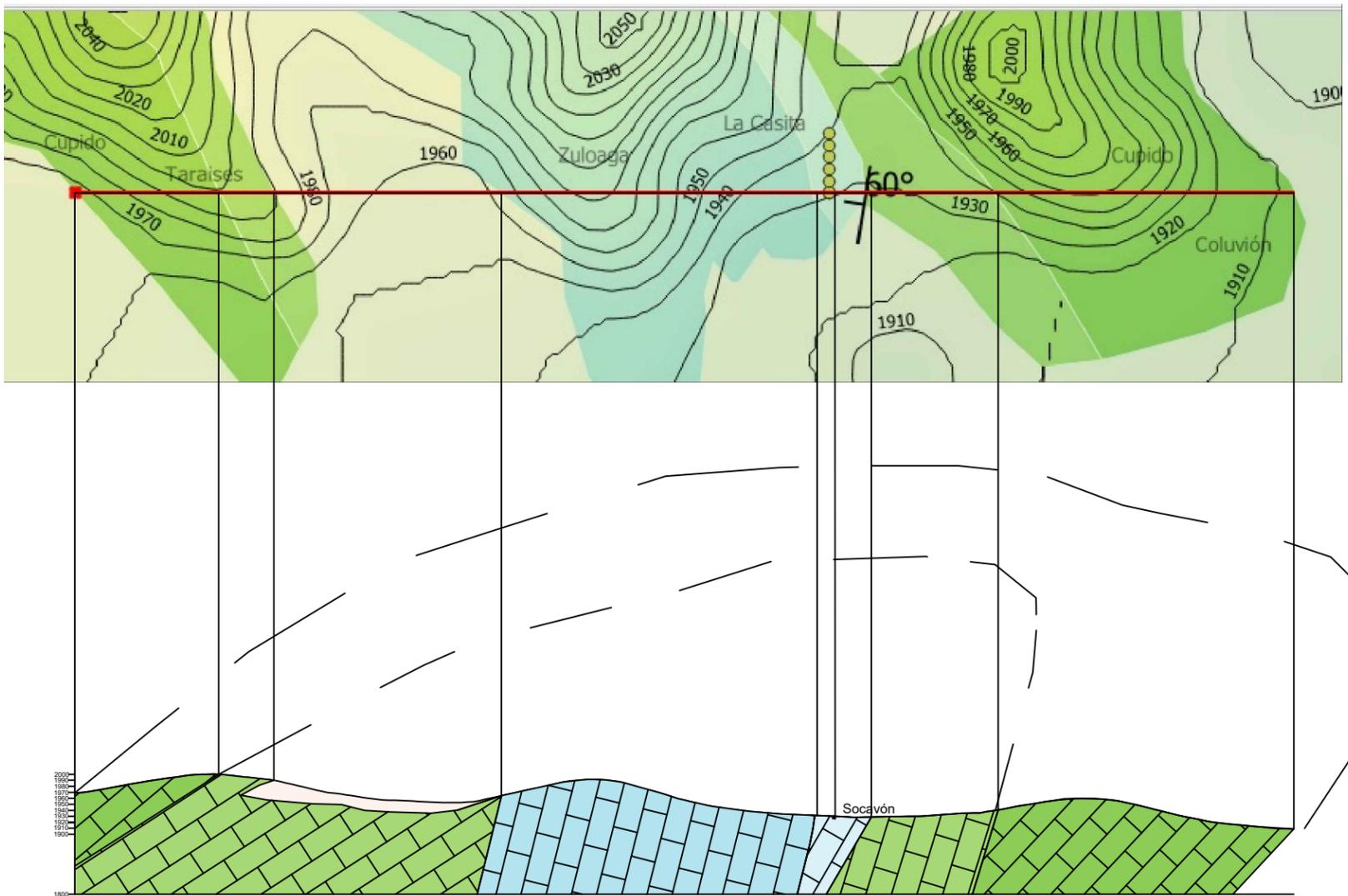
La Casita

Cupido

Taraises

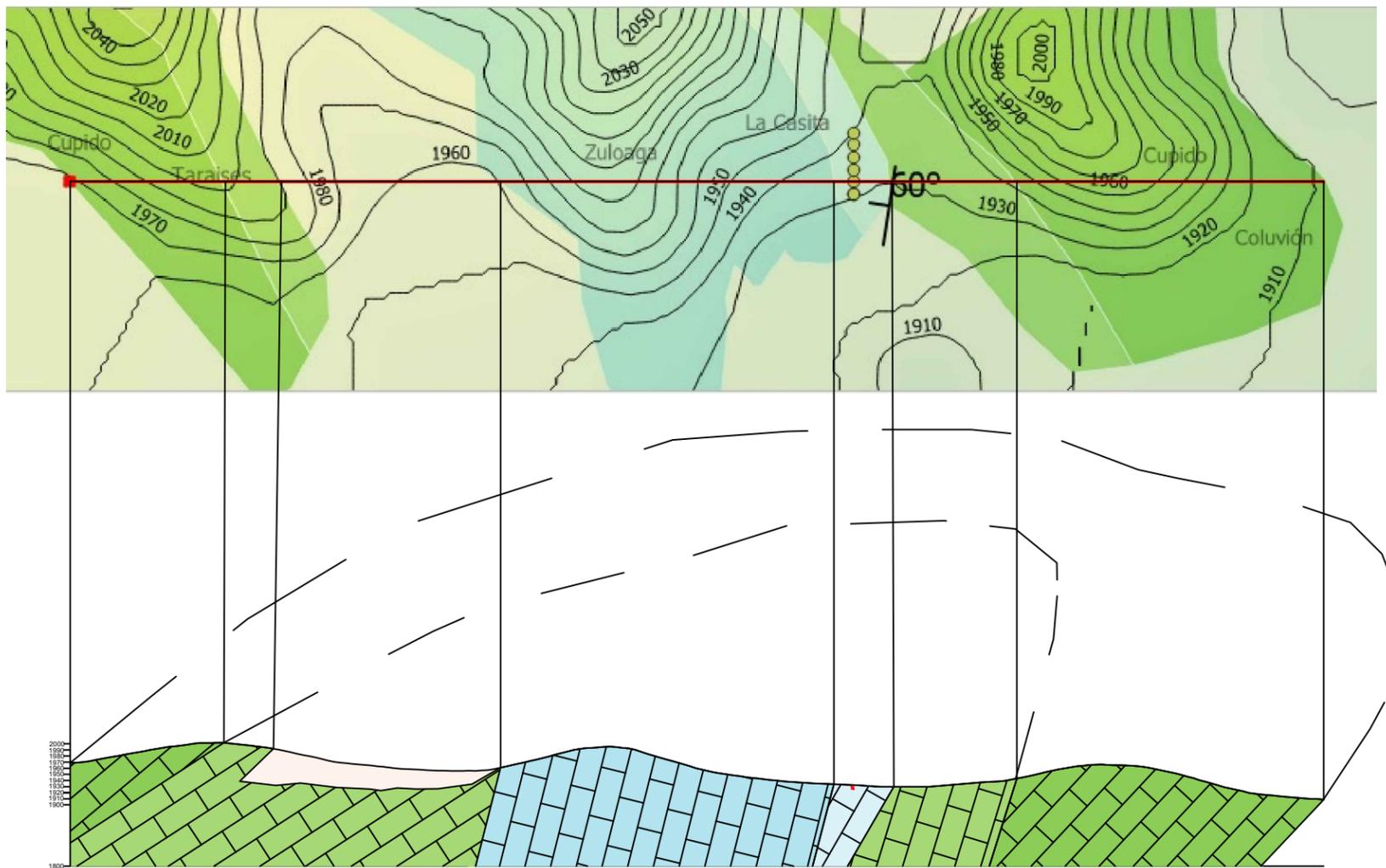
Zuloaga

O E



Sección A-A'

O E



Sección B-B'

esc: 1:10000



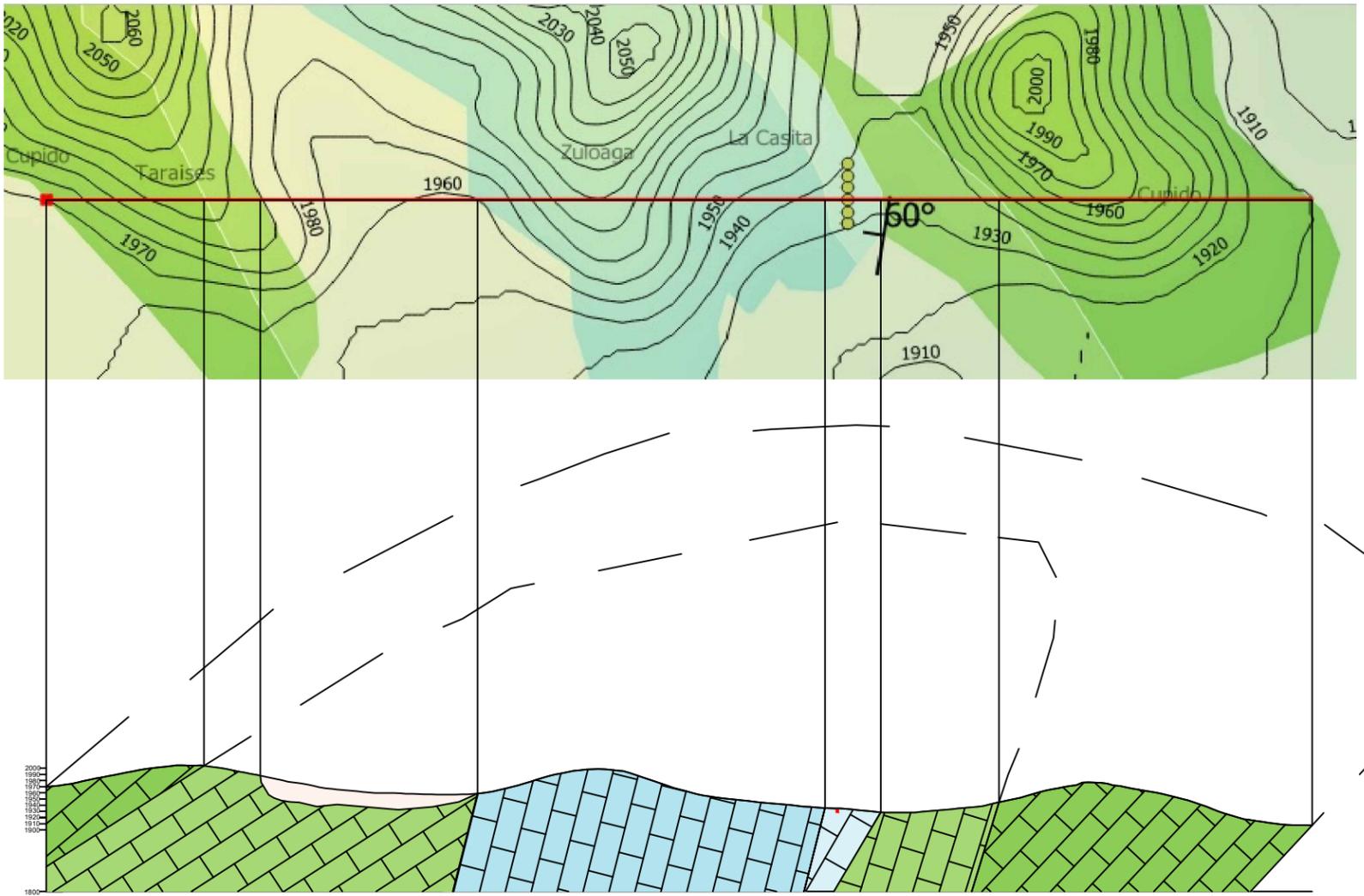
- | | | | | | |
|---|-----------|---|----------|---|--------------------------|
|  | Zuloaga |  | Taraisés |  | Yacimiento de fosforitas |
|  | La Casita |  | Cupido | | |

Anexo 1.2

Secciones geológicas transversales del anticlinal El Barroso

O

E



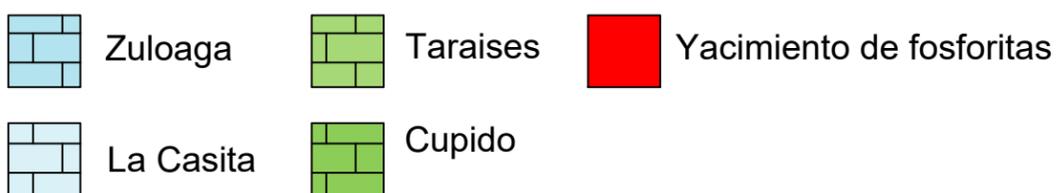
Sección C-C'

O

E



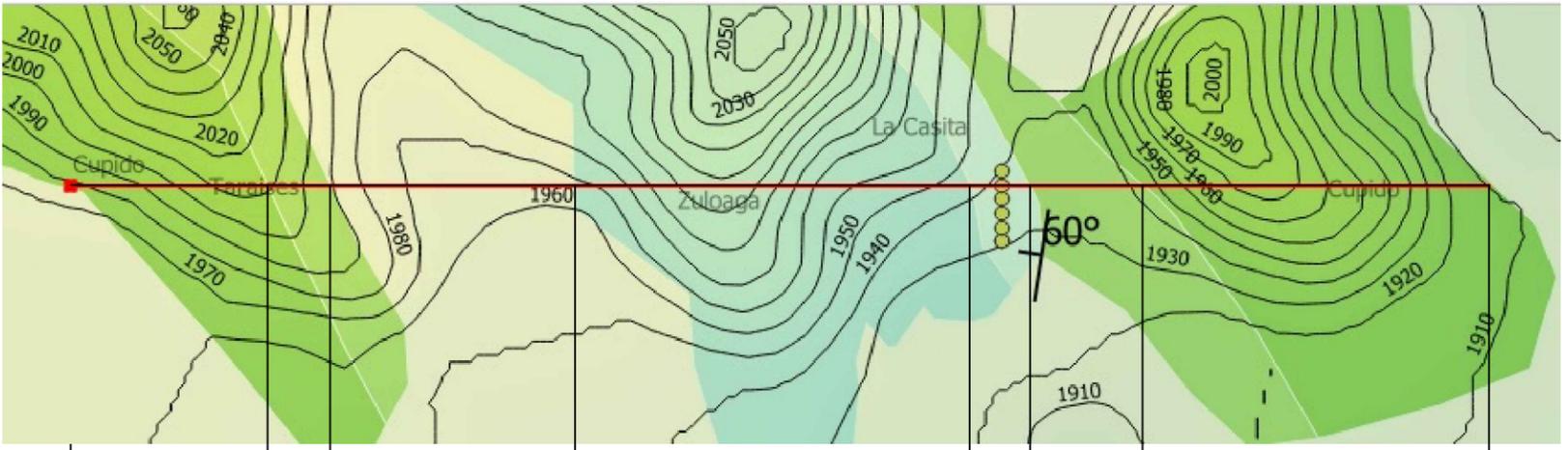
Sección D-D'



esc: 1:10000

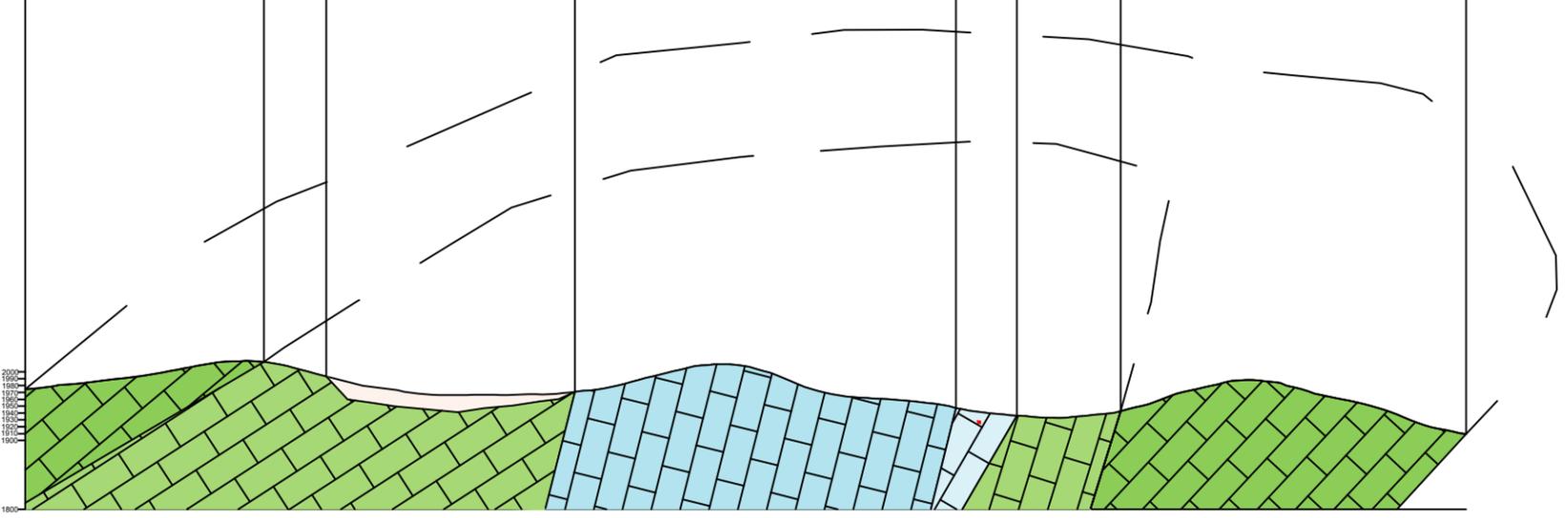
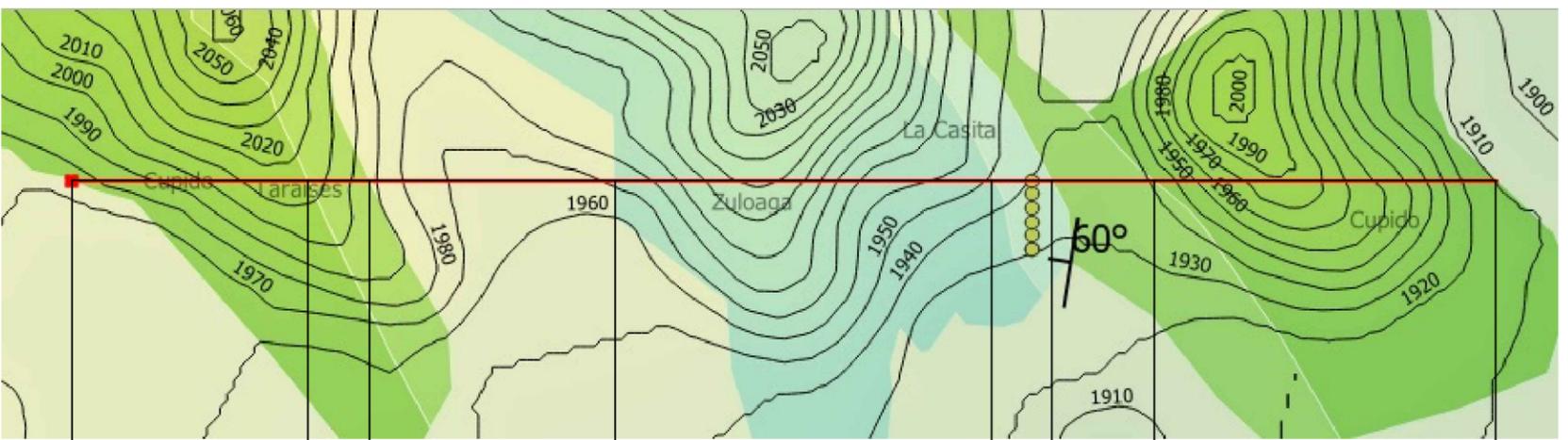


O E



Sección E-E'

O E



Sección F-F'

-  Zuloaga
-  Taraises
-  Yacimiento de fosforitas
-  La Casita
-  Cupido

esc: 1:10000



Anexo 1.3 - Modelo geológico del anticlinal El Barroso (Vista SW)

