



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN GEOLÓGICA DEL PREDIO EL
FAKIR, PARA SU APROVECHAMIENTO COMO
BANCO DE MATERIALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

GONZÁLEZ GARCÍA HUGO ALEJANDRO

DIRECTOR: ING JUAN CARLOS CRUZ OCAMPO

CIUDAD UNIVERSITARIA

2009



Con una Pequeña Ayuda de mis Amigos...

A mis padres Rosa y Francisco por su apoyo y comprensión a lo largo de estos años, lo que siempre me dio el ánimo para continuar, a ustedes les dedico todo mi esfuerzo, muchas gracias.

A mis hermanos Ulises, Áyax (+), Axel; A mis sobrinos, por los momentos que hemos compartido juntos, las alegrías y tristezas, por su apoyo en momentos difíciles, con mucho esfuerzo juntos hemos logrado esta meta.

A mis profesores, Alfredo Victoria, Gilberto Silva, José Luis Arcos, Emiliano Campos, Cláudia Mendoza, María de la Paz, etc. por la formación recibida, y que siempre me servirá para salir adelante en mi etapa profesional

A mi profesor y amigo Juan Carlos Cruz, por la paciencia y la comprensión, por el apoyo y los consejos, por guiarme en la realización de este trabajo gracias al cual he aprendido un poco más, muchas gracias por tu amistad.

A mis amigos Benito, María, Homero, Alberto, Alejandro, Héctor, Toño, Noé, por su amistad a lo largo de todos estos años, juntos hemos compartido muchas experiencias, gracias por dejarme convivir a su lado, su apoyo me ha servido para salir adelante muchas veces.

A mis compañeros y amigos; Beto, Edgar, Mario, Nubia, Maricela, Omar, Fabián, Caro, Memo, gracias por ofrecerme su amistad incondicional, por su apoyo a lo largo de toda la carrera el cual espero haber devuelto de la misma manera.

A Cláudia Bere, gracias por todos tus consejos, tus regaños, tu amistad sincera, siempre estuviste a mi lado en los momentos más difíciles, espero yo haber correspondido de la misma manera, ya sabes que tienes un amigo para siempre.

A Julia Angélica, por todo tu cariño y comprensión, por los momentos tan increíbles que pase a tu lado, por tu apoyo sin el cual no hubiera sido posible culminar este esfuerzo, te dedico esta meta con mucho cariño, tkm.

A Elídee, Edras, Karina, Marlene, Juan, David, por su apoyo a lo largo de estos últimos años, juntos logramos terminar el último esfuerzo.

También quiero agradecer a todos aquellos que compartieron experiencias a todo lo largo de la carrera y que con su ayuda me ayudaron a culminar una de las metas más importantes de mi vida, muchas gracias

...Hugo Alex.

AGRADECIMIENTOS:

En la realización de este trabajo fue necesario el apoyo de muchas personas que directa o indirectamente ayudaron para el buen término del proyecto a todos ellos muchas gracias.

Para la empresa Petroanálisis S.A. por dejarme ser parte de este proyecto y de otros que han complementado mi formación como profesional, en especial a los Ing.; Rosario Peralta, Antonio Godoy, Darío Peña, Carlos Gaspar, de quienes con su esfuerzo, se pudo llevar a buen término la realización de este trabajo.

Al Ing. José Ramón Amezcua por su apoyo para la realización de este trabajo.

A mis sinodales por su plena disposición para la revisión y corrección de esta Tesis; a los ingenieros: Arturo Tapia Crespo, Carlos Garza, Roberto Uribe, José Santos Jallath.

Por último pero no menos importante quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación recibida a lo largo de los últimos años y que hicieron posible que se pudiera llevar a cabo este trabajo, muchas gracias.

A little help from my friends

*What would you think if I sang out of tune,
Would you stand up and walk out on me?
Lend me your ears and I'll sing you a song,
And I'll try not to sing out of key.
I get by with a little help from my friends,
I get high with a little help from my friends,
Going to try with a little help from my friends.
What do I do when my love is away.
(Does it worry you to be alone)
How do I feel by the end of the day
(Are you sad because you're on your own)
No I get by with a little help from my friends,
Do you need anybody,
I need somebody to love.
Could it be anybody
I want somebody to love.
Would you believe in a love at first sight,
Yes I'm certain that it happens all the time.
What do you see when you turn out the light,
I can't tell you, but I know it's mine.
Oh I get by with a little help from my friends,
Do you need anybody,
I just need somebody to love,
Could it be anybody,
I want somebody to love.
I get by with a little help from my friends,
Yes I get by with a little help from my friends,
With a little help from my friends.
... (Lennon y McCartney)*

INDICE

INDICE	PAGÍNA
TEMA	
RESUMEN.	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVOS GENERALES	2
1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	4
1.4 ASPECTOS GENERALES DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA DE CALAKMUL	6
1.4.1 FLORA	6
1.4.2 FAUNA	7
1.4.3 FACTORES ABIÓTICOS	7
1.5 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	8
2. GEOLOGÍA GENERAL	9
2.1 MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
2.2 ESTRATIGRAFÍA	9
2.2.1 BASAMENTO PRE-MESOZOICO	9
2.2.2 TRIÁSICO-JURÁSICO	10
2.2.3 CRETÁCICO INFERIOR	11
2.2.4 CRETÁCICO SUPERIOR	11
2.2.5 LIMITE CRETÁCICO-PALEÓGENO	11
2.2.6 PALEOCENO-EOCENO	12
2.2.7 OLIGOCENO	12
2.2.8 MIOCENO	12
2.2.9 PLEISTOCENO-RECIENTE	13
2.3 MARCO TECTÓNICO REGIONAL	16
2.3.1 EL TERRENO MAYA	16
2.3.2 EL BLOQUE CHORTIS	16
2.3.3 SISTEMA DE FALLAS MOTAGUA- POLOCHIC	17
2.4 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA REGIÓN	18
2.4.1 RIFT TRIÁSICO SUPERIOR-JURASICO MEDIO, APERTURA DEL GOLFO DE MÉXICO	18
2.4.2 TRANSGRESIONES MARINAS JURÁSICAS	19
2.4.3 EMPLAZAMIENTO ACTUAL DE LA PENINSULA DE YUCATÁN	20

INDICE

3. GEOLOGÍA LOCAL DEL ÁREA DE INTERÉS (PREDIO EL FAKIR)	22
3.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL	22
3.2 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO	23
4. APROVECHAMIENTO POTENCIAL DEL YACIMIENTO	24
4.1 MINERALOGÍA DEL YESO	24
4.2 PASOS DE LA EXPLOTACIÓN MINERA	25
4.3 ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL Y NORMATIVIDAD	28
4.4 EL PROBLEMA DE LAS IMPUREZAS EN LOS DEPOSITOS DE SULFATO DE CALCIO	30
5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	32
5.1 MUESTREO SUPERFICIAL	32
5.2 ESTUDIO GEOFÍSICO	35
5.2.1 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	35
5.3 MUESTREO POR SONDEOS A PROFUNDIDAD	39
5.4 ANÁLISIS GEOQUÍMICO	44
5.4.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X	44
5.4.2 ICP (PLASMA ACOPLADO INDUCIDO)	45
5.4.3 GEOQUÍMICA	45
5.5 PETROGRAFÍA	48
5.5.1 PETROGRAFÍA DE MUESTRAS SUPERFICIALES	48
5.5.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO DE LAS MUESTRAS	49
5.5.3 PETROGRAFÍA DE LAS MUESTRAS DEL SUBSUELO	57
5.6 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA INFRARROJA DE ONDA CORTA (SWIR)	64
5.6.1 ANÁLISIS DE MUESTRAS MEDIANTE EL MÉTODO SWIR	66
6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	75
6.1 MUESTREO SUPERFICIAL	75
6.2 CORRELACIÓN DE ESTUDIOS GEOFÍSICOS Y PERFORACIÓN	75
6.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS PERFILES GEOFÍSICOS	79
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
9. ANEXOS	93

RESUMEN

El presente estudio geológico realizado en el predio El Fakir ubicado aproximadamente a 11 kilómetros del poblado de Xpujil, Campeche, se llevó a cabo ante la necesidad actual de la explotación de bancos de materiales para la construcción debido principalmente al crecimiento demográfico e industrial del sureste de México, estos bancos extraen básicamente, calizas, yesos, agregados pétreos y un material muy ampliamente difundido en toda la península llamado Sashcab. Algunos de estos materiales se usan para la fabricación de cementos y concretos por lo que se requiere que sean de muy buena calidad, químicamente puros y con muy poco contenido de materiales que pudieran afectar sus características como adherencia, resistencia, etc.

La península de Yucatán cuenta con amplios yacimientos de estos materiales, debido a su historia geológica; estos se comenzaron a depositar a finales del periodo Jurásico cuando las transgresiones marinas empezaron a inundar la zona del actual Golfo de México, generándose las condiciones para que se depositaran una enorme cantidad de evaporitas y carbonatos en los mares someros que cubrían al bloque de Yucatán.

Durante el presente estudio se utilizaron varios métodos para poder caracterizar geológicamente los materiales que son susceptibles de explotarse comercialmente, mediante muestreo superficial, estudios geofísicos, barrenación exploratoria, petrografía de muestras y análisis químicos, se pudieron obtener datos que posteriormente sirvieron para correlacionar las unidades reconocidas por los métodos anteriores; a través de dicha correlación se pudo obtener un modelo geológico de la zona del predio el que será utilizado posteriormente como una referencia una vez que comience la explotación comercial.

Las diversas técnicas de análisis de las muestras de los materiales (fluorescencia de rayos X, espectroscopia por plasma acoplado inducido, petrografía) permitieron conocer los porcentajes de su contenido de Sulfato de Calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y Carbonato de Calcio (CaCO_3), e identificar otros materiales, algunos de los cuales se identifican como impurezas; óxidos e hidróxidos de hierro y arcillas. Estas se pudieron identificar a través de espectrometría de infrarrojo (SWIR), reconociendo una asociación de illita-sméctita, arcillas muy comunes en suelos.

Con los datos obtenidos a través de los métodos descritos se pudieron emitir recomendaciones para considerar la factibilidad de una futura explotación del predio, así como los métodos de minado a seguir de acuerdo a las características de los materiales encontrados.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GENERALES

➤ La evaluación y caracterización geológica del predio conocido como El Fakir, que se localiza dentro de la región conocida como Zho Laguna Los Chenes, aproximadamente a 30 kilómetros de la población de Xpujil, Campeche. Dichos estudios consistieron en muestreo superficial, estudio geofísico del subsuelo para caracterizar las unidades litológicas presentes, correlación de unidades geofísicas y litológicas mediante dos barrenos con toma de muestra (núcleo), análisis químico de las muestras tomadas (superficiales y del subsuelo) para determinar la calidad de los materiales, petrografía en lámina delgada de dichas muestras para determinar la mineralogía de cada una de ellas.

➤ Determinación de los volúmenes de los materiales encontrados y la disposición de las unidades litológicas de acuerdo a sus características físicas, con la finalidad de evaluar mediante un estudio de factibilidad su posible explotación, adecuado a los lugares en donde los materiales presenten mayor calidad.

1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

➤ Conocer la calidad de los materiales de acuerdo a su contenido mineralógico, de materia orgánica y otros materiales, para determinar el porcentaje del material de interés, en este caso de CaCO_3 y yesos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a través de petrografía y análisis químico.

➤ La generación de un modelo geológico general de la zona con la ubicación y disposición de cada unidad encontrada; éste se presenta tanto en secciones geológicas como en modelos isométricos.

➤ La generación de un mapa general del predio, con la ubicación de los puntos de muestreo, líneas de tendido geofísico, secciones geológicas y delimitación topográfica.

1.2 ANTECEDENTES

La región geográfica de la península de Yucatán ha sido tema de diversos estudios debido a su importancia económica por los numerosos yacimientos petrolíferos encontrados principalmente en las cuencas sedimentarias del cenozoico. Los primeros estudios de esta parte del sureste de México fueron publicados desde comienzos del siglo XX por Böse (1905, 1906), Villarello (1909),

Burckhardt (1930), Gibson (1936a, 1936b), Álvarez (1949, 1941), Viniegra (1950) y Oñate (1950). Posteriormente Castillo-Tejero (1955) y Contreras (1959), sintetizaron la estratigrafía y geología histórica del área (Morán Zenteno et al, 1984). La secuencia cretácica reconocida en las perforaciones de petróleos mexicanos está constituida principalmente por calizas, dolomías, anhidritas e intercalaciones de bentonitas y algunos materiales piroclásticos sobre todo hacia la base que se encuentra formada por las Evaporitas Yucatán (López-Ramos, 1969).

El entonces Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano) realizó diversos estudios exploratorios en el estado de Campeche durante la década de los años 80's para determinar el potencial de minerales metálicos y no metálicos. La secuencia litológica está constituida principalmente por anhidrita, caliza, dolomía, yeso y arcilla; por lo que, los recursos minerales de la entidad son sustancias no metálicas (yeso, arcilla, caliza, caliza dolomítica y sal). Posteriormente, en el año de 1996, el C.R.M. efectuó nuevos estudios en el estado de Campeche, con el objeto de analizar la información existente y visitar todos los bancos de explotación, con la finalidad de elaborar una primera versión del marco geológico de los recursos minerales del territorio estatal. Para el periodo 2000-2006, el SGM contabilizó un volumen de extracción de 638,000 Ton totales de materiales, como arcillas, arenas, caliza, gravas, más de la mitad de este volumen se constituye principalmente por arenas. Las principales regiones mineras del estado de Campeche son:

Tabla 1. Regiones mineras del estado de Campeche (tomado del SGM, 2007)

REGIÓN MINERA	MINERALIZACIÓN	TIPO DE YACIMIENTO	ZONAS PRODUCTORAS
CANDELARIA	AGREGADOS PETRÉOS	BANCOS DE MATERIAL	CANDELARIA ESCARCEGA
XPUJIL	YESO	BANCOS DE MATERIAL	XPUJIL
CAMPECHE- HOPELCHÉN	ARENA	BANCOS DE MATERIAL	CAMPECHE-HOPELCHÉN
CALKINÍ- CELESTÚN	AGREGADOS PETRÉOS, SAL	BANCOS DE MATERIAL	CALKINÍ-CELESTÚN

Los centros de producción o actividad extractiva que existen en el estado son pocos, los principales se encuentran localizados en los municipios de Campeche, Hopelchén, Hecelchakán, Champotón, Calakmul y Escárcega, todos ellos, como ya ha sido mencionado, están dedicados a la explotación de bancos de caliza. Recientemente con la apertura de nuevas vías de comunicación en Campeche se espera un incremento en la actividad minera extractiva ante el aumento en el número de obras públicas y construcción de viviendas. La utilidad de las sustancias extraídas no está

restringida solo a materiales de construcción, la cal extraída de los depósitos de calizas llega a presentar purezas de CaCO_3 superiores al 99%, utilizada para la fabricación de cal, así como materia prima en la fabricación de cemento (SGM, 2007).

En la región minera de Xpujil, municipio de Calakmul, existen afloramientos de yesos que ocurren en una franja orientada en dirección N-S, desde la porción meridional del estado, en la zona de Xpujil, donde están claramente expuestos, hasta el sector centro-oriental, en la región de Los Chenes. Estos depósitos llegan a presentar espesores superiores a los 20 m y su longitud es de varias decenas de metros. Su pureza en cuanto a sulfato de calcio se obtuvo con análisis químicos resultando apta para propósitos comerciales; el banco Vyca es una mina que produce yeso para la elaboración de cemento, con el análisis realizado se obtuvieron datos de una pureza de yeso del 88.9%; Tancúan con una pureza del 90.17%; Chicaná con una pureza del 89.07% (SGM, 2007). Con base en la pureza del yeso se concluye que todos estos prospectos son viables de utilizarse en la elaboración de cemento.

El material superficial no consolidado que se encuentra en casi toda la región de la península de Yucatán conocido como Sashcab se utiliza, triturado junto con calizas y yesos de baja pureza, en forma de arenas para la construcción y fabricación de adobes, pero en un estudio reciente, se pretende utilizar como un componente de concretos para la construcción de pisos de casas habitación, la mezcla de Sashcab junto con cemento Portland tipo I proporciona un material de construcción con una resistencia a la compresión de entre 70 a 75 kg/cm^2 con un porcentaje de cemento del 12% en promedio (Payan-Arjona, 2002).

Con los datos anteriores, se observa claramente que existe la necesidad de incrementar la extracción de sustancias y materiales ante el aumento de la demanda de construcción de infraestructura y vivienda de la población, aunque otro factor importante sería la conservación de los recursos naturales de la zona.

1.3 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se localiza dentro del municipio de Calakmul al sureste del estado de Campeche, entre los kilómetros 132+900 y 134+350 de la carretera Escárcega-Chetumal (fig.1), comprende un área de 3,000m x 1,450m (Galindo-leal, 2002), tomando como límites las coordenadas 227,131.043E – 228,562.742E y 2, 050,776.975N – 2, 053,931.025N en el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), Zona UTM 16Q y Datum Geodésico WGS 84 (World Geodetic System, 1984) (Informe técnico Petroanálisis ; Proyecto “El Fakir”, 2008) . Se ubica a unos 30 km del poblado de Xpujil, Campeche; se puede llegar desde la carretera 180 en Ciudad del Carmen,

hasta Sabancuy (fig. 1) (INEGI; Condensado Campeche, 2009), tomando luego la carretera 186 hasta Escárcega, pasando la desviación hacia Calakmul y luego el poblado de Eugenio Echeverría Castelot, a 10 minutos se localiza el predio El Fakir (fig. 1) (SGM, 2007), demarcado dentro de la zona que corresponde a la gran región de Calakmul, una de las reservas naturales más importantes de México y Centroamérica.

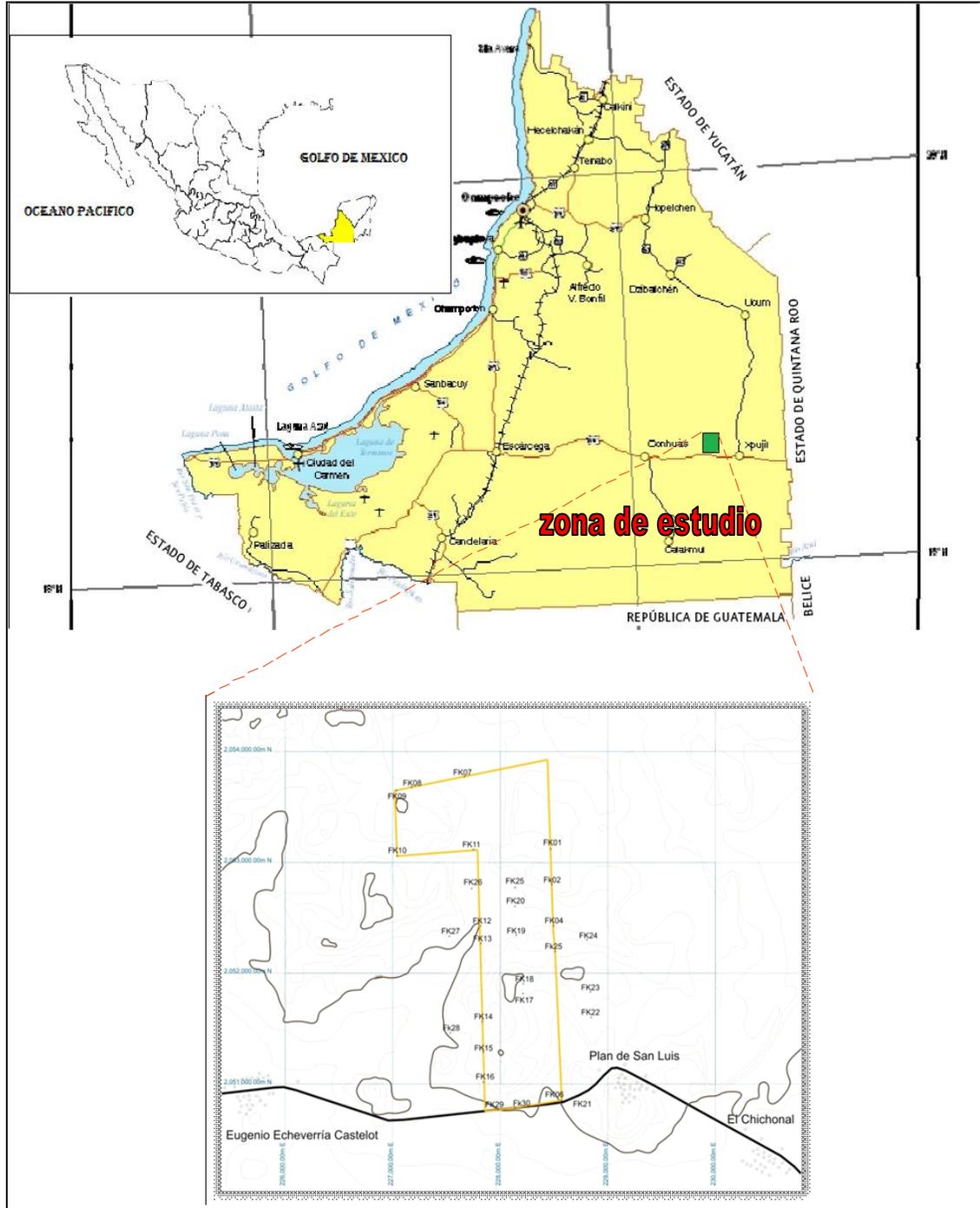


Fig. 1. Plano de localización del predio El Fakir, Xpujil Campeche.

1.4 ASPECTOS GENERALES DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA DE CALAKMUL

Esta región comprende una superficie de aproximadamente 20,000 km² en el sureste del estado de Campeche. Fisiográficamente corresponde a una meseta conocida como Zho-Laguna, con una altitud promedio de entre 200 y 250 m.s.n.m. que se extiende en dirección norte-sur desde el paralelo 18° 50' N hasta la parte norte del Petén Guatemalteco y parte noroeste de Belice. La meseta desciende moderadamente hacia las planicies orientales del Caribe (89° W) y las planicies occidentales del Golfo (90° 15' W). Representa el límite norte de las diversas selvas centroamericanas. Junto con el área contigua del Peten Guatemalteco y Belice al sur, es una de las mayores extensiones de selvas húmedas tropicales de Mesoamérica (Bryant et al. 1997). La selva se encuentra en buen estado de conservación en parte debido a la dificultad de acceso y por la escasez de agua superficial, que se filtra por un gran número de cavidades cársticas resultado de la disolución de las rocas carbonatadas generando dolinas las que al interconectarse entre sí llegan a colapsarse para producir estructuras mayores denominadas poljes.

A pesar de que la reserva es el área protegida de mayor tamaño en el país (7,000 km²), existen varios factores que amenazan la conservación de la biodiversidad de la región (Galindo-Leal et al. 1998,2000): (i) acelerado crecimiento poblacional, (ii) rápida deforestación, (iii) desarrollo sin planeación, (iv) las deficiencias en el diseño de la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Estos factores indican que se debe realizar un nuevo diseño de los límites de la reserva para que esta cumpla con los propósitos para los que fue creada en 1989 y aceptada por el sistema de reservas de la UNESCO en 1993, y que consiste en el mantenimiento a largo plazo de la biodiversidad.

1.4.1 FLORA

La región de Calakmul ha sido descrita como selva mediana subperennifolia, con porciones menores dominadas por selva alta perennifolia, selva baja subperennifolia, sabanas y vegetación de hidrofitos (Flores y Espejel, 1994). Se estima que existen 1,600 especies de plantas vasculares, las cuales quedan divididas en 153 familias y 834 géneros, con un porcentaje del endemismo del 10%. Las selvas altas y medianas están dominadas por chicle, ramón, pukte', bayo o machiche; la selva baja por ja'abin, yaytil o chicle; bajos mixtos o de pukte'. La vegetación secundaria está representada por selvas de tsalam, de chaka', de xu'ul, bajos de sak ts'íits' il che' y de chechén negro, acahuals y helechales.

1.4.2 FAUNA

Ésta se identifica con la región zoogeográfica neo tropical y en particular con la provincia yucateca, por las características de gran extensión y continuidad con otras zonas, en esta región es posible mantener especies que requieren un amplio territorio para poder moverse. Como consecuencia esta región probablemente mantiene las poblaciones más grandes en México de varias especies de gran importancia ecológica y económica como el jaguar, puma, tapir, venado, temazate gris y rojo, venado cola blanca, pecarí de labios blancos y pecarí de collar, mono aullador, mono araña, águila elegante, pavo ocelado y hoco faisán (Escamilla et al. 2000). El 90% de las especies de anfibios y más de la mitad de las 105 especies de reptiles de la península se han registrado en la región de Calakmul.

1.4.3 FACTORES ABIÓTICOS

- Substrato: el suelo encontrado durante el muestreo de la primera etapa del estudio tiene un espesor de apenas unos cuantos centímetros por lo que no es muy apto para las actividades agrícolas, ya que requiere un desmonte constante por lo que es un factor importante de deforestación para el ecosistema y que posteriormente requiere de mucho tiempo para su recuperación. Debajo de la capa de suelo se encuentra un material blanco y frágil llamado “Sashcab” que puede ser observado en cortes superficiales de terreno, en depósitos de material y excavaciones; este material corresponde a rocas sin consolidar, el espesor de la capa de Sashcab varía de unos cuantos centímetros a 5 metros en promedio, su consistencia sugiere que la transformación de aragonita a calcita (un proceso necesario para que la caliza se consolide) no ocurrió (Villasuso y Méndez, 2001).
- Afloramientos de yesos: la presencia de afloramientos de yeso en la parte central de la meseta de Zho-Laguna proporciona características especiales para el desarrollo de las plantas. Existen ejemplos de especies de plantas endémicas restringidas a los afloramientos de yesos.
- Agua: a pesar de que en la región las lluvias son muy recurrentes, el agua es escasa debido a que no se acumula en la superficie, la cual se filtra a través de las fracturas por disolución de los horizontes de yeso subsuperficiales, ésta se restringe a acumulaciones temporales llamadas aguadas que se encuentran en claros desforestados de la selva, a donde acuden a beber un gran número de especies por lo que son de gran valor para la diversidad biológica.

1.5 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En la región existen numerosos sitios arqueológicos pertenecientes a la cultura maya, algunos muy importantes como Calakmul y Becán, así como vestigios de asentamientos humanos de menor importancia, estos forman parte del Petén central, región en la que también se establecieron las ciudades de Hakum, Tikal y Uaxactún, con las que comparten una historia común.

Becán era la ciudad más importante hacia donde se encuentra ubicada la zona de estudio, y también los sitios de Xpujil y Hormiguero. Su ocupación data desde el periodo Preclásico medio (700-600 a.C.) hasta el Clásico terminal (800-100 d.C.) (Folan et al., 1983; Folan, 1985). Calakmul, considerada entre las grandes urbes de la época clásica, fue la gran rival de Tikal. Ahí florecieron las ciencias como la astronomía, y las artes como la arquitectura y la escultura en piedra (Vargas, 1995). Hacia el interior del predio El Fakir sobre las partes elevadas se pueden observar algunas estructuras de piedra caliza en posiciones geométricas (fotografía 1), lo que es indicativo de que fueron colocadas intencionalmente con algún propósito, tal vez como casa habitación de algún poblado autónomo.



Fotografía 1. Estructuras de piedra caliza encontradas en el predio El Fakir, Municipio de Calakmul, Campeche.

Estos pueblos comenzaron la explotación de los materiales pétreos como material de construcción de sus templos y edificios principales, incluso se utilizaba el Sashcab para mezclarlo como mortero y en la construcción de los famosos caminos blancos que conectaban una ciudad con otra en todo el Mayab, conocidos como “Sache” (camino blanco) (Payan-Arjona, 2002).

2. GEOLOGÍA GENERAL

2.1 MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El bloque de Yucatán es una microplaca continental que cubre 450,000 km² en el sur de México, el norte de Guatemala y el norte de Belice, esta ha sido un elemento cratónico estable desde finales del Paleozoico, cuyos márgenes han sido modificados desde que se aisló en el Jurásico Temprano como una microplaca entre América del Sur y América del norte (Rosenfeld, 2002). Desde el Jurásico Tardío, el Bloque de Yucatán ha sido cubierto por un espesor considerable de Carbonatos (calizas, dolomías) y Evaporitas (yeso, anhidrita) perteneciente a la plataforma de Yucatán. Esto debido a la transgresión marina de inicios del Cretácico lo que da como resultado la sedimentación de carbonatos y anhidritas en estas regiones, así como el desarrollo de los depósitos de talud en la franja que bordeaba al gran banco calcáreo (Viniegra, 1981), este se extiende hasta Chiapas y el sur de Veracruz, con el desarrollo de un borde que es el principal objetivo petrolero en Tabasco y la plataforma marina de Campeche.

La península de Yucatán queda comprendida entre los paralelos 16° a 22° longitud norte y 86° a 91° longitud W del meridiano de Greenwich, sus límites geomorfológicos son los siguientes:

- I) El Banco de Campeche al norte y parte del noroeste.
- II) Al sur por el Arco de la Libertad, que incluyen el Petén Guatemalteco y Las Montañas Maya de Belice.
- III) Al oriente por El Talud continental del mar Caribe.
- IV) Al oeste la Planicie Costera del Golfo de México, al SE del Estado de Campeche y oriente del Estado de Tabasco.

2.2 ESTRATIGRAFIA

2.2.1 BASAMENTO PRE-MESOZOICO

El conocimiento que se tiene del basamento pre-mesozoico es escaso y se limita a unos cuantos afloramientos que en su mayoría se encuentran en localidades mexicanas y a pozos exploratorios perforados por PEMEX (López-Ramos, 1969), algunos de estos afloramientos se localizan dentro del Macizo de Chiapas, en donde está constituido por un complejo de rocas metasedimentarias del Precámbrico Superior al Paleozoico Inferior (Sedlock et al., 1993), intrusionadas por granitos, granodioritas y tonalitas datadas por métodos radiométricos de K-Ar y de Rb-Sr como del Permotriásico.

Grupo Santa Rosa

Estas formaciones de edad Paleozoica (Misissipico a Pérmico), cuya localidad tipo aflora en la villa de Santa Rosa (Baja Verapaz, Guatemala), corresponde a rocas clásticas sedimentarias con intercalaciones de calizas (Sapper, 1937) (fig. 4), y que es correlacionable con la Formación Todos Santos (Vinson, 1962). La formación se encuentra parcialmente metamorfizada y se le ha asignado una edad Misissipico-Pérmico. Una secuencia muy abundante de lutitas del paleozoico superior fue renombrada como Formación Táctica (Walper, 1960), pero Clemons y Burkart (1971) proponen el uso del nombre de Grupo Santa Rosa, el cual al oeste de Guatemala incluye tres formaciones; (1) La Formación Chicol inferior expuesta cerca de Huehuetenango conformada por una secuencia de brechas y conglomerados de entre 800 y 1,200 m de espesor, (2) La Formación Táctica media de edad Pennsilvaniana- Pérmica compuesta por lutitas negras y pardas, calizas mudstone, menor porcentaje de limolitas y horizontes de areniscas de grano fino, con un espesor máximo de 1,000 m, (3) La Formación Esperanza que esta hacia la cima del grupo Santa Rosa. Fusulínidos del genero *Schwagerina cf. S. campenis* indican una edad pérmica para estas calizas con lutitas fosilíferas interstratificadas, areniscas y dolomías (Clemons y Burkart, 1971).

El grupo Santa Rosa también esta correlacionado con sedimentos paleozoicos y metasedimentos de bajo grado que forman una gran parte de Las montañas Maya en Belice (Dixon, 1956) (fig. 4), y que definen una serie Maya inferior con metamorfismo y metasedimentos plegados que están sobreyacidos discordantemente por la serie Macal que consiste en una serie de pliegues abiertos de sedimentos clásticos con horizontes distintivos de calizas (Batteson y Hall, 1977).

2.2.2 TRIÁSICO-JURÁSICO

Formación Todos Santos

Sobreyaciendo al basamento cristalino se localizaron lechos rojos, que están constituidos por limolitas, conglomerados, lutitas de color rojo y areniscas de grano fino a muy fino, que ocasionalmente contienen algunas gravas de cuarzo y granos gruesos de arena cuarzosa, con colores amarillentos, blancos, blancos amarillentos, blanco verdoso y café rojizo (fig. 4). Esta secuencia ha sido denominada como Formación Todos Santos con un intervalo estratigráfico que varía del Triásico al Jurásico, descrita por Vinson, 1962, Mullerried, 1957 y Gutiérrez, 1956 (López Ramos, 1969).

2.2.3 CRETÁCICO INFERIOR

Hacia el intervalo entre el Hauteriviano-Barremiano (132 a 121 Ma), aumentó la velocidad de subsidencia de las plataformas que bordeaban El Golfo de México, favoreciendo así el depósito de gruesos paquetes de carbonatos con espesores superiores a los 1,500 m en promedio, con algunos horizontes de lutitas intercaladas como se observa en la figura 4. El nivel de los mares siguió aumentando cubriendo parte de la península de Yucatán; en las zonas contiguas, continuó el depósito de evaporitas, sobre extensas aéreas de plataforma con circulación de aguas marinas restringidas (Padilla y Sánchez, 2007).

2.2.4 CRETÁCICO SUPERIOR

Hacia el sur en Las montañas Maya en Belice, G. Flores (1952) encontró una sección del Cretácico Superior representada por una serie de anhidritas, calizas, calizas dolomíticas y dolomías con una delgada capa de arenisca, de edad Albiano al Cenomaniano, en donde se encontró fauna del tipo lagunar a depósitos de post-arrecife. Hacia la base, a una profundidad de 3,080 m se tienen intercalaciones de anhidrita color blanco a pardo oscuro y gris con calizas dolomíticas y criptocristalinas en partes cristalina de color pardo a gris a través de todo este cuerpo aparecen capas muy delgadas de bentonita. La cima de este cuerpo; llega a una profundidad de 2,265 m (López-Ramos, 1979).

Sobreyaciendo a la unidad anterior se tienen intercalaciones de anhidritas y calizas cristalinas y en partes dolomitizadas (fig. 4), en algunos intervalos las anhidritas se presentan translúcidas y en partes yesíferas, la profundidad de este paquete va desde los 260 m hasta los 1,480 m.

2.2.5 LIMITE CRETÁCICO-PALEÓGENO

Hacia el norte de la península estudios recientes de geofísica han descubierto una gran estructura circular que pudo haber sido provocada por el impacto de un meteorito (fig. 3), y al que se le considera responsable de la extinción de plantas y animales entre las que destacan los dinosaurios y las amonitas (Álvarez et al, 1992). De mucho interés resulta una brecha que coincide con esta edad y que tiene una gran extensión en el sur del Golfo de México de gran importancia económica, ya que es la roca almacén de los grandes campos petroleros del sureste del golfo, siendo una de las teorías, que fue resultado del impacto del cuerpo extraterrestre (Grajales-Nishimura et al., 2000). El cráter K/T de Chicxulub, con un diámetro final estimado en hasta 300 km, es uno de los más grandes rasgos de impacto meteórico preservado en el mundo (Sharpton

et al., 1996). Se ha propuesto que la brecha dolomítica de la Sonda de Campeche, que almacena la mayor parte de su petróleo, se formó por el impacto (Grajales-Nishimura et al., 2000).

2.2.6 PALEOCENO-EOCENO

Formaciones Icaiché y Chichen Itzá

La unidad sedimentaria más antigua que aflora en el área de estudio corresponde a la Formación Icaiché del Paleoceno (Butterlin y Bonet, 1960) (fig. 2); dichas rocas están constituidas de cristales de calcita de un color que varía del blanco al crema, por su textura se deduce que fueron silicificadas y dolomitizadas, lo que explica la ausencia de fósiles determinables pero que indican su origen marino (Álvarez, 1969), también se tiene la presencia de horizontes de yeso y arcillas. A la formación Icaiché le sobreyace La Formación Chichen Itzá del Eoceno (fig. 3) conformada por calizas y margas, se le ha dividido en tres miembros de acuerdo a ligeras variaciones litológicas: (1) Miembro Xbacal, representado por calizas amarillentas e impuras pudiendo pasar a verdaderas margas y lutitas verdosas. Estas rocas forman pliegues cerrados, con echados que alcanzan 20° o más en oposición al resto de la formación, su espesor puede llegar a varios centenares de metros; (2) Miembro Pisté, la litología básicamente es la misma que el miembro anterior con calizas a menudo masivas y a veces en capas más o menos gruesas, las cuales están plegadas en anticlinales y sinclinales, cuyos ejes tienen una dirección dominante WNW-ESE; (3) Miembro Chumbec, está representado por calizas masivas blancas, muy cristalinas, con el aspecto de mármoles sacaroides (López-Ramos, 1979).

2.2.7 OLIGOCENO

El Oligoceno no fue reconocido en las perforaciones hacia el sur de la península pero hacia el norte aparece representado como una calcarenita pulvurenta (fig. 3), quebradiza, suave en partes, con caliche, en bancos que subyacen a la caliza superficial alterada, mal estratificada. Hacia la parte superior está constituida por una caliza y calcarenita pulvurenta, coquinoide y con abundantes restos de moluscos, briozoarios, algas y miliólidos. (López-Ramos, 1979).

2.2.8 MIOCENO

Formación Bacalar

La Formación Bacalar (Butterlin, 1958), corresponde a calizas de un blanco generalmente vivo, deleznable pero con nódulos duros, pasan a margas blancas en los niveles inferiores. Se encuentran a veces intercaladas, finas capas de yesos.

2.2.9 PLEISTOCENO-RECIENTE

Forma el Sashcab superficial que cubre gran parte de la Península, pero existen también porciones pantanosas, calizas alteradas, calcarenitas y calcilutitas que bordean la península, terminando en playas (fig. 3).

Cubriendo indistinta y parcialmente a todas las unidades se tienen depósitos aluviales constituidos por limos y arcillas; depósitos lacustres formados por una cantidad de restos vegetales mezclados con las arcillas, las unidades aflorantes no presentan plegamiento significativo, sin embargo hacia el sureste el régimen frágil está representado por una falla regional denominada Rio Hondo que presenta una dirección de NE 25°SW con echados de 50° a 89° al NW con una longitud de 75 km, que afecta a rocas sedimentarias de las formaciones Estero Franco (Mioceno), Bacalar y Carrillo Puerto (SGM, 2007) (fig. 3).

Se definió un lineamiento denominado Chetumal que presenta una dirección de NE 26° SW y cuya traza presenta una longitud de 40 km, afectando a las rocas de la formación Carrillo Puerto, como se muestra en la fig. 3.

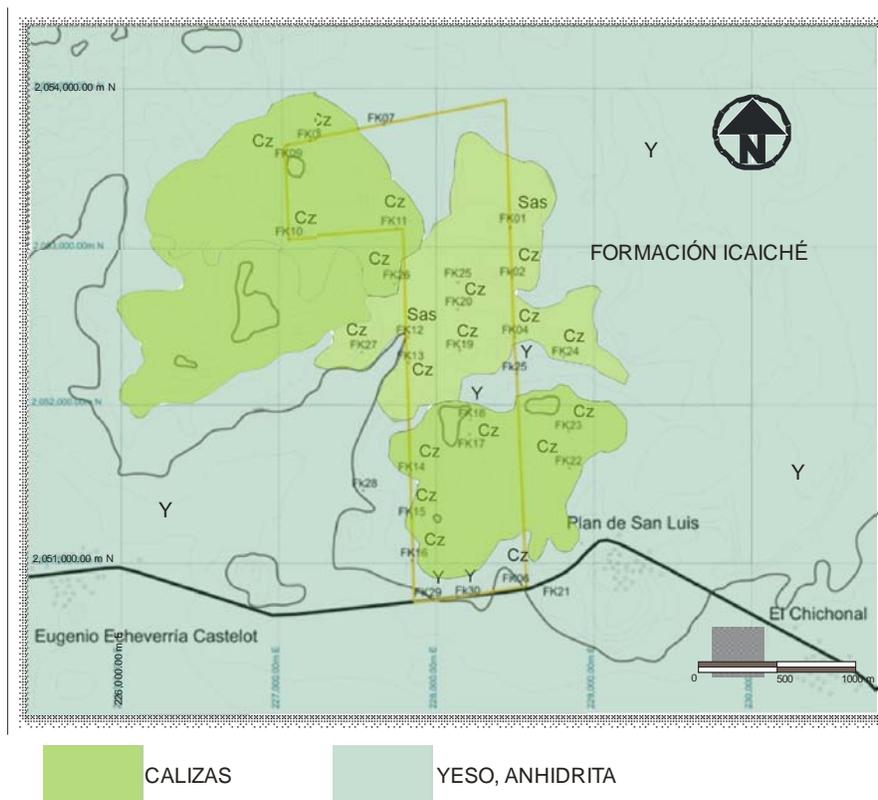


Fig. 2. Geología local del Predio el Fakir, Xpujil Campeche.

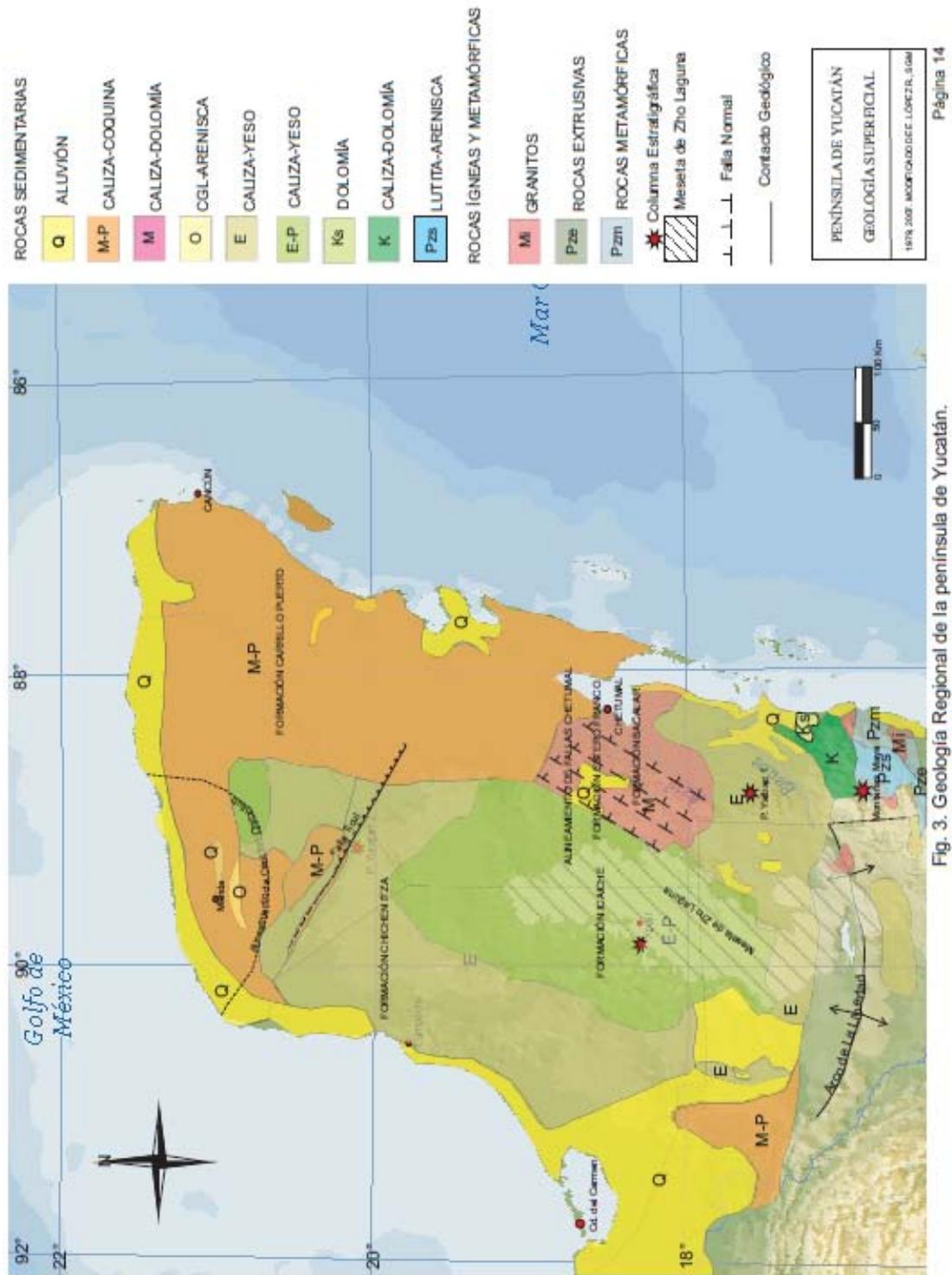


Fig. 3. Geología Regional de la península de Yucatán.

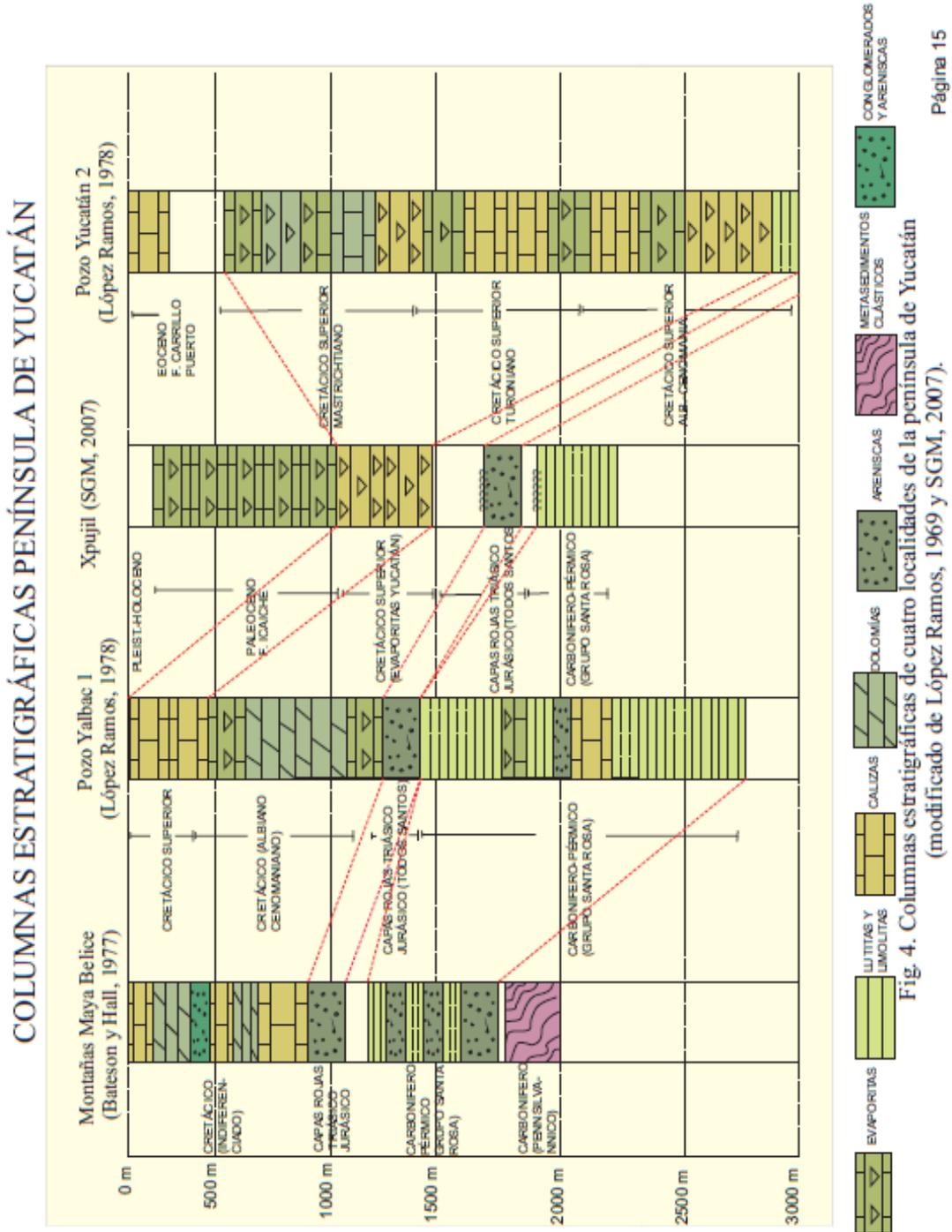


Fig. 4. Columnas Estratigráficas de cuatro locaciones de la península de Yucatán (modificado de López Ramos, 1981 y SGM, 2007).

2.3 MARCO TECTONICO REGIONAL

El sureste mexicano es una de las zonas más complejas desde el punto de vista de su historia tectónica, esto se debe a que es una zona donde convergen los movimientos desde el Oligoceno Tardío (Moran-Zenteno, 2000), de las placas tectónicas de Norteamérica, del Caribe y de Cocos. La placa Norteamericana tiene un movimiento relativo hacia el oeste respecto a la del Caribe, mientras que la de Cocos se mueve hacia el noroeste en dirección a las dos primeras. Las estructuras resultantes de estos movimientos durante el Mesozoico y el Cenozoico, presentan tendencias estructurales diversas, así como también edades de deformación diferentes.

El bloque de Yucatán también conocido como Bloque Maya o Terreno Maya es una microplaca continental que abarca el sureste de México, norte de Guatemala y norte de Belice, formando parte de la placa Norteamericana, delimitada al sur por el Bloque Chortis, que forma parte de La placa del Caribe, cuyo límite es el sistema de fallas Polochic-Motagua que es la estructura tectónica más importante que atraviesa la región (Sedlock et al., 1993).

2.3.1 EL TERRENO MAYA

El Terreno Maya (Sedlock et al., 1993) ó Bloque Maya (Dengo, 1985), que incluye, la Península de Yucatán, parte de la planicie costera del Golfo de México y el Macizo de Chiapas, hasta el Istmo de Tehuantepec.

En la parte sur del terreno Maya, el basamento está representado por un complejo metamórfico denominado unidad La Sepultura (Weber et al., 2002), compuesto por psamitas, pelitas, y calcosilicatos con metamorfismo de alta temperatura y baja presión. El complejo metamórfico está intrusionado en la porción occidental, por el complejo cristalino de Chiapas. Al este del istmo de Tehuantepec, el macizo de Chiapas se extiende más de 20,000 km² paralelo a la costa del Pacífico. Es el más voluminoso de los complejos pérmicos cristalinos en México y está compuesto por rocas metamórficas y plutónicas deformadas (Damon et al., 1981; Schaff et al., 2002; Weber et al., 2005).

2.3.2 EL BLOQUE CHORTIS

El Bloque Chortis está localizado al sur del sistema de fallas Motagua-Polochic e incluye el sur de Guatemala, el Salvador, Honduras, y parte de Nicaragua (Dengo, 1985), su basamento consiste de rocas metamórficas, plutónicas, sedimentarias y volcánicas, su evolución geológica esta pobremente entendida. Probablemente formó parte del sur de México durante el Mesozoico

(Morán-Zenteno, 1984); de acuerdo con esta teoría El bloque de Chortis se originó en México y se pudo haber movido al sureste a lo largo del sistema de fallas de Motagua-Polochic hacia su posición actual al lado del Bloque Maya durante el Terciario (Pindell y Barrett, 1990).

2.3.3 SISTEMA DE FALLAS MOTAGUA-POLOCHIC

El sistema de fallas Motagua-Polochic es la estructura tectónica más importante que atraviesa la región; este sistema de fallas representa el límite entre la placa Norteamericana y la del Caribe y se extiende desde la fosa del Caimán a través del mar Caribe hasta el Golfo de Tehuantepec en el oeste (Muehlberger y Ritchie, 1975; Burkart, 1983). Las estimaciones del movimiento entre las placas del Caribe y la de Norteamérica a lo largo del sistema de fallas, varían de 9 a 34 mm/año (modelos tectónicos globales). El movimiento relativo entre ambas placas es de 20 mm/año, mientras que a lo largo de las fallas laterales del sureste de México la tasa promedio de movimiento es de 6-10 mm/año (Guzmán, 2001).



Fig. 5. Principales rasuras tectónicas de sureste de México. (Modificado de Morán-Zenteno et al. 2005).

2.4 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA REGIÓN

Para un mejor entendimiento de la evolución tectónica de la región es necesario considerar el marco tectónico regional del Golfo de México y del Caribe, la apertura del Golfo de México fue consecuencia de la ruptura del supercontinente Pangea, pero antes de estos eventos se debe considerar la ubicación de los terrenos que posteriormente conformaron el territorio mexicano ya que los depósitos del basamento de la microplaca de Yucatán, comenzaron mucho antes de la formación de Pangea.

Después de la fragmentación de Rodinia en el Neoproterozoico temprano, el límite Noroeste de Gondwana fue ensamblado por convergencia y colisión de varios segmentos cratónicos aproximadamente entre los 650 y 500 Ma (Veevers, 2003), la cual finalmente se suturó con el cratón del este africano para formar el Oeste de Gondwanalandia (Alkmin et al., 2001), hace aproximadamente 550 Ma. La erosión de las rocas presentes en el norte de Amazonia y el noroeste Africano propicio el depósito de sedimentos hacia la dirección en que se encontraban los fragmentos cratónicos que posteriormente formarían el territorio mexicano, esto está confirmado por la datación de zircones que contienen dicha firma isotópica recolectados en la formación Santa Rosa (Weber et al., 2006).

Es durante el carbonífero (depósito de sedimentos de la formación Santa Rosa) que el Bloque Maya junto con otros segmentos de la corteza, estaban localizados al oeste de África o noroeste de Sudamérica, definiendo el margen de Gondwana, donde se depositaron los sedimentos de tipo flysch hacia el suroeste, por la erosión de las cadenas montañosas recientemente formadas producto de la Orogenia Alleghaniana (sutura del supercontinente Pangea). Pero el acomodo de esos bloques del basamento de estilo Grenvilliano (especialmente Oaxaquia), junto con el inicio de la subducción y el magmatismo de arco a lo largo del margen oeste de Gondwana, detuvo la sedimentación y el movimiento al oeste del Bloque Maya, esto se evidencia por la deformación, metamorfismo y magmatismo durante el Pérmico en el Macizo de Chiapas (Weber et al., 2005, 2006).

2.4.1 RIFT TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO MEDIO, APERTURA DEL GOLFO DE MÉXICO

La separación inicial de Pangea en el área que hoy comprende el Golfo de México, está evidenciada por la presencia de lechos rojos que fueron depositados en depresiones continentales, cuya geometría fue controlada por grabenes estrechos con direcciones paralelas a la línea de costa

actual (Salvador, A., 1991c), su edad de depósito varía desde el Triásico Tardío hasta después del Calloviano. El mar inició su avance hacia el Protogolfo de México desde el Pacífico a través de la parte central de México, en donde se han encontrado amonitas del Triásico Superior (Cantú-Chapa, 1969; Salvador, 1991b). La transgresión marina ocurrió en zonas con circulación muy restringida y con condiciones propicias para que se depositaran grandes volúmenes de evaporitas según Salvador, 1991c, estos grandes depósitos de sal solo están divididos en una zona en la porción central del golfo. Tal división sugiere que tuvo que existir una zona más alta y estrecha asociada con una cresta de generación de corteza oceánica que indujo el movimiento del Bloque de Yucatán hacia el sur durante el Jurásico temprano y medio y que separó las dos masas de sal de las que la meridional se movió hacia el sur junto con Yucatán (Humpris, 1979; Salvador, 1987), la distancia horizontal estimada en la que se movió el bloque de Yucatán hacia el sur es de entre 470 y 520 km (Buffler y Sawyer, 1985; Pindell, 1985).

El movimiento del Bloque Maya hacia el sur ocurrió a lo largo de dos sistemas de fallas transformantes, el sistema occidental fue denominado Falla Transformante Tamaulipas-Golden lane-Chiapas por Pindell (1985), Falla Tamaulipas-Oaxaca por Robín (1982) y Padilla y Sánchez (1986), mientras que el sistema oriental solamente ha sido mencionado pero no ha recibido un nombre más formal. La falla transformante tuvo un papel muy importante en la apertura y posterior evolución del Golfo de México porque; (1) la forma de arco de círculo que tiene y que apoya un deslizamiento lateral del Bloque de Yucatán a lo largo de ella durante el Jurásico Temprano, que hace girar a Yucatán unos 49° en sentido contrario al de las manecillas del reloj, lo cual es concordante con los datos paleomagnéticos de Guerrero-García (1975) y Pindell y Kenan (2003), (2) al finalizar el Calloviano cambia su desplazamiento lateral nuevamente a vertical y actúa como un sistema de fallas normales que favorecen la subsidencia del piso del Golfo de México (Padilla y Sánchez, 1982; Alanís-Álvarez et al., 1996).

Al terminar el Calloviano El Bloque de Yucatán alcanzó la posición que ocupa actualmente y desde entonces solo estuvo sujeto a una subsidencia lenta pero continua, hasta la época del Plioceno-Pleistoceno, cuando comenzó a emerger. Es en esta época que el terreno Maya comienza a recibir sedimentos marinos en su porción norte.

2.4.2 TRANSGRESIONES MARINAS JURÁSICAS

Durante el Jurásico superior se desarrollaron amplias plataformas de aguas someras a todo lo largo de los bordes del Protogolfo de México en las que se depositaron grandes volúmenes de carbonatos y probablemente también algunos depósitos de sal en la parte noroccidental del macizo

de Chiapas (Viniegra, 1971). Hacia fines del Tithoniano continuaba la gran invasión de los mares en el Golfo de México, la mayoría de las islas del occidente del golfo de México fueron cubiertas por los mares Jurásicos pero permanecieron emergidas las partes más elevadas incluyendo el Bloque de Yucatán. Para el Cretácico Superior (Hauteriviano-Barremiano, 132 a 121 ma), aumentó la velocidad de subsidencia de las plataformas que bordeaban el Golfo de México, favoreciendo el depósito de gruesos paquetes de carbonatos con espesores superiores a los 1,500 m en promedio.

En este tiempo, el archipiélago de Tamaulipas fue totalmente cubierto por los mares y solo quedaron emergidos los Bloques de Yucatán, Chiapas y la Isla de Coahuila. El depósito de evaporitas continuó en extensas zonas de plataformas someras con circulación restringida (Salvador, 1991b). Al inicio del Aptiano en un período que duró alrededor de 5 millones de años, el mar cubrió definitivamente los altos del basamento que habían estado emergidos desde los inicios de la transgresión marina que inicio en el Jurásico Temprano. A finales del Cretácico se incrementó el depósito de sedimentos clásticos del noroeste y del occidente del Golfo de México durante las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide, al tiempo que continuaba la sedimentación marina sobre el bloque de Yucatán y la parte norte del Macizo de Chiapas. A principios del Paleógeno la parte sur del Bloque Maya continuaba emergido mientras que sobre la parte norte se depositaban secuencias muy gruesas de clásticos, de acuerdo con Ambrose et al. (2003), durante el oligoceno continuó el depósito de clásticos en todo el sureste mexicano.

2.4.3 EMPLAZAMIENTO ACTUAL DEL BLOQUE DE YUCATÁN

Durante el Mioceno medio se forma la cadena plegada Reforma-Akal a partir de un Decollement a nivel de la sal calloviana, formando pliegues orientados NW-SE. El Bloque de Yucatán tuvo un desplazamiento hacia el noreste, lo cual es evidente debido al estilo de fallamiento normal en bloques que se observa en el subsuelo (Viniegra, 1971). Este movimiento se manifestó en la porción sur del Golfo de México, dando lugar al rompimiento del basamento en bloques y a la subsidencia diferencial de los mismos, intensificándose estos movimientos durante el Mioceno (Aguayo-Camargo, 1987). El desplazamiento hacia el oriente de La Placa del Protocaribe, produjo el movimiento distensivo del borde oriental del Bloque Yucateco, lo que dio origen a la formación de la cuenca de Yucatán y a la Trinchera del Caimán en el mar Caribe. Dicho movimiento reactivó a la falla Motagua-Polochic, lo que provocó a la vez que el Bloque Maya girara en sentido de las manecillas del reloj, generándose los sistemas de fallas de transurrencias que deformaron a las rocas del Mesozoico y del Paleógeno inferior, que conforman a la sierra de Chiapas. La rotación de la península de Yucatán también es apoyada por datos paleomagnéticos obtenidos por Curran y McDonald (1977).

Al final del Plioceno y el Cuaternario la península adquiere la forma actual, no obstante en el norte se siguen desarrollando arrecifes en el banco de Campeche. Su configuración sigue gobernada por los desplazamientos continuos del continente y de las placas oceánicas. La península continúa desplazándose en sentido de las manecillas del reloj hasta tomar su posición actual (Aguayo J. E., et al., 1996).

3. GEOLOGÍA LOCAL DEL ÁREA DE INTÉRES (PREDIO EL FAKIR)

3.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

El reconocimiento de la geología superficial del predio el Fakir se realizó a través de un muestreo sistemático, el que presentó la dificultad del desmonte de algunas áreas, ya que la extensa cubierta vegetal impide ver adecuadamente las unidades aflorantes, que corresponden a intercalaciones entre calizas y yeso con algunos horizontes de arcillas de las formaciones Icaiché y Chichen Itzá del Paleoceno-Eoceno. Las técnicas de muestreo empleadas consistieron en la excavación de zanjas de poca profundidad y la toma de muestras de los afloramientos superficiales.

Los yesos se observan en pequeños afloramientos a lo largo de la extensión del predio así como en cortes superficiales junto a la carretera, su aspecto es cristalino de color blanco variando a beige y pardo con intercalaciones arcillosas, presentan marcas de disolución y en afloramientos masivos se puede ver cavidades de disolución, en algunos intervalos se observa muy puro y en otros se pueden observar horizontes con mucho contenido de arcillas.

Intercaladas con los yesos se observan horizontes de calizas microcristalinas de color crema claro a pardo con contenido arcilloso y presencia de algunos clastos y oolitos como se observa en la fotografía 2. Dichas calizas presentan marcas de disolución y en algunas zonas se puede observar karsticidad.



Fotografía 2. Afloramiento de yesos en el corte sobre carretera federal 184 Escárcega-Chetumal

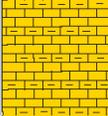
Sobreyaciendo a las unidades anteriores se tienen depósitos de Sashcab con espesores que varían de 0.5 m a más de 4 m de profundidad (Tabla 2), se observa semiconsolidado en algunas zonas y muy deleznable en otras, su color varía de blanco a beige claro. El Sashcab está cubierto por suelos con alto contenido de materia orgánica pero su espesor es muy reducido siendo este de entre 10 y 15 cm en promedio. No se pudo realizar un levantamiento geológico estructural debido a la escasez de afloramientos y porque las unidades aflorantes presentaban una avanzada alteración.

3.2 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para un mejor reconocimiento de la geología del subsuelo dentro del predio el Fakir se realizaron dos perforaciones de 31.5 metros cada una; Fk 1 y Fk 2, en dichos barrenos se reconocieron a través de muestras (núcleos de perforación) tomadas a diferentes profundidades horizontes de yesos con distintas características, encontrándose yesos color blanco a pardo oscuro asociados y en diversas concentraciones con terrígenos y arcillas como producto de alteración, presencia de sulfuro de fierro (pirita) y algunos horizontes de yeso más puro (anhidritas), también se observan intervalos muy arcillosos producto de la alteración de los yesos (tabla 2).

Hacia la parte superior del barreno a una profundidad promedio de 0.30 a 5 m se tiene material carbonatado muy poco consolidado, con partículas del tamaño de arenas color blanco a beige (Sashcab) en él se observan clastos de calizas y yesos.

Tabla 2. Columna estratigráfica del predio “El Fakir”. Xpujil Campeche SGM, 2007.

m.	Litología	Descripción
0 a 0.30		Suelos oscuros con alto contenido de materia orgánica
0.30 a 5		Material carbonatado poco consolidado “Sashcab”
5 a 15		Calizas arcillosas microcristalinas Formación Icaiché
15- ?		Yesos con intercalaciones arcillosas y limosas Formación Icaiché

4. APROVECHAMIENTO POTENCIAL DEL YACIMIENTO

4.1 MINERALOGIA DEL YESO

El yeso tiene múltiples aplicaciones, ya sea en estado crudo o calcinado, siendo utilizado en actividades industriales, agrícolas y construcción. Con la aplicación de una moderada cantidad de calor en un proceso conocido como calcinación, el yeso se convierte en Yeso de Paris, un hemihidrato de sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), cuando se mezcla con agua obtiene gran firmeza ya que el sulfato de calcio regresa a su forma dihidratada estable. Este producto casi ya terminado se llama estuco, que entonces se manufactura en una gran variedad de mezclas, como recubrimiento de paredes, bloques para construcción o en mezclas para aplicaciones industriales como el blanqueado de pinturas. Algunas variedades de alabastro son usadas para decorar interiores y en esculturas.

El yeso calcinado se usa principalmente como un retardador para el cemento Portland, como aditivo para consolidar el suelo y como mineral de relleno y otras aplicaciones menores en la industria.

El yeso y la anhidrita son sulfatos naturales que dependiendo de su estabilidad (grado de hidratación), la anhidrita puede transformarse en yeso y por pérdida de agua el yeso se convierte en anhidrita. Entre los sulfatos de calcio de interés comercial, se tiene: selenita, alabastro, gipsita, yeso y anhidrita, el yeso propiamente como tal es de principal interés comercial y tecnológico. El yeso es un sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 * 2\text{H}_2\text{O}$) teóricamente compuesto por CaO (32.5%), SO_3 (46.6%) y H_2O (20.9%). La anhidrita (CaSO_4) está compuesta por CaO (41.2%) y SO_3 (58.6 %). Es un mineral de color blanco cuando no contiene sustancias extrañas, pero a menudo tiene coloración gris, amarilla ó rosada; fácilmente se raya con la uña; su gravedad específica varía de 2,26 á 2,31; es soluble en quinientas veces su peso de agua, y su solubilidad disminuye cuando la temperatura del agua excede de 35° C.

La basanita ($\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), es una fase intermedia distintiva entre anhidrita y yeso, pero solamente es identificable por difracción de rayos x o con petrografía usando muestras muy cuidadosamente preparadas. La basanita es metaestable bajo condiciones normales (Wood y Wolfe, 1969); sin embargo, su ocurrencia en cantidades menores al 1%, puede ser encontrada en depósitos de sulfato de calcio. La basanita es un estuco natural.

El Yeso es un típico mineral de ambiente sedimentario evaporítico, formado a través de la precipitación directa de aguas salinas o a través de la alteración de anhidritas. También se puede formar por la sublimación directa desde fumarolas o precipita a través de tubos volcánicos submarinos. Los depósitos de yeso formados a través de precipitación son por lo general masivos, con un gran espesor y están intercalados con horizontes de calizas.

4.2 PASOS DE LA EXPLOTACIÓN MINERA

De acuerdo a la geología de la zona de estudio y por los materiales encontrados durante el muestreo superficial y en bancos de material cercanos al predio, se puede hablar de varios materiales susceptibles de poder comercializarse como el yeso, la piedra caliza, y el Sashcab superficial. Los bancos de material adyacentes manejan las sustancias extraídas como materiales de construcción, por ejemplo; gravas, arenas, adobes fabricados con restos de los materiales antes mencionados, por lo que se puede decir que la región es autosuficiente, los concretos y otros agregados provienen de zonas en donde estos materiales alcanzan mayor pureza, los presentes estudios se enfocan precisamente en determinar la pureza de dichos materiales y si son aptos para la elaboración de cemento y otras sustancias.

La explotación de los yacimientos de yeso se realiza a cielo abierto, mediante métodos de banqueo, el arranque del material se realiza mediante barrenación, cargado con explosivo y voladura; en algunos casos puede realizarse mediante métodos mecánicos dependiendo de la dureza del mineral. El movimiento del material se hace con palas frontales o cargador frontal y camiones que realizan el transporte del yeso a planta.

A continuación se describen de manera general las etapas principales de un proyecto minero. En el presente trabajo se han realizado las etapas correspondientes a la exploración del yacimiento y a la cuantificación de reservas; las etapas posteriores correspondientes al estudio de factibilidad, diseño de minado, preparación y desarrollo, y finalmente la explotación se realizarán posteriormente de acuerdo a las recomendaciones emitidas de acuerdo a los resultados de este trabajo.

Los pasos principales a seguir para la explotación minera en general se enlistan a continuación:

- I. Cateo y Prospección Geológica: es la búsqueda de zonas geológicas susceptibles de explotación (vetas, diseminados, lavaderos) en zonas en las que se presume la existencia de un yacimiento mineral.
- II. Solicitud de una concesión minera: si los resultados de las actividades de cateo son positivos se solicita a través de la autoridad competente una concesión minera. La concesión minera otorga a su titular, el derecho a la exploración y explotación de los recursos minerales concedidos.
- III. Exploración. Con la información de campo se conforma un archivo. Se realiza un análisis de las muestras para determinar la cantidad y calidad del mineral posible de extraer. Se determinan las reservas, tonelaje y leyes. Estos estudios se realizan a través de:
 - a) Cartografía geológica, general y a detalle a través de cartas geológicas a escalas 1: 5000 y 1:1000, apoyados en campañas de muestreo, petrografía y sondeos a profundidad.
 - b) Estudios específicos mediante estudios estructurales a detalle, impacto ambiental, zanjas y calicatas.
 - c) Frente piloto con extracción de muestras, ensayos de caracterización y sondeos de mercado y proyectos de explotación.
- IV. Estudios de Factibilidad del Proyecto. Consiste en un estudio económico para determinar la rentabilidad del proyecto de acuerdo con los costos a valor presente derivados de la extracción del mineral y de los precios en el mercado del producto. A partir de este estudio se determina si la explotación del yacimiento es rentable.
- V. Estudios de Impacto Ambiental. Este se exige a todos los titulares de concesiones mineras que proyectan iniciar la etapa de explotación. Son las acciones de orden técnico, legal, humano, económico y social, para evitar la degradación del medio ambiente, a niveles que afecten los ecosistemas, la salud y el bienestar social.
- VI. Desarrollo y Explotación minera. Esta dependerá de las características del yacimiento y las condiciones del entorno, la profundidad máxima de extracción del material será dependiendo de la ubicación de las zonas con mayor calidad del material según el propósito para el que este se emplee, y los espesores que se encuentren. Los trabajos que se desarrollarán en la explotación se pueden dividir en 4 fases:

- a) Remoción de la cubierta de suelo y vegetación (desmonte) y almacenarlos en forma de cordones alrededor de la obra.
- b) Extracción de yesos. El sistema de explotación será siguiendo el esquema tradicional de banqueo con los camiones de acarreo situados dentro del hueco excavado, el número de bancos dependerá de la profundidad de los materiales elegidos para la explotación; el arranque de los materiales se lleva a cabo mediante voladura y métodos mecánicos. Posteriormente se realiza la carga de los materiales y transporte a la planta de beneficio mediante palas mecánicas y camiones de volteo
- c) Beneficio del mineral: En el caso del yeso este se calcina para que pierda su agua de combinación de 120°C a 100°C y se transforma en sulfato cálcico anhidro, que al batirse con agua se hidrata y cristaliza en masa. La temperatura de calcinación más conveniente para un fraguado rápido es la de 140°C , hay que cuidar no llegue a 160° , porque el yeso así obtenido recupera el agua muy lentamente. En las fábricas modernas la calcinación del yeso suele hacerse empleando un tostador de helicoide, cuya inclinación y velocidad se fijan de modo que las piedras se cuezan al recorrer el cilindro que se calienta por el exterior. Otras veces, en el interior del helicoide se inyecta vapor de agua recalentado, lo que parece introduce notable economía. Cualquiera de los dos métodos produce una mezcla muy uniforme y yeso de buena calidad.
- d) Comercialización. Después del molido se hace pasar el yeso por un tamiz de 144 mallas por centímetro cuadrado; el residuo sobre el cedazo se muele de nuevo, y el polvo que pasa por él se apila en los almacenes ó se envasa en sacos de 25 á 40 litros de capacidad. El yeso tiene gran avidez por el agua, con la que se combina con facilidad; cuando ha absorbido humedad al amarlo se forma una mezcla pulverulenta que no fragua, razón por la cual conviene conservarlo en sitios secos y fuera del contacto del aire húmedo.

Batido el yeso con agua se transforma en sulfato

cálcico hidratado, confusamente cristalizado, siendo ésta la causa de su endurecimiento, y por consiguiente, de su fraguado.

- VII. Restauración de la zona explotada. Consiste en restituir las condiciones naturales del sitio, mediante recubrimiento de la zona con suelo fértil y promoviendo la reforestación del lugar.

4.3 ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL Y NORMATIVIDAD

Como se menciona en el apartado V de los pasos principales de la explotación minera, los titulares que obtienen una concesión minera están obligados a presentar un estudio con las acciones a tomar para evitar la alteración o degradación del medio que rodea la zona de posible explotación (Secretaría de Economía, 2003). Además de estas medidas, se cumplirán las condiciones de normatividad solicitadas por las autoridades encargadas de supervisar la explotación de los recursos naturales, en este caso de las comisiones nombradas por la Secretaría de Economía publicadas en el diario oficial de la federación **el 15 de Febrero de 1999 y que abroga el publicado en el mismo diario el 29 de marzo de 1993 y las disposiciones que menciona La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente publicada en el diario oficial de la federación cuya última reforma se publicó el 16 de mayo de 2008**

El título cuatro capítulo 8 de la ley de equilibrio ecológico y protección al ambiente del Estado de Campeche emite recomendaciones para evitar daños al ambiente en el caso de explotación de recursos minerales no reservados a la federación. Los cuales se pueden complementar con las siguientes recomendaciones (Dirección General de Evaluación Ambiental, Castilla España, 2009). Se debe presentar una descripción del proyecto definido en el estudio de impacto ambiental; para evitar daños a parcelas contiguas, evitar accidentes por caídas y que no haya vertido de desechos en el hueco dejado por la explotación, se deberá instalar un cerramiento eficaz en torno al perímetro de la explotación, instalándose una malla permeable para la fauna silvestre. Cualquier modificación del proyecto original como una ampliación, deberá presentarse con un nuevo estudio de impacto ambiental.

Como protección a caminos y fincas colindantes se respetará sin explotar una franja lo suficientemente grande para instalar una pantalla vegetal alrededor de la zona de explotación, y el resto se podrá utilizar única y exclusivamente para las labores de restauración en los taludes. Se aprovecharán los caminos existentes para el tránsito de la maquinaria pesada hacia la explotación, procediendo a su mejora, mantenimiento y adecuación al tráfico pesado que va a soportar.

Para evitar la producción de polvo, y durante períodos secos, se efectuará el riego de los caminos y de la propia cantera añadiendo aditivos higroscópicos no contaminantes al agua de forma que disminuya la evaporación, los camiones encargados del transporte del material deberán ir debidamente cubiertos con lonas que minimicen la emisión de polvo y materiales en suspensión a la atmosfera, incluso los días sin viento (Gobierno del Estado de Campeche, 2009).

No se permitirá en ningún caso el seccionamiento ni la afectación al nivel freático, por lo que se limitará la profundidad de las excavaciones a un metro por encima de la cota máxima que alcancen el nivel freático de las aguas. No se realizarán vertidos de materiales de obra, escombros, residuos sólidos urbanos, residuos no inertizados o inertizados, o de dudosa caracterización o cualquier otro elemento que por erosión, escorrentía o lixiviación pueda afectar a las aguas superficiales y/o subterráneas.

Para evitar la afectación a la vegetación y a espacios protegidos se dejará una franja de protección al mismo, la protección al patrimonio histórico-artístico queda condicionada a las disposiciones que contempla el INAH para zonas en las que se encuentren restos arqueológicos.

Deberá contemplar un plan de recuperación ambiental, con proyectos para reforestación de taludes y plaza de canteras con especies arbóreas y arbustivas de la zona, la cual se deberá de certificar por las comisiones ambientales correspondientes en donde se certifique el tipo de especie utilizada y la homologación por parte de un vivero. Después, tanto a lo largo de la explotación como una vez finalizada la misma, y hasta que se constate el éxito de la cubierta vegetal protectora y la estabilidad del terreno frente a la erosión, deberán corregirse los surcos de erosión que aparezcan en el terreno restaurado. Al finalizar la explotación se procederá a la limpieza y recuperación de todas las vías originales que hubieran sido afectadas directa o indirectamente por aquella.

Una vez terminada la explotación se procederá a la retirada a vertedero de todas las instalaciones auxiliares (maquinaria utilizada, cerramiento instalado durante toda la actividad

extractiva, etc.), o bien su traslado a otros proyectos autorizados, de forma que el área afectada por la actividad minera quede libre de todo resto de la misma.

Es importante que cada uno de los puntos anteriores sea correctamente aplicado y homologado por las autoridades correspondientes ya que en la zona se pueden observar varios bancos de material abandonados (SGM, 2007) y sin ningún trabajo de restauración por lo que el suelo y la cubierta forestal tardaran varios años en reponerse. La afectación que pudieran tener los pobladores de la zona debido a la dinámica de la explotación no es de consideración ya que la magnitud de los terrenos permite que los bancos estén lo suficientemente alejados como para sufrir un impacto negativo por ruido y otros factores. Pero es de considerar un proyecto de restauración para evitar que estos bancos se conviertan en un foco de deforestación y saqueo de los recursos de la zona (Recomendaciones emitidas por La Dirección General de Evaluación ambiental, Castilla España 2009).

4.4 EL PROBLEMA DE LAS IMPUREZAS EN LOS DEPÓSITOS DE SULFATO DE CALCIO

El número de minerales que se puede encontrar en depósitos evaporíticos es bastante grande (Braitsch, 1971) y muchos pueden ser considerados como impurezas en los depósitos de Sulfato de Calcio, esta variedad es a menudo dependiente de la génesis de cada depósito en particular. Muchos depósitos de yeso y anhidrita contienen terrígenos y sedimentos clásticos calcáreos, comúnmente minerales arcillosos y arenas finas, así como precipitados químicos como carbonatos. Minerales evaporíticos relativamente insolubles como la celestita, ciertos boratos, algunos carbonatos y silicatos pueden encontrarse en estos depósitos como cristales muy discretos, agregados cristalinos o nódulos y en muchos casos con características originales de depósito.

Minerales evaporíticos solubles, como la halita, silvita, mirabilita, epsomita, y otros son encontrados frecuentemente en depósitos de Sulfato de Calcio. Esos minerales secundarios son expelidos de la anhidrita durante la yesificación, y más comúnmente vienen asociados con los minerales arcillosos que pueden estar presentes, probablemente adheridos a las superficies de las arcillas. El halo de hidratación de la mezcla yeso anhidrita contiene muchas veces sales solubles en cualquiera de los dos: anhidrita o yeso hidratado.

Al ser analizado, muchas muestras de yeso contienen en general del 10 al 15% de impurezas (Jorgensen, 1994), aunque algunos depósitos pueden ser excepcionalmente puros (hasta un 95% de pureza), o un tanto impuros (80%). En general, la cantidad de impurezas que pueden ser toleradas depende de:

- 1) El tipo de impurezas
- 2) Del producto a ser manufacturado
- 3) La situación económica del material

Basados en los efectos de las impurezas en los procesos de manufactura y en los productos finales, las impurezas se pueden separar en tres categorías:

1. Minerales insolubles o relativamente insolubles como las calizas, dolomita, anhidrita, arcillas anhídridas, minerales silíceos, etc.
2. Minerales evaporíticos solubles, incluyendo cloruros: halita, silvita, etc... y sulfatos: mirabilita, epsomita, etc.
3. Minerales hídricos, pero insolubles; por ejemplo las arcillas del grupo de la montmorillonita.

Los minerales de la primera categoría pueden reemplazar al yeso, reducen la resistencia del estuco rehidratado e incrementan el peso de la masa o recubrimiento; por ejemplo: más kilogramos de un estuco impuro se requieren para obtener una resistencia determinada. Esos minerales ocasionalmente actúan como un acelerador de la hidratación y muchos depósitos de yeso comercial contienen, a lo más de 10 al 15% de esas impurezas insolubles.

La presencia de la segunda categoría de impurezas afecta la temperatura de calcinación y la fluidez de la masa de estuco. Esos minerales están usualmente limitados a no más de 0.02 a 0.03% en peso de la masa de roca de yeso y afectan fuertemente la presión de vapor a la que se efectúa el fenómeno de hidratación-deshidratación del yeso.

El principal impacto de las impurezas de la tercera categoría es la aceleración de la humedad del producto final y de la adhesión característica del estuco de yeso en los recubrimientos donde se utiliza, las arcillas hídricas pueden ser toleradas hasta en un 1.0 al 2.0%.

5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El estudio se dividió en tres etapas:

- En la primera etapa se llevó a cabo la exploración geológica superficial a detalle, así como recolección de muestras para su análisis geoquímico y petrográfico.
- Una segunda etapa consistió en realizar un estudio geofísico de resistividad eléctrica mediante tendidos que cubrieron una zona aproximada de 3,000 m de largo por 1,450m de ancho.
- Una tercera consistió en analizar la información obtenida por medio del muestreo superficial y análisis petrográfico de dichas muestras y correlacionándolo con los resultados del estudio de tendidos SEV'S; se generó un modelo geológico preliminar del banco de materiales el cual se dividió en varios horizontes con características distintivas propias.
- Con base a los resultados obtenidos en la primera etapa se propuso la realización de dos sondeos exploratorios con barrenación y recolección de muestras de aproximadamente 50 m de profundidad cada uno, los cuales cortaron las distintas unidades tentativas en que se dividió el subsuelo.
- Posteriormente se realizó la petrografía y análisis geoquímico de las muestras obtenidas en la perforación para correlacionar sus características con los datos obtenidos en el estudio geofísico y clasificar adecuadamente cada unidad.

5.1 MUESTREO SUPERFICIAL

El presente estudio se realizó a petición de la empresa Blanmin S. de R. L. de C. V. y tiene por objetivo evaluar geológicamente el predio denominado “El Fakir”, mediante la determinación de tipo de material, la calidad y volumen del o los materiales presentes; a través de un estudio de exploración geológica, el que se estructuró en dos etapas; la primera consistió en la evaluación geológica a detalle y marcado de la poligonal que delimita al predio, en donde se llevó a cabo una recolección de muestras y levantamiento mediante ubicación de puntos topográficos; también se realizó un estudio de resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo en la zona de estudio para cubrir un área aproximada de 3,000 m x 1,450 m.

El muestreo superficial se llevó a cabo marcando cada punto para facilitar su posterior localización, asimismo se obtuvieron las coordenadas de cada punto de muestreo mediante el uso de navegadores GPS autónomos de mano marca Garmin, en el sistema de coordenadas UTM (Universal transversal de Mercator) zona UTM 16Q y Datum Geodésico WGS 84 (World Geodetic System 1984)

los puntos de muestreo se observan en la fig. no. 7, así como los límites del predio. La nomenclatura utilizada para cada una de las muestras colectadas en superficie y para su respectivo análisis en laboratorio, está compuesta por las letras (FK) correspondiente a Fakir seguida de dos caracteres numéricos (01-00) que indican el número de muestra como se muestra en la fig. 6. Los datos registrados en la bitácora de campo y mostrados en la tabla no. 3 fueron:

1. Posición del punto.
2. Clave.
3. Descripción General.



Fig. 6. Nomenclatura para muestras de superficie.

Durante la recolección de las muestras fue necesario realizar excavaciones llamadas catas, en algunas zonas mediante la excavación de zanjas y pozo a cielo abierto ya que la mayor parte de la superficie del predio está cubierta por suelos y por Sashcab, que en algunas partes presenta mayor grado de consolidación, también se tomaron muestras en afloramientos superficiales de calizas y yesos, los cuales presentan distintos grados de alteración y en otros se observa disolución y karsticidad en los mismos; con la apertura de las catas se pudieron observar yesos y calizas subyaciendo al Sashcab pero no se pudieron conseguir muestras a más profundidad.

En el muestreo se contó con la participación de pobladores de la localidad de Chichonal, poblado muy cercano al predio el Fakir, lo que tuvo una repercusión económica para ellos y sus familias, estos pobladores cuentan con un amplio conocimiento de la zona, ubicada dentro de la selva tropical lluviosa característica de la reserva de la biosfera de Calakmul.

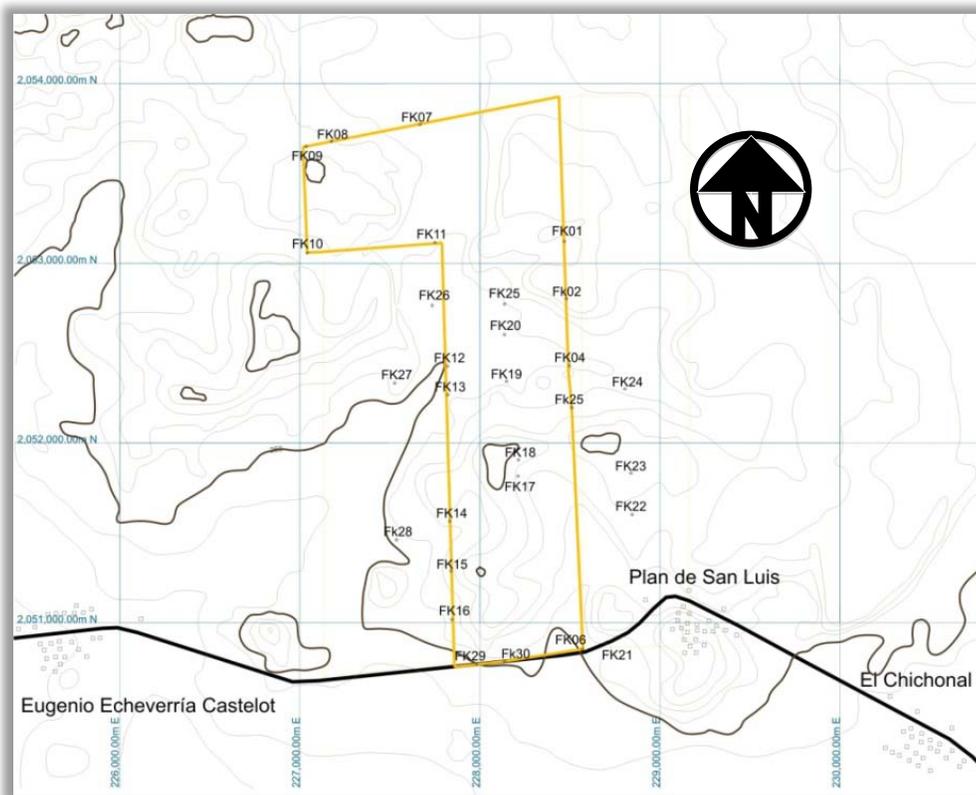


Fig. 7. Puntos de muestreo en el Predio “El Fakir”.

Los datos tomados en cada punto de muestreo se registraron sistemáticamente con el siguiente formato:

MUESTRA	COORDENADAS DE PUNTO DE MUESTREO			DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS
	ESTE	NORTE	ALTITUD	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA
Fk 01	228469.289	2053121.55	274.5802	Sashcab material blanco de aspecto terroso.
Fk 02	228480.67	2052803.38	296.45	Caliza Cristalina, roca de color pardo claro con marcas de disolución.
Fk 03	228485.283	2052763.7	284.1934	Sashcab material blanco de aspecto terroso.

Tabla 3. Registro de datos de muestreo superficial.

Los datos de coordenadas y descripción de las 30 muestras tomadas en campo se presentan en el Anexo A de este trabajo así como en la carta adjunta que se elaboró con los datos recopilados en campo.

5.2 ESTUDIO GEOFÍSICO

5.2.1 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Adicionalmente al muestreo superficial, la exploración geológica del predio el Fakir se apoyó en el estudio geofísico de resistividad, mediante la aplicación del método de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV'S), el que se realizó para caracterizar las unidades que se pudieran encontrar en el subsuelo, la litología, discontinuidades, y posteriormente cuantificar los espesores y volúmenes de los materiales reportados e identificados a través de curvas de resistividad. A pesar de que hay otras técnicas, las cuales pueden ser más modernas y precisas, sin embargo el aspecto logístico y económico fue determinante para la elección de este método.

El método de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV'S) consiste en cuantificar una propiedad física de los materiales, en este caso se trata de la resistencia (R) que oponen los materiales al paso de una corriente eléctrica, cuya ecuación general es: $R = \rho \frac{\text{longitud}}{\text{sección}}$ (Ley de Ohm), donde ρ es la resistividad, un parámetro característico de cada material. R (Ω) se obtiene al dividir la diferencia de potencial (volts) entre la intensidad de corriente (amperes) $R = \frac{\Delta V}{I}$ ($\frac{v}{Amp}$), posteriormente se despeja en la primera ecuación y obtenemos ρ (resistividad) en $\Omega \cdot m$ (ohms por metro).

Los valores de resistividad de los materiales rocosos están determinados principalmente por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad). Algunos valores de resistividad de suelo y roca son:

- Rocas ígneas y metamórficas inalteradas: > 1000 $\Omega \cdot m$
- Rocas ígneas y metamórficas alteradas: 10 a 1000 $\Omega \cdot m$
- Calizas y areniscas: 100 a más de 1000 $\Omega \cdot m$
- Arcillas: 1 a 10 $\Omega \cdot m$
- Limos: 10 a 100 $\Omega \cdot m$
- Arenas: 100 a 1000 $\Omega \cdot m$

Para medir la resistividad del subsuelo se introduce una corriente continua de intensidad I, mediante dos electrodos, denominados A y B, conectados a una fuente de energía, se mide la diferencia de potencial ΔV , generada por el paso de la corriente, entre dos electrodos denominados M y N como se muestra en la fig. 8, después se calcula la resistividad del espesor del terreno afectado por el paso de la corriente (Sánchez-San Román, 2004).

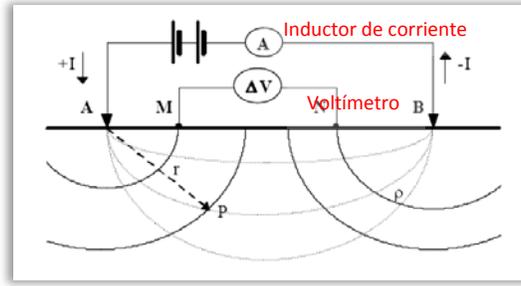


Fig. 8. Medida de resistividades del terreno mediante métodos eléctricos (González de Vallejo, 2005).

La resistividad que se obtiene no corresponde a una unidad litológica en sí, sino que define al conjunto de materiales afectados por la corriente, y se denomina resistividad aparente (ρ_a): $\rho_a = (K\Delta V/I)$, donde K es la constante de configuración geométrica del dispositivo en cada medida, que depende de las distancias entre electrodos AM, MB, AN, y NB (fig. 9). Lo más frecuente es utilizar configuraciones de distancias normalizadas, siendo las más comunes las denominadas Schlumberger (ver en fig. 9) y Wenner, la primera es simétrica, con los electrodos de potencial MN interiores y alineados con los de corriente AB y separación entre M-N inferior a 1/5 de A-B. En la segunda la disposición es igual, salvo que las distancias A-M, M-N, y N-B son iguales (González de Vallejo, 2002).

Durante la toma de datos en un SEV los electrodos de corriente A-B se separan sucesivamente del punto central, siguiendo una línea recta, y midiendo la resistividad en cada disposición. La corriente aparente calculada será por tanto, la correspondiente a mayores espesores según se van separando los electrodos. Se emplea generalmente la configuración Schlumberger. El resultado que se obtiene del SEV es la variación de la resistividad ρ con la profundidad en el punto central del perfil investigado. Las profundidades más habituales de investigación son entre 0 y 200 m.

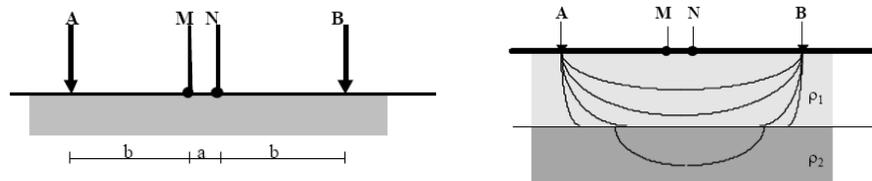


Fig. 9. a) dispositivo Schlumberger, b) a medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas

Los resultados se presentan en un gráfico logarítmico, en abscisas la distancia AB/2 de cada medida, y en ordenadas la resistividad aparente de cada punto. Esta curva es la que se interpreta,

para conseguir los espesores y resistividades de las formaciones geológicas en la zona en la que se ha realizado el SEV.

El dispositivo usado durante la toma de datos en el predio el Fakir fue el arreglo Schlumberger, variando la distancia entre los electrodos y tomando las coordenadas en cada punto, se realizaron 5 líneas de tendido eléctrico con una longitud cada una de ellas de 2,095 m con dirección sur-norte y una separación entre cada línea de 350 m, con una longitud total de 1,320 m con dirección este-oeste, resultando en un total de 35 SEV'S, la ubicación de cada uno de ellos se muestra en la figura 10.

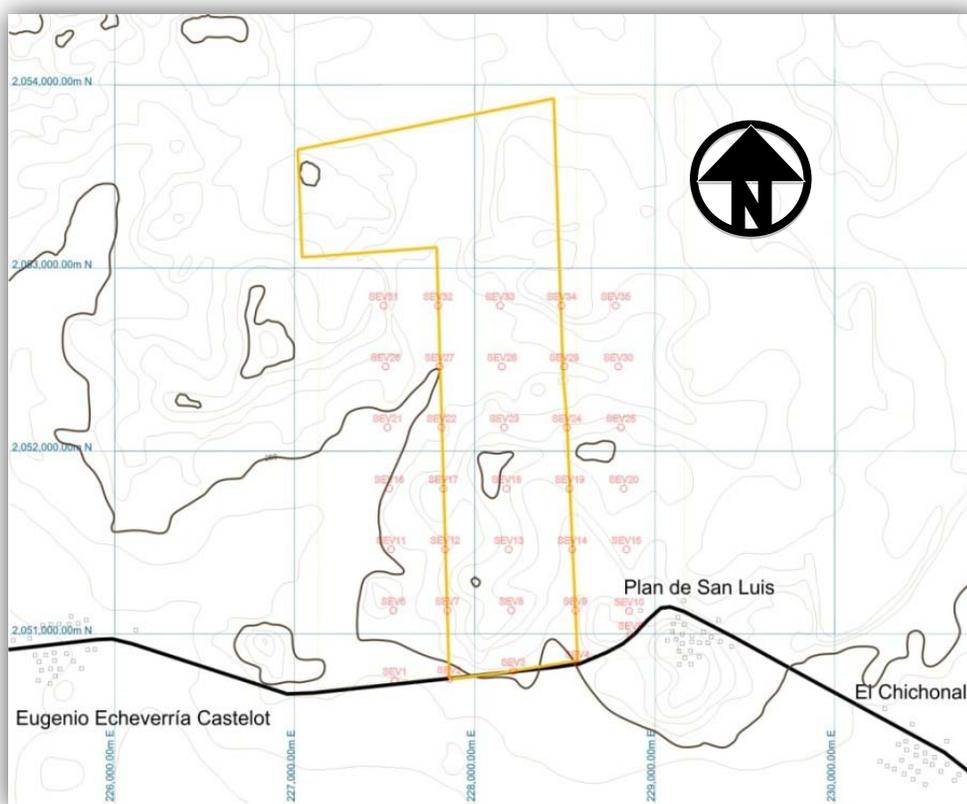


Fig. 10. Líneas de tendido geofísico realizadas en el predio "El Fakir".

Las coordenadas de cada sondeo se presentan en el Anexo B.

Después de procesar los datos obtenidos en cada tendido eléctrico, se realizó la caracterización de 6 unidades geofísicas con distintos rangos de resistividad, estas se correlacionan a partir de las distintas resistividades registradas a diferente profundidad. Una unidad geofísica

(UG) es un lugar con características físicas distintivas y un rango de valores propios. En la tabla 4 se presentan los rangos de valores de resistividad de cada una de las UG caracterizadas.

Unidades Geofísicas	Rango de Resistividades ($\Omega \cdot m$)
U1A	1-1281
U1B	14-39
U2	127-440
U3A	36-85
U3B	7-27
U4	47-2500

Tabla. 4 Unidades Geofísicas predio El Fakir.

A partir de estos valores se generó un modelo preliminar de las unidades litológicas en el subsuelo del predio, los valores de resistividad de un punto donde se realizó un SEV proporcionan zonas en donde hay un cambio en su valor, este cambio se interpreta como un cambio de un horizonte de material a otro con distintas características, interpolando los valores de resistividad de una zona con otros del mismo valor o que son muy aproximados, encontrado en el perfil de resistividad de otro SEV localizado en otro punto cercano, se puede dibujar un perfil que se aproxima a lo que se tiene realmente en la zona; se observan las unidades geofísicas obtenidas en una línea de tendido geofísico en la siguiente figura.

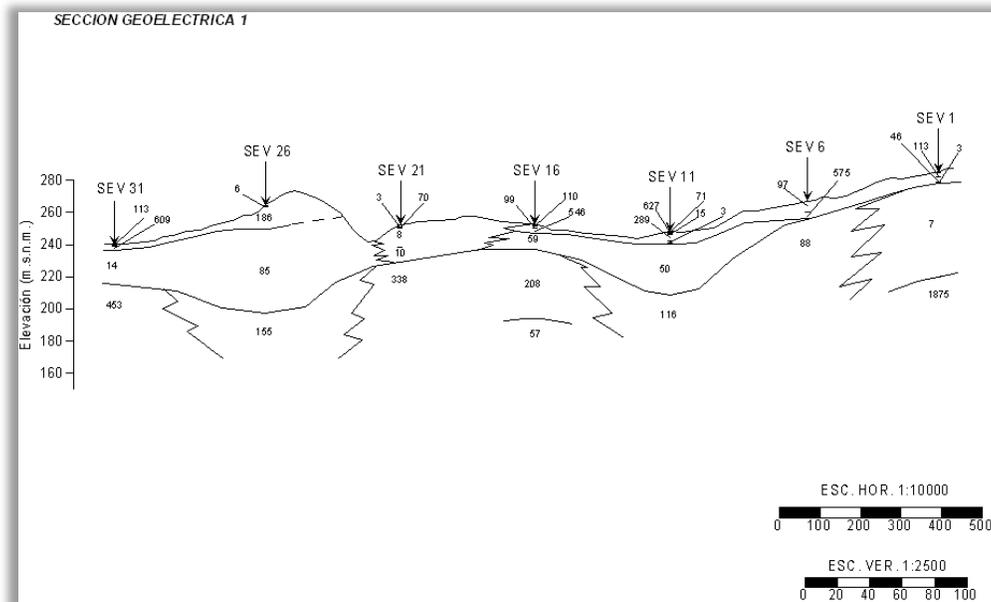


Fig. 11. Perfil de resistividades predio El Fakir, línea 1.

Los resultados obtenidos de cada una de las líneas de tendido eléctrico se presentan en el Anexo C, en ellas se observa la configuración de cada horizonte que corresponde a una unidad geofísica determinada.

Pero cuando se hace la interpretación de la curva de resistividades de una grafica se pueden obtener diferentes resultados de configuración de espesores del terreno ya que los datos obtenidos son a través de un método indirecto, además también se presenta el problema de que varios tipos de material pueden tener un valor de resistividad aproximadamente igual, por ejemplo de $100 (\Omega \cdot m)$; para solucionar estas ambigüedades lo conveniente es tener un perfil de resistividades ya ajustado a un perfil con información geológica de la zona.

Al no contar con esta información los perfiles obtenidos presentarán solo una aproximación de los horizontes de material del predio, pero estos podrían no corresponder a la realidad ya que, como se vio anteriormente, la configuración del terreno podría ser otra por lo que es necesario tener información precisa de la geología superficial y del subsuelo. Para esto se programó la realización de dos sondeos a una profundidad de 50 m (100 m totales) mediante perforación y recuperación de material, para así poder correlacionar la información obtenida mediante el estudio geofísico con los datos de los materiales encontrados durante la perforación.

5.3 MUESTREO POR SONDEOS A PROFUNDIDAD

A partir del estudio geofísico se pudieron caracterizar 6 unidades geofísicas, mismas que se muestran en el anexo correspondiente y donde se puede observar que en varios puntos donde se realizó un SEV; por debajo se localizan varias unidades geofísicas sobrepuestas una sobre otra sucesivamente, para realizar la perforación de dos barrenos se eligieron dos puntos en los que la perforación atravesara varias unidades geofísicas (ver ubicación en el plano adjunto), la perforación se realizó para poder establecer una relación entre los materiales que se pudieran encontrar durante la obtención de muestras en el sondeo y correlacionarlas con las unidades geofísicas obtenidas y descritas en el perfil de resistividad.

Con esta información y correlación se ha logrado elaborar una columna litostática del sitio, que se puede extrapolar a la zona o es representativa, adicionalmente las muestras obtenidas serán objeto de un estudio más detallado para conocer la calidad del material a esa profundidad como se puede ver en la fig. 12.

Se eligieron los puntos en donde se realizaron los SEV'S 3 y 4 cuyas coordenadas geográficas son:

CLAVE	ESTE	NORTE
SEV3	228214.5	2050809.5
SEV4	228570	2050852

Tabla. 5. Coordenadas de ubicación de los dos barrenos programados.

Se eligieron estos puntos debido a que estos se localizan a un costado de la carretera federal Escárcega-Chetumal y por lo tanto son de fácil acceso además de que son zonas en donde la perforación cortaría hasta 4 unidades geofísicas, respectivamente.

El barreno Fk1 correspondiente a la ubicación del SEV 3 cortaría las unidades geofísicas U1A, posiblemente la U3B, la U2.

El barreno Fk2 cortaría las unidades U1A, U2, y U3B, dichas unidades se encuentran en el rango de profundidad de 50 m, que es la profundidad máxima programada para cada uno de los pozos.

Dentro del predio se localizan zonas en donde se podrían sondear hasta cuatro unidades geofísicas, pero debido a la dificultad de acceso dentro de la zona que queda comprendida dentro en la región selvática, la instalación del equipo para llevar a cabo la perforación elevaría los costos del proyecto, ya que la perforación se llevó de manera comercial, el acceso a los sitios seleccionados solo requirió de desmonte de la vegetación adyacente a la carretera y no hubo necesidad de derribar ningún árbol o desecar alguna aguada o cualquier tipo de alteración al entorno.

La perforación se llevó a cabo en el período de octubre a noviembre de 2008. Se utilizó una perforadora Long Year modelo T-34 modificada con la adición de una torre para manejar con facilidad la tubería utilizada, las brocas utilizadas son de carburo de tungsteno colocados a la cabeza del tubo muestreador, este cuenta con un enganchador de tipo Swivel y la tubería es de 3 pulgadas de espesor, debido a estas características es necesario retirar toda la tubería a medida que se realiza el avance, para obtener la muestra, colocar la barrena y volver a introducir toda la tubería.

Se utiliza la circulación normal con agua de perforación adicionada con bentonita, la que se usa actualmente de manera normal durante la perforación.



Fotografía 3. Donde se aprecia el Equipo de perforación Long Year T-34, empleado durante la barrenación.

Por norma establecida para estudios de mecánica de suelos, la perforación superficial se hace mediante la alternancia de barrena giratoria y martillo hincador, en la perforación por percusión se cuenta el número de golpes necesarios para obtener la muestra, dato que posteriormente sirve para estudios de mecánica de suelos.

Después de atravesar el horizonte superficial de suelos, la perforación continúa normalmente con barrena giratoria, el tubo muestreador tiene una medida de 1.5 m con la barrena integrada, la muestra tomada es de 90 cm aproximadamente.

No se tuvieron problemas al atravesar la capa de Sashcab pero cuando se llegó a la capa de roca la propiedad del yeso de aglutinarse por cristalización después de hidratarse provocó que la barrena se saturara de material impidiendo la circulación de agua, este problema se solucionó al cambiar la broca por un modelo con ranuras más amplias que permitían el paso del agua de perforación, aunque ésta continuo de manera más lenta. La litología, número de fracturas, índice de calidad de roca y registro de profundidad, más otros datos se anotaron en la hoja de registro de datos de perforación, estos se presentan en el Anexo D.

Los núcleos obtenidos durante la perforación se guardaron en cajas portanúcleos (fotografía no. 4), las cuales permiten llevar el control de la profundidad y la cantidad de material recuperado; en cada caja se anota el número de pozo, el número de caja y el intervalo de profundidad de las muestras almacenadas, una vez almacenados en las cajas se procedió a describir cada núcleo y anotar los datos en la hoja de registro.



Fotografía 4. Recolección y control de muestras en caja portanúcleos.

A una profundidad de 10 m en promedio se tiene un sistemas de fracturas que provocó pérdida del agua de perforación en ambos pozos, pero se contaba con el suficiente número de tubos de ademado para impedir la perdida de agua, a una profundidad de 31 metros se encontró otro sistema de fracturas por disolución de los yesos, en este caso la profundidad era demasiada como para poder ademar todo el pozo, se tomó la decisión de detener la perforación porque ya se contaba con los datos suficientes para caracterizar los materiales a una profundidad suficiente.

Con estos datos se pudo obtener una columna estratigráfica hasta la profundidad de 31.5 metros lo suficiente para establecer una correlación con tres unidades geofísicas y extrapolar las propiedades de cada una de ellas a las unidades de cada una de las líneas de geofísica, y definir la litología de todo el predio.

Las columnas estratigráficas obtenidas durante la perforación de los pozos 1 y 2 en el predio El Fakir después de realizar la descripción de todos los núcleos de roca obtenidos se muestra en la fig. no. 12.

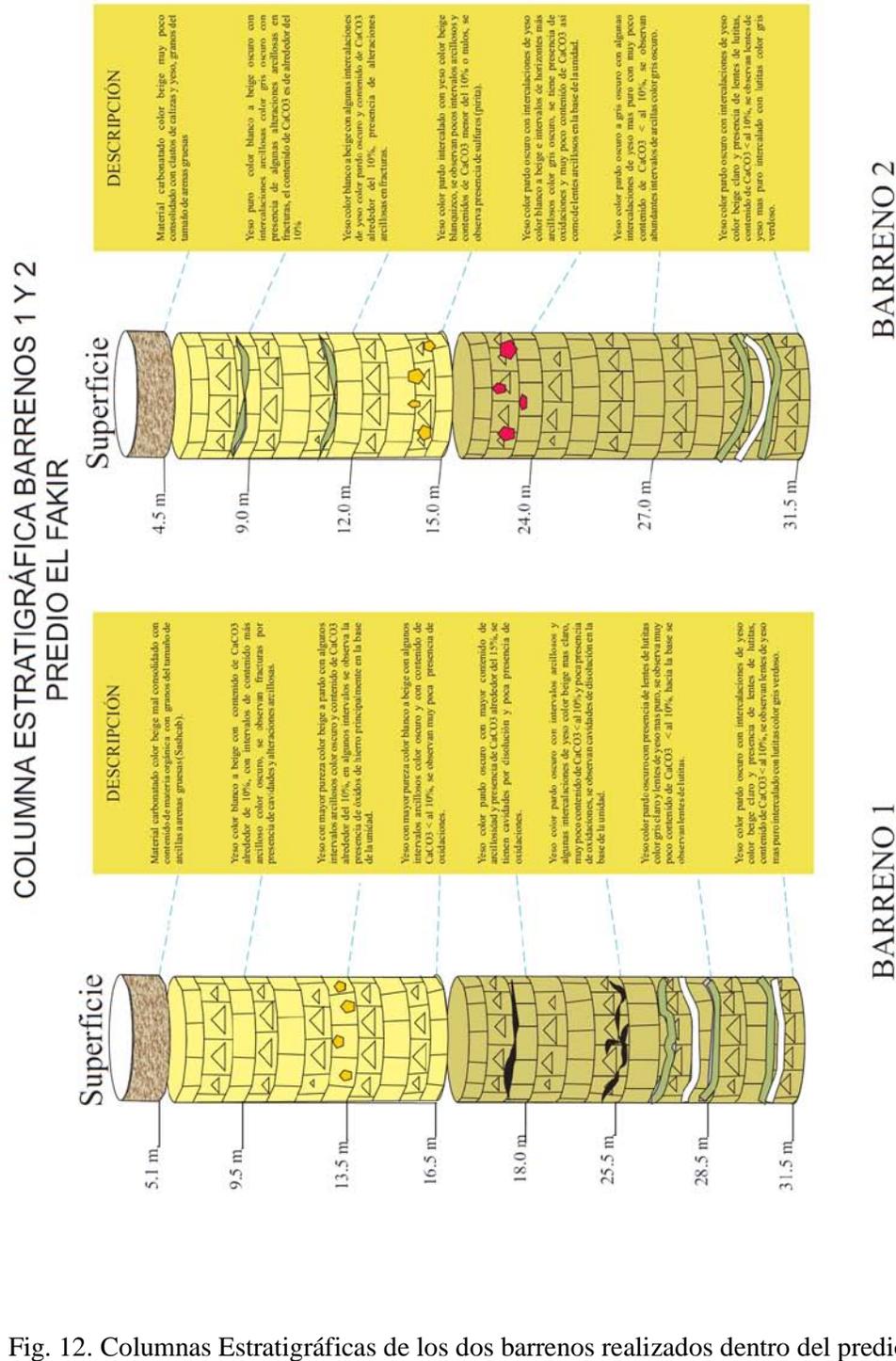


Fig. 12. Columnas Estratigráficas de los dos barrenos realizados dentro del predio.

5.4 ANÁLISIS GEOQUÍMICO

Las muestras colectadas durante la primera etapa de exploración se enviaron a los laboratorios comerciales de ALS CHEMEX LAB los cuales trabajan bajo los estándares de calidad internacionales ISO 9001:2000 e ISO 17025:2005, para su análisis geoquímico multielemental y determinar los valores de pureza de carbonato de calcio (CaCO_3) y de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), posteriormente se utilizarán para realizar un modelo geológico preliminar con la distribución de concentraciones mediante técnicas geoestadísticas de las zonas con mayor contenido de materiales aptos para la explotación comercial. Las técnicas utilizadas en laboratorio consistieron en análisis por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y análisis por Plasma Acoplado Inducido adicionado a un Espectrómetro de Masas (ICP-MASAS) método que se trabaja con la clave ME-XRF06 y que se complementa con el análisis ICP, cada una de las muestras recolectadas se colocó en bolsas plásticas con rótulo externo e interno y se envió al laboratorio, en el cual se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- Registro de cada muestra en el sistema del laboratorio.
- Molienda y cuarteo de cada muestra para homogeneizar el material.
- Pulverizado de cada muestra y cuarteo secundario.
- Análisis mediante Difracción de Rayos X para determinar la composición de la muestra por óxidos totales.

5.4.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

El método de análisis por fluorescencia de rayos X aprovecha la propiedad de los elementos de emitir radiaciones características cuando estos se irradian con un haz de rayos x de alta intensidad, al identificar la longitud de onda de cada una de estas radiaciones se puede saber que elemento es el que la emite y si se puede identificar la intensidad de la radiación se puede conocer la concentración del elemento en cuestión. Sus ventajas consisten en que se puede aplicar para cualquier elemento de número atómico mayor que cuatro (Berilio). Su simplicidad reside en que el espectro de emisión de rayos x es muy sencillo de obtener y de interpretar, por lo que la posición de las líneas de emisión no depende del tipo de compuesto, ni por el estado físico del material.

Se trata de un método no destructivo en el sentido de que la muestra no sufre daño durante el análisis. Las muestras analizadas pueden volverse a analizar las veces que se desee sin que sufran daños. Las muestras pueden encontrarse en una gran variedad de formas, tales como sólidos, pastillas, polvos, líquidos, películas finas e incluso gases, el material puede ser metal, mineral,

cerámico, vidrio, plástico, tela, etc. La forma y tamaño también puede ser variable. Es aplicable a un rango de concentraciones amplio, desde 0,001% hasta 100% en los casos más favorables, la sensibilidad es mayor, cuanto mayor sea el número atómico del elemento presente y menores los números atómicos de los que forman la matriz. El tamaño y la forma de las partículas son importantes y determinan el grado de absorción o dispersión del haz incidente. Los patrones y las muestras deben molerse a la misma finura de malla, de modo que los errores causados por las diferencias en la densidad aparente pueden evitarse adicionando un patrón interno a la muestra. Los polvos se prensan en forma de pastillas en una prensa para muestras metalográficas, o se transforman en una solución sólida fundiéndolos con bórax.

5.4.2 ICP (PLASMA ACOPLADO INDUCIDO)

Los análisis por plasma acoplado inducido (ICP-MASAS) al igual que la FRX nos permiten conocer el análisis cuantitativo y cualitativo de los elementos presentes en la roca, con la diferencia de que el principio físico es diferente, así como su capacidad de resolución. La ventaja de esta técnica radica en su alta resolución, por lo que se enfoca más al análisis de elementos traza y tierras raras.

5.4.3 GEOQUÍMICA

A continuación se presentan los resultados del análisis químico por FRX e ICP-MS de las muestras analizadas del área de estudio, los cuales se presentan en concentraciones de elementos mayores, los elementos mayores son los principales constituyentes estequiométricos de las fases que componen al sistema, en este caso de las muestras de rocas analizadas, generalmente se presentan como óxidos (% en peso).

CLAVE	SiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	CaO%	MgO%	Na2O%	K2O%	LOI%	Total	CaCO3%
Fk01	18.17	0.98	0.29	40.91	0.56	0.08	0.12	36.9	98.25	77.81
Fk02	0.5	0.12	0.03	52.69	0.42	0.06	0.01	45	98.87	97.69
Fk03	7.99	1.82	0.65	45.95	0.79	0.1	0.24	40.8	98.63	86.75
FK04	11.57	0.7	0.34	44.74	0.9	0.11	0.1	40	98.69	84.74
FK05	1.33	0.16	0.01	32.55	0.13	0.04	<0.01	21.9	56.2	54.45
Fk06	1.7	0.42	0.13	51.99	0.45	0.03	0.03	43.3	98.33	95.29
Fk07	6.68	0.8	0.21	48.68	0.59	0.06	0.12	40.9	98.32	89.58

Tabla 6. Valores del análisis químico por óxidos totales. Aquí se presentan solamente los elementos con mayor porcentaje en el análisis, los datos completos se muestran en el anexo D.

Los resultados completos de las 30 muestras se muestran en el Anexo E. los valores de la columna LOI corresponde a la perdida de material por calcinación de la muestra. El porcentaje total de la muestra es la sumatoria total de los valores obtenidos por óxidos totales. El porcentaje total de carbonato de calcio se obtiene estequiometricamente mediante la suma del óxido de calcio total con la perdida de materia por calcinación (oxígeno y carbón). Los cuales se vaporizan para el escaneo mediante FRX.

Las muestras de núcleos obtenidas durante la perforación de los dos pozos también se sometieron a análisis químicos por medio de los métodos FRX e ICP-MS además de las pruebas con clave C-IRO07 y S-IRO08 correspondientes presentan contenido de azufre y carbono. Se escogieron muestras de diferentes profundidades, a cada intervalo de muestreo de 1.5 m de espesor se le colocó una clave para diferenciarlo antes de obtener una muestra mediante corte con disco de diamante, consiguiendo así una pastilla de material, la cual fue enviada a los laboratorios para su análisis químico. La clave colocada a cada muestra consistió en la letra P seguida por el número de pozo (1-2) y después la una letra que define el intervalo de 1.5 m seguida por un número que representa el número de muestras tomada de ese intervalo, comenzando con la A hasta los 31.5 m de profundidad totales, ejemplo: primera muestra a partir del contacto con la roca; P1-A1 (6.0 a 6.5 m). El resultado de los análisis se presenta a continuación:

Muestra	Prof. (m)	SiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	CaO%	MgO%	SrO%	LOI%	Total	C%	S%
P1-A1	6.0-6.5 m	1.51	0.35	0.54	30.31	0.4	2.47	21.4	57.3	1.24	17.9
P1-C1	8.0-9.5 m	1.31	0.36	0.24	31.93	0.24	0.25	21.7	56.31	1.52	18.65
P1-D1	9.5-11.0 m	0.41	0.16	0.1	32.03	0.13	0.17	20.9	54.06	0.33	18.85
P1-F1	12.0-13.5 m	0.65	0.17	0.26	32.02	0.19	0.33	21.4	55.32	1.14	18.1
P1-G2	13.5-15.0 m	0.88	0.21	0.17	32.44	0.21	0.39	20.9	55.42	1.05	18.55
P1-I1	16.5-18.0 m	0.33	0.09	0.09	32.73	0.14	0.16	21	54.68	0.76	18.1
P1-K1	19.5-21.0	0.4	0.06	0.06	31.78	0.34	0.2	21.3	54.28	0.64	17.85
P1-A1	24.0-25.5 m	0.18	0.03	0.17	35.12	0.4	0.18	15.5	51.82	1.27	19.7

Tabla 7. Se presentan solamente los elementos con mayor porcentaje en el análisis, los datos completos se muestran en el anexo D.

Los contenidos de CaCO_3 y de CaSO_4 en ambos casos se obtuvieron con cálculos estequiometricos, el contenido total de sulfato de calcio hidratado de la primera muestra P1-A1 se obtuvo de la siguiente forma:

Se calcula el calcio total por medio de la masa molecular, el porcentaje total de CaO de la primera muestra (P1-A1) es de 30.31%, con este porcentaje se calcula el calcio total de la muestra por medio de la siguiente fórmula:

Porcentaje total de CaO de la muestra (% CaO) * (masa mol Ca/masa mol CaO) = Porcentaje total de Ca de la muestra (%Ca).

$$30.31 * (40/56) = 21.65 \text{ porcentaje total de calcio (\% Ca) de la muestra.}$$

Con este valor se calcula el porcentaje total de sulfato de calcio de la siguiente manera:

Porcentaje total de Ca (% Ca) de la muestra * (masa mol CaSO₄/masa mol Ca) = Porcentaje total de CaSO₄ de la muestra (%CaSO₄).

$$21.65 * (136.1 \text{ CaSO}_4 / 40 \text{ Ca}) = 73.664 \text{ porcentaje total de sulfato de Calcio (\% CaSO}_4\text{) de la muestra.}$$

El porcentaje de CaCO₃ se calcula por medio del contenido total del carbonato de la muestra, por medio de la siguiente fórmula:

Porcentaje total de C (% C) de la muestra * (masa mol CO₃/ masa mol C) = Porcentaje total de CO₃ de la muestra (%CO₃).

$$1.24 * (60/ 12.0111) = 6.1942 \% \text{ porcentaje total de carbonato (\% CO}_3\text{) de la muestra.}$$

Con este valor se calcula el porcentaje total de carbonato de calcio de la siguiente forma:

Porcentaje total de CO₃ de la muestra * (masa mol CaCO₃)/ (masa mol CO₃) = Porcentaje total de CaCO₃.

$$6.1942 \% \text{ de CO}_3 * (100.049/60) = 10.3288 \% \text{ de CaCO}_3.$$

CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O
10.32879949	73.664125
12.66110905	77.60130357
2.748793413	77.84433929
9.49583179	77.82003571
8.746160859	78.84078571
6.330554526	79.54558929
5.330993285	77.23675
10.5786898	85.35414286

Tabla 8. Valores totales de Sulfato de calcio hidratado (yeso) y carbonato de calcio (calcita) de los barrenos 1 y 2.

Los valores obtenidos de contenido total de yeso y calcita para las muestras seleccionadas obtenidas en los pozos servirán para conocer la calidad del yeso y de la caliza del predio los valores completos para cada una de las muestras seleccionadas se presentan en el Anexo F, estos valores se

interpolan para cada una de las unidades encontradas dentro del predio, mediante correlación se puede generar un modelo geológico y seleccionar las zonas que se van a explotar.

5.5 PETROGRAFÍA

5.5.1 PETROGRAFÍA DE MUESTRAS SUPERFICIALES

Las muestras recolectadas durante el muestreo superficial se sometieron a análisis petrográfico, este se realizó de manera comercial en el laboratorio de Petroanálisis S.A. de C. V. mediante equipos de microscopía óptica de luz transmitida, por lo cual las muestras se sometieron a la preparación de secciones delgadas, mediante este método las muestras de roca deben ser cortadas y desbastadas hasta alcanzar un espesor promedio de 30 y 50 micras, el proceso de preparación de las muestras es el siguiente:

- Corte de la roca en húmedo, mediante un disco de diamante de rin continuo a un espesor de aproximadamente 1.0 cm.
- Desbastado de la muestra en una de sus caras para adherirla a un vidrio petrográfico mediante adhesivo óptico de curado ultravioleta.
- Adhesión de la muestra al vidrio.
- Desbastado grueso de la muestra mediante un disco desbastador y la aplicación de carburo de silicio para llegar a un espesor de 0.3 cm.
- Desbastado fino de la muestra para alcanzar el espesor de 30 micras.
- Colocación de cubreobjetos mediante adhesivo óptico de curado ultravioleta.

Una vez que la muestra está lista, la lámina delgada se analizó con un microscopio petrográfico modelo Axiolab Pol de la marca Carl Zeiss, el cual interactúa con el software analizador de imágenes KS-300.

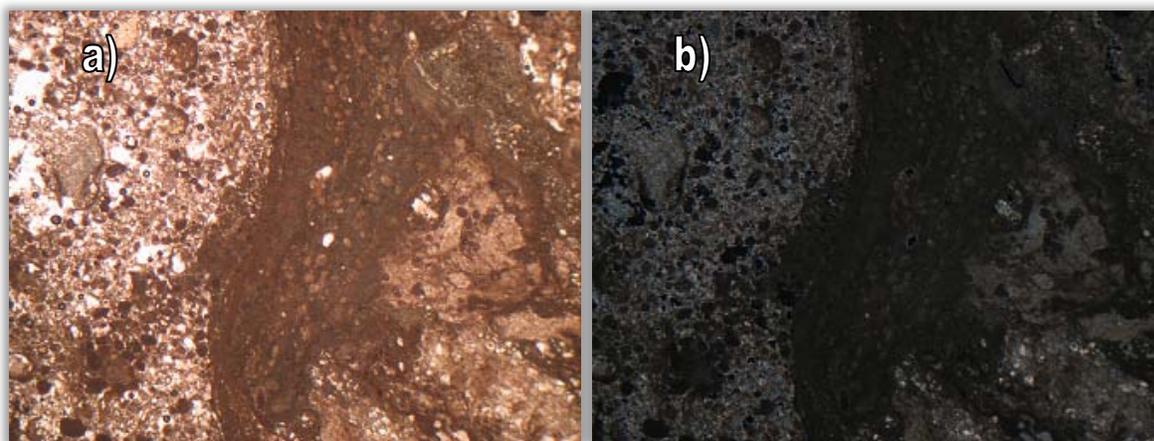
El análisis petrográfico permitió diferenciar las áreas con contenido de yeso o CaCO_3 , además de su calidad y pureza, contenido arcilloso y de otros minerales, para posteriormente realizar un modelo estadístico de las zonas con mayor concentración de caliza o yeso y poder correlacionarlo con los perfiles geofísicos y los resultados del análisis de las muestras de los pozos perforados.

5.5.2 ANALISIS PETROGRÁFICO DE LAS MUESTRAS

MUESTRA FK-02

Descripción microscópica: Corresponde a un mosaico cristalino constituido por fragmentos microcristalinos de calcita (micrítica y esparítica), también se aprecian bioclastos (fragmentos orgánicos) que corresponden a algas, presencia de oolitos (estructuras oolíticas) y asociados abundantes materiales arcillosos. Es posible apreciar dos sectores una en donde se asocian microcristales de calcita micrítica, oolitos y algas, asociados material arcilloso, otro sector donde se asocian microcristales de calcita (esparítica) diseminados y aglomerados, con material arcilloso.

Fotomicrografías de la muestra Fk-02, en donde se puede apreciar dos sectores uno oscuro caracterizado por la textura de las algas, y estructuras oolíticas, así como abundante contenido de arcillas, con respecto al otro sector caracterizado por microcristales de calcita, asociados a material arcilloso.



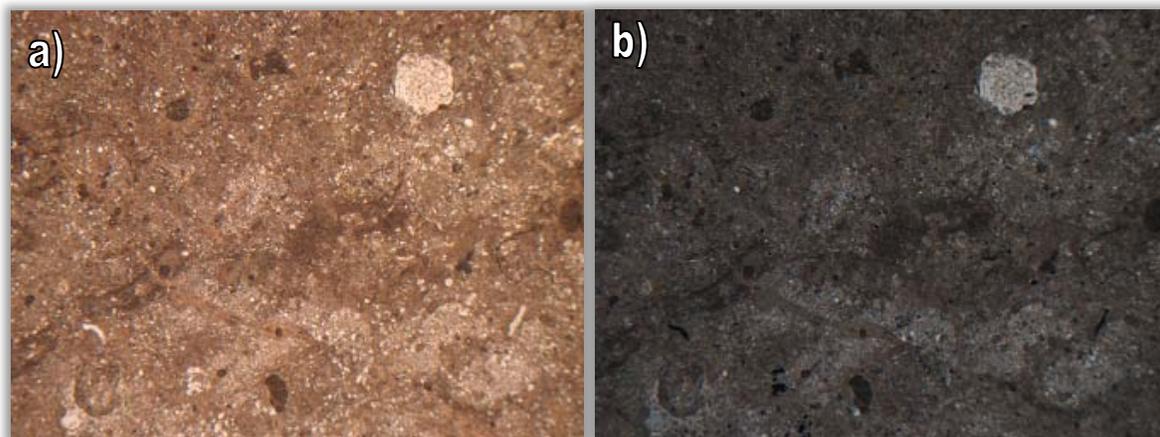
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 1 y 2 Textura y mineralogía de la muestra. a) microcristales de calcita y mineral arcilloso luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-09

Descripción microscópica: Corresponde a un mosaico cristalino compuesto por calcita (micrítica y esparítica), asociado a material arcilloso, con oolitos aglomerados, bioclastos, fragmentos de algas, detritos de cuarzo, angulosos a subredondeados y yeso en fragmentos y rellenando espacios porosos, también se aprecian algunos cristales de dolomita diseminados, así como escasos óxidos e hidróxidos de Fe.

Fotomicrográficas de la muestra Fk-09, en donde se puede ver texturas de algas y algunas estructuras oolíticas y un abundante contenido de arcillas intercalado con los otros materiales.



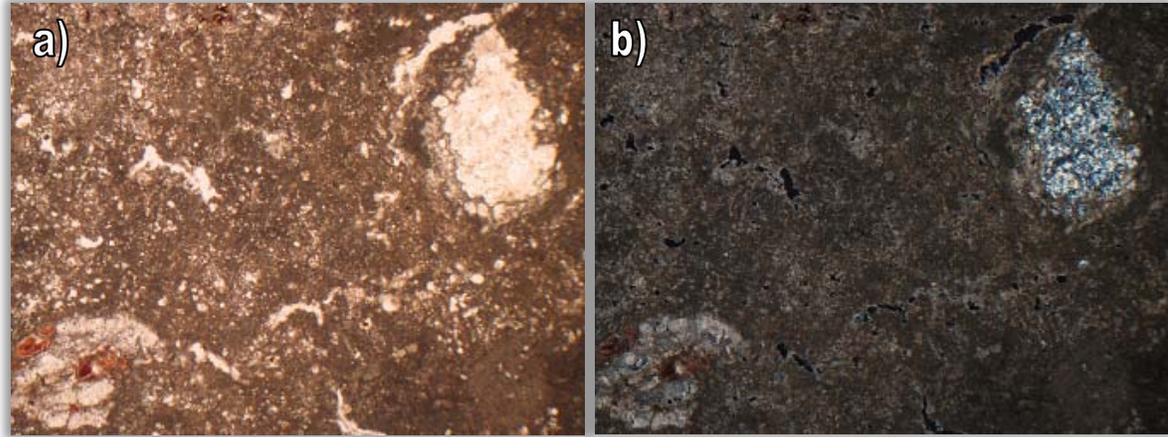
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrográficas 3 y 4. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de calcita y dolomita con material arcilloso luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-14

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico compuesto por calcita micrítica, asociada a material arcilloso, con bioclastos, cuarzo, feldespatos (K y Na-Ca), yeso y óxidos e hidróxidos de Fe diseminados.

En el sector derecho superior se observan cristales de calcita y yeso, en la parte izquierda se observan algunos óxidos e hidróxidos de Fe y algunas estructuras oolíticas.

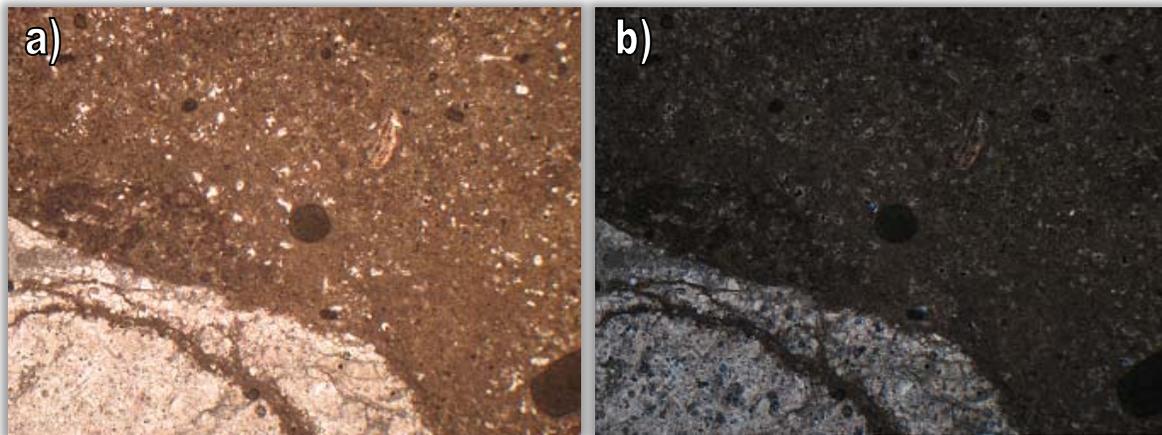


Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 5 y 6. Textura y mineralogía de la muestra. a) Luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-16

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico compuesto por microcristales de calcita micrítica, en una matriz de material arcilloso, con fragmentos de caliza compuesta por calcita esparítica con vetillas secundarias de calcita micrítica. También se aprecian bioclastos diseminados.



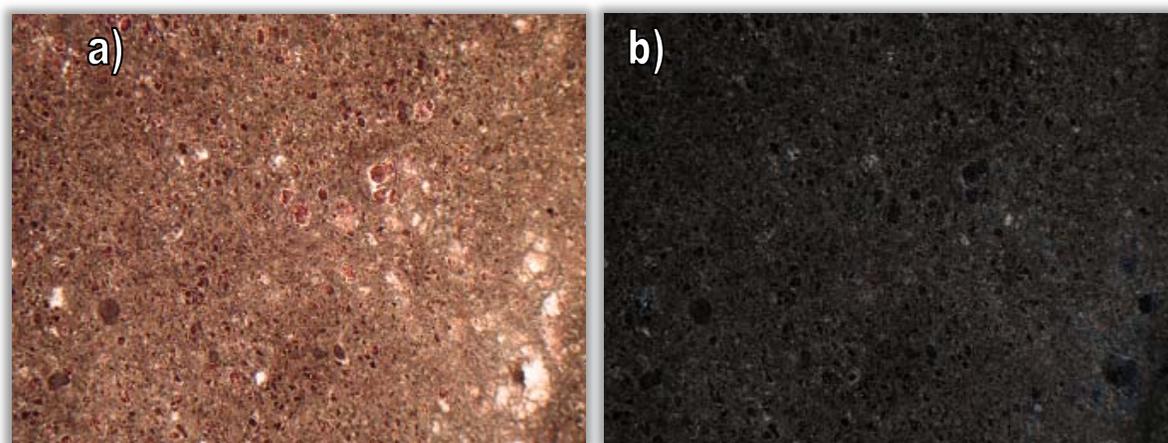
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 7 y 8. Textura y mineralogía de la muestra. a) Luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK- 18

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico compuesto por calcita micrítica asociada a material arcilloso, con fragmentos redondeados de óxidos e hidróxidos de Fe, los cuales representan hasta un 25% del material de la muestra. También se aprecian vetillas secundarias de calcita (micrítica) y se observan microcristales de calcita esparítica.

Fotomicrografías de las muestras Fk-18, el abundante contenido de óxidos e hidróxidos de Fe corresponden a una etapa de alto aporte continental, lo que también va evidenciado por el retrabajo de las partículas en el depósito final.

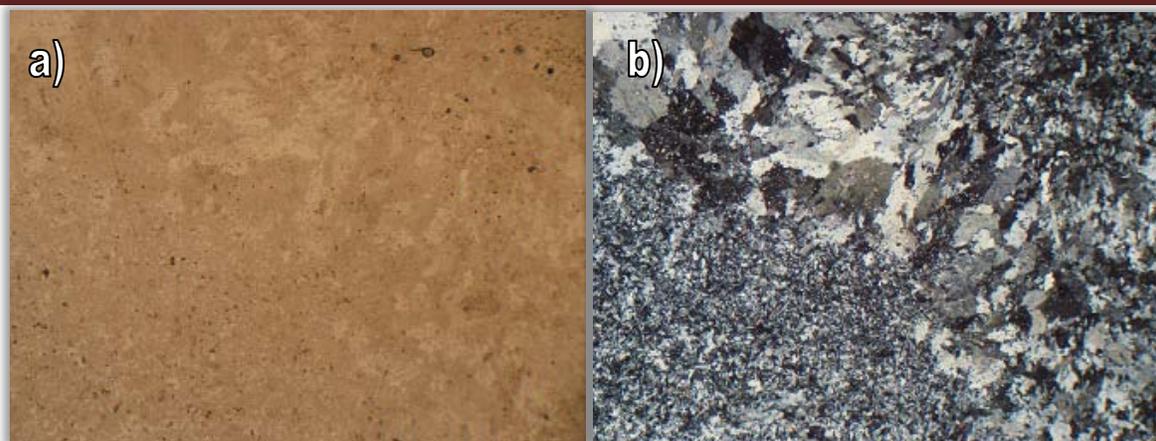


Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 9 y 10. Textura y mineralogía de la muestra. a) Luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-19

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico microcristalino con granos de diversos tamaños y microcristales anedrales, subedrales y euedrales, en ocasiones con secciones alargadas fibrosas de yeso, entre las que se encuentran diseminados microcristales de calcita. Todo el mosaico presenta material arcilloso asociado (sericita).



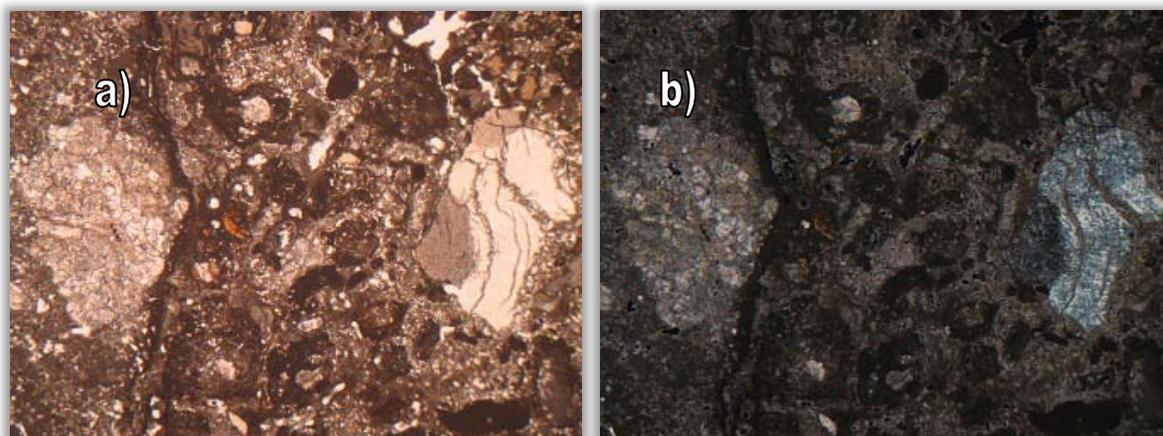
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 11 y 12. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados

MUESTRA FK-21

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico compuesto por microcristales de calcita micrítica, asociada a material arcilloso, con bioclastos, yeso, cuarzo y óxidos e hidróxidos de Fe disseminados.

Fotomicrografías de la muestra Fk-21, en donde se puede ver algunas estructuras oolíticas y un abundante contenido de arcillas intercalado con los otros materiales.



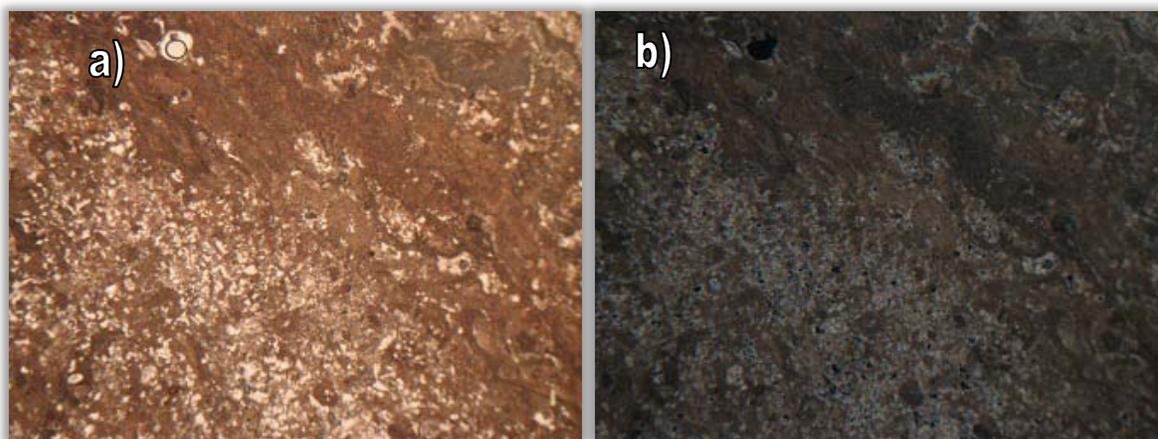
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 13 y 14. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-24

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico formado por restos de algas dispuestas en capas o laminaciones alternadas de calcita micrítica con material arcilloso asociado y microcristales de calcita esparítica diseminados. Se aprecian estructuras oolíticas incorporadas al mosaico y zonas con microcristales de calcita esparítica.

Fotomicrografías de la muestra Fk-24, en donde se puede ver algunas estructuras oolíticas y un abundante contenido de arcillas intercalado con los otros materiales.



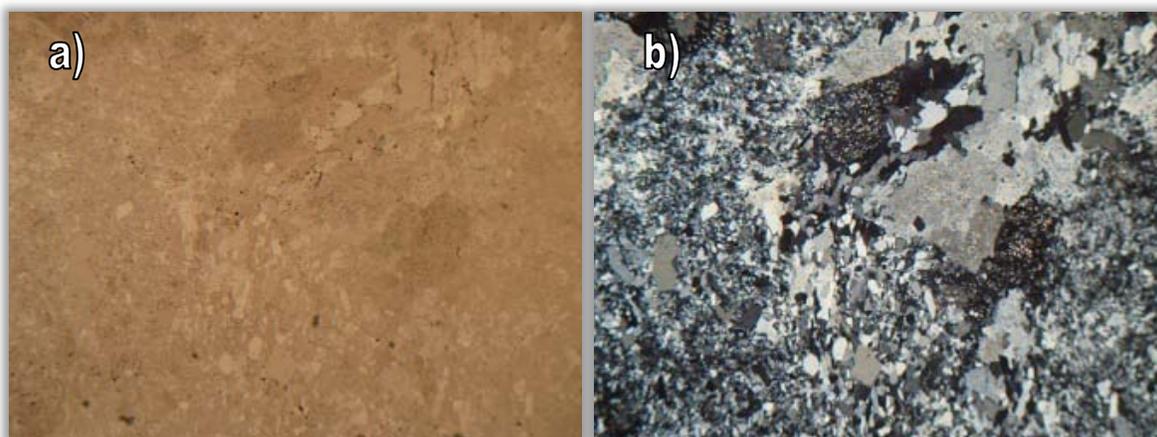
Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 15 y 16. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-25

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico microcristalino constituido por microcristales de yeso, anedrales, subedrales y euedrales de diferente tamaño, en ocasiones con secciones alargadas fibrosas, entre las que se encuentran diseminados microcristales de calcita. Todo el mosaico presenta material arcilloso asociado (sericita-clorita).

Fotomicrografías de la muestra Fk-25, en donde se pueden apreciar cristales de yeso intercalados con cristales de calcita y contenido de arcillas.

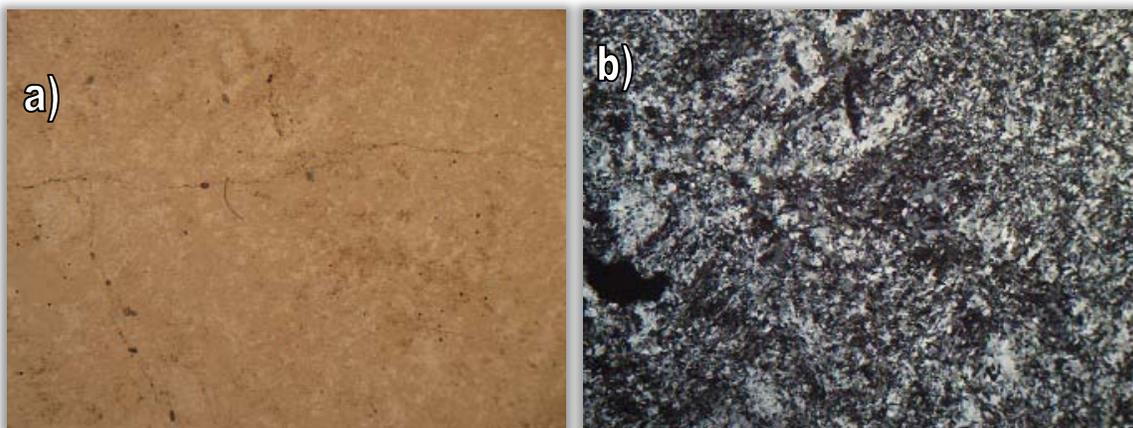


Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 17 y 18. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-29

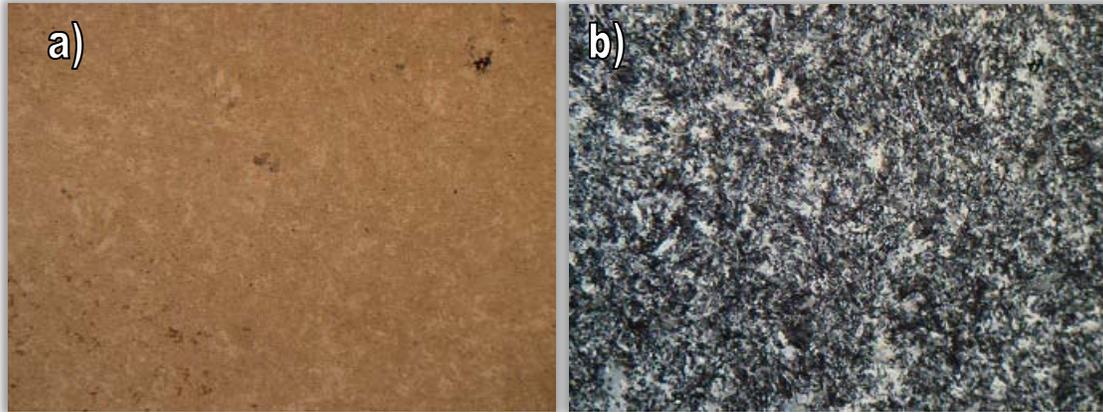
Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico microcristalino con granos de diversos tamaños y microcristales anedrales, subedrales y euedrales, en ocasiones con secciones alargadas fibrosas de yeso, entre las que se encuentran diseminados microcristales de calcita. Todo el mosaico presenta material arcilloso asociado (sericita).



Fotomicrografías 19 y 20. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados.

MUESTRA FK-30

Descripción microscópica. Corresponde a un mosaico microcristalino con cristales de yeso, equidimensionales, en ocasiones con secciones alargadas fibrosas, entre las que se encuentran diseminados microcristales de calcita. Todo el mosaico presenta material arcilloso asociado (sericita).



Escala gráfica:  2000 μm .

Fotomicrografías 21 y 22. Textura y mineralogía de la muestra. a) cristales de diversos tamaños luz paralela, b) nicoles cruzados.

5.5.3 PETROGRAFÍA DE MUESTRAS DEL SUBSUELO

El análisis petrográfico de las muestras del subsuelo obtenidas durante la perforación de los dos barrenos, permitió diferenciar las áreas con contenido de yeso o CaCO_3 , además de su calidad y pureza, contenido arcilloso y de otros minerales, para posteriormente realizar un modelo estadístico de las zonas con mayor concentración de caliza o yeso y poder correlacionarlo con los perfiles geofísicos y poder caracterizar cada una de las unidades geofísicas encontradas de acuerdo a las características litológicas de cada una de ellas.

Se escogieron muestras a diferentes intervalos de profundidad, las cuales resaltaban por presentar mayor contenido visual de yeso, contenido arcilloso, yeso con mayor contenido de impurezas, etc. De cada una de ellas se obtuvo un fragmento el cual se sometió al mismo tratamiento para elaborar las láminas delgadas de las muestras superficiales (apartado 5.5.1).

Una vez obtenida la lamina delgada se procedió a su estudio mediante el equipo utilizado para las muestras superficiales; un microscopio petrográfico modelo Axiolab Pol de la marca Carl Zeiss, el cual interactúa con el software analizador de imágenes KS-300.

Una vez hecha la interpretación de la lámina delgada, la información obtenida se presenta de la siguiente manera: se presenta la fotomicrografía tanto en luz paralela como con los nicols cruzados, con el texto de la interpretación a un costado. Se presenta también un grafico que representa un intervalo de profundidad del barreno el cual se correlaciona con la profundidad de donde se obtuvo la lámina delgada, de esta forma se puede caracterizar cada intervalo del barreno de acuerdo a sus características y obtener una interpretación de la columna estratigráfica. la interpretación se presenta en las siguientes figuras.

La descripción completa de la petrografía de las muestras seleccionadas se presenta en el Anexo G.

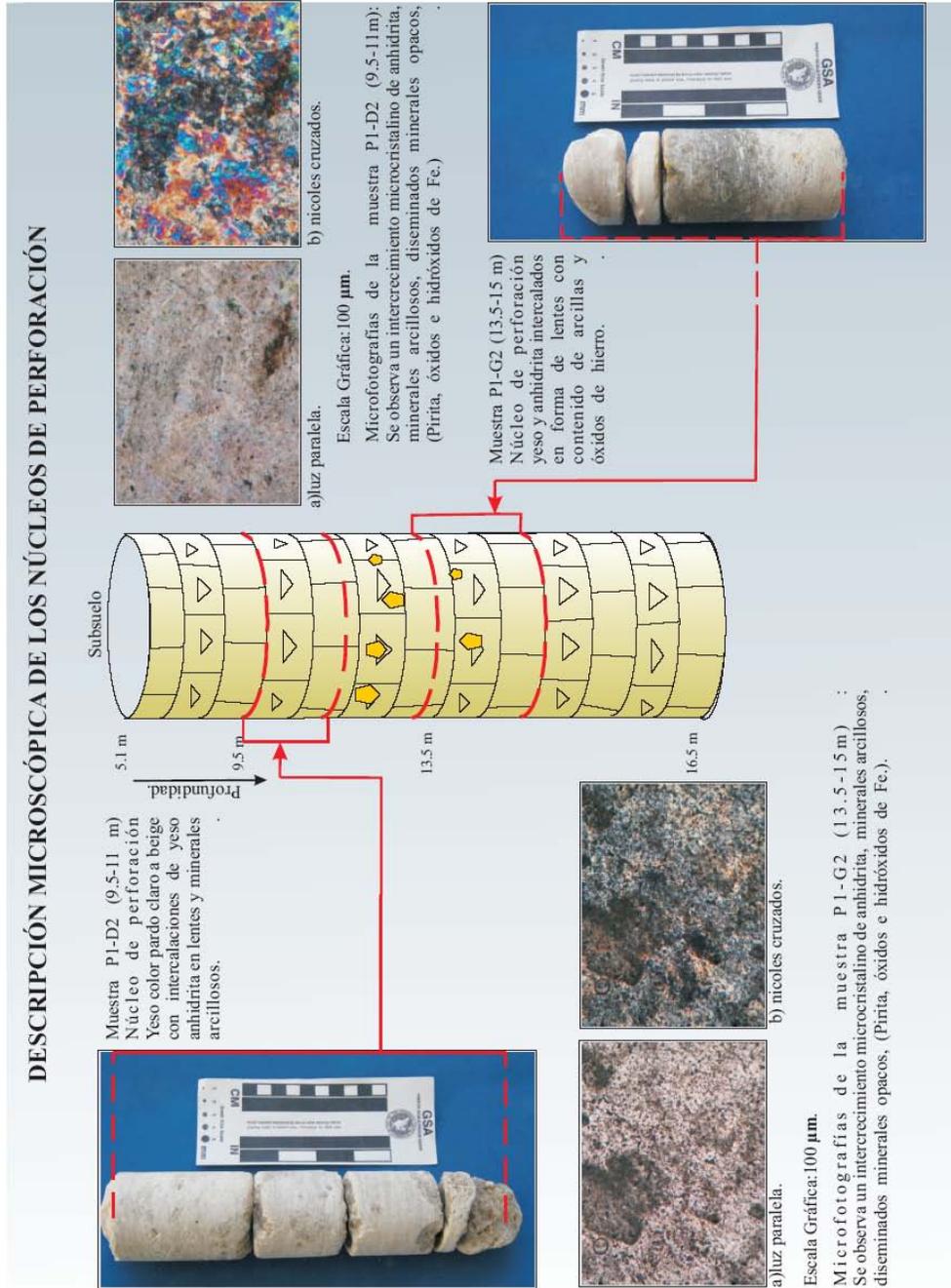


Fig. 13. Petrografía de las muestras P1-D2 y P1-G2.

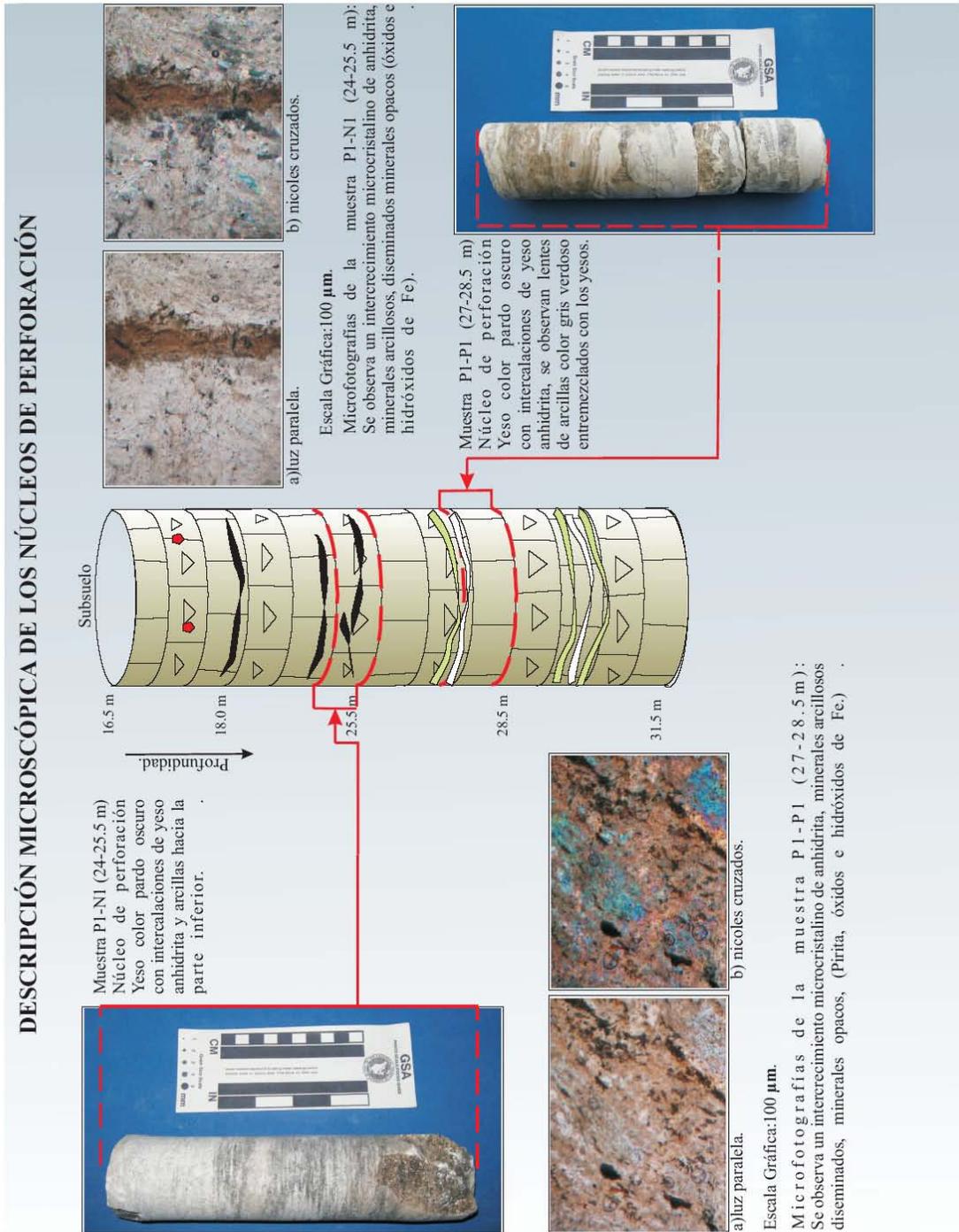


Fig. 14. Petrografía de las muestras P1-N1 y P1-P2.

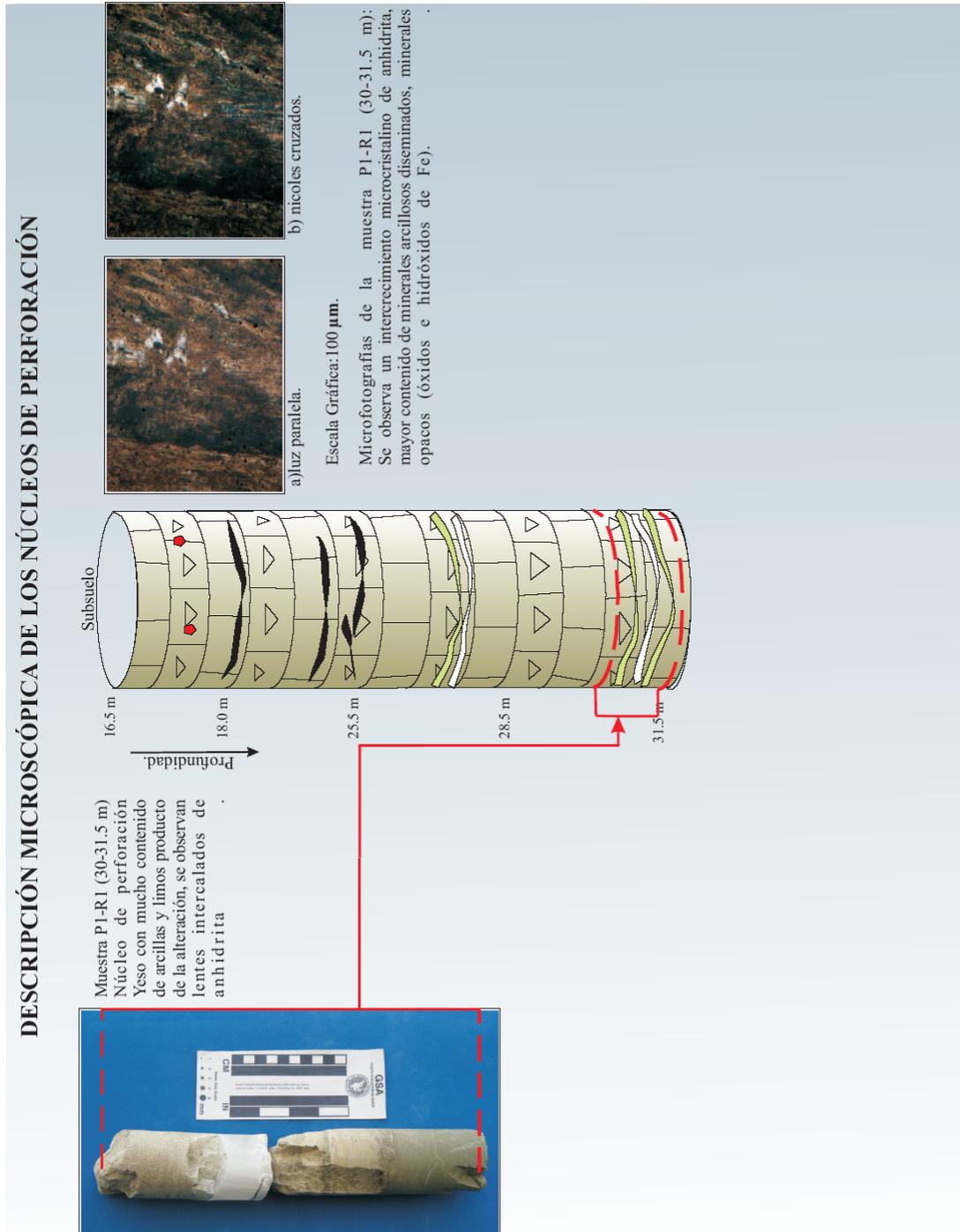


Fig. 15. Petrografía de la muestra P1-R1.

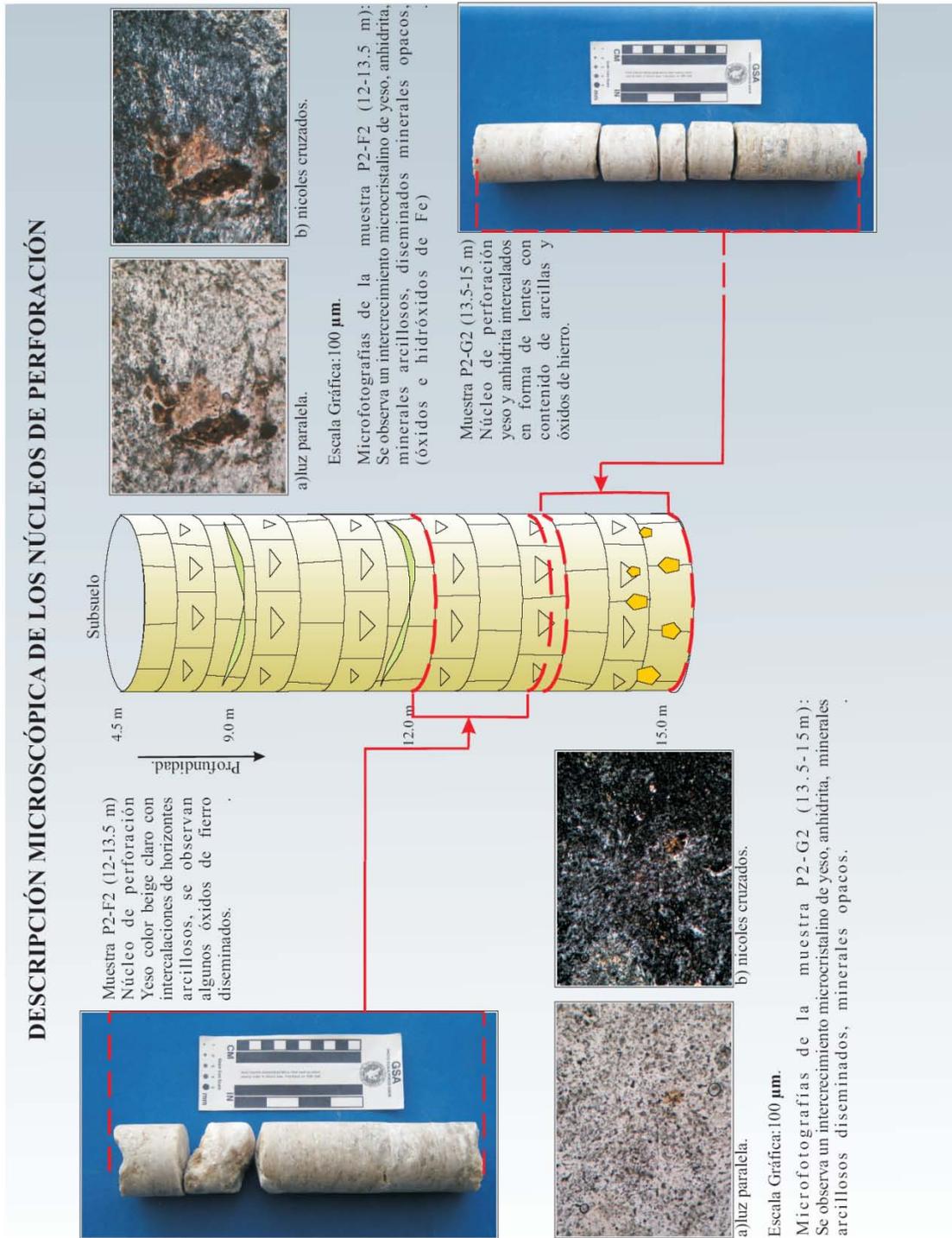


Fig. 16. Petrografía de las muestras P2-F2 y P2-G2.

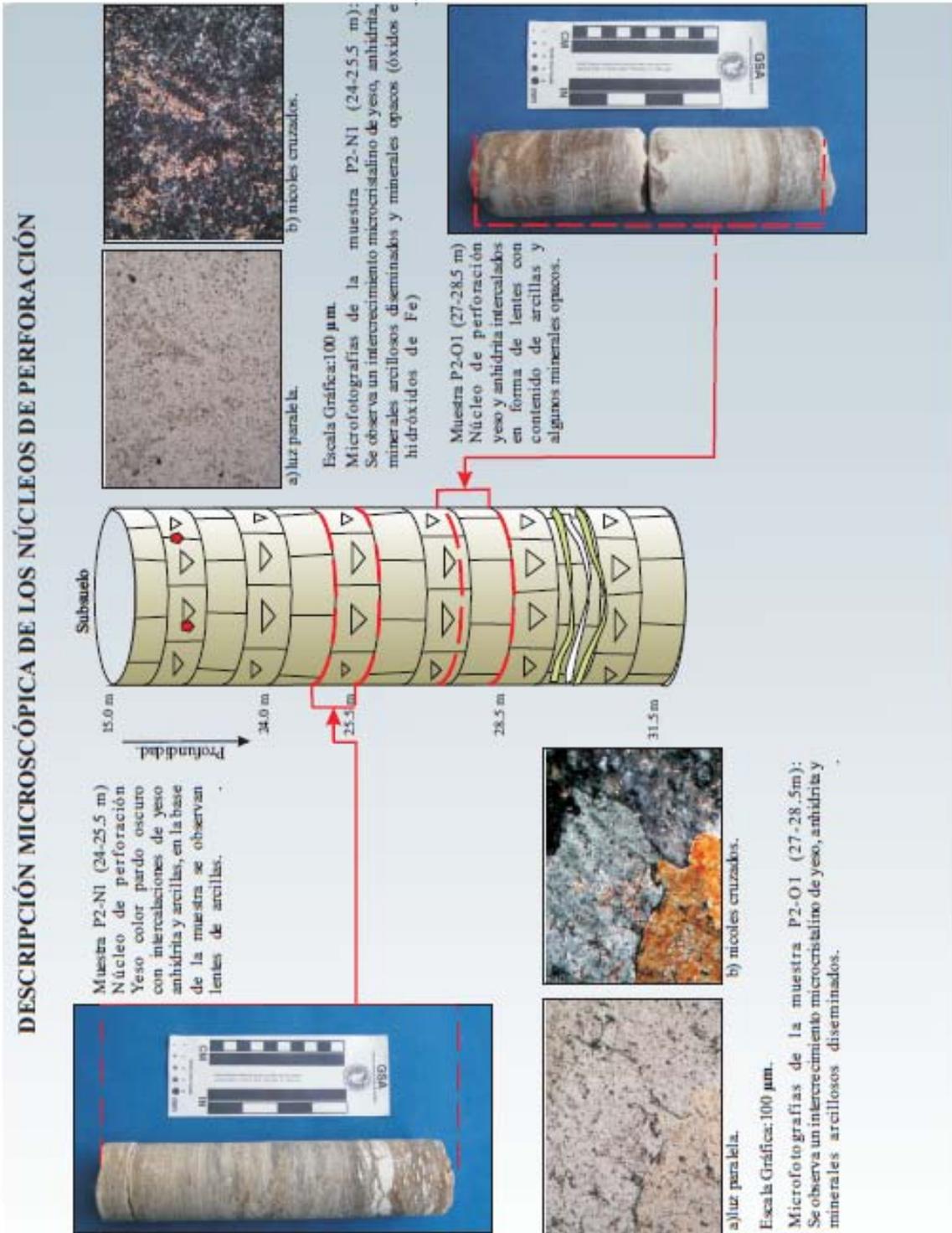


Fig. 17. Petrografía de las muestras P2-N1 y P2-O1.

Fig. 13. Petrografía de las muestras P2-N1 y P2-O1.

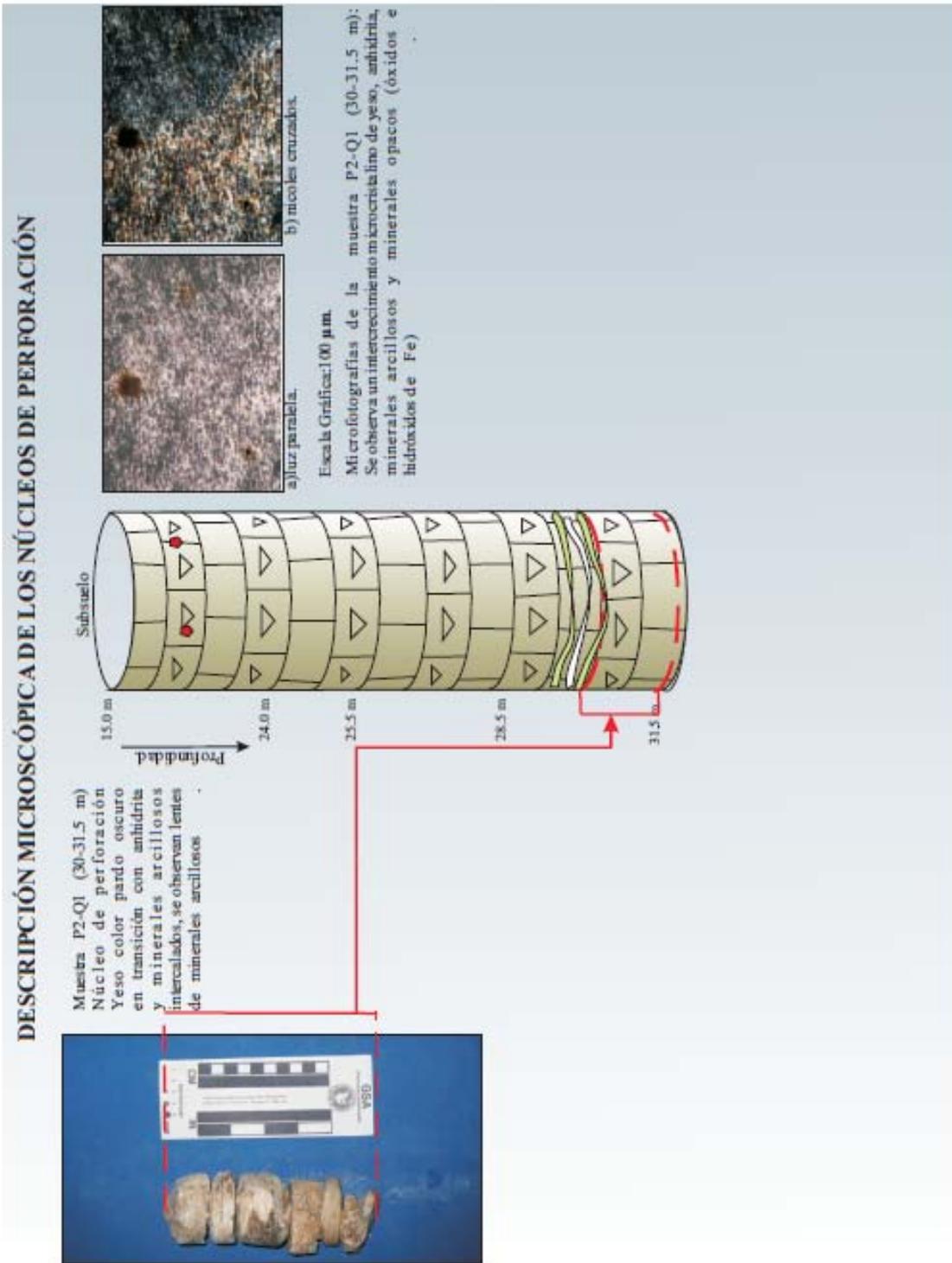


Fig. 18. Petrografía de la muestra P2-Q1.

5.6 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA INFRARROJA DE ONDA CORTA (SWIR)

Espectroscopia infrarroja

La espectroscopia infrarroja (IR) aplicada al estudio de los minerales se basa en la capacidad de éstos para absorber o transmitir haces de luz con diferente longitud de onda. Particularmente la luz infrarroja al interactuar con los compuestos sólidos permite reconocer los planos de vibración de las cadenas constitutivas de esos compuestos en las diferentes regiones IR del espectro electromagnético, de tal forma que las respuestas al IR son plasmadas en una gráfica que puede relacionar absorción o transmisividad con longitud de onda (cm^{-1}). La espectroscopia infrarroja era hasta hace una década una técnica alternativa para el estudio de materiales, debido principalmente a su carácter no destructivo, también a la escasa información existente acerca de patrones espectrográficos de materiales inorgánicos, sin embargo, la implementación del modo de reflexión ha revolucionado en el estudio de los minerales de alto valor estético, mediante el escaneo de una superficie pulida según los laboratorios de MINERAL PERCENTEGES SPECTRAL INTERNACIONAL INC (SII; www.pimausa.com). La técnica, que originalmente fue empleada en la gemología, ha sesgado recientemente (1999) al estudio de piezas arqueológicas, con aportes interesantes. Es importante mencionar que esta técnica generalmente ha sido complementada con estudios espectroscópicos Raman y viceversa (SII, 2009).

La espectroscopia por reflectancia ha sido usada por los químicos por años. Esta fue redescubierta por la disciplina de la teledetección remota que usa la información obtenida por medio de la banda de ondas infrarrojas para mapear zonas de vegetación, exploración minera y monitoreo ambiental. Para la geología es especialmente útil para el logueo de núcleos de roca, y delineación y mapeo de zonas de alteración.

La reflectancia espectroscópica se puede definir como la técnica que usa la energía de la banda de luz visible (0.4-0.7 μm), infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm) e infrarrojo de onda corta (1-3 a 2.5 μm), regiones de longitud de onda del espectro electromagnético de análisis de materiales como se observa en la siguiente figura.

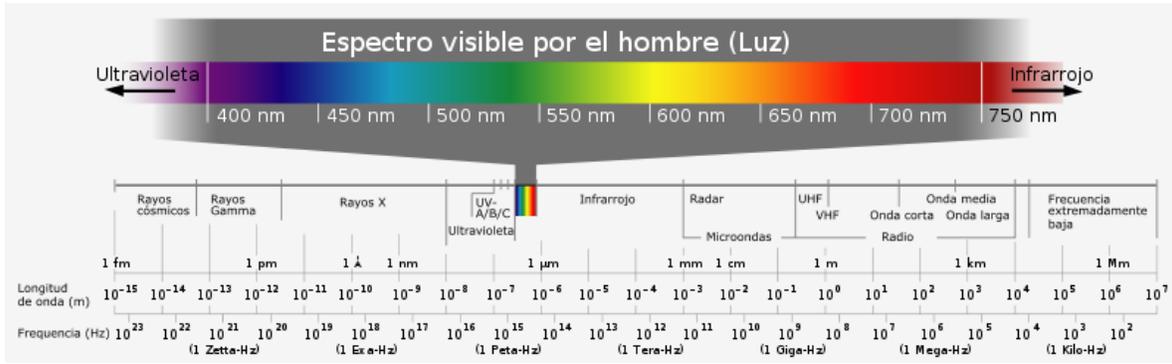


Fig. 19. Espectro de radiaciones electromagnéticas, (Frenzel Louis, 2003).

Ciertos átomos y moléculas reflejan límites de energía química en longitudes de onda específicas como una función de su estructura atómica. La manifestación de estas longitudes toma la forma de un espectro de reflectancia con características de absorción, las posiciones de la longitud de onda y los perfiles distintivos pueden ser usados para la identificación de fases minerales y orgánicas (RPS Qualitas, 2009).

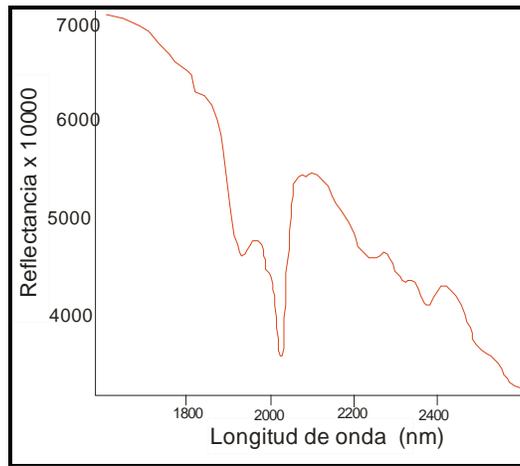


Fig. 20. Parte de un espectro de absorción SWIR de la caolinita, (SII, 2009).

Cada mineral detectado en el espectro SWIR tiene un grupo aproximado de características únicas combinadas en ese espectro de reflectancia, pero estas combinaciones tienen múltiples variables y algunos compuestos no son siempre visibles (como los óxidos de hierro). Las propiedades de reflectancia, tamaño de partícula, grado de orientación de la muestra, presencia de agua superficial e intersticial, fases orgánicas e inorgánicas asociadas, todas estas variables influyen en la configuración de la curva espectral SWIR. Este método es particularmente sensible a los enlaces de OH, H₂O, CO₃, CH, NH₄. Los minerales detectados incluyen minerales arcillosos (caolinita, illita, dickita, halloysita, sméctita), y otros filosilicatos (serpentin, talco, pirofilita,

cloritas), carbonatos (calcita, dolomita, malaquita, siderita), hidróxidos (brucita, gibbsita, diáspora), anfíboles, micas, epidotas, zeolitas y topacio.

Por lo tanto su aplicación en la exploración minera es muy importante para definir asociaciones y tipos de yacimientos (SII, 2009).

5.6.1 ANÁLISIS DE MUESTRAS MEDIANTE EL MÉTODO SWIR

Se seleccionó este método de análisis para identificar las fases arcillosas presentes en las muestras de los dos barrenos perforados, ya que estas son difíciles de identificar mediante el análisis petrográfico, el porcentaje de arcillas de las muestras de pozo se encuentran en un rango del 10% al 8%, encontrándose unos horizontes con mucha mayor presencia de estas, particularmente hacia la base de la perforación a una profundidad de 28.5 en adelante.

El origen de estos horizontes arcillosos corresponde a intervalos de tiempo en donde el aporte de sedimentos continentales del noroeste y del occidente del golfo de México (en donde el aporte era más alto Salvador, 1991b), particularmente en la etapa de transgresiones y regresiones del Cretácico-Paleoceno, hacia donde los niveles del mar comenzaban a retirarse hasta su posición actual; estos sedimentos se intercalaban con depósitos de evaporitas y carbonatos, dichos sedimentos correspondían a un ambiente de bajo nivel de oxígeno lo que favorecía la cristalización de sulfuros y de óxidos e hidróxidos de hierro.

Se eligieron las muestras con mayor contenido visual de arcillas en el análisis petrográfico, así como las que no presentan mucho contenido de éstas como una forma de hacer una comparación entre muestras más arcillosas y las que no lo son. Para esto se cortaron pastillas del mismo núcleo de donde se obtuvo el material para las laminas delgadas, dichas muestras se encuentran rotuladas lo que facilita su rápida identificación. Una vez preparadas se limpia la superficie y se procede al análisis.

El análisis SWIR se realizó en el laboratorio de muestras minerales y petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM, departamento de recursos naturales. En dicho laboratorio se cuenta con el equipo necesario para dicho análisis; un equipo LabSpec Pro, el cual interactúa con el software Indico Pro versión 3.1, este equipo cuenta con una unidad CPU que está conectada a una lámpara Unit 4054 H.I. Contac Probe (fig. 14), la que emite una luz intensa en la banda electromagnética de la luz visible e infrarroja, dicha luz es reflejada por la muestra y está registrada por el lector de la lámpara que analiza el espectro de emisión infrarroja.



Fotografía 5. Equipo para análisis SWIR, Instituto de Geofísica, UNAM.

Antes de cada lectura la unidad se calibra con una pastilla de barita fig. 15, la que se utiliza como referencia para las lecturas posteriores, ya que este material no emite radiaciones producto de la irradiación en la frecuencia infrarroja.



Fotografía 6. Pastilla de barita y lámpara infrarroja para toma de lecturas SWIR.

Cada lectura se hace colocando la lámpara sobre la muestra que es preferible que tenga una cara lo más plano posible y libre de impurezas, se hace la toma de la muestra y esta se registra en un gráfico que dibuja una línea de valores de reflectancia contra longitud de onda en nm. De este gráfico solo es útil la parte de valores superiores a los 1250 nm sobre la línea de las abscisas que es el intervalo que abarca la longitud de onda del espectro infrarrojo hasta los 2500 nm.

La manera de interpretar este gráfico es comparar los espectros de las asociaciones mineralógicas de cada muestra con los espectros obtenidos producto del análisis de muestras cuya

mineralogía es conocida, se comparan los picos de cada longitud de onda con los valores de los picos de asociaciones mineralógicas ya conocidas (SII, 2009); estas se obtienen mediante otros métodos, o un conjunto de metodologías que dan un valor más aproximado de las fases presentes en cada muestra, el conjunto de datos que presenta el programa se archiva y se traduce a un programa que pueda manejar más fácilmente los datos y graficarlos adecuadamente, en este caso se usa Excel, se presenta en la tabla de los valores obtenidos así como el grafico correspondiente de reflectancia contra longitud de onda.

MUESTRA P1-G2 ANÁLISIS SWIR

Long. onda	De Reflectancia						
1250	0.48116728	1290	0.50026577	1330	0.43085015	1370	0.31582723
1251	0.48268647	1291	0.49997803	1331	0.4279843	1371	0.31396305
1252	0.48412931	1292	0.49962148	1332	0.42507623	1372	0.31222985
1253	0.48536358	1293	0.49912595	1333	0.42209223	1373	0.31057635
1254	0.48645977	1294	0.49857847	1334	0.41900361	1374	0.30885771
1255	0.48745866	1295	0.49800517	1335	0.41575237	1375	0.30710087
1256	0.48830159	1296	0.49740704	1336	0.41245053	1376	0.30549059
1257	0.48904675	1297	0.49665377	1337	0.40912805	1377	0.30397237
1258	0.48987345	1298	0.49577763	1338	0.40586198	1378	0.30262664
1259	0.49066293	1299	0.49483975	1339	0.40259443	1379	0.30149104
1260	0.49140989	1300	0.49397648	1340	0.39919683	1380	0.30030853
1261	0.49206498	1301	0.49315209	1341	0.39566958	1381	0.29906148
1262	0.49249003	1302	0.49213366	1342	0.39218757	1382	0.29793934
1263	0.49298189	1303	0.49100581	1343	0.38877842	1383	0.29691022
1264	0.49365869	1304	0.48985544	1344	0.38530198	1384	0.29581963
1265	0.49435391	1305	0.48862805	1345	0.38164575	1385	0.29471911
1266	0.49500085	1306	0.4872376	1346	0.37806381	1386	0.29360717
1267	0.49558947	1307	0.48570239	1347	0.37471947	1387	0.29247062
1268	0.49617795	1308	0.48398189	1348	0.37130503	1388	0.29138784
1269	0.49681723	1309	0.48213906	1349	0.36779077	1389	0.29022227
1270	0.49741258	1310	0.48011189	1350	0.36440249	1390	0.2889558
1271	0.49793839	1311	0.47808087	1351	0.36120072	1391	0.28760243
1272	0.4984765	1312	0.47612802	1352	0.35795664	1392	0.28616524
1273	0.4990067	1313	0.47413607	1353	0.3547074	1393	0.28433395
1274	0.49946543	1314	0.47194571	1354	0.35168487	1394	0.28235457
1275	0.49994531	1315	0.46964802	1355	0.34879963	1395	0.28031131
1276	0.50037933	1316	0.46722578	1356	0.34620678	1396	0.27823382
1277	0.50065973	1317	0.46473853	1357	0.3436755	1397	0.27590241
1278	0.50080657	1318	0.4622766	1358	0.34103749	1398	0.27337659
1279	0.50101053	1319	0.45986629	1359	0.33842165	1399	0.27052466
1280	0.50123758	1320	0.45732533	1360	0.33606189	1400	0.26761841
1281	0.50129706	1321	0.45474709	1361	0.33388118	1401	0.26442304
1282	0.50135081	1322	0.45230775	1362	0.33181774	1402	0.26102429
1283	0.50150291	1323	0.44976526	1363	0.32964008	1403	0.25745414
1284	0.50162385	1324	0.44702213	1364	0.32740901	1404	0.25389086
1285	0.50161341	1325	0.44436001	1365	0.32535621	1405	0.25024808
1286	0.50147455	1326	0.44180437	1366	0.32360932	1406	0.24645409
1287	0.5011869	1327	0.43920805	1367	0.32185046	1407	0.24256571
1288	0.50086966	1328	0.4365299	1368	0.31984355	1408	0.23872049

Tabla 9. Valores de reflectancia contra longitud de onda, muestra FK-G2.

Se presentan solamente los valores de reflectancia contra longitud de onda de los primeros 160 valores, los valores completos hasta el valor 2500 nm de longitud de onda se presentan en el

Anexo H así como los valores para los 20 análisis realizados, en algunos casos se repite análisis para una misma muestra ya que se tomaron dos lecturas en una zona con diferentes características de la misma.

También se presentan en el Anexo I los gráficos correspondientes a cada análisis realizado de cada una de las muestras.

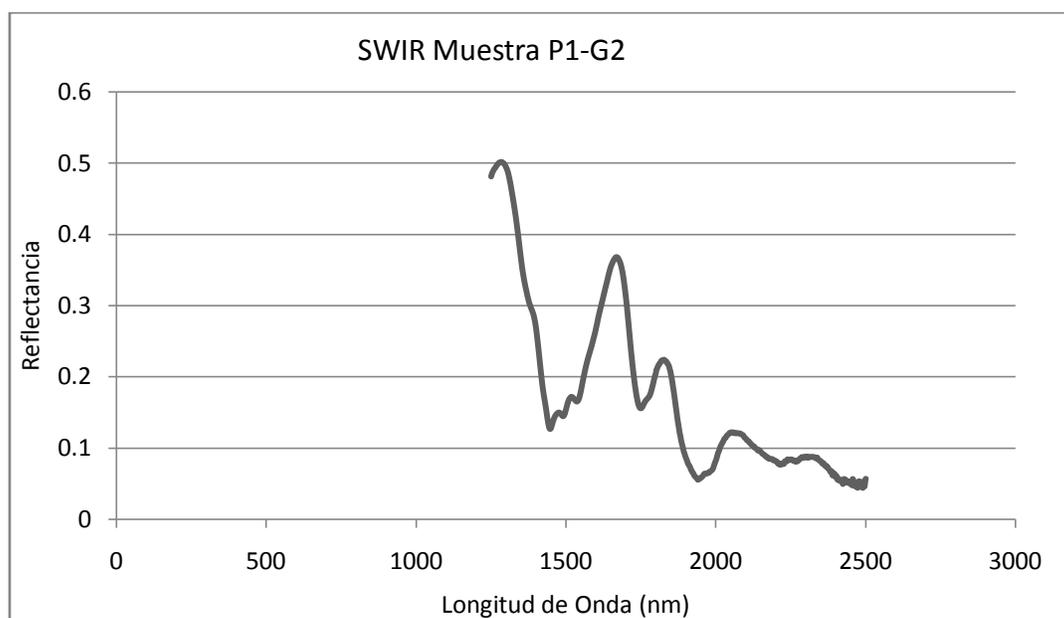


Fig. 21. Gráfico de Reflectancia contra Longitud de onda, muestra P1-G2.

Para interpretar esta gráfica y poder conocer de que fase mineralógica se trata, se compara el valor de los picos más altos presentes en la grafica, en el caso de las arcillas se toman en cuenta los valor correspondientes a partir de la longitud de onda que va del 2000 nm a los 2500 nm, el otro intervalo que va de los 1250 a los 2000 corresponde a el espectro obtenido por análisis a muestras de anhidrita y yeso que comparativamente son los que más se aproximan, en la fig. 22, se muestra la grafica de los valores de longitud de onda de la muestra P1-G2 a partir del valor de 2000 nm, los cuales se comparan con los valores del mismo intervalo para el espectro SWIR de la illita.

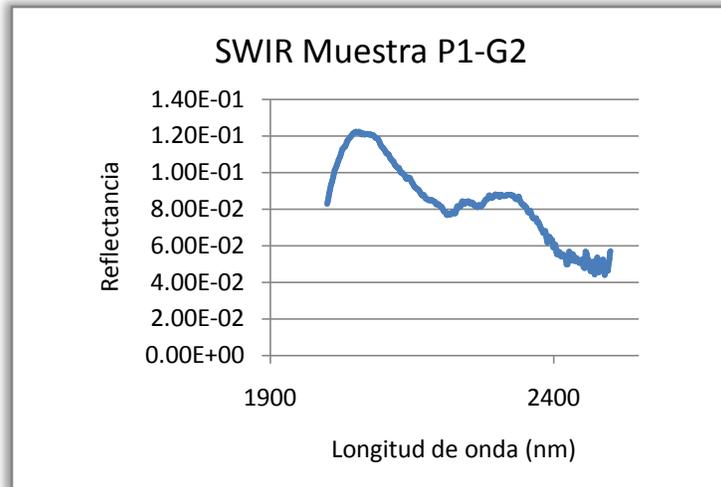


Fig. 22. Gráfico de Reflectancia contra Longitud de onda, muestra P1-G2.

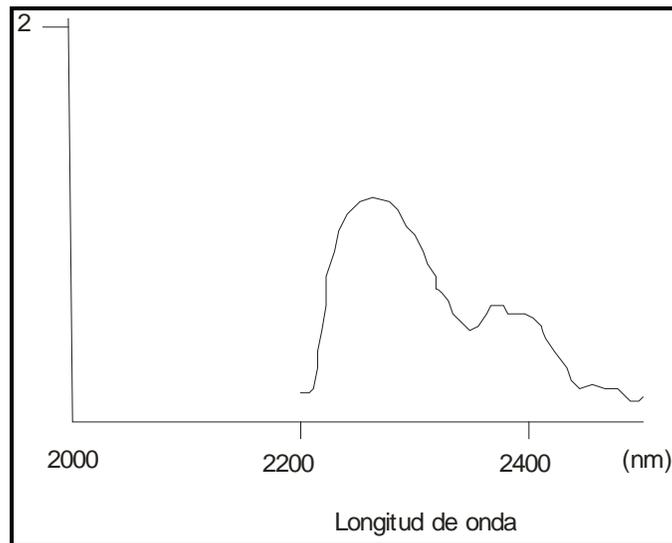


Fig. 23. Gráfico de Reflectancia contra Longitud de onda (teórico), Illita.

Se observan similitudes entre el gráfico obtenido con las muestras de pozo y el gráfico obtenido para muestras de illita aunque el intervalo para la muestra P1-G2 se encuentra desfasado 200 nm hacia la izquierda.

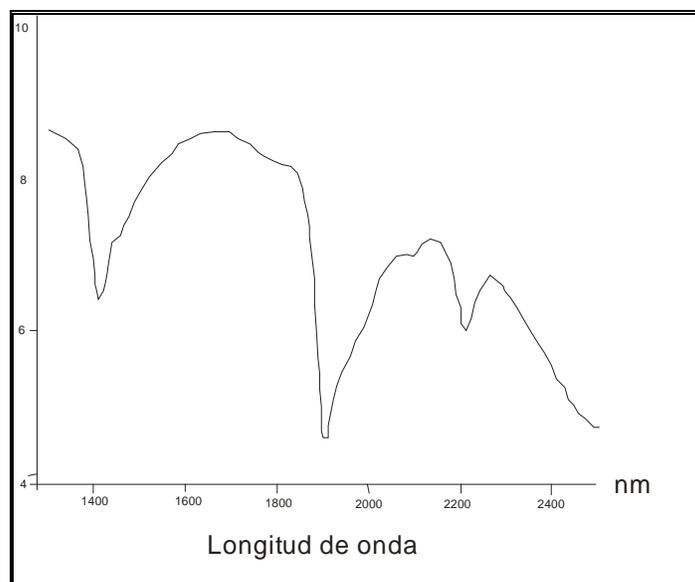


Fig. 24. Gráfico de reflectancia contra Longitud de onda, Esméctitas (SII, 2009).

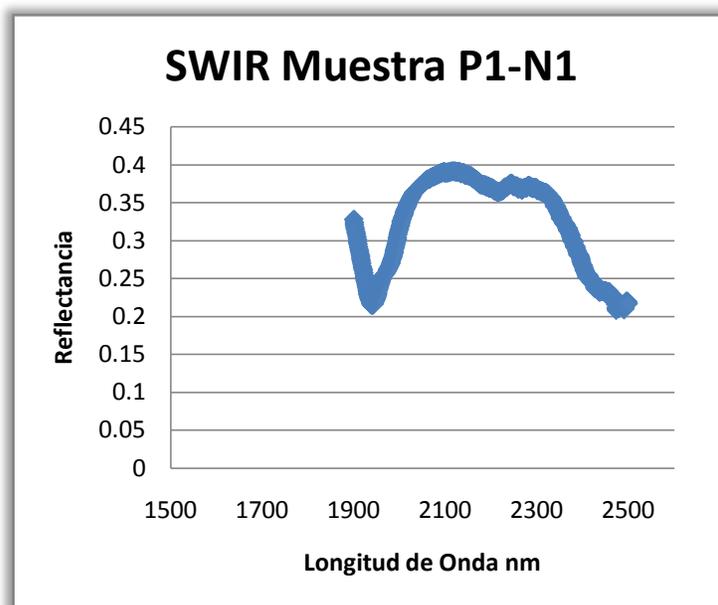


Fig. 25. Gráfico de reflectancia contra longitud de onda, muestra P1-N1.

Las similitudes del gráfico SWIR de la sméctita también presentan ciertas similitudes con el gráfico obtenido para la muestra P1-G2 con los dos picos de valores principales a los 2200 y 2400 nm, aunque se observa que el corrimiento de valores de longitud de onda es más pronunciado para la sméctita, lo que nos dice que la muestra P1-G2 presenta una asociación de ambos minerales arcillosos y que el corrimiento se debe a que se tiene dicha asociación mineral illita-sméctita que

son arcillas muy importantes en la conformación de los suelos, cuyas características generales se presentan a continuación.

Las illitas

Las illitas son principalmente minerales arcillosos pertenecientes al grupo de la mica, al igual que las micas verdaderas, las illitas constan de una capa unitaria integrada por una hoja de octaedros de Al en medio de dos hojas de tetraedros de Si, la celda unitaria es la misma que la de la montmorillonita excepto que algunos Si están siempre remplazados por Al y que la deficiencia de cargas está balanceada por iones K^+ (Vallejo-Gómez, 1997), las illitas se clasifican en di octaédricas, las derivadas de la moscovita en dioctaédricas y trioctaédricas las derivadas de la flogopita.

Son silicatos hidratados complejos de aluminio, y pueden llevar calcio, magnesio y sodio. Todos tienen estructura en láminas y aparecen en granos extremadamente finos. Cuando están húmedos son plásticos (Kraus et al., 1965).

La pequeñez de las partículas de illita limita su estudio por microscopía óptica. Al microscopio electrónico se presentan como láminas de grosor variable, pero con ejes bien definidos, a veces con diseño hexagonal o poligonal. Algunas muestras se presentan agregadas en forma de bastones. Keller sugiere que la formación de la illita es favorecida por las siguientes condiciones: adecuada disponibilidad de sílice, condiciones alcalinas del medio, presencia de cationes Ca, Mg y Fe^{2+} , potasio en solución y en concentración lo suficientemente elevadas como para incluirse como catión de cambio y que exista un déficit de carga positiva (Vallejo-Gómez, 1997). Sin duda que las illitas son los minerales de arcilla más abundantes en los sedimentos y suelos. Su abundancia se explica debido a que muchos materiales parentales del suelo son abundantes en micas, cuya fuente primaria la constituyen las rocas ígneas.

Espectro de absorción Infrarroja. El espectro de la illita no muestra diferencias notables con respecto al de la montmorillonita, ni tampoco con otros minerales 2:1. Son características, en todo caso, las bandas de absorción alrededor de 3620 nm, otra muy ancha a 3400 nm y bandas a 1640, 1060, 1010, 915, 830, 755, 620, 530, 475, 430 y 415 nm (Vallejo-Gómez, 1997).

Grupo de las Esméctitas

La sméctita o montmorillonita son minerales arcillosos cuya fórmula base es $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4n.H_2O$. Frecuentemente las partículas de estos minerales son de tamaño muy

pequeño (100-200 Å), razón por la cual su superficie específica suele ser muy grande, del orden de varios cientos de metros cuadrados. La sméctita es un mineral expandible. La admisión de moléculas polares entre las capas determina una expansión en dirección de su eje c, que es función del tamaño de la molécula introducida. La sméctita es importante mineral de suelos, exceptuando la saponita y hectorita que son constituyentes raros. Se encuentran también en depósitos sedimentarios, metamórficos y de origen hidrotermal (Vallejo-Gómez, 1997).

La montmorillonita es la representante más importante. Las hojas tetraédricas y octaédricas se combinan de forma que las puntas de los tetraedros de cada hoja de sílice y los dos planos de OH de la hoja octaédrica forman planos comunes. Estas unidades fácilmente se dilatan y se contraen con el humedecimiento y el secado para proporcionar un efecto de acordeón. Durante la formación de la montmorillonita, algunos de los átomos de aluminio en los huecos de los octaedros son reemplazados por magnesio. Se conoce que la abundancia de magnesio en el medio es un requisito previo para la formación de montmorillonita. La sustitución de Al por Mg puede ocurrir debido a que los 2 átomos tienen radios iónicos muy similares, así que el remplazo de solamente 1/6 de los átomos de Al en la red cristalina no le causa desviaciones excesivas. Esta sustitución es llamada sustitución isomorfica.

La montmorillonita se presenta en forma de masas compactas, de color gris, blanco, teñidas a veces con coloraciones marrones, verdosas o amarillentas. Su fractura es concoidal y es una arcilla muy pegajosa y plástica, su densidad varía desde 1.6 a 2.7, de acuerdo al grado de hidratación.

Espectro de Absorción Infrarroja. El espectro de la montmorillonita muestra una banda de absorción fuerte entre 3600 y 3700 nm, relacionada con grupos OH. Algunas muestras exhiben una banda muy ancha alrededor de 3400 nm y todas, una banda de agua alrededor de 1620 nm. Entre 950 y 650 nm muestra una serie de bandas propias de los filosilicatos (Si-O-Al) destacando la banda a 915 nm (Vallejo-Gómez, 1997).

Asociación illita-sméctita

Esta asociación es un indicador de las condiciones de depósito en las cuencas sedimentarias; tiempo de depósito, temperatura y profundidad, en donde ocurren procesos de transformación y metamorfismo de bajo grado (Potier., P.E., 2005). De entre estos procesos el más importante es la transformación de la sméctita en clorita e illita. Cuando la sméctita es dioctaedral, la transformación produce illita a través de un intermediario llamado illita-sméctita (I/S), y cuando

es trioctaedral la transformación produce clorita a través de un intermediario llamado illita-clorita (I/C). Dichas capas de arcillas mezcladas consisten en hojas intercrecidas, cuya proporción se puede estimar por difracción de rayos x; estas transiciones son de mucho interés por varias razones: la illita es la arcilla dominante en antiguos depósitos de lodolitas y calizas y la transición I/S provee información de la historia de temperatura de una cuenca, por lo que este tipo de transición ha sido estudiada ampliamente en diferentes cuencas, y aunque muchos detalles no han sido completamente resueltos (Melson et al. 1998), los principales factores que las controlan son: la temperatura, disponibilidad de K⁺, otros factores son la permeabilidad (la que acelera virtualmente todas las transformaciones mineralógicas), materia orgánica (la que tiende a retardar reacciones en arcillas).

Las condiciones encontradas en los depósitos de arcillas dentro son un indicativo de que la asociación illita-sméctita ha tenido el tiempo suficiente para transformarse casi completamente a illita, así como la proporción de la transición illita/clorita que no es muy abundante, así como las condiciones de la cuenca que han sido relativamente estables.

6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

6.1 MUESTREO SUPERFICIAL

Durante el muestreo superficial se identificaron zonas en donde afloran depósitos de yesos principalmente hacia la parte sur en los cortes de la carretera donde se aprecian afloramientos de yeso con buena calidad y que muestran en algunas zonas alteraciones e impurezas. Hacia el interior del predio estos afloramientos de yesos son esporádicos ya que el Sashcab cubre la mayor parte de la superficie, el Sashcab presenta en algunos puntos de muestreo valores superiores al 70% de CaCO_3 y alcanza en varios de ellos valores de hasta 97%, la unidad subyacente está constituida por calizas con contenido arcilloso, cuarzo, bioclastos y óxidos e hidróxidos de hierro, en algunos horizontes el contenido de clastos re TRABAJADOS indica un alto aporte continental.

El análisis de la caliza muestra un alto contenido de CaCO_3 , en algunos casos superior al 90%; como la muestra FK-02 cuyo contenido de carbonato de calcio es de 97.69%, asimismo las muestras FK-06, FK-13, y FK-23 con valores superiores al 95%. Los contenidos de carbonato de los horizontes de Sashcab y calizas muestran buenos valores como para considerarse como posibles objetivos de explotación. Los valores de CaCO_3 de los otros puntos varían en un rango de 70 a 90% en contenido total, el cual se considera suficiente para los valores de carbonato necesarios para la fabricación de cementos y otras mezclas para construcción.

El estudio geofísico nos permite correlacionar las unidades encontradas mediante el muestreo con las obtenidas a través de los SEV'S e identificar horizontes de calizas que pudieran tener valores hasta del 90% de CaCO_3 o mayores, así como de yesos con distintos grados de pureza (de 70 a 88% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), para poder evaluar el volumen de dichos materiales.

6.2 CORRELACIÓN DE ESTUDIOS GEOFÍSICOS Y PEFORACIÓN

El estudio geofísico permitió identificar seis unidades geofísicas con diferentes características de resistividad; para poder corroborar esta información y caracterizar correctamente estas unidades se realizó la perforación de 2 barrenos de 50 m cada uno, pero debido a circunstancias propias de la perforación solo se pudieron perforar 31.5 m en cada uno de ellos, lo que fue suficiente para poder caracterizar 3 de estas unidades, una de las cuales se encontró en cada una de las líneas de estudio geofísico (U3B), dichas unidades fueron:

UNIDAD 1A SASHCAB

La unidad U1A que es la más superficial con un rango de resistividades de 1 a 1300 Ω *m, dicha unidad es fácilmente correlacionable con el material encontrado superficialmente durante la perforación y que corresponde al Sashcab semiconsolidado que tiene una profundidad promedio en todo el predio de aproximadamente 5 metros, la calidad en contenido de CaCO_3 de Sashcab es muy bueno y que varía en un rango de 75 a 97% en contenido total, la diferencia en profundidad encontrada entre la geofísica y la perforación es de aproximadamente ± 1 m esto debido a que existe un cambio litológico entre el Sashcab y la caliza más consolidada cuyas características son muy similares.

UNIDAD 2 YESO I

La siguiente unidad correlacionable es la U2 cuyo rango de resistividades va de 127 a 440 Ω *m, que aparece a una profundidad de 6 m en la zona de perforación, en el sondeo a esta profundidad se tienen yesos con un contenido promedio de CaSO_4 de 77% y 10 % de CaCO_3 además de intercalaciones de horizontes arcillosos. Se observan cavidades de disolución. Hacia la parte media de la unidad a una profundidad de 13.5 m se tiene un contenido de óxidos de hierro, producto de la alteración de sulfuros de hierro, los cuales son resultado del alto aporte de sedimentos continentales alternados con los depósitos de evaporitas.

El espesor de esta unidad es de 11.5 m que es muy aproximado al espesor dado por la geofísica que es de 10 m, una diferencia de aproximadamente ± 1 m. El contenido arcilloso promedio es de 8% aproximadamente, que corresponde a una asociación de illita-sméctita, las cuales son aluminosilicatos hidratados con contenido de Ca, Mg y Na.

El índice de calidad de roca (RQD), el cual es un valor que indica que tan sana se encuentra esta, de acuerdo al número de fracturas y grado de alteración de los minerales que la forman, es de 84 % promedio lo que es indicativo de que la calidad de la roca es buena.

UNIDAD 4 YESO III

La unidad subyacente en el perfil geofísico es la U4 con un rango de resistividades de 47 a 2500 Ω *m; en la perforación esta unidad correspondería a un horizonte de yesos con un contenido de 82% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y 6 % de CaCO_3 , de color pardo oscuro, se observa la presencia de cavidades de disolución y hacia la base de la unidad se tienen horizontes arcillosos intercalados con

horizontes de anhidrita (yeso deshidratado). El contenido arcilloso promedio es de un 10 %, que corresponde a una asociación de illita-sméctita.

Casi no se tiene presencia de óxidos de hierro, no se conoce el espesor ya que la perforación alcanzó los 31.5 m sin cambio en la litología y en el perfil resistivo, la U4 corresponde a la unidad geofísica que se encuentra a más profundidad, hacia la base de la cual no se conoce el espesor, esta unidad se encuentra en la base de todas las líneas de geofísica.

El índice RQD para esta unidad se puede dividir en dos intervalos de profundidad; para una profundidad de 15 a 21 m se tiene un valor de RQD de 94%, pero hacia la base de esta a partir de los 21 m se tiene un valor de RQD de 86% ya que se observan cavidades formadas por la disolución de la roca (karsticidad). Para ambos valores se observa que la calidad de la roca es muy buena y hacia la parte inferior también.

El Sashcab y el yeso I (correspondiente a la unidad geofísica U2) se encontraron durante la perforación del barreno 2, no así el yeso III (correspondiente a la unidad geofísica U4), el Sashcab presentó un espesor de 4.5 m y el yeso I de 10.5 m.

UNIDAD 3B YESO II

Subyaciendo al yeso I se encontró un horizonte de yesos correspondiente a la unidad geofísica U3B (yeso II), con un rango de resistividades de 7 a 27 $\Omega \cdot m$, su contenido de $CaSO_4$ es de 78% y un 4% de $CaCO_3$, son yesos de color pardo oscuro con horizontes arcillosos intercalados y presencia de óxidos de hierro hacia la cima de la unidad; hacia la base se observan horizontes de anhidrita y de arcillas color gris claro, no se conoce su espesor ya que no hubo cambio en la litología hasta los 31.5 m límite de la perforación pero este se puede conocer correlacionando esta unidad con la misma unidad U3B la cual afloraba en otros sitios, de acuerdo a los datos de geofísica; conforme a este método el espesor promedio de la unidad es de aproximadamente 28 m. Hacia la base de la unidad se presentan algunos sulfuros de Fe, los cuales presentan un halo de oxidación.

El contenido arcilloso promedio es de 12% aproximadamente, que corresponde a una asociación de illita-sméctita.

El índice RQD para esta unidad es de 87% en promedio lo cual indica que el horizonte de yeso II es una roca de buena calidad.

La perforación solo permite correlacionar de manera adecuada las unidades correspondientes al Sashcab, al yeso I, II, y III, las unidades geofísicas restantes se pueden caracterizar a través del muestreo superficial y por correlación de valores de resistividad de las otras unidades ya caracterizadas. A partir del muestreo superficial se caracterizaron las unidades U1B, y U3A.

UNIDAD 1B CALIZA I

La unidad geofísica U1B corresponde a caliza mucho más consolidada que el Sashcab, con presencia de arcillas, contenido de bioclastos, horizontes de algas y cuarzo, en ocasiones con secciones alargadas y fibrosas de yeso, su rango de resistividad va de 14 a 39 Ω *m los contenidos de CaCO_3 son de 77.30 %, valor correspondiente al punto de muestreo FK-19, su espesor de acuerdo al estudio geofísico es de 14 m aproximadamente con una diferencia de ± 1 m de acuerdo a los valores de espesores vistos con anterioridad.

Para esta unidad no se tienen valores de RQD ya que no se realizaron estudios correspondientes para este índice.

UNIDAD 3A YESO IV

La unidad geofísica U3A tiene un rango de resistividades de 36 a 85 Ω *m. esta unidad presenta algunos afloramientos en el interior del predio específicamente en el punto de muestreo FK-25 que corresponde a yesos cristalinos color pardo; sus porcentajes de contenido de sulfato de calcio, es de aproximadamente 87.39 %, la petrografía hecha a las muestras de este punto presenta una matriz cristalina con material arcilloso, el que puede tratarse de la asociación illita-sméctita encontrada en las muestras a profundidad. Se observan también microcristales de calcita diseminados.

Para esta unidad no se tienen valores de RQD ya que no se realizaron estudios correspondientes para este índice.

Se muestran las unidades correlacionadas en la tabla siguiente.

Unidades Geofísicas	Rango de Resistividades (Ω^*m)	Unidad litológica correspondiente
U1A	1-1281	Sashcab
U1B	14-39	Caliza I
U2	127-440	Yeso I
U3A	36-85	Yeso IV
U3B	7-27	Yeso II
U4	47-2500	Yeso III

Tabla 10. Correlación de unidades geofísicas y geológicas.

6.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS PERFILES GEOFÍSICOS

Una vez identificado cada unidad a través de la correlación es posible caracterizar los perfiles geofísicos y establecer la geología del subsuelo. Sustituyendo los valores de resistividad con la litología característica de cada uno de ellos, se obtienen secciones geológicas en donde se pueden establecer espesores, calidad del material, horizontes con alteraciones o contenido de óxidos y material arcilloso, como se muestra en la fig. 25, las secciones correspondientes a cada perfil de geofísica se presentan en el plano de secciones geológicas anexo a este trabajo.

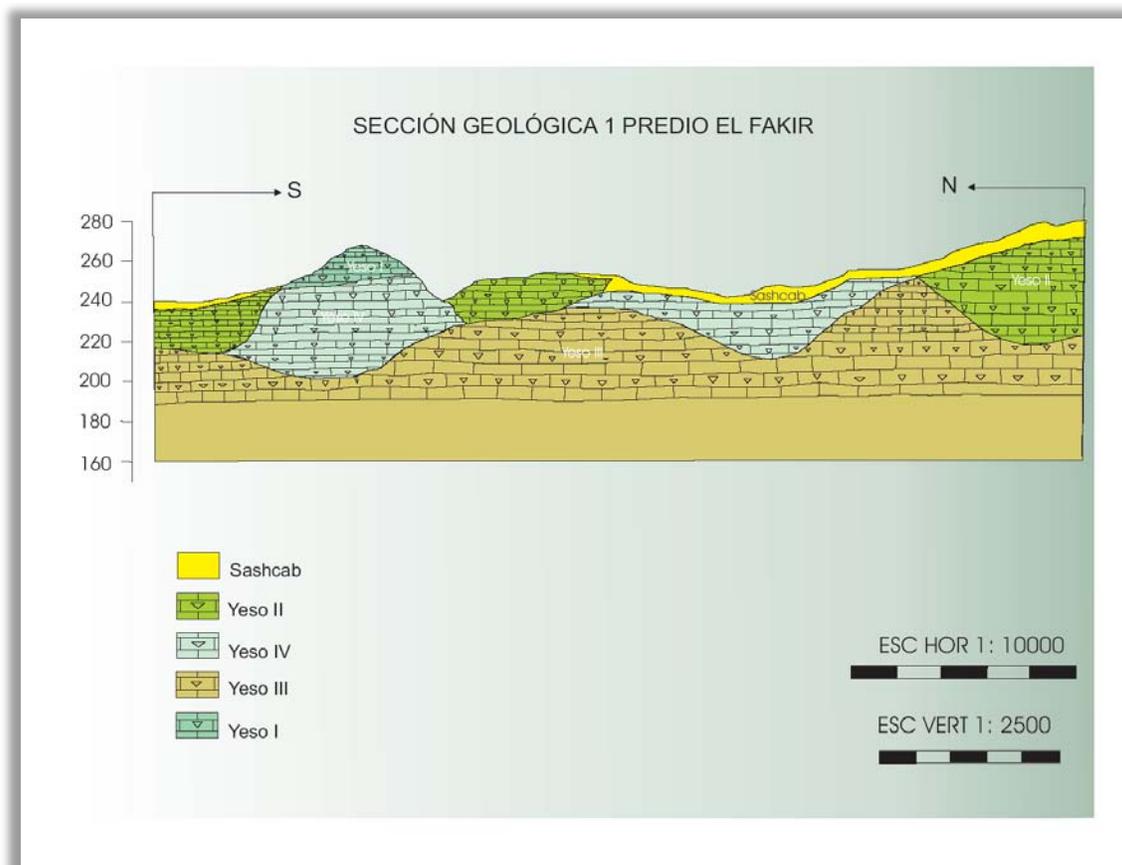


Fig. 25. Sección geológica 1.

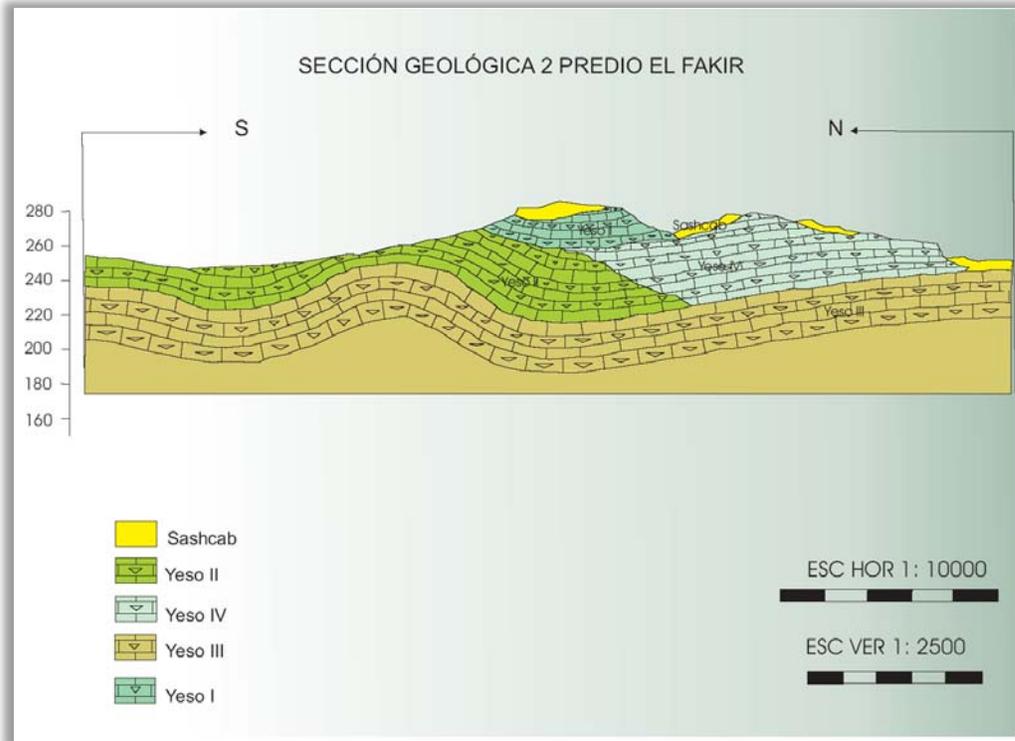


Fig. 26. Sección geológica 2.

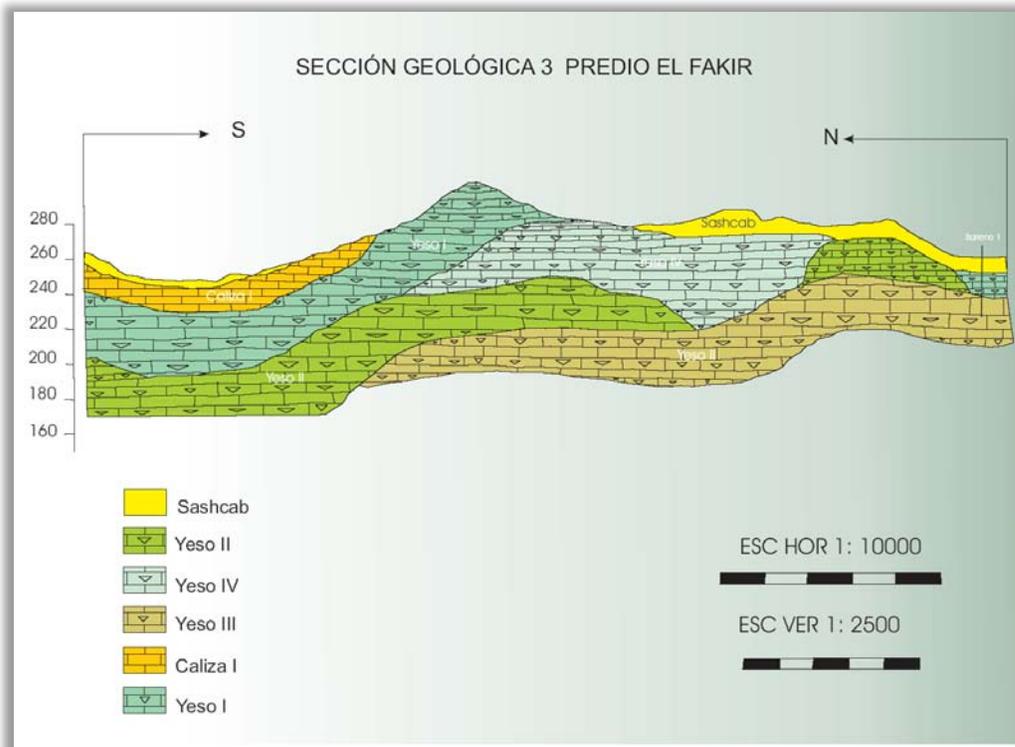


Fig. 27. Sección geológica 3.

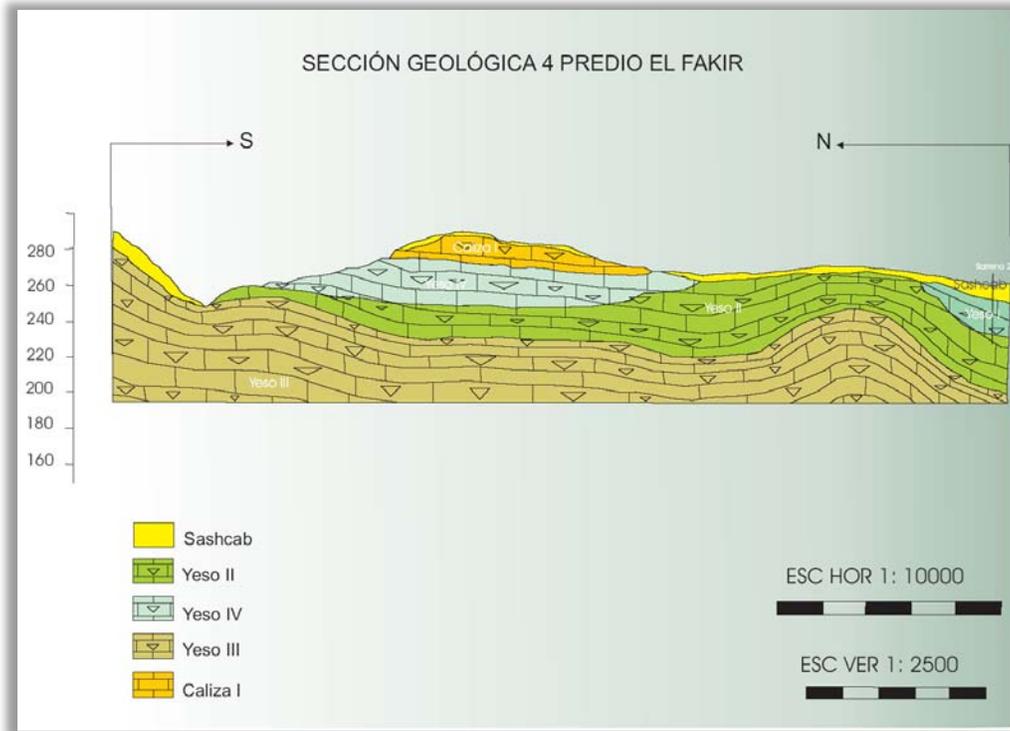


Fig. 28. Sección geológica 4.

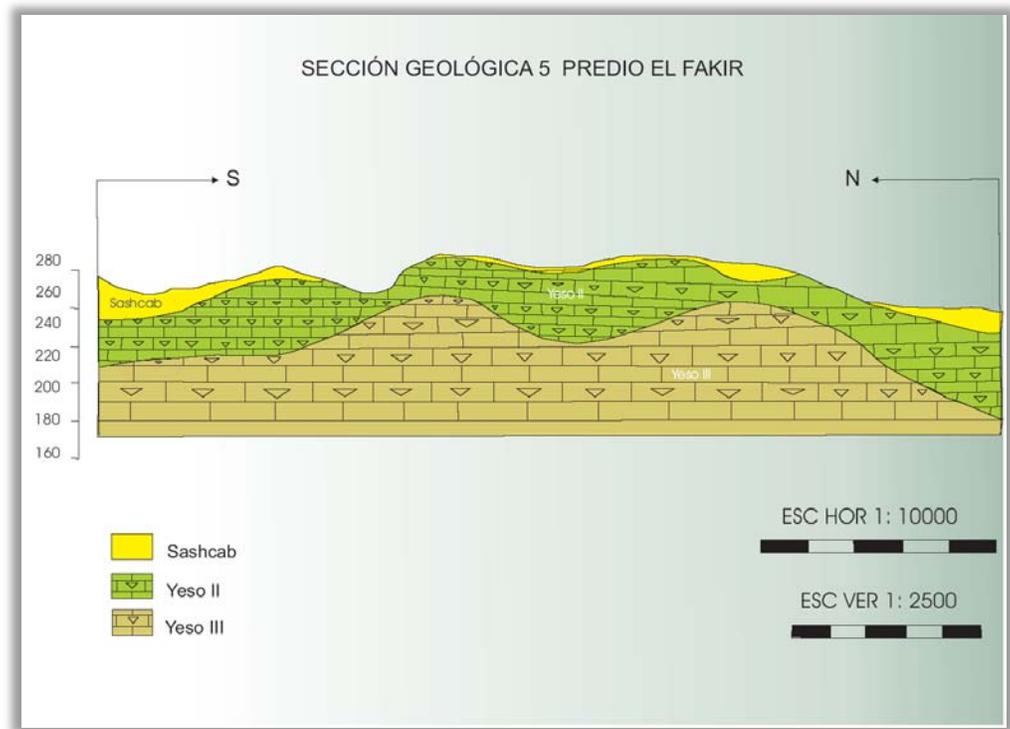


Fig. 29. Sección geológica 5.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el estudio para la evaluación de la calidad de los materiales encontrados dentro de la zona del predio el Fakir, se llevaron a cabo diversos métodos de investigación como exploración superficial, exploración geofísica, toma de muestras (superficiales y del subsuelo), y posterior análisis geoquímico y petrográfico y la interpretación geológica de los datos obtenidos. Para esto son considerados varios aspectos geológicos como la litología, estratigrafía del subsuelo, geomorfología, que permiten realizar la caracterización de los materiales encontrados en superficie, así como los obtenidos del subsuelo, con ello se ha logrado identificar las diferentes unidades litológicas, con lo cual se ha elaborado un modelo de cada una de las unidades encontradas, así como sus características distintivas tales como mineralogía, calidad de la roca, porcentaje de minerales encontrados, espesores. etc. Las conclusiones de cada uno de estos métodos se presentan a continuación:

I. Muestreo superficial:

Durante el muestreo superficial se pudieron identificar mediante la toma de muestras y realización de catas de diversos puntos ubicados dentro del predio:

- a) El espesor de la cubierta vegetal, cuya máxima profundidad es de 1 m en algunas zonas, por lo que su desmonte no representara mayor problema, si en un futuro se llevan a cabo los trabajos de explotación y minado.
- b) El Sashcab superficial, representa a la caliza mas somera, cuyo contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) abarca un rango de 75 a 97 % en promedio, el espesor que alcanza es de 5 a 6 m. la pureza en cuanto a su contenido de carbonato de calcio es muy buena, pero su cantidad no es tan importante desde el punto de vista comercial. Por los altos porcentajes de CaCO_3 , si se puede utilizar este material como un componente de concretos de acuerdo al proyecto revisado en el capítulo I (Payan-Arjona, 2002). Como material de construcción (arenas y gravas), debido a su poca consolidación, es económicamente explotable.

II. Estudio geofísico:

Con los datos obtenidos durante el estudio geofísico exploratorio se pudieron identificar 6 diferentes unidades geofísicas en el subsuelo; con dicha información se elaboraron 5 perfiles

geofísicos diferentes a través de los cuales se pudo realizar una correlación con los datos del muestreo por barrenación, obteniendo 5 secciones geológicas de la zona de estudio.

III. Muestreo y caracterización del subsuelo:

El muestreo por sondeo a barrenación permitió elaborar una columna estratigráfica generalizada hasta una profundidad de 31.5 metros a través de la cual se pudo establecer una correlación con cuatro unidades geofísicas diferentes incluyendo el Sashcab, y extrapolar las propiedades de cada una de ellas, para definir la litología de todo el predio. Asimismo durante la barrenación se tomaron datos de calidad de la roca (RQD), datos que se toman en cuenta para conocer el método de explotación, estos valores se presentan en la tabla número 11.

Seleccionando muestras a diferente profundidad en núcleos de barrenación, se realizó un estudio petrográfico para definir características microscópicas como caracterización mineral, tamaño de cristales, relaciones texturales, clasificación litológica, porcentaje de minerales, y pureza o ley, de cada una de las unidades litológicas, encontrándose horizontes de yesos, calizas, minerales arcillosos, sulfuros de Fe y óxidos e hidróxidos de Fe, los horizontes de yesos encontrados a una profundidad de entre 6 metros hasta los 16.5 metros resultaron debido a su volumen, económicamente viables para su explotación como banco de materiales. Los horizontes de yeso que se encuentran a más profundidad también son económicamente viables pero su contenido arcilloso, hace necesaria la aplicación de un método de beneficio para liberar al yeso de estas arcillas.

IV. Análisis geoquímico:

Por medio de los análisis químicos realizados a las muestras superficiales y a los núcleos de barrenación mediante DRX e ICP-MASAS se pudieron conocer sus contenidos en porcentaje de Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y de Carbonato de Calcio (CaCO_3), reconociendo así las zonas con mayor pureza de ambas sustancias (Yeso IV y Yeso III con hasta el 88% de CaSO_4 y la Caliza I con un 77% de CaCO_3). Asimismo se identificó su contenido de arcillas, mediante el método de EIC (Espectrometría de Infrarrojo Cercano), encontrándose una asociación de illita-sméctita, minerales arcillosos comunes en suelos, el cual servirá para saber que método de beneficio sería el más adecuado para cada unidad.

De acuerdo a este tipo de asociación se puede identificar al contenido arcilloso encontrado en el predio como una impureza de la tercera categoría, la de los minerales hídricos, al que pertenecen las arcillas como la montmorillonita. Estas impurezas contenidas afectarán

principalmente la velocidad con la que se humedece el producto final y su adherencia como material de recubrimiento.

Los porcentajes de yeso y carbonato se presentan en la tabla número 11.

Tabla 11. Contenido de Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y Calcita (CaCO_3), contenido arcilloso y RQD de cada una de las unidades identificadas.

Unidad Litológica	Espesor. (m)	Contenido de CaSO_4 (%)	Contenido de CaCO_3 (%)	Contenido de Óxidos e hidróxidos de Fe y arcillas (%)	RQD (%)
Sashcab	5	-	75 - 97	8-10	-
Caliza I	14	-	77.30	8-10	-
Yeso I	11.5	77	10	13	84
Yeso IV		87.39	4.61	8	-
Yeso II	28	78	4	12	87
Yeso III	No se encontró	82	6	10	86-94

V. Petrografía:

La petrografía de las muestras superficiales y de los núcleos de barrenación permitió identificar cada una de las fases minerales presentes en las láminas delgadas de cada unidad litológica; la Caliza I perteneciente a la formación Icaiché, que se encuentra hacia la cima de la columna estratigráfica presentó en general un contenido de calcita micrítica, material arcilloso, restos de algas, bioclastos, clastos redondeados y subredondeados de cuarzo y óxidos e hidróxidos de Fe. Las unidades subyacentes pertenecientes a yesos de la formación Icaiché presentaron en general un contenido de microcristales de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con cristales diseminados de calcita, material arcilloso asociado y óxidos e hidróxidos de Fe. Hacia la parte inferior de la columna se tiene una asociación de yesos, anhidrita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y calcita, con menor porcentaje de contenido arcilloso y presencia de óxidos e hidróxidos de Fe. Se observa que la caliza contiene gran cantidad de aloquímicos, (bioclastos, oolitos, intraclastos), pero su contenido arcillosos hace que su pureza en cuanto a carbonato de calcio no sea muy buena, siendo apta solo para su explotación como materiales de construcción (agregados pétreos). Las unidades de yesos presentan hacia la parte superior poco contenido de material arcilloso y escasa presencia de óxidos e hidróxidos de Fe, siendo las más aptas para la explotación comercial, las unidades de yesos encontradas a mayor profundidad (14-16 m) también son aptas para la explotación comercial por su alto contenido de

yeso-anhidrita (hasta 87%) pero se requiere un método de beneficio para liberarlas del contenido de arcillas que es de hasta un 10%.

A partir de los datos colectados con la metodología utilizada durante este estudio se concluye que las zonas más susceptibles de ser explotadas son las encontradas hacia la parte media del predio, como se puede ver en las secciones geológicas 2 y 3 las unidades de yeso I, II y IV presentan mayores espesores en esta sección, siendo el principal objetivo en una primera etapa de explotación, el yeso III que presenta mayores espesores a ambos límites este y oeste del predio también es un objetivo de explotación aunque debido a su contenido arcilloso y por la presencia de horizontes arcillosos y karsticidad representaría una mayor inversión en su explotación, pero que redituaría por su alto contenido de yeso-anhidrita (hasta el 82%).

Asimismo los materiales como el Sashcab y los horizontes de calizas también son económicamente recuperables aunque de menor importancia que las unidades de yesos debido principalmente a su escaso espesor.

RECOMENDACIONES

- En caso de que se tome la decisión de explotar el predio, será necesario hacer la caracterización y el análisis de los materiales para ubicar cualquier variación que se pudiera presentar, y que haga necesario reclasificar o adicionar nuevas unidades diferentes a las que ya se tienen identificadas.
- A partir de los datos obtenidos con las dos barrenaciones que perforaron varias unidades y que permitió caracterizarlas adecuadamente, se recomienda realizar barrenaciones en zonas que permitan caracterizar a mayor detalle la geología del predio ya fraccionado (lugares que perforen hasta cuatro unidades litológicas), dando prioridad a las zonas por explotar.
- Con los datos obtenidos de la barrenación de control, realizar un modelo geológico, a partir de valores de análisis químicos y petrografía, de las zonas de mayor pureza de yeso y calcita con la finalidad de tener un mayor rendimiento en la relación gastos de explotación-mineral obtenido.
- Las impurezas de los materiales explotables ya identificadas como del tipo 3 de la clasificación de Jorgensen, 1994 (capítulo IV), una asociación de illita-sméctita; hace necesario considerar un método de beneficio que libere al yeso y a la caliza de estos materiales incluyendo los óxidos e hidróxidos de Fe.

- Utilizar el método de explotación por arranque de material a través de voladuras usando barrenación rotaria, con tamaño de 50.8 a 101.6 mm de diámetro, y con un espaciado relativamente cerrado, para distribuir la explosión a través de la masa rocosa en un patrón algo denso (Jorgensen Duane B., 1994). Es indispensable considerar que el yeso tiende a absorber la fuerza explosiva sin buen fracturamiento. Un patrón de voladura mal acomodado, resulta en fragmentación irregular, exceso de finos, etc.
- Si se usa el método de explotación descrito anteriormente, se recomienda seguir las normas de seguridad y protección al ambiente citadas en la Ley Federal y Estatal de protección al ambiente, con la finalidad de evitar daños y degradación ambiental, ya que los ecosistemas que rodean al predio son especialmente frágiles. Asimismo es recomendable establecer un programa de reforestación y protección a la fauna y flora de las zonas aledañas ya, que durante el presente estudio se pudo observar, la tala de maderas preciosas, y caza ilegal y furtiva de especies protegidas, principalmente para su venta.

ANEXOS

ANEXO A. COORDENADAS DE MUESTREO SUPERFICIAL

MUESTRA	COORDENADAS DE PUNTO DE MUESTREO			DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS
	ESTE	NORTE	ALTITUD	DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA
Fk01	228469.289	2053121.55	274.5802	SASKAB Material blanco de aspecto terroso.
Fk02	228480.67	2052803.38	296.45	CALIZA Roca color crema con disolución.
Fk03	228485.283	2052763.7	284.1934	SUELO Material suelto color crema.
Fk04	228498.172	2052430.68	254.6331	CALIZA Roca color crema claro
Fk05	228510.084	2052198.45	280.348	YESO Roca de textura cristalina color pardo
Fk06	228569.969	2050852.51	250.307	CALIZA Roca color crema
Fk07	227666.543	2053771.49	246.9425	SUELO Material color negro con pardo
Fk08	227174.75	2053677.64	264.7267	CALIZA Roca color crema
Fk09	227035.181	2053649.81	289.4805	CALIZA Roca color crema blancuzco
Fk10	227040.863	2053056.93	275.5415	CALIZA Roca color crema blancuzco
Fk11	227749.775	2053116.4	254.3927	CALIZA Roca color crema lechoso
Fk12	227819.585	2052427.99	250.0668	SASKAB Roca blanca con manchones pardos
Fk13	227822.883	2052269.4	252.9507	CALIZA Roca color pardo
Fk14	227831.582	2051565.85	279.8673	CALIZA Roca color crema parduzco
Fk15	227840.037	2051288.58	276.5028	CALIZA Roca color pardo con disolución
Fk16	227844.304	2051018.14	269.5333	CALIZA Roca color crema con terrígenos
Fk17	228211.82	2051815.64	288.0386	CALIZA Roca color crema
Fk18	228213.714	2051906.57	285.8756	YESO Roca color pardo con manchones ocre
Fk19	228148.056	2052344.37	260.1605	CALIZA Roca color crema con terrígenos
Fk20	228136.481	2052603.55	253.9121	CALIZA Roca color pardo con terrígenos
Fk21	228707.614	2050891.49	258.9589	CALIZA Roca color crema
Fk22	228845.942	2051602.43	276.9835	CALIZA Roca color pardo
Fk23	228838.593	2051833.45	289.2402	CALIZA Roca color crema parduzco
Fk24	228805.13	2052301.93	258.7185	CALIZA Roca color pardo lechoso
Fk25	228136.645	2052772.85	236.8488	YESO Roca cristalina color pardo
Fk26	227734.533	2052764.62	252.2297	CALIZA Roca color pardo cremoso
Fk27	227526.808	2052334.28	279.3867	CALIZA Roca color crema blancuzco
Fk29	227980.247	2050770.81	246.9425	YESO Roca cristalina color pardo translúcido
Fk30	228137.263	2050786.36	249.1053	YESO Roca cristalina con terrígenos

Tabla 12. Coordenadas de los puntos de muestreo en el predio El Fakir y descripción macroscópica de las muestras recolectadas.

ANEXO B.

COORDENADAS DE PUNTOS SEV (SONDEO ELECTRICO VERTICAL)

COORDENADAS SEV'S (SONDEO ELECTRICO VERTICAL)		
CLAVE	ESTE	NORTE
SEV1	227560.447	2050715.92
SEV2	227859	2050767
SEV3	228214.5	2050809.5
SEV4	228570	2050852
SEV5	228868.945	2050882.28
SEV6	227548.766	2051142.83
SEV7	227848.912	2051142.83
SEV8	228203.875	2051142.83
SEV9	228559.311	2051142.83
SEV10	228857.672	2051139.13
SEV11	227536.743	2051476.38
SEV12	227836.895	2051476.17
SEV13	228189.557	2051476.17
SEV14	228542.042	2051476.17
SEV15	228842.344	2051476.17
SEV16	227526.36	2051809.5
SEV17	227826.505	2051809.5
SEV18	228176.708	2051809.5
SEV19	228527.113	2051809.5
SEV20	228827.414	2051809.5
SEV21	227515.97	2052142.83
SEV22	227816.115	2052142.83
SEV23	228164.237	2052142.83
SEV24	228512.188	2052142.73
SEV25	228812.484	2052142.83
SEV26	227505.58	2052476.17
SEV27	227805.725	2052476.17
SEV28	228151.566	2052476.17
SEV29	228497.253	2052476.17
SEV30	228797.553	2052476.17
SEV31	227495.19	2052809.5
SEV32	227796.951	2052809.5
SEV33	228140.876	2052809.5
SEV34	228482.322	2052809.5
SEV35	228782.623	2052809.5

Tabla 13. Coordenadas de los puntos donde se realizaron los sondeos eléctricos verticales.

ANEXO C. SECCIONES GEOELECTRICAS

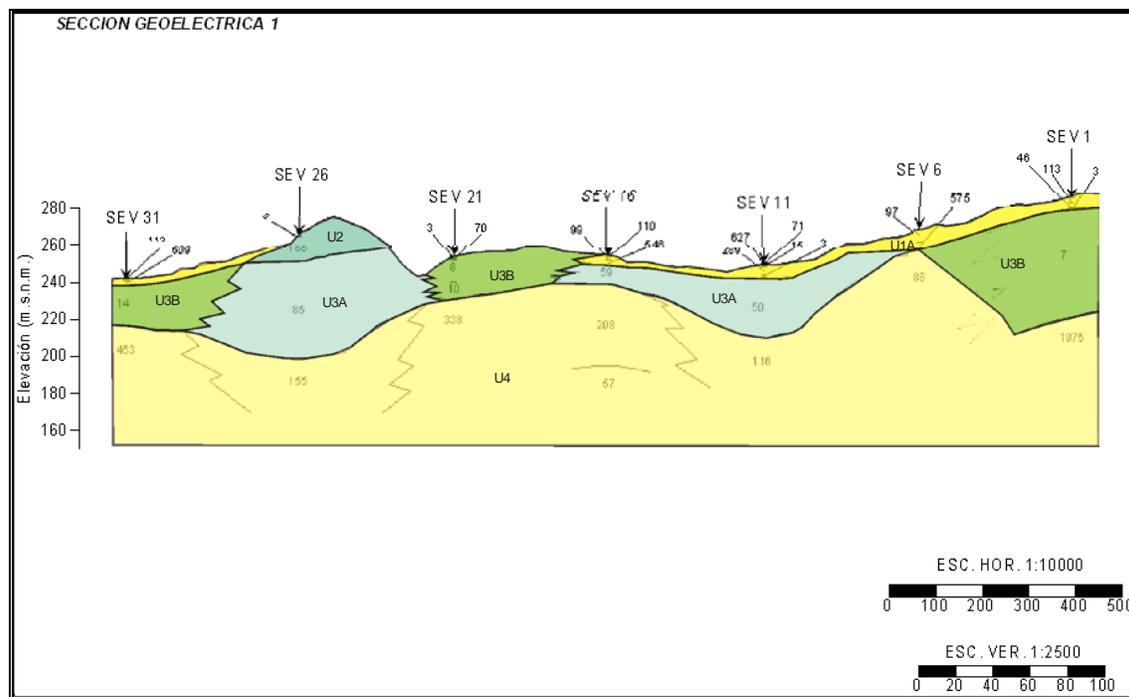


Fig. 30. Sección Geoelectrica 1.

	Unidad Geoelectrica 1A
	Unidad Geoelectrica 1B
	Unidad Geoelectrica 2
	Unidad Geoelectrica 3A
	Unidad Geoelectrica 3B
	Unidad Geoelectrica 4

Tabla. Clave de color de las unidades geofísicas

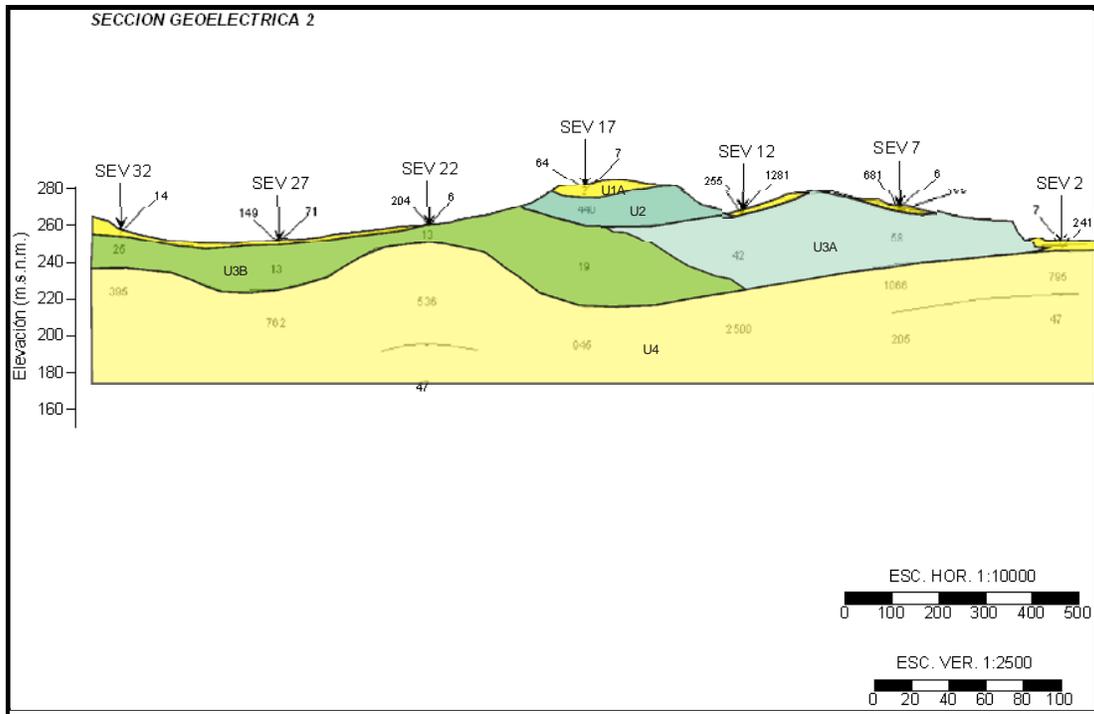


Fig. 31. Sección Geoelectrica 2.

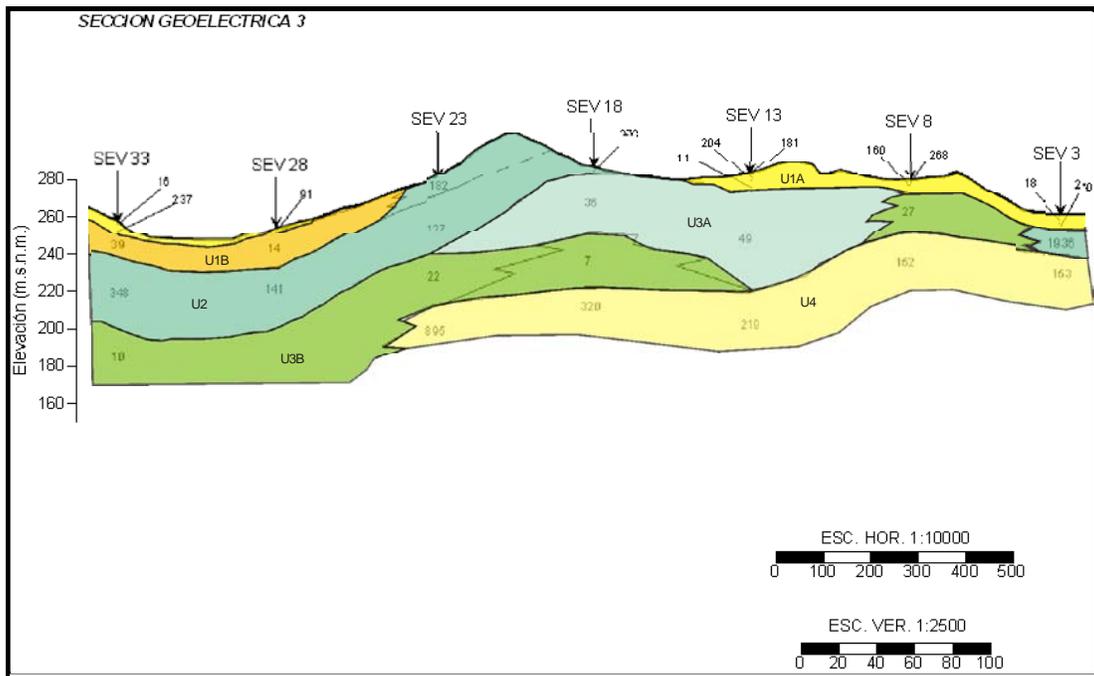


Fig. 32. Sección Geoelectrica 3.

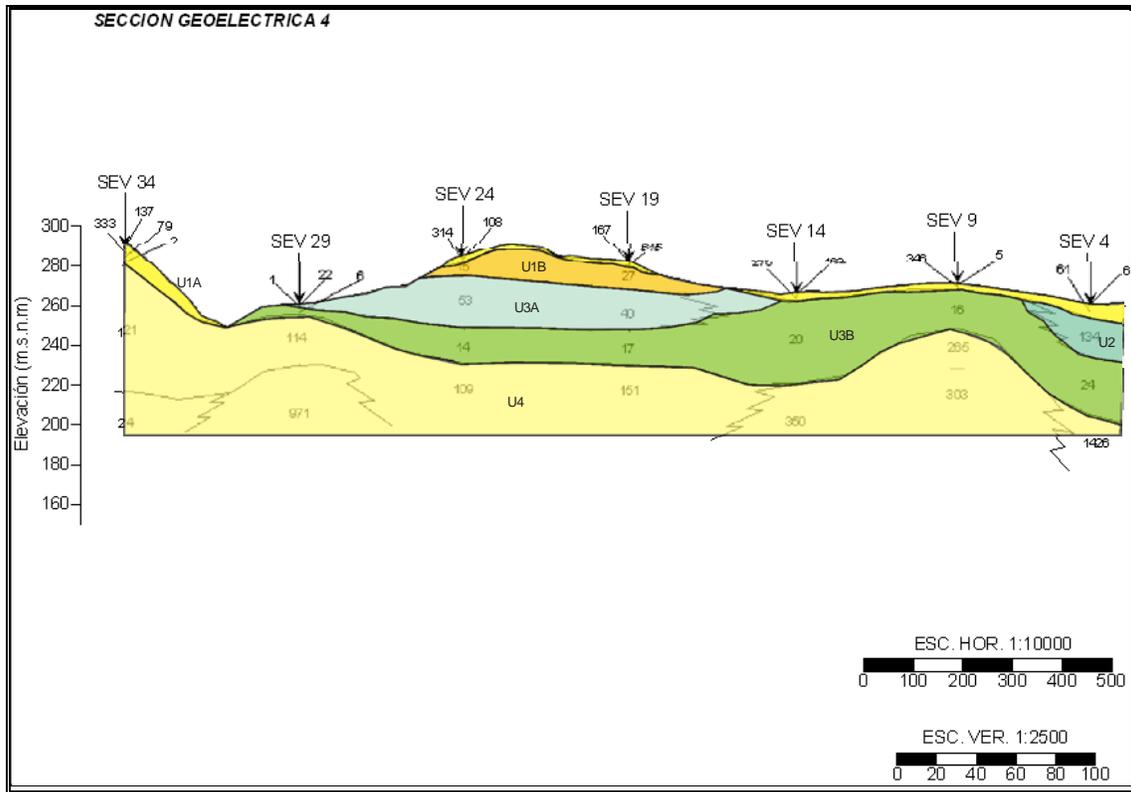


Fig. 33. Sección Geoelectrica 4.

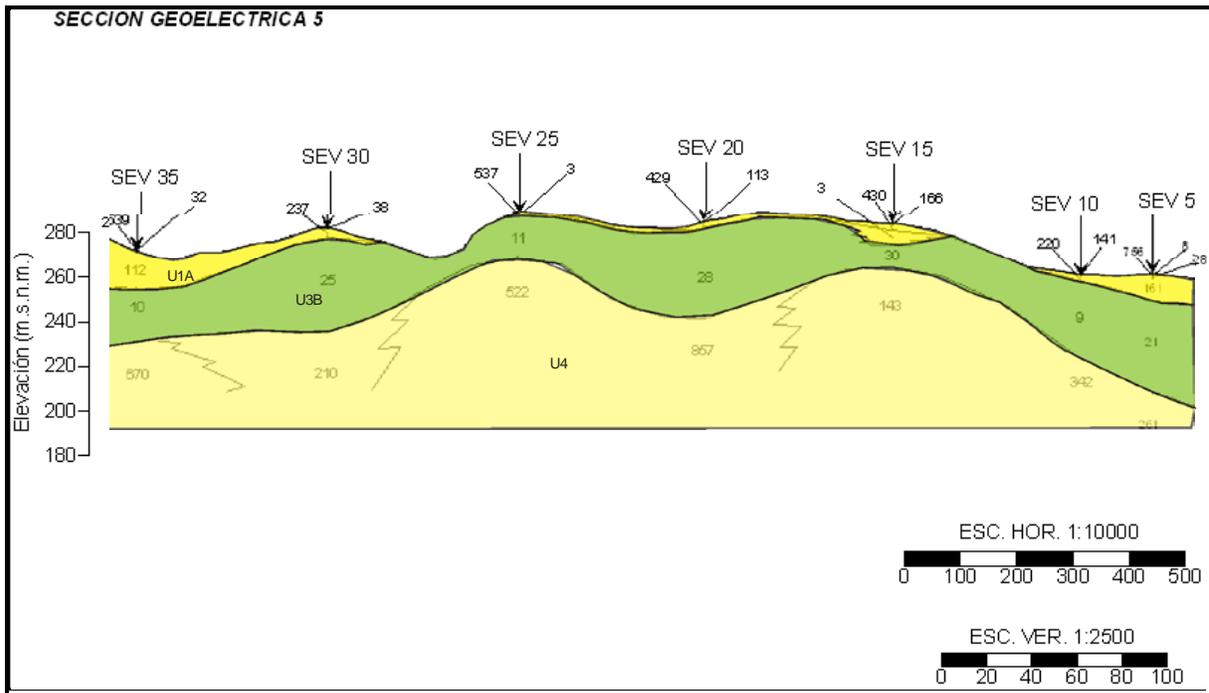


Fig. 34. Sección Geoelectrica 5

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adams, A.E., Mackenzie, W.S., Guilford, C., 1994, Atlas of Sedimentary rocks under the microscope. 4a Edition, Longman Group limited, England, 104 p.
- Aguayo-Camargo, J. E., Martin-Córdova, S., 1987. Origen y Evolución de los rasgos Morfotectónicos Postcretácicos de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XIXIII, núm. 2, pp. 15-39.
- Alaníz-Alvarez, S. A., P. van der Heyden, Nieto Samaniego, A. F., Ortega-Gutierrez., F., 1996, Radiometric and kinematic evidence for Middle Jurassic strike-slip faulting in southern México related to the opening of the Gulf of México: *Geology* v. 24, p. 443-446
- Alvarez., W., Smith, Lowrie, W., Asaro, F., Margolis, S.V., Clacys, P., Kastner. M., and Hildebrand, A. R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of México: A restudy of DSDP Leg 77 sites 536 and 540: *Geology*. V. 20, p. 697-700
- Ambrose, W.A., T. F. Wawrzyniec, K. Fouad, S.C. Talukdar, R.H. Jones, D.C. Jennette, M. H. Holtz, S. Sakurai, S.P. Dutton, D.B. Dunlap, E.H. Guevara, J. Meneses Rocha, J. Lugo, L. Aguilera, J. Berlanga, 2003, Geologic framework of upper Miocene and Pliocene gas plays of the Macuspana Basin, southeastern México: *American associations of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 87, pp. 1411-1435.
- Bird, Dale., Burke, Kevin., 2005, Pangea Breakup: México; Gulf of México, and Central Atlantic Ocean: University of Houston.
- Bird, Dale., Burke, Kevin., Hall, Stuart, A., 2004, Jurassic tectonics of the Gulf of México and Central Atlantic Ocean: Ph. D. Thesis, University of Houston.
- Bryant, D., D. Nielsen, and L. Tangley. 1997. The Last Frontier Forests: Ecosystems and Economies on the Edge. World Resources Institute's Forests Frontiers Initiative. 80 pp.
- Burkart, B., 1983, Neogene North American-Caribbean plate boundary across northern Central America: Offset along the Polochic Fault: *Tectonophysics*, v. 99, p. 251-270.
- Carbajal, Quiroz, Juan, R., López, Fonseca, 2005, Perspectivas económicas como piedras dimensionables del material rocoso del cerro El Salitre, municipio de Tlaltizapan, Estado de Morelos. Tesis de Licenciatura, UNAM.
- Carr, Donald, D., 1994, *Industrial Minerals and Rocks*. 6a. Ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, inc., Littleton, Colorado, pp. 571-581.
- Castro, Dorado, Antonio., 1989, *Petrografía Básica, Texturas, Clasificación y nomenclatura de rocas*, Paraninfo, Madrid, España, 143 p.
- Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente, 2009, Resolución de 10/12/2008, de la Dirección General de Evaluación ambiental, sobre la declaración de impacto ambiental del

- proyecto denominado: Cantera de Yesos Elia (Exp. TO-6089-08), Diario oficial de Castilla-La Mancha, España, Año XXVIII, Núm. 39, pp. 8290-8294.
- Damon, P.E., K.F. Clark, Shafiquillah, J.Q. Roldan y L.J. Islas 1981 a. Geology and mineral deposits of southern Sonora at Sonoran Sierra Madre Occidental. Cordilleran Section of the Geological Society of America and Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Memoir with Field Guide Book: 369-428.
- Dobrin, B., Milton., 1975, Introducción a la Prospección Geofísica, 3ª Ed., Ediciones Omega S.A. Barcelona, España, 483 p.
- Escamilla, A., M. SanVicente, M. Sosa, and C. Galindo-Leal. 2000. Habitat mosaic, prey availability and wildlife hunting in the tropical forest of Calakmul, Mexico. Conservation Biology. In press.
- Flores-Villela, O., y A.G. Navarro. 1993. Un análisis de los vertebrados terrestres endémicos de Mesoamérica en México. Pp. 387-395. En: Diversidad Biológica de México. Gío-Argáez, R., y E. López-Ochoterena (eds.). Vol. Esp. (XLIV) Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. México D.F.
- Galindo-Leal, C., B. Sandler, M. Weber, R. Cedeño, J. Correa, C. Pozo, J. Schmitter-Soto, and J. Salgado. 1998. Amenazas a la Selva Maya de Campeche y Quintana Roo, México y prioridades de monitoreo. Pp. 142-144. In: Maya Forest Biodiversity Workshop: inventorying and monitoring. Herrera-MacBryde O. (Ed.). Smithsonian Institution, Washington.
- Galindo-Leal, C. 1999. La gran región de Calakmul: Prioridades biológicas de conservación y propuesta de modificación de la Reserva de la Biosfera. Reporte Final a World Wildlife Fund – México, México D.F. 40 pp.
- García-Molina, G., 1984, Structural Evolution of SE México (Chiapas-Tabasco-Campeche) offshore and onshore: Rice University, Ph.D. Dissertation, 161 p.
- González-Barros, Manuel, R., 2008, Exploración y Explotación de Rocas Ornamentales, Instituto Geológico y Minero de España, Presentación en formato PDF, 89 p.
- González de Vallejo, Luis I., 2005, Ingeniería Geológica, Última ed. 2006., Pearson, Prentice Hall, Madrid, España, 715 p.
- Guerrero García, J.C., 1975, Contributions to paleomagnetism and Rb-Sr geochronology: Ph. D. Dissertación, The University of Texas at Dallas, 152 p.
- Grajales-Nishimura, J.M., E. Cedillo-Pardo, C. Rosales-Dominguez, D.J. Moran-Zenteno, W. Alvarez, P. Clacys, J. Ruiz-Morales, J. García-Hernandez, 2000, Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern México oil fields: Geology, v. 28, p. 307-310.

- Hurlbut, H., Cornelius, 1970, Minerals and Man, 3ª Ed., Chanticleer Press Edition, New York, 304 p.
- INEGI, 1999, Campeche, Condensado Estatal: Esc. 1: 500,000
- INEGI, 1999, Quintana Roo, Condensado Estatal: Esc. 1: 700,000
- International Stratigraphic Chart, 2005 International Commission on Stratigraphy, ratified by the International Union of Geological Sciences (IUGS).
- Keer, P. F., 1965, Mineralogía Óptica: Traducción., Ed. Del Castillo, Madrid, España, p. 448.
- Korbel, Petr., Novák Milán., 2004, La Enciclopedia de los Minerales. 1ª. Ed. Ed. Libsa, España, 296 p.
- Ley de Equilibrio Ecológico del Estado de Campeche, 2008, Título Cuarto, Capítulo VIII, Aprovechamiento de minerales o Sustancias no Reservadas a la Federación, Expedida por decreto Núm. 261, P.O. 22/Jun./1994. LIV LEGISLATURA.
- López Ramos, E., 1969. Geología de México. 2ª. Ed. Edición escolar. Tomo III.
- Mackenzie, W.S., Guilford, C., 1994, Atlas of rock-forming minerals in thin section. 9a Edition, Longman Group limited, England, 98 p.
- Melgarejo, Joan, Carles., 2003, Atlas de asociaciones minerales en lamina delgada. 1ª Ed. Universidad de Barcelona/Fundación Folch, Barcelona, España. Tomos I y II, p. 1071.
- Morán Zenteno, Dante J., 1984, Geología de la República Mexicana. 2ª. Ed. INEGI-UNAM, México, D.F., pp. 77-84.
- Morán Zenteno, Dante J., Martiny, B., Tolson, G., Solis Pichardo, G., Alba-Aldave, L., Hernandez-Bernal, M. del S., Macias Romo, C., C. Martinez Serrano, R.G., Schaaf, P., Silva-Romo, G., 2000, Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, T. LIII, No. 1, p. 27-58.
- Morán Zenteno, Dante J., Cerca, M., Duncan-Keppie, J., 2005, La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación: Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, núm. 3, pp. 319-341.
- Mottana, Annibale. Crespi, Rodolfo., Liborio Giuseppe, 1993, Guide to rocks and Minerals, 1ª Ed, Simon and Schuster inc. impreso en España, 607 p.
- Muehlberger, W.R. y Ritchie, A.W., 1975, Caribbean-American Plate Boundary in Guatemala and Southern México as seen on Skylab IV orbital photography: Geology, v. 3, p. 232-235.

- Muñoz-Meneses R.A., Muñoz-Chávez J.A., Mancilla, P., 2007, Caracterización Físicoquímica de arcillas del Municipio de Guapi-Costa Pacífica Caucana (Colombia): Rev. Academia Colombiana de Ciencias. 31 (121), pp. 537-544.
- Ortiz, B. H., Padilla, D., Cabanzo, R., 2006, Análisis de Carbones por Espectroscopia de Plasma Inducido por laser y Plasma Generado por Acoplamiento Inductivo (LA-ICP-AES): Revista Colombiana de Física, Vol. 38, Núm. 4, pp. 1359-1362.
- Padilla y Sánchez, Ricardo José., 1986, Post-Paleozoic tectonics of Northeast México and its Role In the Evolution of the Gulf of México: Geofísica Internacional, V. 25, No. 1, P. 157-206.
- Padilla y Sánchez, Ricardo José., 2007, Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, núm. 1, pp. 19-42.
- Payan-Arjona, María de Lourdes., Estabilización del Sashcab con cemento Pórtland tipo 1 para la construcción de pisos en viviendas rurales: Ingeniería civil 6-2, Instituto Tecnológico de Mérida, pp. 33-45.
- Pindell, J.L., 1985, Alleghenian reconstructions and subsequent evolution of the Gulf of México, Bahamas, and proto-Caribbean: Tectonics, v. 4, pp. 1-39.
- Pindell, J.L. y Barret, S.F., 1990, Geological Evolution of the Caribbean region. A plate tectonic perspective; in Dengo, G., y Case, J. E., The Geology of North America, v. H: The Caribbean Region, Geological Society of America, pp. 405-432.
- Potier, P. E., Maynard, J. B., Depetris, P. J., 2005, Mud and Mudstones. SPRINGER, Berlín Heidelberg New York.
- Rosenfeld, Joshua H., 2002, El potencial económico del bloque de Yucatan en México, Guatemala y Belice: Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, Tomo LV, núm. 1, pp. 30-37.
- Salazar-Sánchez, Josué., 2008, Geología, petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas, área de Motozintla de Mendoza. Tesis de Licenciatura, México, D.F., UNAM, 68 p.
- Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of México basin : American association of Petroleum Geologist Bulletin, v. 71, p. 419-451.
- Salvador, A., 1991b, Triassic-Jurassic, in A. Salvador, ed., The Gulf of México Basin: Geological Society of America, The Geology of North America, v. J, pp. 131-180.
- Salvador, A., 1991c, Origin and Development of the Gulf of México Basin: Geological Society of America, The Geology of North America, v. J, p. 389-444.
- Sánchez, F.J., M.A. de Andrés, I. Tardáguila., 1987, Prospección hidrogeológica en rocas ígneas y metamórficas mediante Sondeos Eléctricos Verticales: Hidrogeología y recursos hidráulicos, Universidad de Salamanca, XI, pp. 557-566.

- Secretaría de Desarrollo Social, 2005, Atlas de riesgos del municipio de Mérida Yucatán, México, SEDESOL, Gobierno del estado de Yucatán, pp. 42-45.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutierrez, F. y Speed, R.C., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of México: Geological Society of America Special Paper 278, 153 p.
- Servicio Geológico Mexicano. 2007. Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, Escala 1:500,000.
- Servicio Geológico Mexicano. 2005. Carta Geológico-Minera, Chetumal E16-4-7, Estados de Quintana Roo y Campeche, Secretaría de Economía, Escala 1: 250,000.
- Servicio Geológico Mexicano.2007, Panorama Minero del Estado de Campeche. Secretaria de Economía, coremisgm, disponible en www.coremisgm.gob.mx.
- Silva Romo, Gilberto, Claudia Cristina Mendoza Rosales y Campos Madrigal, Emiliano., Elementos de Cartografía Geológica. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2001, 292 p.
- Villasuso, Miguel J., Méndez-Ramos, Renán., 2001, A conceptual Model of the Aquifer of the Yucatán Península: Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 120-137.
- Viniegra, O. F., 1981, El gran banco calcáreo yucateco: Revista Ingenieria, No. 1, p. 20-44.
- Viniegra, O.F., 1971, Age and evolution of salt basin of southeastern México. Am Assoc. Petrol. Geol., Bull. 55: 478-494.
- Walper, J.L., 1980. Tectonic evolution of the gulf of México. In: R.H. Pilger (Ed.) The Origin of the Gulf of México and the Early Opening of the Central North Atlantic Ocean: A Symposium Baton Rouge, La.: p. 87-88.
- Weber, B., Cameron, K.L. Osorio, M. y Schaaf, P., 2005, A late Permian tectonothermal event in Grenville crust of the Southern Maya terrane; U-Pb zircón age from the Chiapas massif, Southeastern México. International Geology Review, v. 47, no. 5, pp. 509-529.
- Weber, Bodo., Schaaf, Peter., Valencia, Víctor A., Iriondo, Alexander., Ortega-Gutierrez, Fernando., 2006, Provenance ages of late Paleozoic sandstone (Santa Rosa Formation) from the Maya Block, SE México. Implications on the tectonic evolution of western Pangea: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, núm. 3, pp. 262-276.
- Weber, Bodo., Valencia, Víctor, A., Martens, Uwe., 2007, El Paleozoico en el Bloque Maya- Geocronología de Zirrones Detríticos en Rocas Metamórficas y Sedimentarias: Presentado en; Simposio: La Conexión Chortis-Sur de México en el Tiempo y en el Espacio, Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla, 39 p.

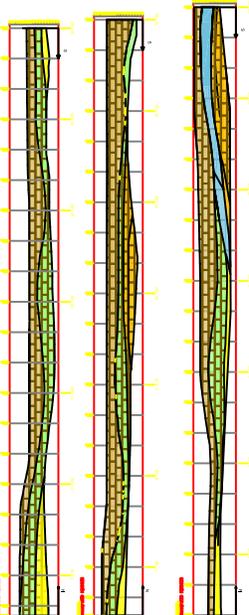
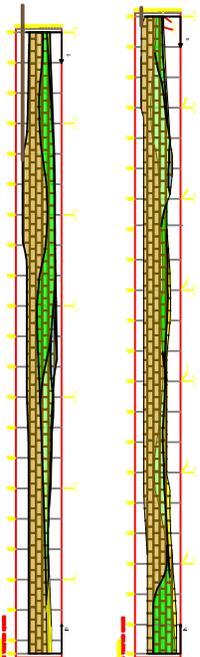
CONSULTAS ELECTRONICAS

<http://www.geocities.com/smexmineralogia/>

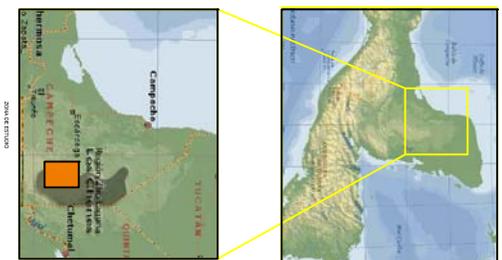
<http://www.pimausa.com>

<http://www.rpsqualitas.es>

<http://www.campeche.gob.mx>



LOCALIZACION



	SASHICAB		CAJIZA
	YESO I		PUNTO DE PERFORACION
	YESO II		CAJIZA EN PLANTA
	YESO III		YESO AMBIBITA
	YESO IV		



SIMBOLOGIA

	PUNTO DE MUESTREO		NORTE
	PUNTO DE GEOMETRIA		SECCION GEOELECTRICA
	SECCION GEOELECTRICA		LIMITE DE TERRENO
	LIMITE DE TERRENO		CURVA DE NIVEL PRIMARIA
	CURVA DE NIVEL PRIMARIA		CURVA DE NIVEL SECUNDARIA
	CURVA DE NIVEL SECUNDARIA		CARRETERA FEDERAL
	CARRETERA FEDERAL		POBLADO

NOTAS:

Proyecto: Evaluación de Bancos de Materiales para la Construcción de la Carretera Federal de Mérida a San Luis Potosí

Cliente: Universidad Tecnológica de Mérida

Ubicación: Camino de Mérida a San Luis Potosí, Km. 100

Fecha: Septiembre 2009

Elaborado por: HGO ALZAMIRÁN GONZÁLEZ GARCÍA

Revisado por: HGO ALZAMIRÁN GONZÁLEZ GARCÍA

Supervisor de Proyecto: HGO ALZAMIRÁN GONZÁLEZ GARCÍA

Fecha: Septiembre 2009

EVALUACIÓN DE BANCO DE MATERIALES "EL PANIER"

HGO ALZAMIRÁN GONZÁLEZ GARCÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FECHA: SEPTIEMBRE 2009