



FORMACIÓN CUMANÁ: MINERALOGÍA, PETROGRAFÍA, DIAGÉNESIS Y DATOS PALINOLÓGICOS DE LA LOCALIDAD DE CALAMARCA Y SU CORRELACIÓN CON LOS AFLORAMIENTOS DE LA ISLA DEL SOL

Shirley S. López-Velásquez y Mildred L. Dorado-Calderón

Instituto de Investigaciones en Ingeniería Petrolera (INSPET), Carrera de Ingeniería Petrolera, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. sslopez@umsa.bo

RESUMEN

La Fm Cumaná, caracterizada por su origen glacial, aflora en extensiones restringidas en el norte del Altiplano y la Faja de Huarina. En la región de Calamarca sobreyace a la Fm Collpacucho, y su tope está en contacto marcado con la Fm Kasa. En estos afloramientos presenta litología de diamictitas de color gris oscuro en la base, y hacia el tope expone areniscas sabulíticas parduzcas con lentes microconglomerádicos de coloración violácea. La petrografía de las facies gruesas muestra textura con empaquetamiento moderado a malo, buena esfericidad en la mayoría de las muestras a excepción de una que proviene de los niveles superiores. La forma de los granos varía de subredondeada a subangular. La facies fina presenta esfericidad buena con granos subangulares y clasificación de regular a mala. La mineralogía en sus facies finas consta de cuarzo monocristalino en tanto que las gruesas presentan cuarzo policristalino, cuarzo con extinción ondulada y, en menor proporción, cuarzo volcánico. Los feldespatos del tipo ortosa, en algunos casos, exhiben alteración sericítica y en otros son perfiticos. Los líticos están compuestos por rocas metamórficas principalmente, pero son muy escasos. La Fm Kasa suprayacente presenta buen empaquetamiento y buen grado de selección, tiene esfericidad buena, granos subredondeados a subangulares; la mineralogía es similar a la de la Fm Cumaná pero con mayor presencia de cuarzo y con <1% de zircón detrítico. El óxido de hierro está presente como cemento parcial. Las características de estas rocas sugieren una fuente de aporte proveniente de una zona relativamente próxima, que podría atribuirse al Escudo brasileño y/o al cratón Arequipa Antofalla; así mismo, habría existido aporte de un área volcánica. De acuerdo a las características descritas, y al fracturamiento parcial de los granos, se infiere una diagénesis por soterramiento y, en menor proporción, por solevantamiento. El contenido de Carbón Orgánico Total obtenido es del 2%, equivalente a un potencial de generación de hidrocarburos bueno. El TAI de 4- a 3+, estimado por comparación en la tabla *polen/spore color standard*, y una reflectancia de la vitrinita de 1,3 % a 2,0%, son indicadores de una madurez termal orgánica equivalente a la "fase madura de la generación de hidrocarburo líquido", en tanto que la palinofacie, observada y ploteada en el diagrama ternario de Tyson, corresponde al grupo VII, análogo a una plataforma disóxica-anóxica para un kerógeno tipo II>>I con tendencia a la generación de petróleo (oil prone). Los palinomorfos, estudiados de manera muy preliminar, no equivalen a las asociaciones de la Fm Cumaná del área del Lago Titicaca, ya que sugieren una edad más antigua, especialmente por la ausencia de *R. lepidophyta*.

Palabras clave: Fm Cumaná, palinofacie, diagénesis

ABSTRACT

The Cumaná Fm, which is characterized by its glacial origin, has restricted outcrops in the northern Altiplano and in the Huarina belt. In the Calamarca region it is overlying to the Collpacucho Fm and, at the top, is in sharp contact with Kasa Fm. Its lithology consists of dark grey diamictites in the base, and in the top brown sabulitic sandstones with violet microconglomeratic lenses are found. Petrography of the coarse facies shows a texture with moderate to bad packing, and

good sphericity for most of the samples except for one coming from the upper levels of the unit. The shape of the grains ranges from subrounded to sub angular. The fine facies shows good sphericity, with subangular grains, and from regular to bad classification. Mineralogy of fine facies is constituted by monocrystalline quartz, while the coarse facies includes polycrystalline quartz as well as quartz with wavy extinction; some volcanic quartz crystals are also found. Orthose is present sometimes sericitized and sometimes as pertite. Lithics are mainly metamorphic rocks but they are scarce. The overlying Kasa Fm shows good packing and good selection; the sphericity is also good, and the grains are subrounded and subangular; the mineralogy is similar to that of the Cumaná Fm, but quartz is more abundant and detritic zircon <1% vol. is found. Iron oxide is a partial cement. These features suggest a nearby source, which can be the Brazilian shield or the Arequipa-Antofalla craton. Also, a volcanic area could have contributed. The partial fracturing of the grains allows to infer a diagenesis mainly due to burying, and only in a little proportion it is due to uplift. The Total Organic Carbon is 2%, suggestive of a good potential for hydrocarbon generation. The TAI, estimated through comparison with the pollen/spore color standard table, and the vitrinite reflectance of 1.3 to 2.0%, are both indicators of an organic thermal maturity equal to "mature phase for generation of liquid hydrocarbon", whereas the observed palinofacie, plotted in the Tyson ternary diagram, corresponds to VII group, which is suitable with disoxic-anoxic platform for a II>>I kerogen type with tendency to oil prone generation. The preliminary study of palinomorphs in Calamarca indicates these are not equivalent to those of the Cumaná Fm sited in the Lake Titicaca area. The absence of *R. lepidophyta* suggests an older age for rocks studied.

Key words: Cumaná Fm, palinofacie, diagénesis

INTRODUCCIÓN

Afloramientos de la Fm Cumaná están restringidos al límite entre la Cordillera Oriental y el Altiplano norte, a lo largo del norte de la faja de Huarina entre el lago Titicaca y la población de Calamarca. Esta unidad fue definida por Ascarrunz y Radelli (1964) en los afloramientos de la península de Copacabana (Suarez-Soruco, 1996). Según la descripción original, está compuesta por diamictitas e intercalaciones subordinadas de areniscas y conglomerados con bloques de sedimentos alóctonos resedimentados. Los clastos son de tamaño y composición variados con evidencias de abrasión glacial; se identifican dos subunidades: un miembro inferior lutítico y laminado que porta *dropstones*, y un miembro superior generalmente macizo, con presencia de grandes bloques deslizados y redepositados. En la base, el contacto es erosivo con la Fm Collpacucho del

Fameniano; hacia el tope, está en concordancia con la Fm Kasa atribuida al Tournesiano Inferior a Medio (Suarez-Soruco, 1996). A nivel regional, la Fm Cumaná marca el límite entre el ciclo tectosedimentario Cordillerano y el ciclo Subandino.

Los afloramientos más estudiados de esta unidad son los de la localidad tipo, en la Península de Cumaná. Díaz-Martínez (1994) la considera como un modelo de sedimentación glaciomarina del Devónico Tardío clasificándola, desde el punto de vista litológico, como diamictita, con tamaños de grano, angulosidad, redondez y composición variable. Su origen sería una fuente heterogénea con presencia de glaciares. Este autor reconoce dos litofacies: AL1 de lutitas laminadas con clastos caídos desde masas de hielo flotantes, y AL2 de diamictitas de sedimentación proglacial al borde de una masa de hielo parcialmente flotante.

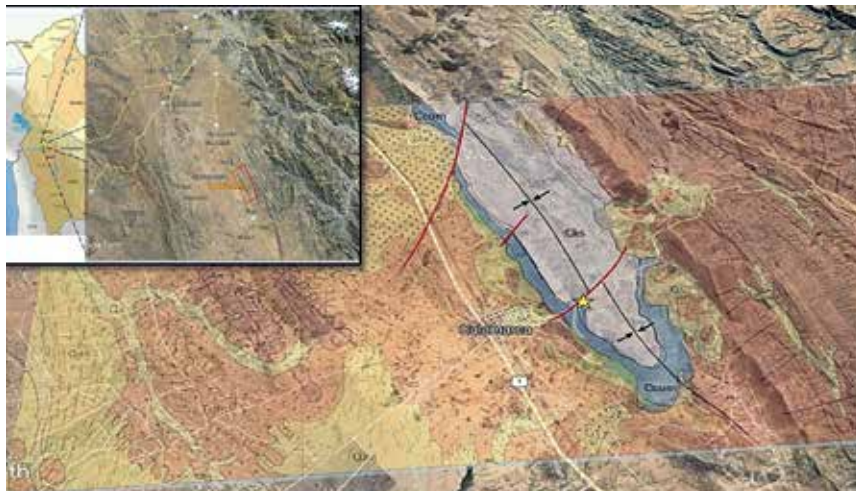


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, sinclinal de Calamarca



En posteriores trabajos, Díaz-Martínez (1995) describe a la Fm Cumaná en un afloramiento del sinclinal de Tumusa, SSE de la ciudad de La Paz, en un contexto tectónico complejo. Este afloramiento forma parte del flanco occidental del sinclinal de Tumusa, donde esta formación suprayace a la Fm Collpacucho del Devónico, y el contacto hacia el tope está erosionado. Así mismo, el autor menciona a la Fm Cumaná del flanco oriental del sinclinal de Calamarca, ubicado a 45 Km de la ciudad de La Paz, en la carretera a Oruro. En esta zona, el tope está en concordancia con la Fm Kasa.

Lakin et al. (2022) realizaron estudios sedimentológicos, palinológicos y de isótopos de ^{13}C en los afloramientos de la Península de Copacabana y del borde nororiental del lago Titicaca. Allí reconocieron la existencia de un DCB (Devonian Carboniferous Boundary) que se correlaciona con eventos de extinción global. Ellos determinaron la edad del contacto con la Fm Collpacucho que corresponde a una secuencia siliciclástica de plataforma marina, en la que se habría formado una incisión donde se depositó parte de la Fm Cumaná durante el Fameniano Tardío. La litología que describen estos autores para esta formación está compuesta de areniscas gruesas y diamictitas arenosas, las que se interpretan como de origen glaciomarino, que se encuentran en todo el centro de América del Sur.

Es importante recordar que, en esta parte del continente sudamericano, se identificaron tres episodios glaciales en los estratos del Devónico Tardío y del Mississippiano, según datos sedimentológicos, estratigráficos, paleontológicos, de pozos y de afloramientos. El primero, del Fameniano Tardío ("Struniano"), fue reconocido en cuencas de Brasil, Bolivia, y Perú, donde los glaciares alcanzaron entornos costeros y marinos; el segundo episodio tomó lugar a finales del Tournaisiano Medio y principios del Tardío, el que se registra en el subsuelo de la cuenca de Solimoes (Brasil); el tercer episodio glacial es de edad Viseana Tardía y actualmente se lo reconoció en cuencas de Brasil principalmente (Caputo et al., 2008).

En el presente trabajo, se proporcionan datos que se suman al conocimiento de la Fm Cumaná a objeto de entender mejor tanto la paleogeografía como la procedencia y edad de esta unidad, ajustando los aportes de los nuevos métodos, conceptos e interpretaciones. La información que se proporciona proviene del flanco oriental del sinclinal de Calamarca, donde se trabajó con el objetivo de ampliar la información petrográfica, mineralógica, palinofacial, de diagénesis, y de sus características geoquímicas como roca madre para hidrocarburos.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de trabajo se encuentra en la localidad de Calamarca, en el camino La Paz-Oruro. Para el trabajo se tomó como base la hoja geológica Calamarca, a escala 1:100.000. Según este mapa, los afloramientos pertenecen a las formaciones Collpacucho, Cumaná, y Kasa. La Fm Collpacucho consta de intercalación de areniscas de grano fino limosas, cuyo contacto con la Fm Cumaná está cubierto por sedimento modernos. El primer afloramiento de la Fm Cumaná, consta de areniscas arcósicas masivas y deleznable afectadas por la erosión intensa, en estos "bloques" se observan presencia de lentes de areniscas sabulíticas de reducida extensión, en éstas se tomó la muestra CLM-5. En otro afloramiento más al oeste, se hace más evidente la presencia de la unidad roca objetivo especialmente en el tope de la colina, donde se la identifica en un escarpe, con mayor variación litológica, compuesta por areniscas bien compactas de color predominantemente rojizo a rosáceo por la abundancia de óxido de hierro que es visible en casi todo el afloramiento. También presentan lentes de microconglomerados polimicticos con clastos de tamaño variable desde arenisca de grano grueso hasta gravas, de reducido espesor y extensión, con matriz mayormente arenosa. Debajo de la anterior y menos expuestas, afloran lutitas limolíticas de color grisáceo tanto en superficie fresca como alterada, muy fracturada.

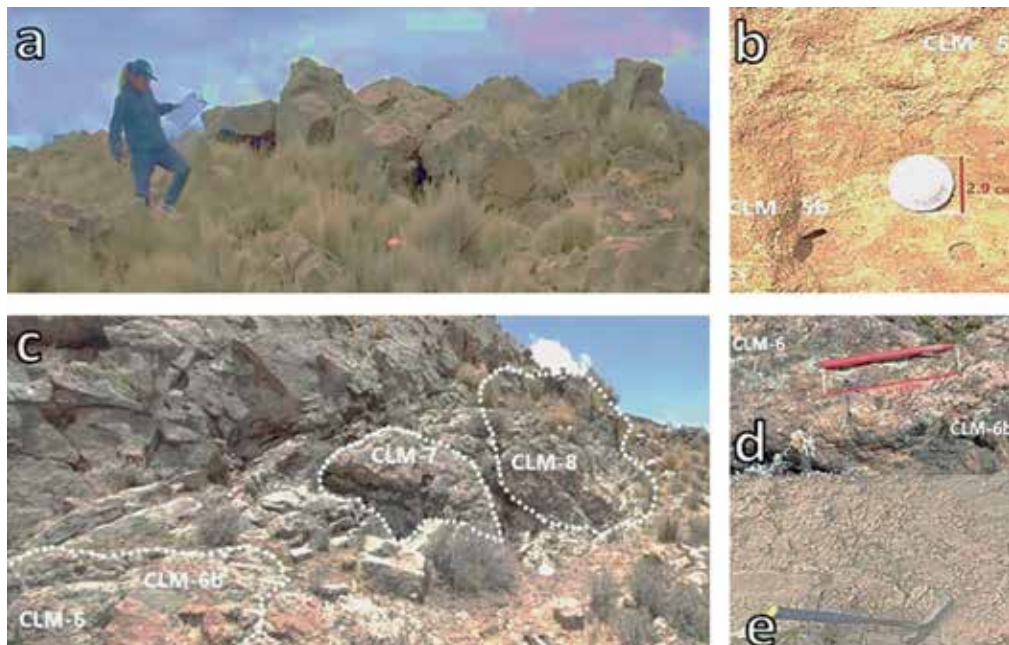


Figura 3. Fotografía del afloramiento de los niveles superiores de la Fm Cumaná, donde se señalan las muestras extraídas y analizadas en el presente trabajo.

El afloramiento estudiado presenta, hacia el este, exposición de bloques de color marrón rojizo (figura 3) compuestos por areniscas masivas que portan lentes de arenas sabulíticas de pequeño espesor y extensión limitada. Hacia el oeste, se observa litología de características propias de una diamictita, no muy compacta, y de mayor espesor. Esta roca forma gran parte de la ladera oeste del cerro. En los niveles más elevados de la serranía, se encuentra horizontes de areniscas gruesas gris blanquecinas de la Fm Kasa en un espesor aproximado de 10 m. en esta secuencia, se tomó un total de 11 muestras: 8 petrográficas, una palinológica, y una para Carbón Orgánico Total. La muestra para palinología se tomó del nivel inferior de las diamictitas, expuesto a la altura del camino.

MÉTODOS DE LABORATORIO

La preparación y el análisis de las muestras petrográficas y palinológicas fueron realizadas en el laboratorio de Geología del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Petrolera (INSPET). El análisis de Carbón Orgánico Total fue realizado en el IIDEPROQ, en un equipo Analizador de Carbono ASTDM D5291. El procedimiento para la elaboración de las láminas delgadas de rocas fue el standard: cortado en el cutting machine, seguido del pulido con carbonato de silicio de 600 y 800, que posteriormente se adhirió al portaobjetos con Araldita, para un corte posterior en la cutting and grading machine, y su desgaste con abrasivos números 320, 600, 800 y 1000. La preparación de la muestra para palinología y palinofacies aplicó el método standard de Traverse (2007), que incluye la maceración de la muestra en ácido clorhídrico al 30 % para disolver los carbonatos, seguido de HF al 60% para disolver los componentes silicáticos. Posteriormente se procedió al ataque con la solución de Schultze. Las láminas se montaron con gelatina glicerina. Una vez concluida la preparación de muestras, estas se sometieron a su análisis correspondiente con ayuda de un microscopio (iScope), de luz transmitida con cámara digital, en base a observaciones de sus propiedades ópticas y características representativas de cada muestra.

DESCRIPCIONES

La litología de la Fm Cumaná, en la zona, está compuesta, hacia la base, por diamictitas de matriz limolítica y arenosa de grano fino, de color marrón amarillento, tanto en superficie fresca como meteorizada. En gran parte es masiva con lentes delgadas de facies conglomerádicas a microconglomerádicas, de tipo polimíctico. El contacto con la Fm Collpacucho está cubierto. Las muestras se colectaron según se muestra en la foto 3.

Muestra CLM-5

En el afloramiento, la roca está muy meteorizada presentándose de color marrón amarillento tanto en superficie meteorizada como en fresca. Su textura es masiva con delgados niveles de arenisca de grano grueso, tipo sabulita. Se muestra poco compacta y con matriz arenosa y arcillosa. En el microscopio presenta empaquetamiento malo y un pobre grado de selección, puesto que se observa hasta cinco tamaños de grano. Los tamaños menos dominantes son los de mayor dimensión que varían desde 1,6 mm a más grandes. Éstos son granos de esfericidad buena con formas subangulares a subredondeadas. Tamaños de 460 a 740 micrones son más abundantes, los que tienen buena esfericidad y redondez.

La mineralogía consta de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, y también cuarzo del tipo volcánico con su característico *embayment*. En menor proporción están feldspatos del tipo ortosa y pertita, y líticos compuestos por lutitas, carbonatos, y rocas metamórficas. Se observa óxido de hierro como cemento parcial. El cuarzo monocristalino pertenece a los granos de menor tamaño que varían desde 200 hasta 440 micrones. El cuarzo policristalino, por su parte, se encuentra en tamaños mayores que alcanzan hasta aproximadamente 740 micrones. Los granos de cuarzo que exhiben extinción ondulada y el cuarzo volcánico también alcanzan estos tamaños. Los escasos líticos metamórficos y de rocas sedimentarias se presentan en los clastos de mayor tamaño, desde 400 a 740 micrones.

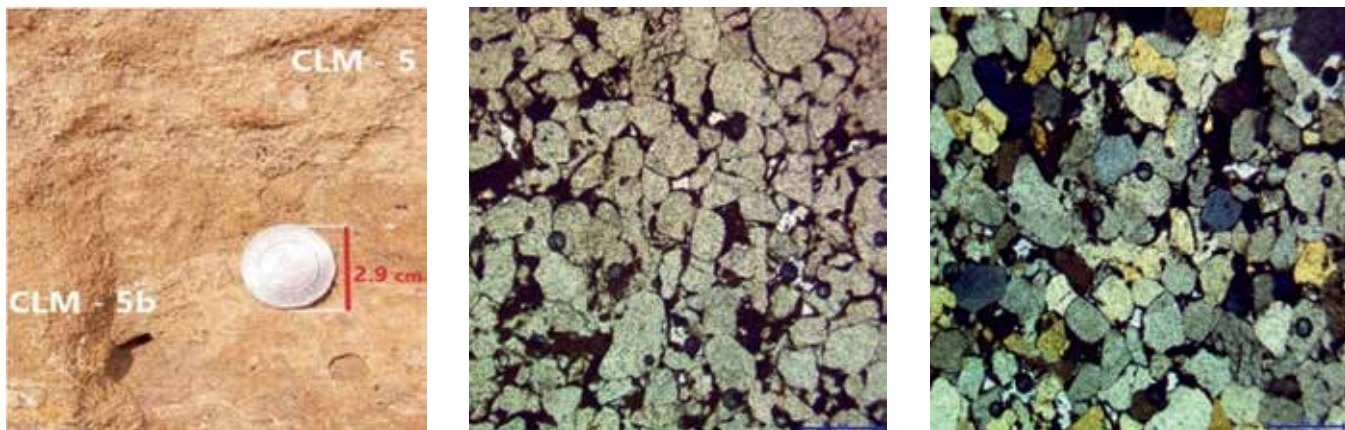
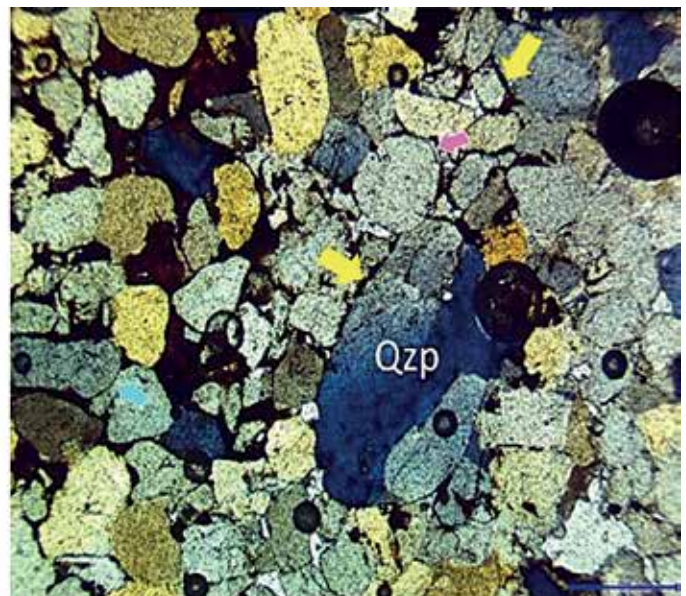
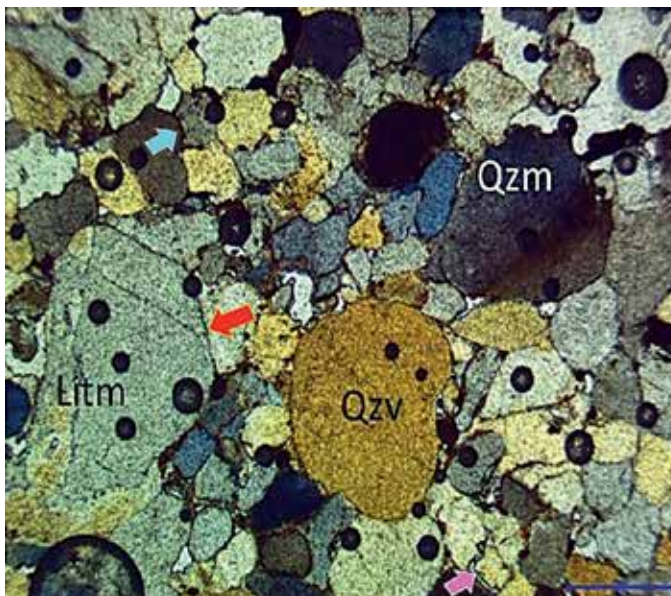
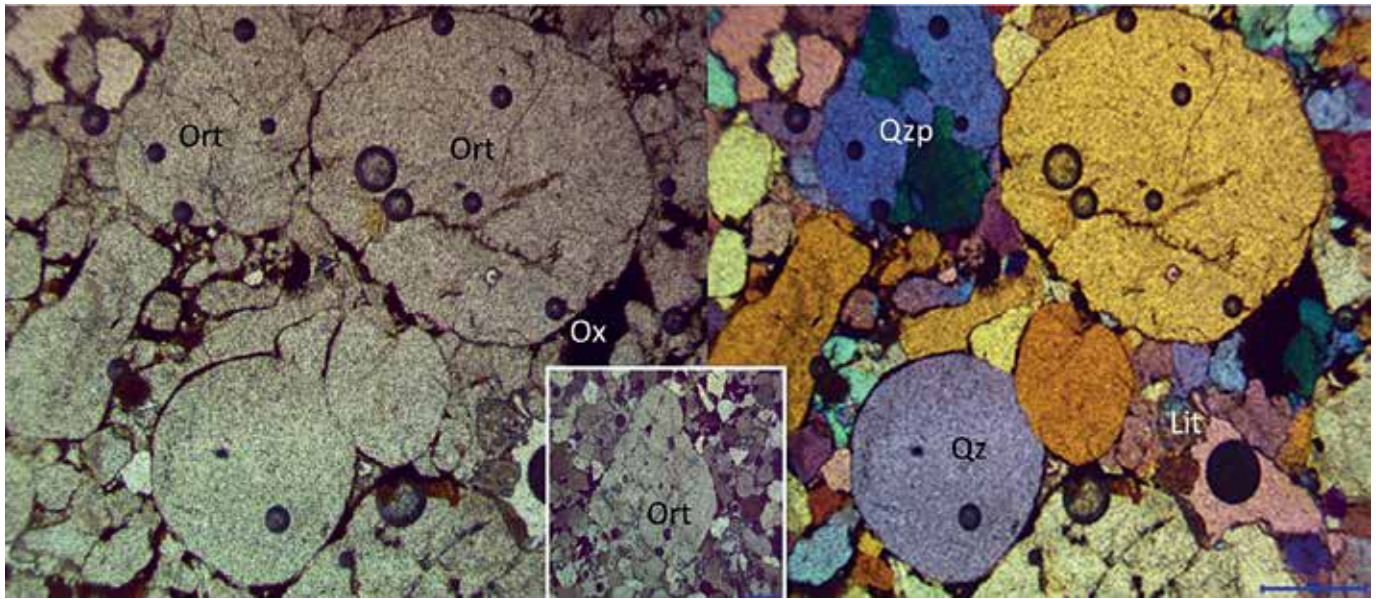


Figura 4: Muestra CLM 5: arriba, izquierda, vista del afloramiento con ubicación de muestras, 2°y 3°, foto de lámina delgada al microscopio, con aumento de 5x, luz normal y nicoles cruzados respectivamente. 2°fila, con aumento 10x, izquierda, nicoles paralelos y derecha con nicoles cruzados. Abajo, 5x, flecha roja, contacto intergranular planar, flecha amarilla, borde de FeO, flecha celeste, contacto cóncavo-convexo. Litm, lítico metamórfico, Qzm, cuarzo monocristalino, Qzp, cuarzo policristalino, Qzv, cuarzo volcánico, ort, ortosa.



Muestra CLM 5b

La preparación de la lámina delgada se dificultó por la poca compactación, y en el proceso se perdieron algunos granos. En el afloramiento corresponde a los niveles delgados dentro de la roca de la muestra CLM 5. Su litología macroscópica corresponde a areniscas más gruesas que las del punto anterior y con la misma coloración tanto en superficie meteorizada como fresca (marrón amarillento). En el microscopio con aumento de 5x, se observa empaquetamiento moderado a malo, con un grado de clasificación pobre y presencia de granos de hasta cinco tamaños; las dimensiones varían desde 400 micrones a 1.6 mm. La esfericidad es buena a mala, con formas bien redondeadas, subredondeadas, y subangulares.

La mineralogía consta, de manera dominante, de cuarzo volcánico, feldespatos y líticos de rocas metamórficas y sedimentarias, como lutitas. Estos componentes son más

abundantes que en la muestra CLM-5. El cuarzo monocrystalino es más frecuente en los granos de menor tamaño, en tanto que el cuarzo policristalino está entre los granos más grandes. El feldespato es del tipo ortosa. Los granos presentan fracturamiento en algunos casos, con contacto cóncavo convexo, especialmente en los granos redondeados. El óxido de hierro que forma parte del cemento está distribuido de manera **irregular**.

MUESTRA CLM 6

Se prepararon dos láminas de esta muestra. El afloramiento in situ presenta un lente de 40 cm de espesor máximo y una extensión de aproximadamente 5 metros. En superficie meteorizada tiene color rojizo con tonos violáceos tenues. Está compuesta de areniscas ferruginosas tipo sabulíticas.

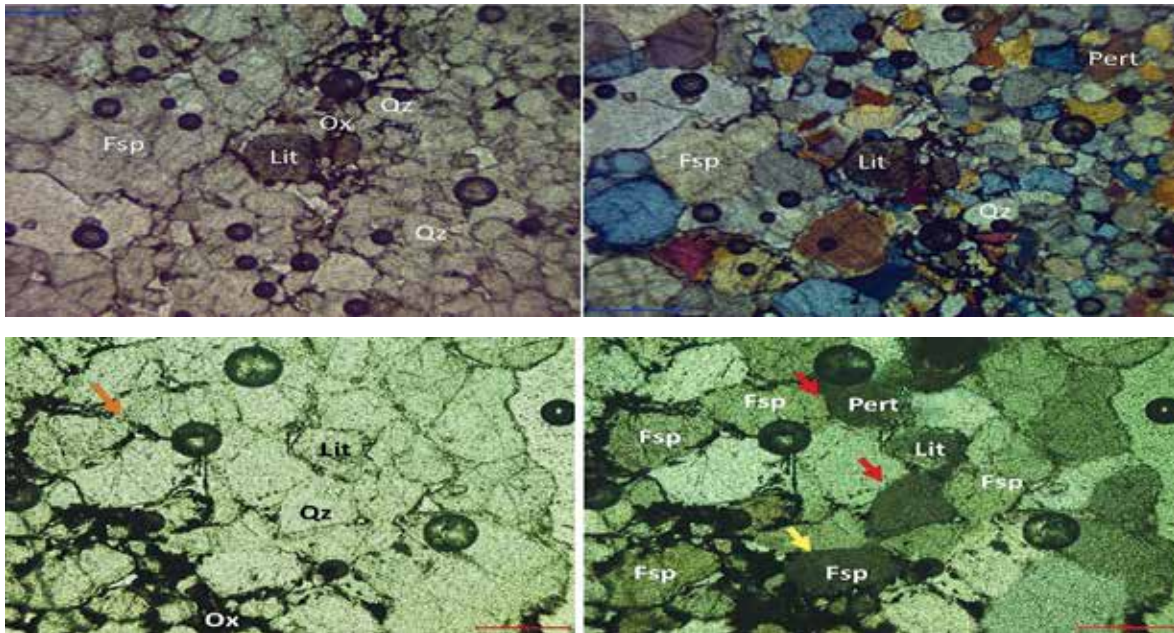


Figura 6. Muestra CLM 6 (aumentos de 5x y 10x). Flecha roja, contacto entre granos de tipo cóncavo/convexo, amarilla, contacto planar, arriba, se diferencian dos facies una más fina y otra más gruesa. Fsp, feldespato, Lit, lítico, flecha amarilla contacto planar, flecha roja, contacto cóncavo convexo, flecha fucicia, cuarzo sintaxial, verde, feldespato en proceso de disolución.

Arriba con 5x, abajo con 10x

Esta roca presenta, en general, un empaquetamiento de regular a malo, con granos que tienen contacto por dos o tres caras; sólo en algunos lugares el empaquetamiento es de regular a bueno (Fig. 6). De igual manera, el grado de selección es malo en gran parte de la muestra, pero en sectores se observa la presencia de “aglutinados de granos de cuarzo” bien compactos y de buena selección. Sin embargo, las facies más finas tienen empaquetamiento malo pero buen grado de selección. La esfericidad en general es buena pero los granos son subangulares. Los tamaños varían desde 50 hasta 194 micrones.

La mineralogía consta mayormente de cuarzo monocristalino, que corresponde a los granos más redondeados de tamaños desde 200 hasta 400 micrones; los de mayor tamaño corresponderían al cuarzo volcánico y en menor proporción al cuarzo policristalino. Otro grupo frecuente es el de los feldespatos, mayormente del tipo ortoclasa, en granos de hasta 500 micrones; asimismo, se identifica pertita en tamaños de

300 micrones aproximadamente, en mucha menor cantidad. Los líticos corresponden a lutitas y son muy escasos; no se observan líticos de rocas metamórficas. El óxido de hierro está como cemento parcial.

Muestra CLM 6b

El afloramiento consiste de una arenisca conspicua y de alta dureza, color marrón claro en superficie alterada, y en superficie fresca gris claro. La muestra proviene de un lente dentro de la arenisca, del mismo nivel que CLM-6 y colindante con ésta. Sus características macroscópicas son diferentes. Consta de arenisca gruesa de color marrón rojizo en superficie meteorizada y gris rojizo en superficie fresca.

Muestra CLM 7

En afloramiento se presenta como un lente conspicuo de reducida extensión que en superficie alterada muestra un color marrón amarillento. Su aspecto es masivo.

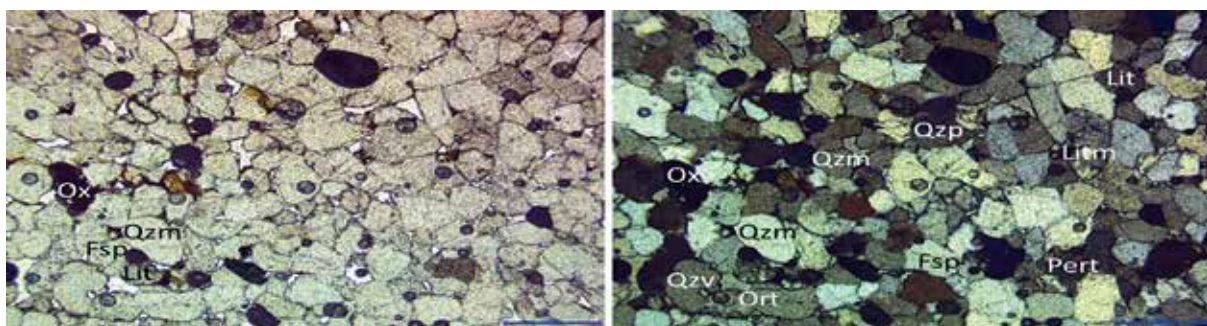


Figura 7: Fotografía de lámina delgada de la muestra CLM-7 con con aumento 5x, izquierda con nicoles paralelos, derecha con nicoles cruzados. Ort, ortosa, Ox, óxido de hierro, Qzm, cuarzo monocristalino, Qzp, cuarzo policristalino, Qzv, cuarzo volcánico, Litm, lítico de roca metamórfica, Pert, pertita, Fsp, feldespato.



Al microscopio se observa mayor uniformidad en el tamaño de los granos, puesto que éste varía poco, entre 300 y 400 micrones para los de mayor tamaño, y 100 para los más pequeños; esto correspondería a una arenisca de grano medio a fino. El empaquetamiento es bueno con un grado de selección bueno. Los granos muestran esfericidad mala con formas subredondeadas a redondeadas.

La mineralogía consta de cuarzo monocristalino, cuarzo volcánico, y cuarzo policristalino más escaso, todos ellos en

granos de 400 micrones aproximadamente. Incluye, además, feldespatos del tipo ortosa y dos tipos de líticos: de lutitas y de rocas metamórficas, en ambos casos de pequeño tamaño.

Muestra CLM 8

El afloramiento muestreado tiene similares características al lente del cual se colectó la muestra CLM-7. Es una roca de color marrón amarillento con tonos rojizos en superficie alterada, y tonos grisáceos blanquecinos con tintes rojizos en superficie fresca.

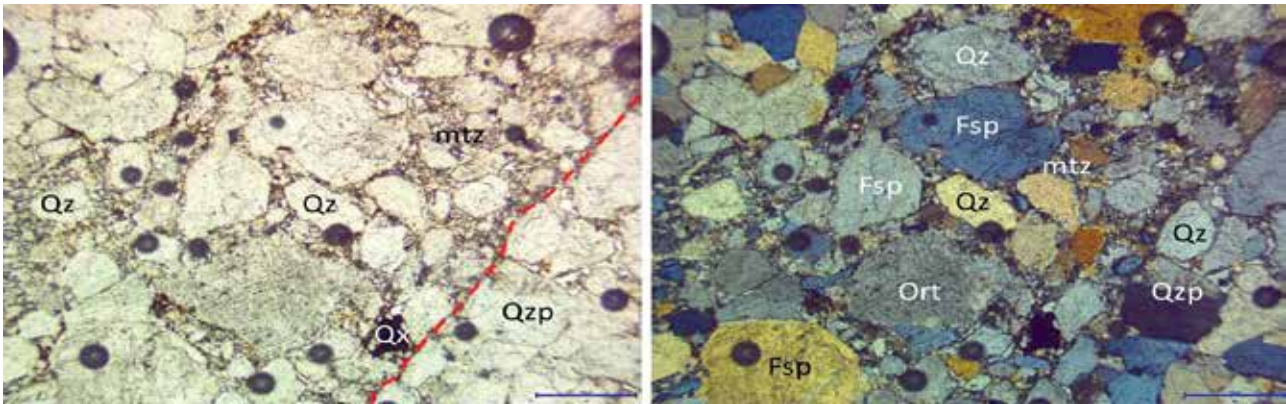


Figura 8: Fotografía de lámina delgada de la muestra CLM-8 con aumento 5x, izquierda con nicols paralelos, derecha con nicols cruzados Muestra 8 Ort, ortosa, Ox, óxido de hierro, Qzm, cuarzo monocristalino, Qzp, cuarzo policristalino, Qzv, cuarzo volcánico, Litm, lítico de roca metamórfica, Pert, pertita, Fsp, feldespato, mtz, matriz detrítica

En general presenta empaquetamiento malo, pobre grado de selección, esfericidad buena, y granos de forma subredondeada, especialmente los granos de mayor tamaño, y angulosos a subangulosos los de menor dimensión. Una matriz detrítica compuesta de arenisca de grano fino, se encuentra entre los granos.

La mineralogía consta de cuarzo monocristalino, presente en todos los tamaños de granos; el cuarzo policristalino, en menor proporción, corresponde a los granos de mayor dimensión principalmente. Otro componente mineral en la roca es el

feldespato tipo ortosa, que forma los granos más grandes. El óxido de hierro es menos frecuente pero disperso.

Muestra CLM 9

Esta muestra corresponde a la suprayacente unidad Formación Kasa. En el afloramiento se presenta como arenisca conspicua de color gris blanquecina, con aspecto sacarado y masivo. Su espesor es de aproximadamente 6 m, en el lugar del muestreo. Su base está en contacto discordante con la Fm Cumaná, y el tope fue erosionado. La muestra se tomó de los niveles superiores.

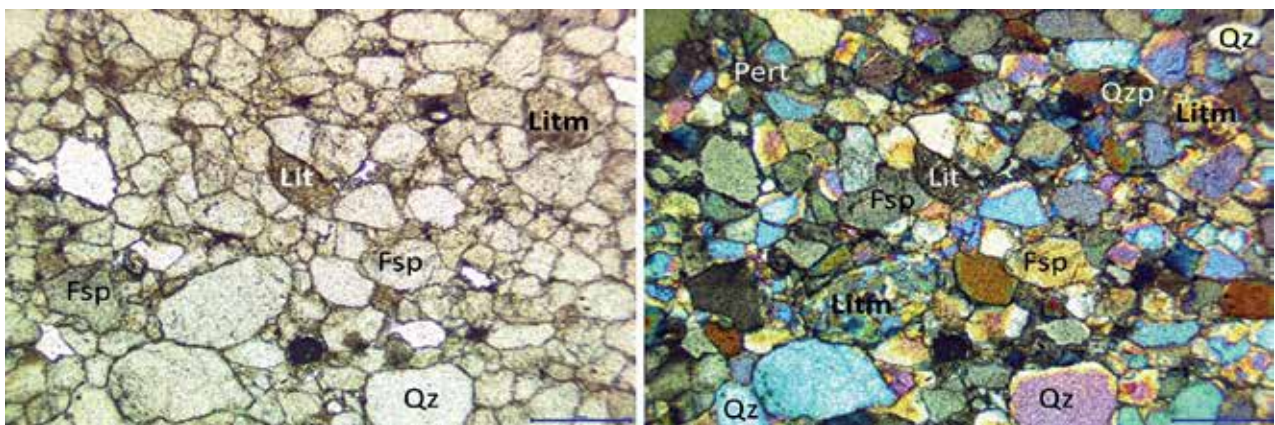
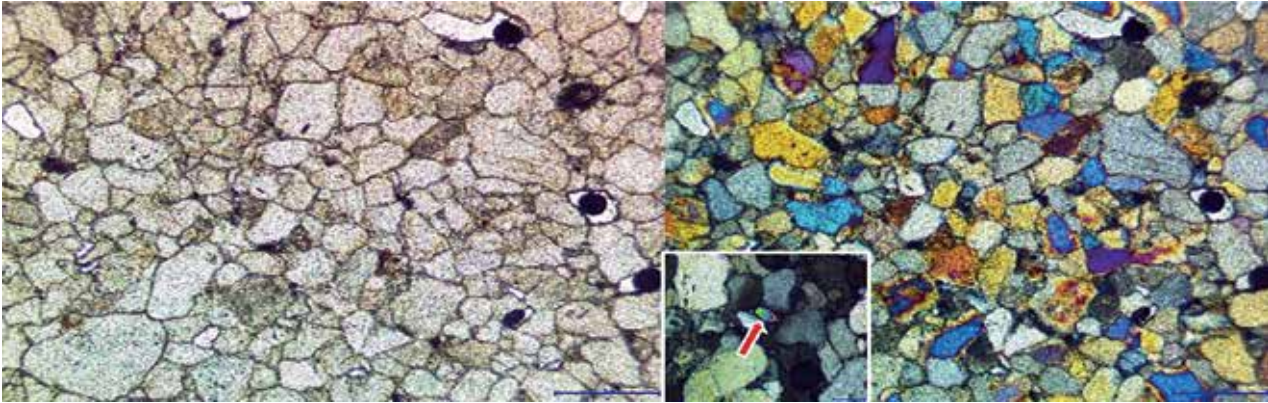


Figura 9: Fotografía de lámina delgada de la muestra CLM-9, izquierda con nicols paralelos, derecha con nicols cruzados. Arriba, con aumento 10x, abajo con 5x. Ort, ortosa, Ox, óxido de hierro, Qzm, cuarzo monocristalino, Qzp, cuarzo policristalino, Qzv, cuarzo volcánico, Litm, lítico de roca metamórfica, Pert, pertita, Fsp, feldespato, detalle con aumento 20x, flecha roja, zircón detrítico.



La roca en lámina delgada muestra empaquetamiento de regular a bueno, grado de selección regular a malo, esfericidad buena con granos subredondeados a subangulares; en menor proporción se encuentran granos redondeados, principalmente los de tamaño medio.

La mineralogía consta de cuarzo principalmente de tipo monocristalino, que se presenta en granos de menor tamaño, en tanto que los más grandes corresponden al cuarzo de tipo policristalino. Los feldespatos son del tipo ortosa, plagioclasa alterada, y muy poca pertita; asimismo, se observa zircón detrítico. Los líticos son principalmente de rocas metamórficas de varios tamaños.

Síntesis petrográfica y mineralógica

Los resultados de las muestras evaluadas muestran diferencias entre sí en cuanto a la petrografía, en la cual las muestras CLM 5 y CLM 5b presentan empaquetamiento pobre con grado de selección malo y con esfericidad buena, con granos de forma variada desde redondeadas, subredondeadas y subangulares. En cuanto a la mineralogía, existe homogeneidad en la composición, siendo dominante el cuarzo monocristalino, especialmente en los granos de tamaño pequeño, en tanto que el cuarzo policristalino como el cuarzo con extinción ondulada, corresponden a los granos de mayor tamaño. Este patrón se reproduce en el resto de las muestras, sin embargo, la presencia de pertita se restringe a CLM-5, CLM-6 y CLM-9, esta última proveniente de la Fm Kasa. En el caso de la muestra CLM-7, presenta mayor contenido de cuarzo y mejor empaquetamiento y grado de selección. En tanto que CLM-8 y CLM-9 contienen ortosa con alteración sericitica, no contienen cuarzo volcánico a diferencia de las demás, y contienen zircón detrítico, aunque muy escaso.

DIAGÉNESIS

La diagénesis de rocas sedimentarias se refiere a todos los **procesos naturales que ocurren en una roca desde la sedimentación** (sedimento crudo), continuando por la compactación, litificación y hasta antes del inicio del metamorfismo. Sin embargo, el límite entre diagénesis y metamorfismo no es preciso, en términos de presión y temperatura, tampoco entre diagénesis y meteorización. Por lo tanto, por convención, se considera que el dominio de la diagénesis se encuentra entre los límites imprecisos de la acumulación del sedimento y su soterramiento hasta profundidades de unos 5 km, donde temperaturas de 250°C y presiones de 1,5 kb son habituales.

La historia diagenética de este intervalo es compleja; existen varios procesos identificados en base a parámetros diagenéticos (ver figura 10) producto de una evaluación de la petrografía microscópica. En función a las relaciones texturales y momento relativo de ocurrencia de los mismos, se describen a continuación los mencionados rasgos desde el más antiguo al reciente:

Compactación física

La evidencia de compactación física es visible en los puntos de contacto intergranular que se transforman en disolución a presión y derivan en características como contactos de tipo cóncavo-convexo y de sutura, representados en las figuras 4 y 5.

Sobrecrecimiento de cuarzo

Esta fase, no se observa de manera extensa sino en unos pocos granos y de forma parcial, presente como sobrecrecimiento no continuo de cuarzo sintaxial (figura 6 superior, flecha fucsia), lo que dio lugar a la formación de cemento parcial de rocas clásticas recicladas. Por lo tanto, esta fase de cementación no tiene relación con la formación estudiada y es heredada de una antigua roca sedimentaria.

Disolución

Esta característica se observa en algunos granos, afectando principalmente a los de composición feldespática como la ortosa (figura 5 superior, flecha verde). Así mismo, se asume que existe una relación estrecha entre la disolución de los feldespatos y la presencia de cemento arcilloso.

Compactación química

La compactación química en las areniscas incluye contacto granular de tipo tangencial, planar, cóncavo – convexo y de sutura. Así también se observan vetas de solución más evidentes en arenisca y lutita, respectivamente. Las mencionadas características, se señalan en las figuras 4 y 5.

Historia diagenética

En la figura 10 se registran los rasgos diagenéticos reconocidos y su relación textural y temporal. En general la mayoría de los rasgos diagenéticos están básicamente relacionados a la diagénesis tardía Morad et al. (2000), y sólo la compactación física corresponde a la diagénesis temprana. Cabe tomar en cuenta que es frecuente encontrar rocas sedimentarias



con minerales diagenéticos alogénicos, provenientes de una posible fuente externa. Las características petrográficas y mineralógicas de las muestras evaluadas de la Fm Cumaná, en base a lo descrito, son: compactación física, contacto de grano tipo planar y cementación parcial producto de la disolución de feldespato, así mismo, el desarrollo de feldespato autígeno y cemento hematítico (parcial) que corresponden a la etapa de Eodiagénesis. La Mesodiagénesis, está representada por el sobrecrecimiento de feldespatos y el sobrecrecimiento de cuarzo syntaxial (aunque muy escaso), también la presencia de sericita, muscovita alterada, contacto granular cóncavo-convexo y contacto de sutura. Los rasgos de diagénesis por solevantamiento son: la presencia de disolución mineral y fracturamiento de granos (menos frecuente). Todos los rasgos de la etapa de diagénesis se resumen en la Figura 10.

ESTUDIO DE PALINOFACIE PRELIMINAR

El término *palinofacie* fue introducido por Combaz (1964) para referirse a la materia orgánica presente en sedimentos y que son resistentes a los ataques químicos. Esta información acerca de la calidad de materia orgánica, se ha aplicado como una herramienta útil para la interpretación deposicional y paleoambiental del sedimento que contiene la materia orgánica. En palinofacies los componentes para términos de clasificación corresponden a: Materia Orgánica Amorfa (MOA), fitoclastos, fitoclastos opacos (black debris) y palinomorfos (esporas, polen, dinoflagelados). Para el presente caso aplicamos el material contabilizado y ploteado en el diagrama de Tyson (1995).

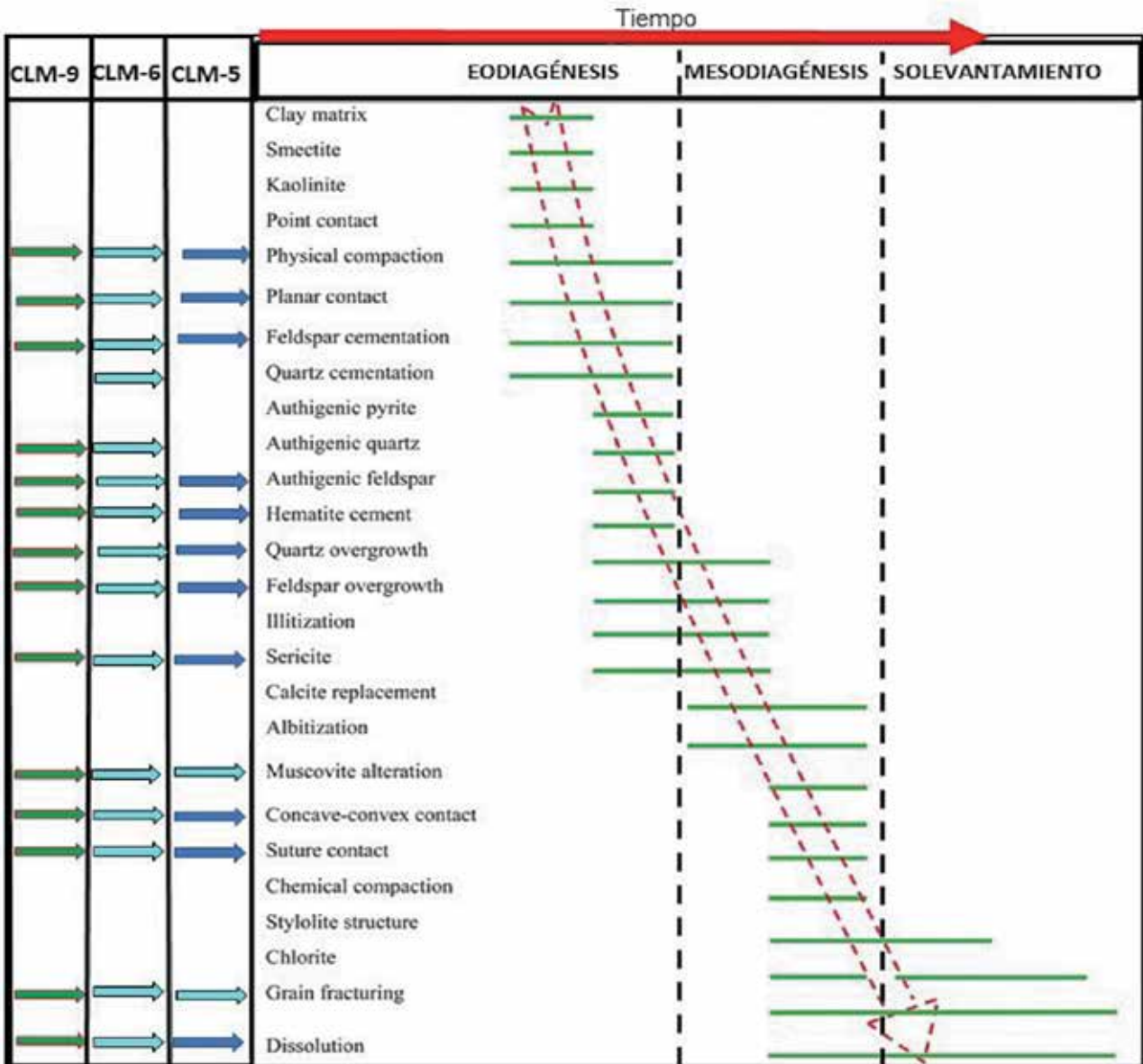


Figura10.- Representación esquemática de rasgos diagenéticos de tres muestras, dos de la Fm Cumaná, CLM-5 y CLM 6, y una de la Fm Kasa, CLM 9. Las características están señaladas con flechas de color.

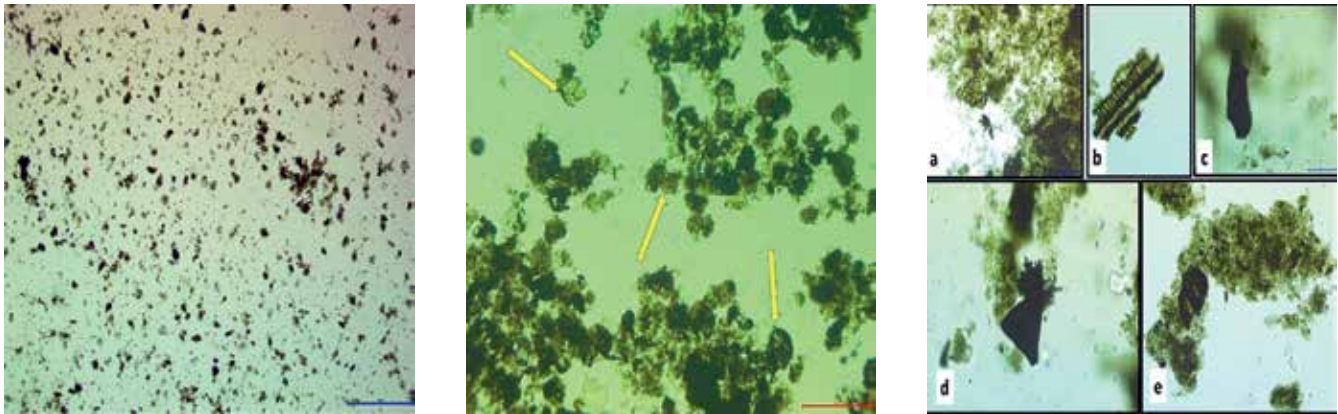


Figura 10: Imagen al microscopio con aumento 5X, al centro con aumento de 10x, derecha, detalle con 20x y 40x, a. botryococcus, b. traqueida, c. chitinozoo, d. acritarco, e. MOA de parte del contenido

La palinofacie estudiada de manera preliminar, consta principalmente de Materia Orgánica Amorfa dispersa y también aglutinada, en parte compuesta por botryococcus. Los fitoclastos son translúcidos y en menor proporción existen

fitoclastos opacos. En cuanto a palinomorfos, están presentes tanto pólenes, acritarcos como chitinozoos. La proporción de componentes palinofaciales estimada, se representa en la siguiente tabla:

Fitoclastos	MOA	Palinomorfos
35,71	42,86	21,43
20	50	30

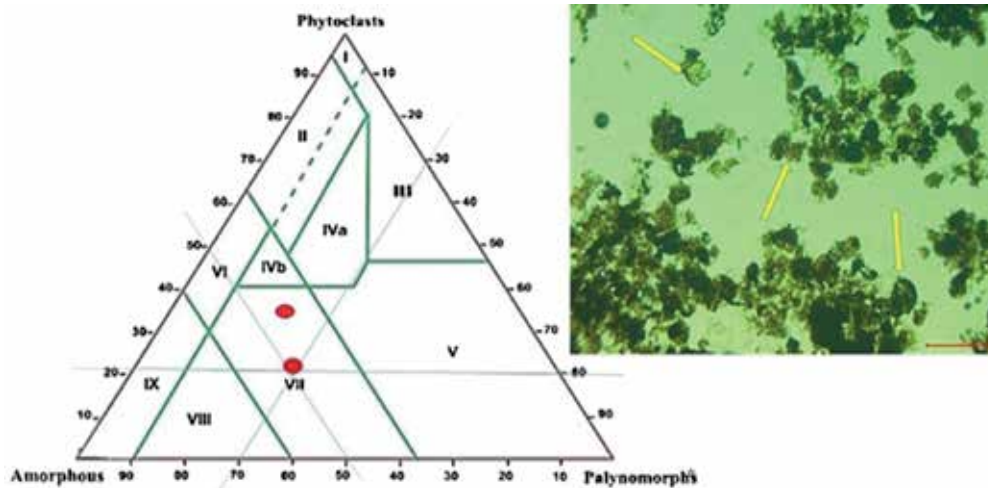


Figura 11. Ploteo de MOA-Fitoclastos-Palinomorfos, según Tyson (1995). El análisis palinofacial muestra abundancia de fitoclastos y palinomorfos, indicando plataforma disóxica-anóxica distal, con kerógeno tipo II>>I que implica que es apta para oil prone.

El contenido palinofacial evaluado, corresponde a un material proveniente en gran medida de restos orgánicos tanto de influencia continental, como lo corrobora la presencia de las esporas, géneros *Leiotriletes*, *Emphanisporites* y *Verrucosporites* entre otros, en tanto que la influencia marina corresponde al grupo de acritarcos, representados en parte por *Estiastra rhytidia*, ¿arkonites? y otros, así como chitinozoos.

La estimación de la madurez termal y del TAI de 4- a 3+, se determinó por comparación en la tabla *polen/spore color standard*, (Munsell color standard (matte finish) first updated printing of versión #2 1984). Al mismo tiempo, la misma tabla

sugiere una reflectancia de la vitrinita de 1,3 % a 2,0% y una madurez termal orgánica equivalente a la “fase madura de la generación de hidrocarburo líquido”. El contenido de Carbón Orgánico Total registró un valor del 2% que clasifica como regular a buena, analizado en el IIDEPROQ.

Consideraciones geocronológicas preliminares

El estudio del contenido palinológico no se profundizó en el presente estudio porque, dada la presencia importante de palinomorfos, este amerita un trabajo posterior. Sin embargo, se mencionan algunos especímenes que también fueron reportados en la Isla del Sol, dada su cercanía con la localidad



de Calamarca, pero no se los señala con fines diagnósticos delimitados desde el punto de vista geocronológico. Es así que, por ejemplo, se tiene a *Estiastra rhytdoa* Wicander & Wood también mencionada por Vavrdova et al. (1993), especie registrada en los niveles superiores de la Fm Colpacucho y en las diamictitas de la base de la Fm Cumaná. Sin embargo, este género *Estiastra* no es mencionado por Lakin et al. (2022).

Vavrdova, et al. (1993), asigna a la Fm Cumaná una edad Fameniana, principalmente a las diamictitas, las que correlaciona con las diamictitas con *dropstones* descritas para el Amazonas.

Por otro lado, Vavrdova, (2000), se refiere como “secuencia de offshore de edad Fameniana” a asociaciones estudiadas del sinclinal de Calamarca (sin ubicación precisa). Lakin et al. (2022), incluye tanto a la Fm Colpacucho como a la Fm Cumaná (CFEU) al Fameniano (Devónico Superior), en tanto que el tope de este piso coincidiría con el último registro de *R. lepidophyta*. El límite DCB (Devonian Carboniferous Boundary), estaría dentro de los niveles inferiores de la Fm Kasa donde existe un pico positivo de los isótopos de carbón (PCIE) $\delta^{13}C_{org}$, concurrente con los valores más bajos de TOC.

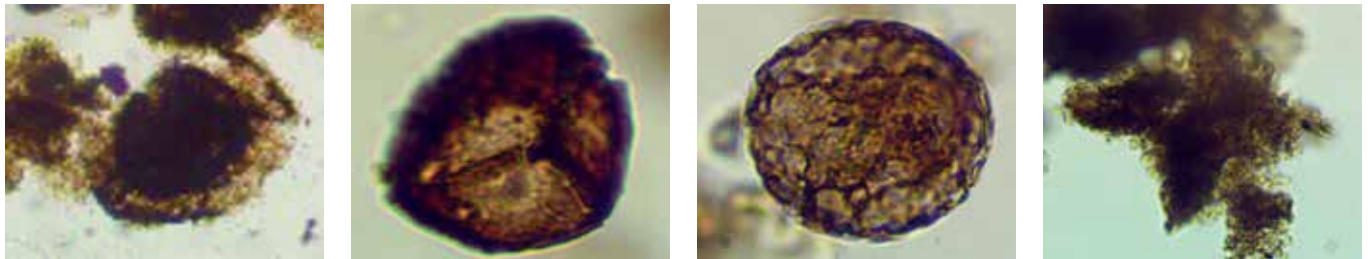


Figura 11: Izquierda Auroraspora sp, b. Leiotriletes sp, c. Dictyotidium sp., d. Estiastra rhytdoa?.

A simple vista, la principal diferencia palinológica de la muestra CLM-11, de las diamictitas de la base de la Fm Cumaná, con las asociaciones reportadas para esta unidad tanto por Lakin et al. (2022) como por Vavrdova et al. (1993), es la ausencia de *Retispora lepidophyta* así como la del género *Maranhites*. *R. lepidophyta* que es referencia geocronológica para el Devónico Superior, asumiéndose que la base del Carbonífero es el primer nivel sin esta miospora; por otro lado, ésta define las palinozonas LE y LL identificadas para Europa (no diferenciadas en la zona del Lago Titicaca) y reconocidas en el Subandino sur por Wicander, (2011) y DiPasquo, (2007) para la Fm Itacua.

DISCUSIÓN

Petrografía y mineralogía

En general, la petrografía explica que las características litológicas de las muestras analizadas de la Fm Cumaná, son variables y de madurez *baja*, grado de clasificación *pobre*, esfericidad *mala* con forma de granos subangulares y en menor proporción subredondeados. La composición mineral, también es variada, en niveles donde los granos corresponden a las areniscas de grano medio a fino constan de cuarzo monocristalino. Las muestras CLM-6, 5 b y 6 a y b, presentan abundantes líticos, los de mayor tamaño están compuestos por rocas metamórficas, cuarzo policristalino, cuarzo con extinción ondulada, que podría atribuirse al escudo brasileño y/o al cratón Arequipa Antofalla que actuaban como fuente de aporte principal. Asimismo, la presencia de cuarzo volcánico supone una fuente ígnea más joven.

Desde el punto de vista litológico, el afloramiento de la Fm Cumaná, localidad de Calamarca, correspondería a la subunidad superior identificada para el afloramiento de la zona del lago Titicaca por Lakin et al. (2022), caracterizada por diamictitas en espesor menor a 10 m, con facies arenosas de estratificación sutil, matrix soportada, clastos de composición variada y coloración en bandas. En las areniscas CLM-5 y CLM-5b existen abundantes clastos cuarcíticos, no orientados, en tanto

que en los lentes (CLM-6 a CLM – 8) son más feldespáticas y metamórficas con cemento de óxido de hierro parcial. La suprayacente Fm Kasa se depositó en concordancia sobre las diamictitas, consistente con un ambiente de retroceso de hielo y de transgresión, o un ambiente posglacial (Lakin et al. 2022), con una composición más homogénea.

Lakin et al. (2022), se refiere a los niveles superiores de la Fm Colpacucho y transicionales hacia la Fm Cumaná como CFEU (Cumaná Fm Equivalent Unit), en tanto que como DCB (Devonian Carboniferous Boundary) al nivel transicional Devónico-Carbonífero, registrados en base a variaciones de TOC (Total Organic Carbon) y de isótopos de $\delta^{13}C$. Los datos del mencionado trabajo, provienen de las cercanías de la localidad de Chaguaya, al noreste del Lago Titicaca. La Fm Cumaná la describe como “unidad de espesor variable desde 58 m hasta 140 m, compuesta por areniscas gruesas, gravas y diamictitas”, con presencia de incisiones de casi 100 m, en la Fm Colpacucho, la que en los niveles inferiores consta de areniscas bioturbadas de textura moteada. Reconocen tres sub unidades, una inferior dominada por areniscas, la segunda, lateral y verticalmente discontinua, compuesta por areniscas con estratificación laminar y cruzada, lultitas y limolitas mal seleccionadas de color púrpura y areniscas arcillosas restringidas lateralmente, y la tercera es la subunidad superior compuesta por areniscas con estratificación laminar y cruzada, y por diamictitas. El modelo evolutivo paleoambiental consta de cinco etapas: 1. Depósito de la Fm Colpacucho en un escenario de *Shoreface*, como areniscas progradantes; 2. desarrollo de una superficie de incisión basal en la Fm Colpacucho principalmente; 3. Desarrollo de un glacial con una subunidad central y otra inferior, compuestas por areniscas de estratificación cruzada, pobremente seleccionadas, de color púrpura con limolitas y areniscas arcillosas, seguida de diamictitas; 4. desarrollo de una unidad equivalente y una subunidad superior, compuesta por horizontes de gravas fuertemente cementadas y 5. depositación de la Fm Kasa, en un ambiente de retroceso de hielo y transgresión posglacial.

De acuerdo al modelo, el afloramiento estudiado sería equivalente, desde el punto litológico, a la etapa 3 con presencia de lagos glaciogénicos probablemente reemplazados por una

corriente de hielo fundido finiglacial y por “balsas de hielo” flotantes (*ice rafts*). El patrón depositacional tendría carácter hyperpycnal del afluente.

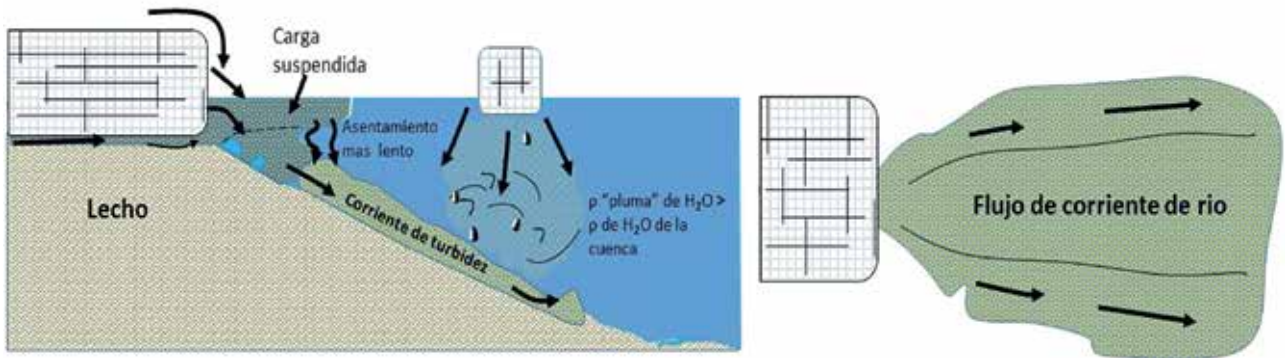


Figura 12. Representación esquemática de un posible escenario de sedimentación de la Fm Cumaná en la zona de Calamarca. Izquierda, representación en perfil, Derecha, en planta.

Palinología

La palinología de la Fm Cumaná ha sido expuesta en publicaciones de Vavrdova et al. (1993), donde identifica 124 taxa, y presenta a *Retispora lepidophyta*, *Hymenozonotriletes explanatus*, *Verrucosisorites nitidus* y *Lophozonotriletes rarituberculatus* del Devónico tardío (Fameniano) y *Densosporites spitsbergensis* y *Rugospora polyptycha* del Carbonífero temprano, para muestras que corresponden a la base de esta unidad, en afloramientos tanto de la Península de Copacabana como de la zona (costa) oriental del Lago Titicaca. Por otro lado, Lakin et al. (2022), clasifica tres grupos de palinomorfos: Asociación I compuesta por *Retispora lepidophyta* / *Umbellasphaeridium* spp., donde *R. lepidophyta*, se extiende desde la Fm Collpacucho hasta la base de la Formación Kasa. La Asociación II dominada por *Gorgonisphaeridium* spp. presenta abundancia relativa de esporas, y la tercera Asociación III dominada por esporas y fitoclastos, que corresponden a la Fm Kasa inferior.

Según Lakin et al. (2022) los datos palinofaciales muestran dominio numérico de fitoclastos y de esporas terrestres, con poca proporción de fitoplancton marino y materia orgánica amorfa; tendencia descendente hacia los niveles superiores. El Carbón orgánico total (COT), tiene un pico de 2,5 %, coincidente con niveles más altos de fitoclastos. La quimioestratigrafía muestra una correlación del PCIEs (Positive Carbon Isotope Excursions) con el DCB (límite Devónico / Carbonífero). Por otro lado, los datos de isótopos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ de la Fm Cumaná, indican una importante tendencia en la cual su volumen estaría influenciado por procesos favorables a la transferencia y preservación de materia orgánica terrestre y marina (Davies et al. 2012; Kónitzer et al. 2014).

El contenido positivo (2‰) de isótopo de ^{13}C sería sincrónico con extinciones palinológicas terrestres y marinas a escala global. Atribuyendo a la Fm Kasa un ambiente marino de *offshore* depositado en una superficie de inundación basal, a 12 m por encima, se localizaría el límite Devónico/ Carbonífero, en base a la última ocurrencia de *R. lepidophyta* y a cambios significativos en las asociaciones palinológicas, con la pérdida de la bioprovincia del fitoplancton *Umbellasphaeridium saharicum* que se la conoce como endémica del Gondwana.

Con respecto a la posible edad del afloramiento de la Fm Cumaná de Calamarca, sólo se puede sugerir, de manera muy preliminar, que es más antigua que las diamictitas de la zona del lago Titicaca. Por un lado, por la presencia de *E. rhytidoa* Wicander & Wood (rango Pragiense-Emsiense) que fue reportada para la Fm Chigua de la Precordillera (Amenabar et al. 2009) y del pozo Tacobo X1001 (García-Muró, et al. 2021). Por otro lado, por la ausencia de los palinomorfos indicadores geocronológicos de los afloramientos de las localidades tipo y próximas al lago.

El contenido palinofacial de la muestra CLM-11, correspondiente a las diamictitas, consta principalmente de Materia Orgánica Amorfa (MOA), seguida de fitoclastos y, en menor proporción, palinomorfos de importante influencia continental (terrestre). En base a lo explicado, existiría similitud palinofacial entre los afloramientos de la zona del Lago Titicaca y Calamarca.

CONCLUSIONES:

- La litología y mineralogía de la Fm Cumaná muestra una secuencia compuesta por arenas gruesas hacia los niveles inferiores de la sección de Calamarca, seguido por diamictitas con lentes de arenas sabulíticas y microconglomerádicos, y tiene contacto definido con la suprayacente Fm Kasa.
- Tomando en cuenta los tres episodios glaciales identificados en el intervalo Devónico Superior - Carbonífero Inferior (Misisipiano) para la región sudamericana, en Bolivia, las diamictitas de la zona del lago Titicaca se han correlacionado con los registrados en el Fameniano Superior (Struniano) de Perú y Brasil por Vavrdova et al. (1993), en base a palinozonas. Sin embargo, la de la zona estudiada, podría ser anterior a las mencionadas.
- La ausencia de *R. lepidophyta* en los registros de la zona de Calamarca, y la presencia de *Estiastra rhytidoa?* en este afloramiento, sugiere una edad más antigua que la de la zona del lago Titicaca. Se requiere de un estudio más detallado para discriminar las formas retrabajadas que contribuirán a una mayor aproximación.
- La composición mineralógica de las facies gruesas en las rocas muestreadas, sugiere proveniencia de una fuente



relativamente próxima por el tamaño de los clastos, y por su composición metamórfica puede atribuirse por un lado al escudo brasileño y por otro al cratón Arequipa Antofalla.

- La presencia abundante de feldespatos como ortosa, pertita y cuarzo volcánico en menor proporción, también sugiere aporte de rocas ígneas.
- El material palinológico recuperado en la sección de Calamarca, de manera preliminar, no registra palinomorfos correspondientes a las palinozonas de referencia para Europa, LN y LE del Fameniense tardío y Struniano respectivamente. El único elemento de correlación con el afloramiento de la zona del lago Titicaca es el acritarco **Estiastra rhytidoa?**.
- La calidad de roca madre clasifica como buena a pobre, por el contenido de 2% de COT, comparada con la de la Isla del Sol que varía desde 0.3% hasta un pico de 2.5%
- El grado de madurez termal estimado a partir del color de las esporas sugiere que la muestra analizada está en “fase madura de generación de hidrocarburo líquido”; así mismo, la palinofacies alude a ambiente de plataforma disóxica-anóxica distal, con kerógeno tipo II>>I que implica que es apta para oil prone (líquido).
- **La sección de Calamarca, requiere de estudio complementarios** palinológicos orientados a una correspondencia con uno de los episodios de glaciación definidas por Caputo et al. (2008) del intervalo Upper Devonian and Lower Mississippian para Sud América y corroborado por Díaz-Martínez (1994).

REFERENCIAS

- Amenabar C., R., di Pasquo, M. y Azcuy, C. 2009. Palynofloras of the Chigua (Devonian) and Malimán (Mississippian) formations from the Precordillera Argentina: Age, correlation and discussion of the D/C boundary. *Revista Española de Micropaleontología*. 41. 217-239.
- Ascarrunz, R y Radelli, L. 1964. Geología del la Penisola di Copacabana e delle Isole del setore sud del Lago Titikaka. *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale in Milano*, vol. 103, N°3, p. 273-284.
- Caputo M. V. ; Gonçalves de Melo J. H.; Streef M. ; Isbell J. L., 2008. BC Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space, Christopher R. Fielding; Tracy D. Frank; John L. Isbell. *Geological Society of America*, Volume 441. ISBN print: 9780813724416.
- Combaz, A., 1964. Les palynofaciès. *Revue de Micropaléontologie*, 7, 205-18.
- Davies SJ, Leng MJ, MacQuaker JHS y Hawkins K (2012) Sedimentary process control on carbon isotope composition of sedimentary organic matter in an ancient shallow-water shelf succession. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 13,1–15. doi: 10.1029/2012004218.
- Díaz - Martínez E. 1994. La Formación Cumaná del Altiplano de Bolivia: Un modelo de sedimentación glaciomarina del Devónico Superior. *Revista Técnica de YPF*, vol.15 (3-4), pp. 357-372.
- Díaz - Martínez, E., 1995. Devónico superior y Carbonífero del Altiplano de Bolivia: estratigrafía, sedimentología y evolución paleogeográfica. *ORSTOM Bolivia*, informe N° 46.
- DiPasquo, M.M. 2007. Asociaciones palinológicas en las formaciones Los Monos (Devónico) e Itacua (Carbonífero Inferior) en el perfil de Balapuca, sur de Bolivia. Parte 2. Formación Itacua e interpretación estratigráfica y cronología de las Formaciones Los Monos e Itacua. *Revista Geológica de Chile* 34 (2):163-198.
- García-Muro, V. J., Rubinstein, C. V., Camina, S. C., Vergani, G., Pereira, M., 2021. Palynology and organic geochemistry of an early to Middle Devonian succession from TCB X-1001– tacobo borehole, sub-Andean basin, southern Bolivia, *Journal of South American Earth Sciences* VL - 105
- Könitzer SF, Davies SJ, Stephenson MH y Leng MJ (2014) Depositional controls on mudstone lithofacies in a basal setting: implications for the delivery of sedimentary organic matter. *Journal of Sedimentary Research* 84, 198–214. doi: 10.2110/jsr.2014.18.
- Lakin J. A., Marshall J. E.A. y Troth I., 2022. An investigation of a Devonian/Carboniferous Boundary section on the Bolivian Altiplano, *Geological Magazine* 158: 2209–2230. <https://doi.org/10.1017/S0016756821000741>
- Morad S, Ketzer J.M., De Ros, L.F., 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology* 47, p. 95–120. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00007.x>.
- Suarez Soruco, R., 1996. Léxico Estratigráfico de Bolivia, *Revista técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos* Vol. 17 Número 1-2.
- Suarez Soruco, R., 2000. Compendio de Geología de Bolivia, *Revista técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos* Vol. 18 Número 1-2.
- Traverse, A., 2007. *Paleopalynology*. 2nd. Edition, Springer, Dordrecht, the Netherlands, 813 p.
- Tyson, R.V., 1995. *Sedimentary Organic Matter. Organic facies and palynofacies*. Chapman and Hall, Londres, 615 pp.
- Vavrdová M., 2000. Palynology of selected Devonian strata, Western Gondwana. *Zbl. Geol. Paläont. Teil1, Heft 7/8*, 799-821.
- Vavrdová I.M., Isaacson P. E., Díaz E. y Bek, 1993. Devonian-Carboniferous Boundary at Lake Titikaka, Bolivia: Preliminary Palynological Results. *Comptes Rendus XII ICC-P*, Buenos Aires, Volume 1: 187-199.
- Vavrdová M. e Isaacson P.E, 1999. Late Famennian phytogeographic provincialism: evidence for a limited separation of Gondwana and Laurentia. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 54, 453–63.
- Wicander R, Clayton G, Marshall JEA, Troth I y Racey A., 2011. Was the latest Devonian glaciation a multiple event? New palynological evidence from Bolivia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305,75–83. doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.016.