

PETROGRAFIA ORGANICA Y MADURACION DE LA FORMACION
LA LUNA EN SU SECCION TIPO, CRETACEO DE
VENEZUELA OCCIDENTAL

NIDYA JORDÁN

WOLFGANG SCHERER

Departamento de Ciencias de la Tierra

INTEVEP, S. A

ABSTRACT: This paper studies the distribution of finely disseminated organic matter and the degree of organic metamorphism of the type section of the La Luna Formation. Using organic petrography, the component macerals of kerogen are studied and correlated with indications of *in situ* hydrocarbon generation. It is concluded that (a) the section is in an immature phase of organic metamorphism, $R_o = 0,21\%$, even though *in situ* generation has been observed; (b) the micritic-amorphous kerogen and exinite are the main sources for hydrocarbon generation; and (c) these macerals occur in at least six cycles of mayor concentration, forming the organic matter in the thinly bedded, black limestones that are the main source rocks in the formation.

RESUMEN: En el presente trabajo se estudia el grado de metamorfismo orgánico y la distribución del material orgánico diseminado en las distintas capas de la sección tipo de la Formación La Luna. Mediante métodos de petrografía orgánica se estudian los macerales componentes del kerógeno y se correlacionan con manifestaciones de generación *in situ* de hidrocarburos. Se concluye que (a) la sección está en una fase inmadura del metamorfismo orgánico, $R_o = 0,21\%$, a pesar de que se observan manifestaciones de generación *in situ*; (b) el kerógeno micrítico-amorfo de origen marino y la exinita son las fuentes principales para la generación de hidrocarburos; y (c) estos macerales se presentan en por lo menos seis ciclos de mayor concentración dando lugar a paquetes de capas de calizas negras, finamente laminadas, que son las rocas madres por excelencia.

INTRODUCCION

Mediante los métodos tradicionales de prospección geofísica y del taladro se hace cada vez más difícil en Venezuela encontrar yacimientos de crudos livianos y dulces, i.e., $>35^\circ$ API y $\leq 0,3\%$ de contenido de azufre. El grado de agotamiento progresivo de las reservas de estos crudos (apenas queda para 15 años a la tasa de explotación actual [1]) obliga al estudio científico regional de las potenciales rocas madres de edad cretácea, generadoras de una porción importante de crudos livianos.

El Departamento de Ciencias de la Tierra de INTEVEP ha venido estudiando desde hace unos cinco años el potencial de generación del Cretáceo en la Cuenca de Maracaibo. Este trabajo forma parte del Proyecto K-Lago cuyo objetivo es estudiar los dos elementos requeridos para la generación de hidrocarburos: (a) la composición de la materia orgánica depositada en la cuenca, o sea las rocas madres, y (b) la distribución e historia termal de las denominadas "cocinas" geológicas, i.e., áreas en las cuencas sedi-

mentarias donde se han alcanzado temperaturas suficientes durante un tiempo geológico apreciable para convertir la materia orgánica en hidrocarburos. El conocimiento regional de estos factores permitirá delinear las áreas prospectivas con mayores probabilidades de haber generado hidrocarburos livianos.

A las calizas y lutitas negras, bituminosas, de la Formación La Luna del Cretáceo Superior de la Cuenca de Maracaibo se les ha reconocido un papel de gran importancia en la generación de hidrocarburos [2, 3], los cuales en general han resultado ser livianos.

En este trabajo se presentan los resultados del análisis microscópico de la materia orgánica diseminada en las rocas de la Formación La Luna en su sección tipo. Se ha intentado hacer una interpretación geológica de su calidad como roca madre y de los efectos posteriores de maduración o metamorfismo orgánico. Estudios similares se realizan en la actualidad en 23 columnas geológicas de la misma edad, distribuidas estratégicamente en la Cuenca de Maracaibo, para cumplir con los objetivos generales del Proyecto K-Lago y contribuir a optimizar la exploración de

hidrocarburos livianos, en las cuencas profundas del occidente de Venezuela.

Trabajos Previos

La sección tipo de la Formación La Luna fue definida inicialmente como caliza La Luna por Garner en 1926 [4], quien tomó el nombre de la Quebrada La Luna al oeste de la hacienda del mismo nombre en el Distrito Perijá del Estado Zulia (ver Fig. 1).

En 1931 Hedberg [2] identificó las características generadoras de la Formación La Luna mediante el análisis geoquímico de 9 muestras provenientes del flanco occidental de la Cuenca de Maracaibo, y discutió sus diferencias en capacidad de generación con respecto al Grupo Cogollo infrayacente. Quedó establecido claramente que el material orgánico de la Formación La Luna se encuentra finamente diseminado en las calizas negras, concrecionarias, con fuerte olor a petróleo, mientras que en el Grupo Cogollo se encuentra bitumen, posiblemente migrado, en fracturas de

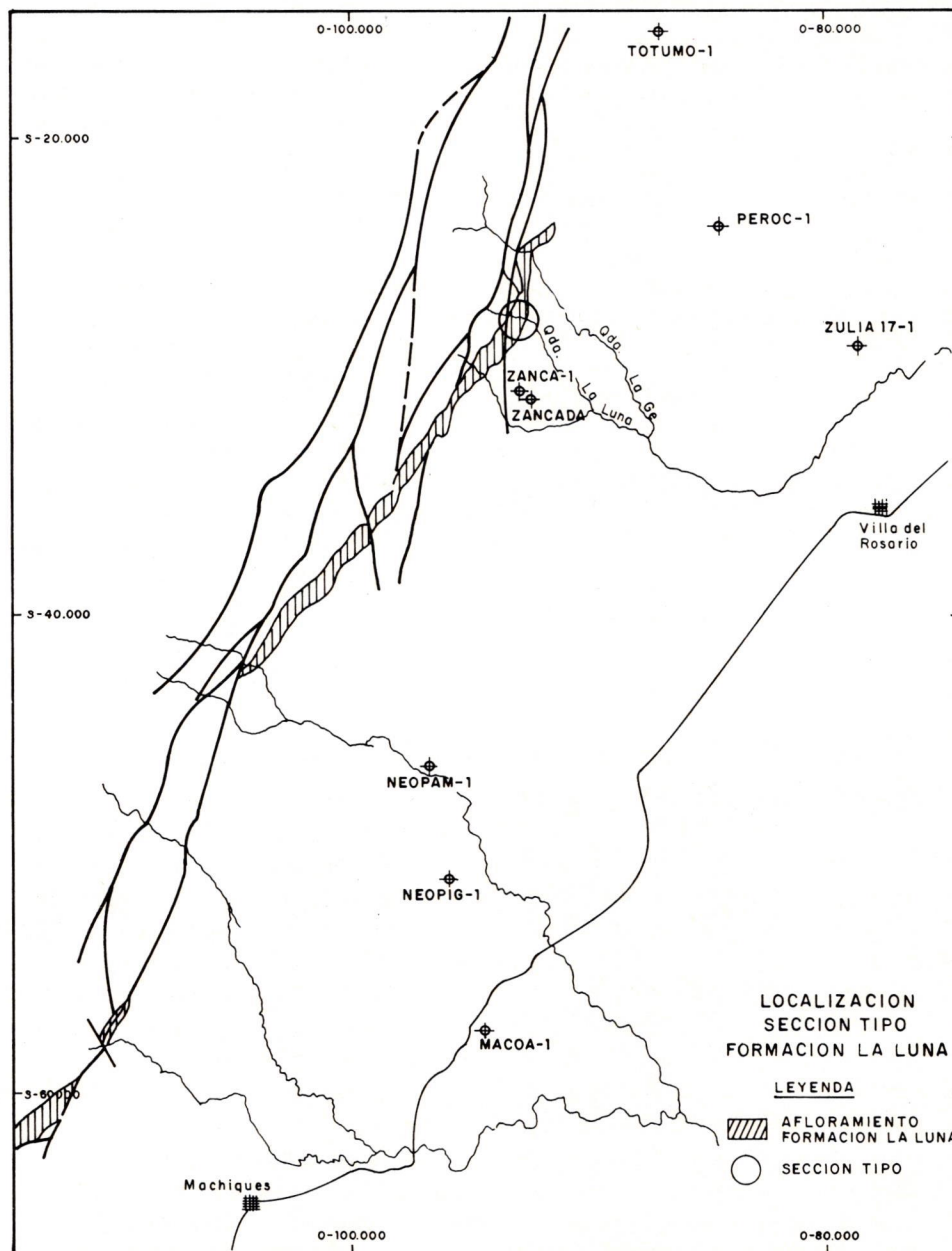


Fig. 1. Mapa de localización.

las calizas. Mencionó a los géneros de foraminíferos planctónicos Globigerina, Globorotalia, Globotruncana y Guembellina como los principales formadores de calizas de la Formación La Luna.

Hedberg postuló un ambiente marino profundo para la sedimentación de La Luna, y también la generación de hidrocarburos a partir de plancton marino preservado bajo condiciones anaeróbicas muy especiales en el fondo de los mares de la Formación La Luna. El concluyó que esta formación es la principal fuente de hidrocarburos en la Cuenca de Maracaibo, no sólo en el Cretáceo sino también en parte de la Sección Terciaria.

En 1937 Hedberg y Sass [5] señalaron un espesor cercano a los 300 m para la sección tipo y mencionaron que en el contacto superior se encontraba un mene, probablemente asociado a una falla.

Una breve descripción litológica de la columna estratigráfica de la Formación La Luna fue publicada por Rod y Maync en 1954 [6], donde muestran aproximadamente 340 m de espesor en la sección tipo y discuten el origen contemporáneo con la sedimentación de las concreciones típicas de la Formación La Luna.

Ford y Houbolt [7] hicieron una descripción bien documentada por fotomicrografías de las características petrográficas más resaltantes de la Formación La Luna en diversos afloramientos y pozos de la Cuenca de Maracaibo.

METODOLOGIA

Levantamiento Geológico

Para cumplir con algunas de las metas del proyecto K-Lago, un equipo de profesionales dirigido por W. Scherer e integrado por I. Azpírtxaga, X. Márquez, N. Jordán y M. Gutiérrez, hizo un levantamiento geológico con plancheta en escala 1:1000 de la quebrada La Luna en enero de 1980. La descripción litológica de la sección se hizo en escala 1:100 y se tomaron 95 muestras, de las cuales 86 corresponden a la Formación La Luna y las restantes detallan los contactos con las formaciones Maraca infra-yacente y Colon suprayacente. Resultados parciales de este estudio aparecen en informes internos preparados en 1981 acerca de la descripción litológica y el análisis petrográfico por Azpírtxaga, Gutiérrez y Márquez [8] y del reconocimiento geoquímico de la sección tipo por Vierma [9].

Preparación de Muestras

Para el presente estudio de la petrografía orgánica y maduración se seleccionaron 133 muestras representativas de las diversas litologías de la columna estratigráfica. Se

pulverizaron unos 20 g de cada muestra para separar y concentrar el material orgánico mediante tratamiento con ácidos clorhídrico y fluorhídrico y decantación subsiguiente con bromoformo. El material orgánico insoluble en solventes orgánicos (kerógeno) se montó sobre láminas de vidrio y se pulió con alúmina a fin de obtener secciones finas pulidas para el análisis microscópico. Para otros análisis microscópicos se montó de cada muestra un taco en epóxido en frío y se pulió según el procedimiento de roca total.

Examen Microscópico

Todas las muestras fueron examinadas con un microespectrómetro Zeiss, modelo SMP-II, el cual está montado sobre un fotomicroscopio de investigación modelo Zeiss III. Para la petrografía orgánica se suele utilizar el objetivo EPI 40/0,85 POL de inmersión de aceite, con oculares Klp 12,5x y optovar de 1,25. La iluminación proviene de una fuente altamente estabilizada de luz blanca, policromática, modulada, de tipo halógeno; la cual pasa por un epicondensador tipo II-E para luz reflejada. En la reflectometría se mide la intensidad relativa de un rayo de luz de 3 micrones de diámetro reflejado de una partícula de vitrinita y filtrado por el estándar internacional de 546 nm del International Commission of Coal Petrology [10].

Para el análisis de la fluorescencia de las preparaciones se empleó una fuente luminosa de mercurio de alta presión (HBO-100) con filtros de excitación azul de 455-490 nm y transmisión de 520 nm montados en el bloque Fl-2 del epicondensador conjuntamente con el filtro de protección calorífica. Se usó aceite de inmersión no-fluorescente con índice de refracción de 1,518 a 23°C (DIN 58884).

Presentación de Resultados

Las observaciones de campo y los resultados más resaltantes de los análisis de petrografía orgánica se presentan en forma correlativa en la Fig. 2. En la parte izquierda se muestra la columna estratigráfica simplificada de la Formación La Luna, incluyendo litología, espesores y contactos. A la derecha se indican los sitios de muestreo y su numeración en orden estratigráfico (de 10 en 10). Bajo Observaciones se reseñan por medio de símbolos especiales las características relevantes observadas en el campo y en el laboratorio. Se indican solamente los sitios donde se han percibido olores especialmente fuertes de hidrocarburos, ya que casi todas las calizas negras y finamente laminadas despiden un fuerte olor a petróleo al golpearlas con el martillo. En esta columna también se indican las cuatro fallas mayores observadas en el campo y que tienen importancia para la interpretación de la maduración.

La columna Huminita recoge observaciones semi-cuantitativas sobre la abundancia de este maceral en el concentrado de kerógeno. La columna Exinita presenta la variación estratigráfica de la abundancia de macerales fluorescentes, generalmente formados a partir de lípidos, que han sido postulados como fuentes de hidrocarburos [11]. Con la misma finalidad se presenta la abundancia relativa del kerógeno Micrítico amorfo producido por la degradación de plancton marino y considerado por diversos autores [11, 12, 13] una fuente importante de generación de hidrocarburos.

La fluorescencia de las muestras se describe en la Fig. 2 mediante el color predominante de los macerales y su intensidad relativa con respecto a las demás muestras. Se reconocen tres categorías de intensidad: poca, pero claramente distinguible como material fluorescente, mediana y fuerte. Los colores están indicados en el orden normal de maduración de la exinita, i.e., de verde-amarillo-ocre-ámbar a café, y representan la secuencia que se observa con el filtro de transmisión de 520 nm.

El grado de metamorfismo orgánico de las rocas se expresa mediante la reflectancia de vitrinita, o, como en este caso, a través de la reflectancia del maceral huminita que también tiene incrementos monótonos de reflectancia con la maduración termal. En la escala logarítmica de la columna Histograma se representa gráficamente el valor central de la clase modal (se toman entre 20 y 80 mediciones de partículas individuales de vitrinita-huminita, según sea su abundancia en la muestra). Se presenta también una secuencia vertical de histogramas a fin de facilitar la interpretación geológica de los resultados, ya que permite apreciar las poblaciones de vitrinita-huminita, posible re-deposición, uniformidad en el metamorfismo orgánico y diversas fuentes de material orgánico, etc.

La abundancia de los componentes principales del kerógeno en la totalidad de las muestras de la Formación La Luna se presenta en los histogramas generales en la última columna de la Fig. 2, conjuntamente con el histograma del espesor de las unidades litológicas individuales reconocidas en el campo.

PETROGRAFIA ORGANICA

Tipos de Kerógeno y Macerales

Las secciones pulidas de las calizas negras de la Formación La Luna presentan un aspecto característico de capas compuestas casi exclusivamente por microfósiles y con abundante material orgánico, generalmente amorfo, finalmente diseminado en la roca y concentrado localmente en

bandas o rellenando cavidades de caparzones de foraminíferos. La Fotografía 1 muestra una sección fina típica de las calizas finamente laminadas, ricas en material orgánico, de la parte superior de la sección tipo, mientras que en la Fotografía 2 se ilustra el mismo tipo megascópico de caliza proveniente de la parte inferior de la sección y que tiene características microscópicas diferentes, principalmente sus micro-laminaciones que posiblemente indican una tasa menor de sedimentación.

El material orgánico de la Formación La Luna en su sección tipo está constituido principalmente por cinco macerales que se presentan en proporciones variadas a través del tiempo geológico. Estos macerales son, en orden de importancia para la generación de hidrocarburos: micrítico-amorfo, exinita, huminita, inertinita y material orgánico estructurado.

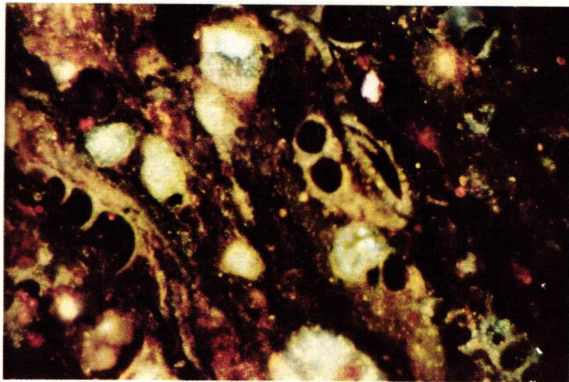
Micrítico-Amorfo

El maceral dominante es el micrítico-amorfo, material orgánico sapropélico formado principalmente por descomposición del plancton marino, partes blandas de foraminíferos, moluscos y algas en partículas muy finas y muchas veces gelificadas por procesos de metamorfismo orgánico (Fotografía 3). La mayoría de los autores consideran que este tipo de material es la principal fuente generadora de hidrocarburos [2, 10, 11, 12, 13].

Exinita-Alginita-Exudatinita

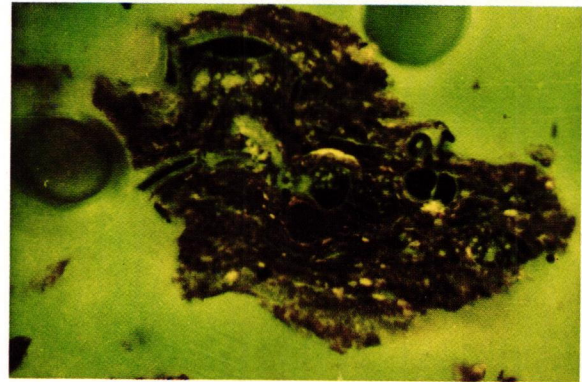
La exinita es el segundo maceral en importancia volumétrica y también es una fuente importante de hidrocarburos. Se distingue bien con luz azul fluorescente por sus colores vivos verde-amarillo-ocre a café, según el estado de maduración. En la sección tipo está compuesta principalmente por alginita, según se ilustra en la Fotografía 4. Las fotografías 5 y 6 representan la misma porción de la muestra en roca total, pero solamente en la fluorescencia (Fotografía 6) se pueden discernir los filamentos característicos de las algas marinas microscópicas.

Otra variedad importante de exinita es la exudatinita formada por exudaciones de hidrocarburos, resinas y ceras producidas por descomposición bacteriana de material orgánico y concentradas generalmente en forma globular o rellenando cavidades naturales de la roca, tales como cámaras de foraminíferos. Tiene fluorescencia muy viva e intensa y es abundante en la sección tipo. Se encuentra generalmente en forma dispersa y en partículas pequeñas en el concentrado de kerógeno, pero reacciona fuertemente con el epóxido al montar la muestra. En la Fotografía 7 se presenta una muestra típica de concentrado de kerógeno en



0.05mm
0.0

Fotografía 1. Muestra 76 - Obj. 40x, luz incidente, nicols X, aceite de inmersión. Materia orgánica negra y caparzones de foraminíferos con algunas cámaras rellenas.



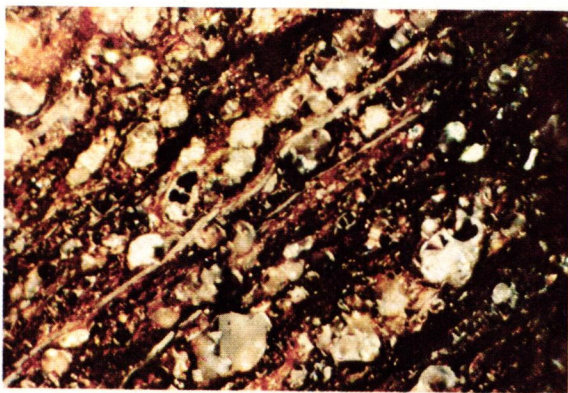
0.05mm
0.0

Fotografía 3. Muestra 8 - Obj. 40x, luz transmitida, aceite de inmersión. Kerógeno amorfo típico de la Formación La Luna, de probable origen marino.

luz blanca incidente. La misma muestra aparece en fluorescencia en la Fotografía 8 donde se aprecia la gran cantidad de exudatinita que contiene.

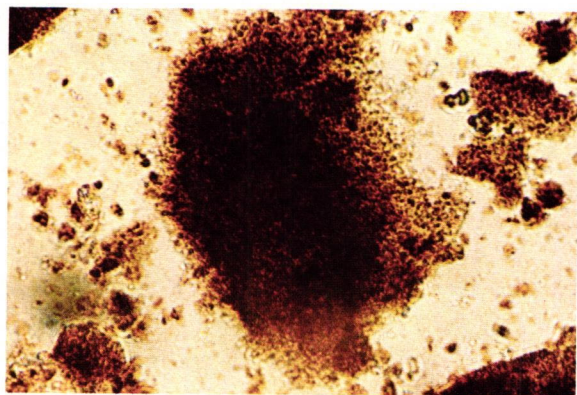
Reacciones espectaculares se producen cuando el kerógeno rico en exudatinita entra en contacto con el aceite de inmersión bajo la fuerte intensidad calorífica de la luz ultravioleta de la fluorescencia. En ese momento se produce una especie de destilación y se forman glóbulos amarillos de hidrocarburos que salen a la superficie de la muestra

pulida y se mezclan con el aceite de inmersión produciendo una mancha fluorescente que dificulta cualquier análisis microscópico posterior (Fotografía 9). Para evitar este inconveniente se hace primero el reconocimiento microscópico en fluorescencia bajo inmersión en agua y luego se usa el método estándar para medir la reflectancia de vitrinita-huminita en inmersión de aceite, teniendo cuidado de limpiar frecuentemente el objetivo y la muestra y colocar aceite nuevo cada vez.



0.05mm
0.0

Fotografía 2. Muestra 24 - Obj. 40x, luz incidente, nicols X, aceite de inmersión. Láminas estratificadas típicas de la Formación La Luna. Caparzones de foraminíferos con algunas cámaras rellenas de bitumen, abundante material orgánico estratificado y concentrado localmente.

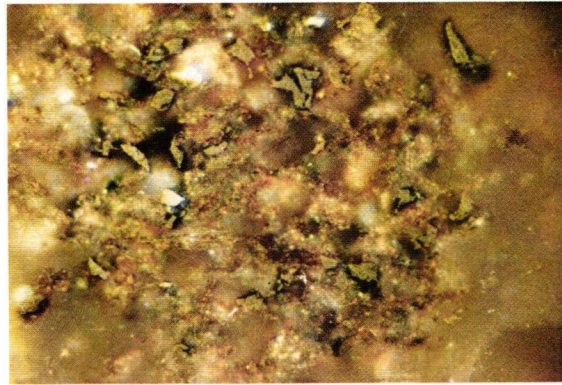


0.05mm
0.0

Fotografía 4. Muestra 60 - Obj. 40x, fluorescencia, aceite de inmersión. Partículas de concentrado de kerógeno amorfo montadas en epóxido (verde) con algunos esporangios de algas y exinitas amarillas. En el contacto con el epóxido se ha producido abundante exudación de hidrocarburos que fluorescen amarillo.



Fotografía 5. Muestra 25 - Obj. 16x, luz incidente, aceite de inmersión. Roca total con abundantes foraminíferos planctónicos y algo de material orgánico de color negro.

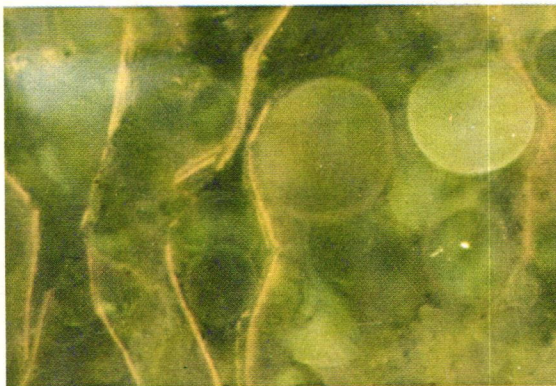


Fotografía 7. Muestra 20 - Obj. 40x, luz incidente, aceite de inmersión. Concentrado de kerógeno compuesto principalmente por material marino de aspecto amorfo y algunas partículas de huminita porosa de baja reflexión, de probable origen terrestre.

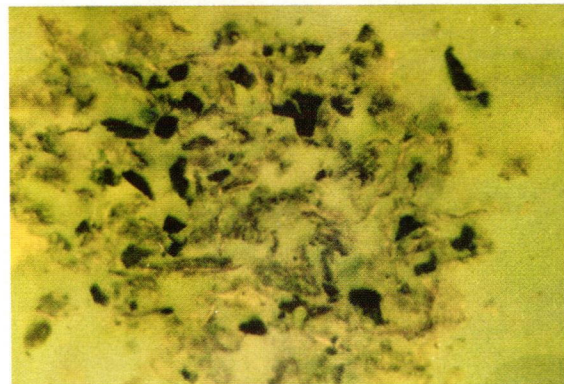
Bitumen

La bituminita se agrupa usualmente bajo la familia de macerales exinita, aunque se conocen muchas especies de bitumen que no fluorescen. En la Fotografía 10 se muestra una partícula de bitumen, insoluble en la mayoría de los solventes orgánicos, incluyendo aceite de inmersión, tiene color gris oscuro bajo luz blanca incidente, se caracteriza por su reflectancia muy baja (entre 0,07-0,15% R_0) y porque se raya fácilmente durante la pulitura de las muestras.

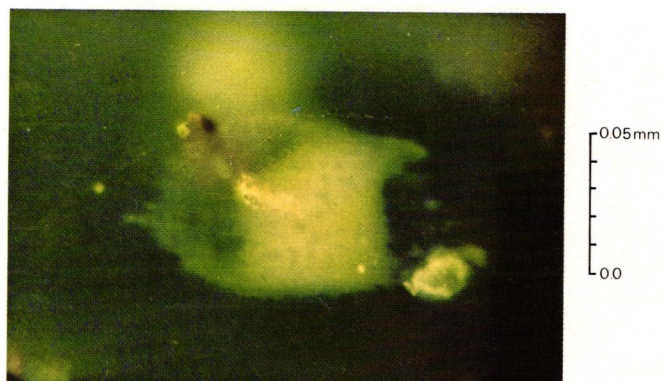
En muchas de las muestras el bitumen se encuentra relleno por completo las cámaras de microfósiles, como se aprecia en la Fotografía 11. Bajo luz blanca incidente a veces resulta difícil distinguir el bitumen amorfo de la roca circunvecina, por lo cual se usa luz polarizada. En la misma porción de la muestra anterior tomada con luz polarizada (Fotografía 12) se destaca el bitumen por su color negro, propio de las sustancias amorfas bajo nicoles cruzados.



Fotografía 6. Muestra 25 - Obj. 16x, fluorescencia, aceite de inmersión. La misma muestra anterior. Por medio de la fluorescencia se puede identificar el material orgánico como algas filamentosas.



Fotografía 8. Muestra 20 - Obj. 40x, fluorescencia, aceite de inmersión. Aspecto de la muestra anterior donde se observa la gran cantidad de exudación producida por el kerógeno amorfo. Esta es una de las capas generadoras por excelencia.



Fotografía 9. Muestra 76 - Obj. 40x, fluorescencia, aceite de inmersión. Exudación producida por reacción con el aceite de inmersión con hidrocarburos atrapados en partículas de concentrado de kerógeno. La mancha central se produjo por el movimiento del objetivo sobre la lámina.

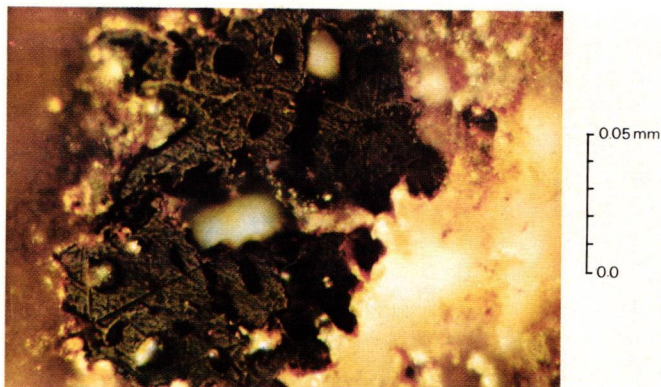


Fotografía 11. Muestra 9 - Obj. 40x, luz incidente, aceite de inmersión. Caliza típica de la parte inferior de la formación con caparzones de foraminíferos rellenos de bitumen. La caliza es micrítica con algunos cristales de pirita altamente reflectantes.

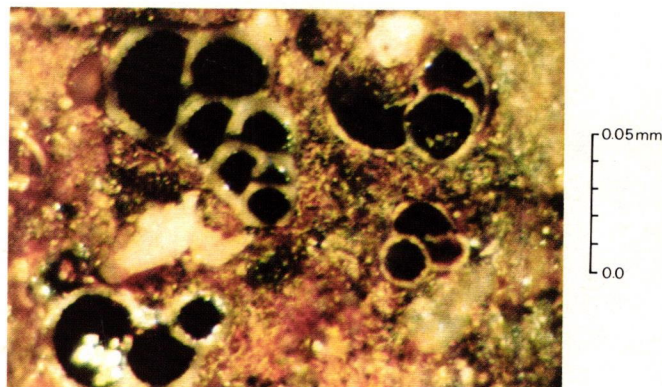
Huminita

El maceral huminita se conoce también como pseudo-vitrinita, ya que es un precursor de la vitrinita, y se origina a partir de plantas superiores. Tiene la propiedad de incrementar la reflectancia en forma monótona con el grado de metamorfismo orgánico. Es difícil de observar en roca total por su pequeño tamaño y poca abundancia. En

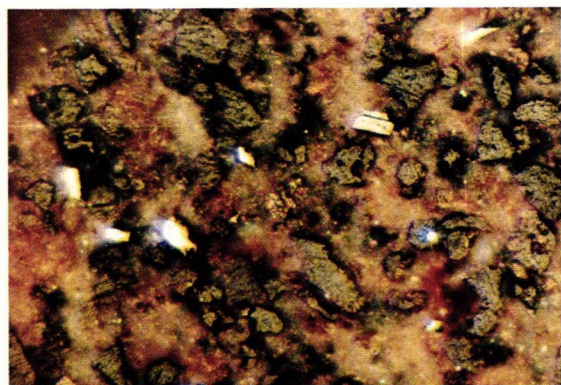
el concentrado de kerógeno se presenta en forma de partículas porosas, de color gris oscuro, que no fluorescen. La Fotografía 13 muestra uno de los concentrados más ricos en huminita, perteneciente a la parte inferior de la sección tipo. Se diferencia del bitumen por su mayor reflectancia (0,20% R_0) y por el aspecto de sus bordes. En la Fotografía 7 también se observan algunas partículas de huminita, sin fluorescencia como se aprecia en la Fotografía 8.



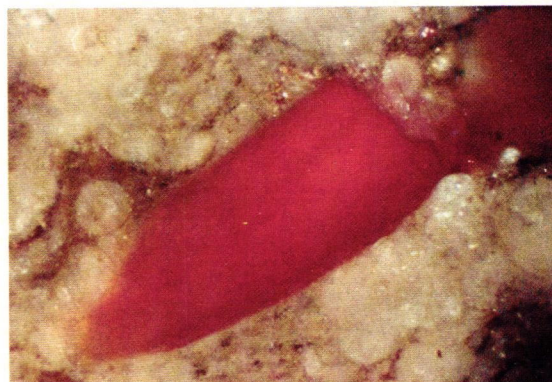
Fotografía 10. Muestra 74 - Obj. 40x. Luz incidente, aceite de inmersión. Partícula de bitumen, probablemente Gilsonita, rayada por el proceso de pulitura.



Fotografía 12. Muestra 9 - Obj. 40x, luz incidente, nicols X, aceite de inmersión. La misma muestra anterior donde se destaca la materia orgánica por su aspecto negro, i.e., amorfo para los efectos de la luz polarizada.



Fotografía 13. Muestra 13 - Obj. 40x, luz incidente, aceite de inmersión. Concentrado de kerógeno compuesto por una masa de kerógeno amorfo y partículas de huminita porosa de bajo grado de reflectancia, así como algunas inertinitas y granos de pirita.



Fotografía 15. Muestra 26 - Obj. 16x, luz incidente, aceite de inmersión. Restos de peces en una roca compuesta principalmente de caparzones de foraminíferos.

Inertinita

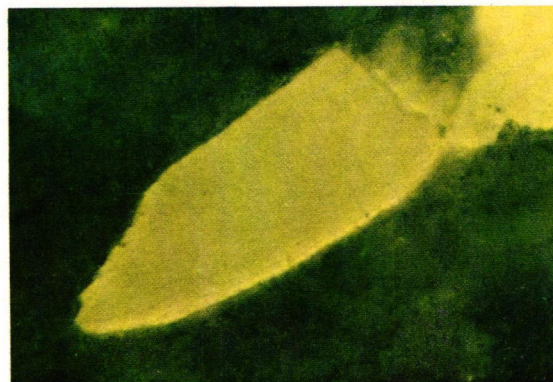
La inertinita es un maceral de origen continental y terrestre producto de la oxidación de la celulosa de plantas superiores. Es muy rara en las muestras de la Formación La Luna. Se identifica muy fácilmente por la intensa reflectancia y porque mantiene la morfología del tejido vegetal. En la Fotografía 13 se aprecian algunas partículas de inertinita de la parte inferior de la sección.

Material Orgánico Estructurado

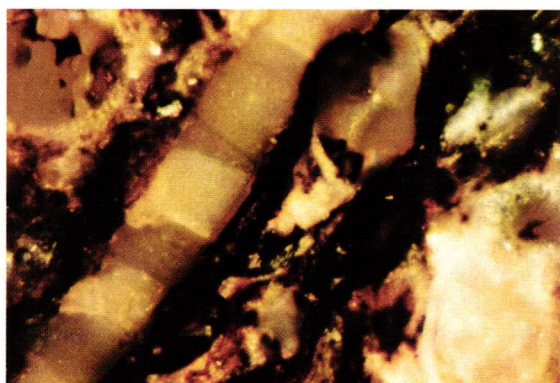
Desde el punto de vista de la generación de hidrocarburos, la importancia de la Formación La Luna radica en su abundancia de material orgánico, finamente particulado y sin estructura aparente, i.e., amorfo o gelificado. El examen microscópico detallado de las muestras revela, sin embargo, algunas estructuras orgánicas que permiten hacer una mejor reconstrucción del ambiente de sedimentación de la formación.



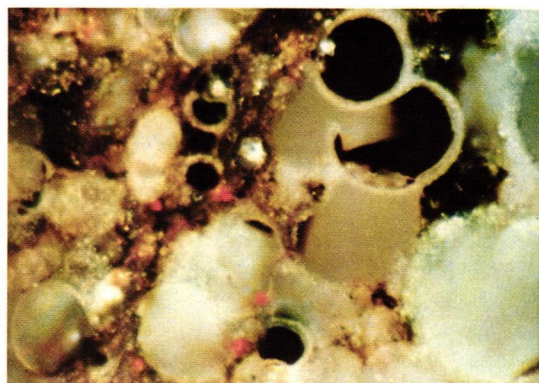
Fotografía 14. Muestra 16 - Obj. 40x, luz incidente, aceite de inmersión. Resto de pez, posiblemente escama, en caliza.



Fotografía 16. Muestra 26 - Obj. 16x, fluorescencia, aceite de inmersión. La misma muestra anterior donde se observa la fuerte fluorescencia amarilla del resto de pez gelificado y un proceso de conversión a hidrocarburos.



Fotografía 17. Muestra 58 - Obj. 40x, luz incidente, nicoles X, aceite de inmersión. Una de las muestras más ricas en materia orgánica, correspondiente a la población de calizas finamente laminadas. Nótese la distribución de la materia orgánica negra en forma bandea-da y rellenando algunas cámaras de foraminíferos.



Fotografía 19. Muestra 40 - Obj. 40x, luz incidente, nicoles X, aceite de inmersión. Disolución de caparazones y recristalización *in situ* de cristales de espato de calcita con el consiguiente desplazamiento del bitumen que rellenaba las cámaras originalmente de los foraminíferos.

Como ya se ha mencionado, las caparazones de foraminíferos planctónicos pequeños (0,3-0,5 mm) son muy abundantes. Asociados a ellas en muchas muestras se encuentran restos de escamas de peces (Fotografía 14). También se encuentran espinas que, en luz blanca incidente, se caracterizan por el color rojizo típico de la colofana y otros minerales fosfatados asociados (Fotografía 15) y en luz

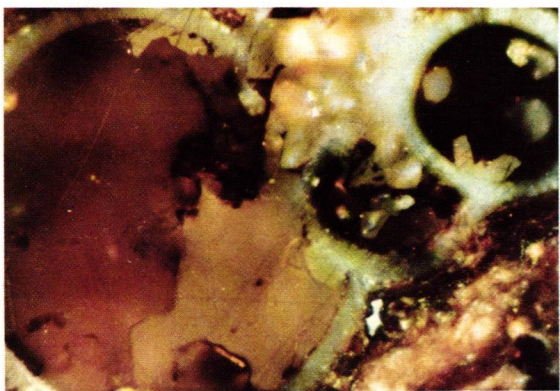
ultravioleta presentan fuerte intensidad de fluorescencia amarilla (Fotografía 16). Así mismo, en algunas muestras se han observado fragmentos de macrofósiles de concha delgada (Fotografía 17).

Diagénesis y Metamorfismo Orgánico

Para deducir los cambios que han sufrido las rocas y la materia orgánica que ellas contienen, a través del tiempo geológico, conviene señalar algunas características de la Formación La Luna y de su ambiente de sedimentación original. En general, la Formación La Luna representa la máxima transgresión de los mares cretáceos sobre el cratón de Guayana [14]. La columna de rocas de la Formación La Luna puede representar la historia geológica correspondiente a unos 20 millones de años, abarcando en el Cretáceo Superior los pisos del Cenomaniense al Santiense [7], con un espesor de apenas 178 m.

La tasa de sedimentación neta para la sección tipo se estima en 0,9-1,5 cm/1000 años. El cálculo de la tasa menor se hizo sobre la base del espesor de 178 m medido por los presentes autores y para la tasa mayor se tomó el espesor de 300 m dado por Hedberg y Sass [5]. En ambos casos, las tasas de sedimentación son representativas del talud de cuencas batiales modernas [15, 16].

Debido a las condiciones euxínicas del fondo de los mares de La Luna se observa poca actividad de bioturbación; los caparazones de foraminíferos se sedimentaron en capas finas sin perturbación aparente por organismos depredadores. El mismo ambiente euxínico y ligeramente re-



Fotografía 18. Muestra 80 - Obj. 40x, luz incidente, aceite de inmersión. Efecto de disolución de la calcita de los caparazones de foraminíferos y consiguiente recristalización en las cámaras en forma de espato que produce el desplazamiento del bitumen hacia las cámaras superiores o se queda atrapado entre cristales de espato.

ductor es responsable de la preservación de gran cantidad de materia orgánica, la cual inhibe los efectos diagenéticos de disolución y recristalización frecuentemente observados en Venezuela en otras calizas cretáceas y aún más jóvenes.

Los fenómenos tectónicos asociados con la orogénesis andina y el levantamiento de la columna litológica por encima del nivel base, con la consiguiente invasión de aguas meteóricas ácidas, han producido algunas manifestaciones diagenéticas importantes. En la Fotografía 18 se observa el efecto de disolución de calcita de las caparazones de un foraminífero y su recristalización en forma de grandes cristales de espato calcáreo en las cámaras del caparazón. Este proceso diagenético de disolución/recristalización ocasiona el desplazamiento y concentración de los hidrocarburos en los espacios porosos restantes con el consiguiente aumento de la presión intersticial. La fracción petróleo que no puede concentrarse así queda atrapada entre cristales de espato, como se observa en la Fotografía 19.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Espesor y Relaciones Estructurales de Campo

La sección tipo de la Formación La Luna tiene un espesor de 178 m medidos con plancheta y controlados con cinta métrica en la descripción de las capas individuales. El contacto inferior de la formación es concordante y abrupto con la Formación Maraca y el superior es inferido y aparentemente concordante con la Formación Colón aunque la presencia del mene podría indicar que se trata de una falla. Este contacto se presenta asociado al mene de la quebrada La Luna, el cual se observa en ambas orillas de la quebrada y constituye una impregnación de petróleo muy viscoso que fluye lentamente de unas capas de calizas y lutitas del tope de la Formación La Luna.

En el campo se han observado cuatro fallas denominadas A, B, C y D en este trabajo, cuya posición en el registro estratigráfico es de 13, 111, 115 y 127 m, respectivamente. Tres de estas fallas se manifiestan también en su comportamiento de reflectancia, ya sea por desplazamiento del gradiente promedio en cada labio y/o por mediciones anormalmente altas de reflectancia indicativas de incremento en el flujo de calor por el plano de falla. En dos de ellas se observa cierto incremento en el color de fluorescencia hacia el ámbar y café, colores indicativos de mayor maduración de la exinita. Este último criterio no es determinante, pero en unión de los otros anteriormente mencionados define muy bien la intensidad de la zona de falla.

La interpretación preliminar en base a la petrografía orgánica y reflectometría (Fig. 2) indica que la falla A es

aparentemente inversa, con un desplazamiento de 40 a 50 m calculados a partir del gradiente de reflectancia. Sin embargo, no se ha observado en el campo repetición de sección en la columna litológica como lo requiere este modelo de falla. Es posible que la sección repetida por el sobrecorrimiento corresponda a la llamada "litología tipo La Luna" observada por Hedberg [2] y Rod y Maync [6] en el Grupo Cogollo infrayacente. Las fallas B, C y D aparentemente son normales y se caracterizan por un incremento apreciable en el flujo de calor a lo largo del plano de falla, manifestado en valores de reflectancia de vitrinita-huminita anormalmente altos. La presencia de estas fallas en la sección tipo puede explicar la discrepancia de espesor con respecto a otros autores previos [2, 5] que reportan "cercano a los 300 metros de espesor" para la sección tipo de la Formación La Luna.

Tectonismo Sedimentario

Generalmente se considera a la Formación La Luna como el intervalo correspondiente a la máxima transgresión de los mares cretáceos, sobre la base de la uniformidad litológica, espesor consistente de las capas y paquetes individuales y de la formación en conjunto, y abundancia de amonites y foraminíferos planctónicos que indican condiciones ambientales propias de mares profundos (aunque sobre este último aspecto ha existido cierta controversia desde los años 30 [2, 3]).

El análisis de los parámetros de la petrografía orgánica (Fig. 2) indica que se produjeron dos o tres episodios durante los cuales se depositó material orgánico de origen terrestre, posiblemente erosionado en el cratón o en una isla-plataforma cercana. Es probable que este material orgánico sea redepositado (de segundo ciclo); en la Formación La Luna se encuentra en los tiempos correspondientes a las muestras 29-31, 64-68 y 74. Es conveniente recordar que la columna litológica de la Formación La Luna representa probablemente unos 20 millones de años y que la tasa de sedimentación es muy baja, por lo que es muy factible que durante dicho lapso hayan ocurrido episodios orogénicos locales o de levantamientos del *hinterland*, como han postulado otros autores [6].

Ambiente de Sedimentación Orgánica

En cuanto a la composición del material orgánico en sí, es interesante describir el carácter cíclico de los incrementos de los dos principales macerales generadores de hidrocarburos, i.e., la exinita y el material micrítico-amorfo de origen marino. En la exinita se observan por lo menos seis ciclos con un máximo de huminita por causas aún sin clari-

ficar. La fluorescencia también tiene ciclos de intensidad fuerte, algunos correlacionables con ciclos correspondientes de exinita. La presencia de abundantes restos de peces ocurre preferentemente en los mínimos de exinita, lo que indica que la presencia de exudatinita y bituminita no se debe a la descomposición de peces sino a una abundancia de algas marinas o alginita.

Los valores altos de exinita coinciden también con las manifestaciones de impregnación de bitumen y reacción de exudación del kerógeno con aceite de inmersión observadas en el campo y en el laboratorio, respectivamente. La distribución general de la exinita en 39 muestras de la sección es casi normal, con ligero dominio de los valores altos y un modo centrado en 25% (ver Fig. 2), mientras que la huminita sigue una distribución probablemente de tipo gamma con valores esperados más frecuentes entre 2 y 4%.

En varias muestras se han observado cristales pequeños, pero bien formados de anhidrita de color rojizo en luz incidente, confirmados por microsonda, que indican condiciones supersaturadas del agua oceánica de La Luna durante los tiempos representados por las muestras 28, 44-54 y 63. La presencia de foraminíferos planctónicos es uniforme a través de toda la sección estratigráfica y por lo tanto no se considera un factor determinante, por sí sólo, de la calidad de las potenciales rocas generadoras.

Metamorfismo Orgánico y Maduración

La maduración de la sección litológica fue determinada mediante mediciones de la reflectancia de vitrinita-huminita en 51 muestras. Los valores de R_o varían de 0,21% en la base hasta 0,13% en el tope con un gradiente promedio de 0,45% R_o /km. Se concluye, por lo tanto, que la sección tipo de la Formación La Luna es inmadura ya que no pasa el umbral de la ventana del petróleo de la mayoría de los autores [11, 12, 13]. La inmadurez de la sección tipo fue confirmada independientemente por Vierma [9] mediante el método de la pirólisis. Estudios previos indican que el área geográfica de la sección tipo está comprendida dentro de la zona de madurez [17], pero conviene enfatizar que están basados en estimados y cálculos y no en mediciones completas como las de este trabajo.

Se ha tratado de estimar la máxima paleotemperatura alcanzada por las rocas de la sección tipo de la Formación La Luna a partir de la reflectancia de vitrinita. Bostick *et al.* [18] presentan un gráfico que relaciona reflectancia de vitrinita con temperatura y tiempo de soterramiento, del cual se deduce que la sección tipo no ha sobrepasado los 40°C; además incluyen otra figura que demuestra que no ha estado cubierta por más de 800 m de sedimentos en su

historia geológica. Esto se puede explicar por el efecto positivo, contrario a la subsidencia, del arco de Mérida, cuya prolongación hacia el noroeste se hacía sentir con mayor intensidad en el área de la sección tipo, anulando localmente los efectos de subsidencia del surco de Machiques.

En este sentido, conviene señalar que tanto la temperatura como la profundidad de soterramiento de la Formación La Luna aumentan rápidamente hacia el norte, este y sur. Así tenemos que en el Río Socuy, a unos 60 km al norte, la reflectancia de vitrinita es de 1,10%, lo que implicaría paleotemperaturas máximas del orden de los 130°C para un tiempo efectivo de soterramiento de 30 millones de años y una cobertura de 3500 m de sedimentos. Valores similares de reflectancia de vitrinita se han observado hacia el este y hacia el sur.

CONCLUSIONES

1. El material orgánico diseminado en las rocas de la sección tipo de la Formación La Luna es kerógeno sapropélico formado por la descomposición de plancton marino, algas, restos de foraminíferos, moluscos y peces.
2. El kerógeno micrítico-amorfo y la exinita son los ingredientes principales para la generación de hidrocarburos. Su abundancia en la columna estratigráfica ocurre por ciclos, los cuales están correlacionados con exudatinitas e impregnaciones de bitumen.
3. Los análisis de petrografía orgánica sugieren que los restos de peces tienen una importancia secundaria en la generación de hidrocarburos.
4. Se han identificado tres episodios de introducción de material orgánico de origen terrestre que han permitido determinar el grado de metamorfismo orgánico mediante la reflectancia de vitrinita-huminita.
5. Las rocas de la sección tipo se encuentran en estado de inmadurez; la reflectancia de vitrinita-huminita varía de 0,13 a 0,21%. Sin embargo, se encuentra frecuentemente exudatinita lo que indica generación incipiente de hidrocarburos.
6. El gradiente de reflectancia es de 0,45 % R_o /km, lo cual se considera normal para un borde de cuenca tectónica.
7. La tasa de sedimentación neta puede variar entre 0,9 y 1,5 cm/1000 años y se considera representativa del talud de cuencas batiales.

REFERENCIAS

1. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. *Memoria y Cuenta*. 1979.
2. HEDBERG, H. D. Cretaceous Limestone as Petroleum Source Rock in Northwestern Venezuela. *AAPG Bull.* 15, p. 229-246. 1931.
3. LIDDLE, R. A. *The Geology of Venezuela and Trinidad*. J. P. Mac Gowan, Fort Worth, Texas, 552 p. 1928.
4. GARNER, A. H. Suggested Nomenclature and Correlation of Geological Formations in Venezuela. *Amer. Inst. Min. Metall. Eng. Trans.*, p. 677-684. 1926.
5. HEDBERG, H. D.; SASS, L. C. Sinopsis de las Formaciones Geológicas de la Parte Occidental de la Cuenca de Maracaibo, Venezuela. *Bol. Geol. y Min.*, 1 (2-4): 77-120. 1937.
6. ROD, E.; MAYNC, W. Revision of Lower Cretaceous Stratigraphy of Venezuela. *AAPG Bull.*, 38 (2): 193-283. 1954.
7. FORD, R.; HOUBOLT, J. J. H. T. *Las Microfacies del Cretáceo de Venezuela Occidental*. Int. Sed. Petrog. Serv. v. 6, 67 p. 109 lám., E. J. Brill, Leiden. 1963.
8. AZPIRITXAGA, I.; GUTIÉRREZ, M. L.; MÁRQUEZ, X. *Petrografía de la Sección Tipo de la Formación La Luna, Cretáceo Superior*. Informe inédito confidencial INTEVEP, ICT 117, 60 p. 3 lám., 23 fotg., 1981.
9. VIERMA, L. *Evaluación Geoquímica de la Formación La Luna en su Sección Tipo, Machiques, Estado Zulia*. Informe inédito confidencial INTEVEP, ICT 130, p. 29, 1 lám., 70 fotog. 1981.
10. ICCP. *International Handbook of Coal Petrography*, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris. 1971.
11. TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer Verlag, Berlin, 538 p. 1978.
12. TEICHMULLER, M. Über neue Macerale der Liptinit Gruppe und die Entstehung von Micrinit. En *Inkoblung und Erdol Beitrage der Kohlenpetrologie zur Prospektion auf Erdol und Erdgas*. Fortsch. in Geol. Rheinland-Westfahlen v. 24, 184 p. 1974.
13. HUNT, J. M. The Origin of Petroleum in Carbonate Rocks. (En *Carbonate Rocks*, Chilingar *et al.*, Eds., Elsevier Publ. Co. New York). p. 225-251. 1967.
14. GONZÁLEZ DE JUANA, C.; ITURRALDE DE AZORENA, J.; PICARD, X. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Ediciones FONINVES, 2 Tomos, 1031 p. 1980.
15. GARRELS, R. M.; MACKENZIE, F. T. *Evolution of Sedimentary Rocks*, Norton, 396 p. 1971.
16. SCHERER, W. *Estratigrafía de las Formaciones Cretáceas de la Cuenca de Maracaibo*. Informe en preparación, INTEVEP. 1982.
17. BLASER, R.; WHITE, C. Estudio Geoquímico del Habitat de Hidrocarburos en la Cuenca de Maracaibo, Venezuela Occidental. Informe de Progreso. *Sem. Tec. Expl. y Oper. del Cretáceo PDVSA*, 1, 389-413. 1979.
18. BOSTICK, N. H.; CASHMAN, S. M.; McCULLOCH, T. H.; WADELL, C. T. Gradients of Vitrinite Reflectance and Present Temperature in the Los Angeles and Ventura Basins, California. *Symp. Geochem Temperature and Clay Minerals*. 1980.

NOTA:

Escala de las fotomicrografías: La longitud de las fotografías representa 0,21 mm para el objetivo 40x y 0,53 mm para el objetivo 16x. La altura está en proporción.

Recibido: 07-04-82
Aprobado: 17-05-82