

GEOLOGY OF THE PALEOCENE SEPULTURA FORMATION, MESA DE LA SEPULTURA, BAJA CALIFORNIA

GEOLOGIA DE LA FORMACION SEPULTURA DEL PALEOCENO, EN MESA DE LA SEPULTURA, BAJA CALIFORNIA

Patrick L. Abbott
Andrew D. Hanson
Celeste N. Thomson
Deirdre L. Logue
Kristine D. Bradshaw
Woody Joe Pollard
Thomas E. Seeliger

Department of Geological Sciences
San Diego State University
San Diego, California 92182-0337, U.S.A.

Recibido en septiembre de 1992; aceptado en noviembre de 1992

ABSTRACT

At its Mesa de La Sepultura type area, the upper-lower to upper Paleocene Sepultura Formation lies with apparent disconformity on the lower Maastrichtian, marine upper slope and shelf deposits of the Rosario Formation. In places the uppermost Rosario Formation is marked by a kaolinite-rich paleosol. The Sepultura Formation is a deepening-upward sequence divided into a lower glauconitic-clastic member and an upper limestone member. The lower member has a basal plutonic-volcanic conglomerate overlain by sandstone containing abundant *Turritella peninsularis* of late-early to early-late Paleocene age. The dominant lithology is calcite-cemented, glauconitic, fossiliferous arkose or lithic arkose of apparent Peninsular Ranges provenance. The beds contain abundant red algal nodules, storm deposits, and iron-stained corrosion surfaces. Terrigenous sediment influx was diverted so that the upper member is virtually pure limestone dominated by branching red algae fragments and forams but devoid of micrite. The Sepultura Formation at Mesa de La Sepultura is a carbonate sediment-dominated record of late-early to late Paleocene deepening that progressed from shallowest marine at the base to 200 m deep shelf waters at the top. During this time, terrigenous coarse sediment deposition was blocked here even though it dominated in areas to the north and south.

Key words: Paleocene, Sepultura, limestone, Baja California.

RESUMEN

En su área tipo de Mesa de la Sepultura, la Formación Sepultura del Paleoceno superior-inferior a superior yace en discordancia aparente sobre los depósitos de la plataforma y pendiente superior marinos de la Formación Rosario, del Maastrichtiano medio. En algunos sitios el contacto superior de la Formación Rosario está marcado por un paleosuelo rico en caolinita. La Formación Sepultura es una secuencia que se hace más profunda hacia arriba, dividida en un miembro inferior clástico-glauconítico y un miembro superior calizo. El miembro inferior tiene un conglomerado plutónico-volcánico basal, cubierto por arenisca que contiene abundante *Turritella peninsularis* del Paleoceno temprano tardío al tardío temprano. La litología dominante es arcosa fosilífera o lítica cementada con calcita glauconítica, que procede aparentemente del Batolito Peninsular. Las capas contienen abundantes nódulos de algas rojas y depósitos de tormenta, así como superficies de corrosión con manchas ferrosas. El flujo de sedimentos terrígenos fue desviado

de modo que el miembro superior es casi caliza pura dominada por fragmentos de algas rojas ramificadas y foraminíferos pero carente de micrita. La Formación Sepultura en Mesa de la Sepultura es un registro dominado por sedimentos de carbonatos, del Paleoceno tardío-temprano a tardío, que representa una sumersión o hundimiento desde ambientes marinos someros en la base de la columna hasta profundidades de plataforma de 200 m en la cima. Durante este tiempo, el depósito de sedimentos gruesos terrígenos fue inhibido aquí, aunque dominó en áreas al norte y sur de esta región.

Palabras clave: Paleoceno, Sepultura, caliza, Baja California.

INTRODUCTION

Mesa de La Sepultura is located in northern Baja California about 20 km southeast of El Rosario (Fig. 1). It is the type locality of the Paleocene/Eocene Sepultura Formation named by Santillán and Barrera (1930). The geomorphology of the mesa is vividly depicted by the name sepultura, which is an above ground burial site with a tombstone. Resistant limestone caps the mesa and a topographic high point on the west is reminiscent of a tombstone.

The distribution of Tertiary strata of Baja California is included on the map by Gastil *et al.* (1975). The Paleocene and Eocene units are typically described as deltaic and nearshore deposits (Beal, 1924; Gastil *et al.*, 1975). Beal (1948) further suggested that the units reflect an important subsidence or advancing shoreline during which the sea covered the western flanks of the peninsula.

Kilmer (1963) mapped the Cretaceous and Tertiary sequence in the vicinity of El Rosario. He identified the invertebrate fossils and defined the stratigraphy of the Upper Cretaceous Rosario Group. Patterson (1978) furthered his work by studying the foraminifera and paleoecology of the uppermost 400 m of marine siltstone and sandstone of the Rosario Formation. She suggested a drastic downdropping of the Rosario basin to bathyal depths followed by gradual sediment buildup to shallower water depths. It is likely that the uppermost part of her section near El Rosario overlaps with the lowest part of the section exposed at Mesa de La Sepultura. Storm deposits in the Sepultura Formation were described and interpreted by Ledesma-Vázquez (1991).

Santillán and Barrera (1930) described the Sepultura Formation at Mesa de La Sepultura as principally green, grey, red and yellow sandstone with medium size conglomerate layers and rare, silty limestone. Since that

INTRODUCCION

Mesa de la Sepultura se localiza en el norte de Baja California, aproximadamente 20 km al sureste de El Rosario (Fig. 1). Es la localidad tipo de la Formación Sepultura del Eoceno/Paleoceno, denominada así por Santillán y Barrera (1930). La geomorfología de la meseta está vívidamente descrita por el nombre sepultura, ya que parece una elevada tumba de tierra con una lápida. La meseta está cubierta por caliza resistente y, al oeste, un punto topográfico alto evoca la lápida.

La distribución de estratos terciarios de Baja California se incluye en el mapa de Gastil *et al.* (1975). Las unidades del Paleoceno y Eoceno están descritas típicamente como depósitos deltaicos y de cercanía de costa (Beal, 1924; Gastil *et al.*, 1975). Beal (1948) sugirió además que las unidades reflejan un hundimiento importante o avance de la línea costera, durante el cual el mar cubrió los flancos occidentales de la península.

Kilmer (1963) trazó la secuencia del Cretácico y Terciario en el área de El Rosario. Identificó los fósiles invertebrados y definió la estratigrafía del Grupo Rosario del Cretácico superior. Patterson (1978) continuó su trabajo con un estudio de los foraminíferos y la paleoecología de los 400 m superiores de limolita y arenisca marinas de la Formación Rosario. Esta investigadora considera que hubo una caída drástica de la cuenca Rosario a profundidades batiales, seguida de acumulación gradual de sedimentos a profundidades menores. Es probable que la parte superior de su sección cercana a El Rosario esté superpuesta a la parte inferior de la sección expuesta en Mesa de la Sepultura. Los depósitos de tormenta de la Formación Sepultura han sido descritos e interpretados por Ledesma-Vázquez (1991).

Santillán y Barrera (1930) describieron la Formación Sepultura de Mesa de la Sepultura como constituida principalmente por

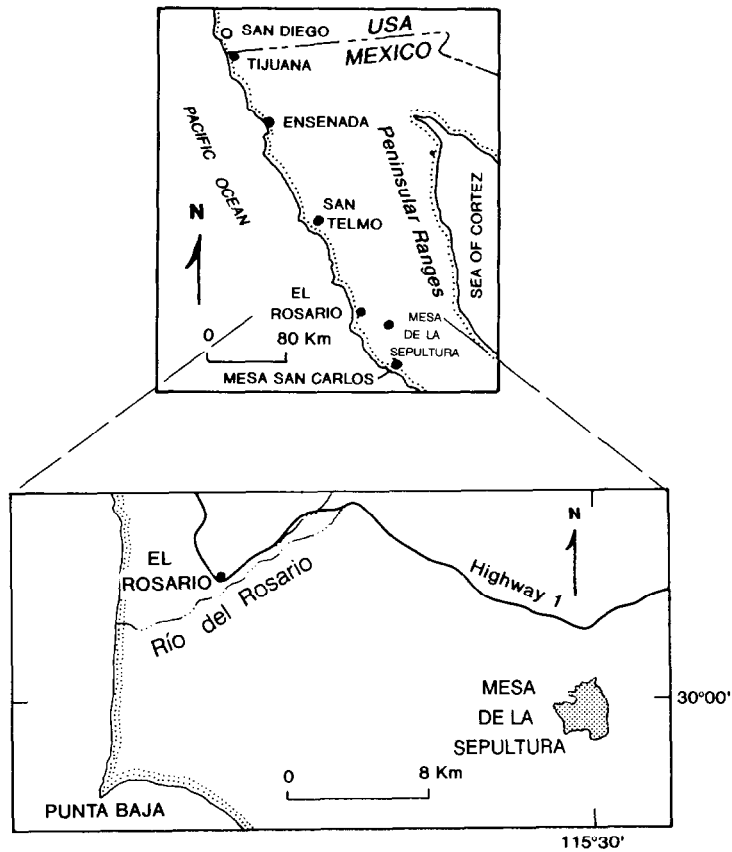


Figure 1. Location map.
 Figura 1. Mapa de localización.

time, no detailed lithologic study has been completed.

Santillán and Barrera (1930) stated "...Pero el espesor que manifiesta arriba de la Formación Rosario no es de consideración en ninguno de los lugares donde aflora...", i.e., the Sepultura Formation is of no real importance because of its minor outcrop thickness. Admittedly, it is much thinner than the Rosario Group, but the Sepultura is of potentially grave importance. During Paleocene time, the Sepultura limestones were accumulating while to the north and south only terrigenous clastics were being deposited. Therefore, the Sepultura Formation provides important evidence in the reconstruction of the Paleocene paleogeography of northern Baja California.

arenisca verde, gris, roja y amarilla, con capas de conglomerado de tamaño medio y escasa caliza limosa. Desde entonces no se ha completado ningún estudio litológico detallado.

Santillán y Barrera (1930) afirmaron "...Pero el espesor que se manifiesta arriba de la Formación Rosario no es de consideración en ninguno de los lugares donde aflora...". Es cierto que el afloramiento es mucho más delgado que en el Grupo Rosario, pero la Formación Sepultura es potencialmente importante. Durante el Paleoceno, las calizas de la Sepultura se fueron acumulando mientras al norte y al sur sólo se depositaban clásticos terrígenos. Por tanto, la Formación Sepultura proporciona importante evidencia para reconstruir la paleogeografía del Paleoceno del norte de Baja California.

DEFINITION OF THE SEPULTURA FORMATION

At the type locality, Mesa de La Sepultura, both the Sepultura and the Rosario Formations are nearly flat-lying. In our lithologic study it was necessary to define more succinctly the base of the Sepultura Formation. Because the Sepultura Formation exhibits great lateral variation in lithology in Baja California, multiple criteria are here provided to help define the formation over this large geographical area.

The criteria used for defining the base of the Sepultura Formation are: a) a steep break in slope due to increased induration resulting from the increase in calcium carbonate percentage, b) an upsection change in color from the black and dark grey of the Rosario Formation to light grey, red, pink, and yellow, c) the gradual upsection increase in sand grain sizes in the uppermost Rosario Formation as well as the first appearances of one-clast thick conglomerate stringers, herald the approach to the Sepultura Formation, d) the local appearance of a paleosol developed on uppermost Rosario which is expressed as leached zones with distinct white, light-red and dark-red colored horizons and enrichment in clay minerals, e) pebble to small boulder, crystalline-clast conglomerates ranging from 0.5 to 5 m thick at the base of the Sepultura, and f) the first appearance of *turritellids* which occur in abundance near the base of the Sepultura Formation. By using all or some of the criteria listed above, the break between the Sepultura Formation and Rosario Group can be consistently determined.

Our investigation of the Sepultura Formation recognizes two members, a lower glauconitic and clastic member and an upper limestone member (Fig. 2). The lower member consists of calcite-cemented arkosic sandstones, volcanic clast-dominated conglomerates, tempestites, abundant glauconite peloids, and minor limestone. This lower member contains terrigenous clastic material similar to that of the Rosario Formation as well as a high content of limestone like the upper member of the Sepultura Formation. The limestones are typically sorted, red algal-fossil fragment *biosparrudite*. Fragmented molluscan fossils and calcareous red algae are common throughout both members of the Sepultura Formation.

DEFINICION DE LA FORMACION SEPULTURA

En la localidad tipo Mesa de la Sepultura, ambas formaciones, Sepultura y Rosario, yacen casi planas. En este estudio litológico fue necesario definir muy sucintamente la base de la Formación Sepultura. Puesto que dicha formación muestra mucha variedad lateral de litología en Baja California, se proporcionan aquí varios criterios para ayudar a definirla sobre esta gran área geográfica.

Los criterios usados para definir la base de la Formación Sepultura son: a) una discontinuidad en la pendiente debida al incremento en el porcentaje de carbonato de calcio, b) un cambio de color, del negro y gris oscuro, en la sección de arriba de la Formación Rosario, al gris claro, rojo, rosa y amarillo, c) el aumento gradual del tamaño de los granos de arena al ascender en la sección de arriba de la Formación Rosario superior, así como las primeras apariciones de capas de conglomerado grueso de un solo tamaño de grano, que anuncian la cercanía de la Formación Sepultura, d) la aparición local de un paleosuelo desarrollado en la Rosario superior, que se manifiesta como zonas blanqueadas con bien definidos horizontes coloreados de blanco, rojo claro y rojo oscuro, así como enriquecimiento en minerales de arcilla, e) conglomerados de clasto cristalino, cuyo tamaño es de guijarros a cantos rodados, de 0.5 a 5 m de grosor en la base de la Sepultura, y f) la primera aparición de *turritélidos*, que ocurre en abundancia cerca de la base de la Formación Sepultura. Usando todos o algunos de los criterios arriba listados, se puede determinar consistentemente la separación entre la Formación Sepultura y el Grupo Rosario.

Nuestra investigación de la Formación Sepultura reconoce dos miembros, uno inferior glauconítico y clástico y otro superior calizo (Fig. 2). El miembro inferior consiste en areniscas arcósicas cementadas con calcita, conglomerados dominados por clasto volcánico, tempestitas, abundante oolita glauconítica y poca caliza. Este miembro inferior contiene material clástico terrígeno similar al de la Formación Rosario, así como un alto contenido de caliza, al igual que el miembro superior de la Formación Sepultura. Las calizas están separadas típicamente, *biosparrudita* con fragmentos de algas rojas fósiles. En cualquier parte de ambos miembros de la

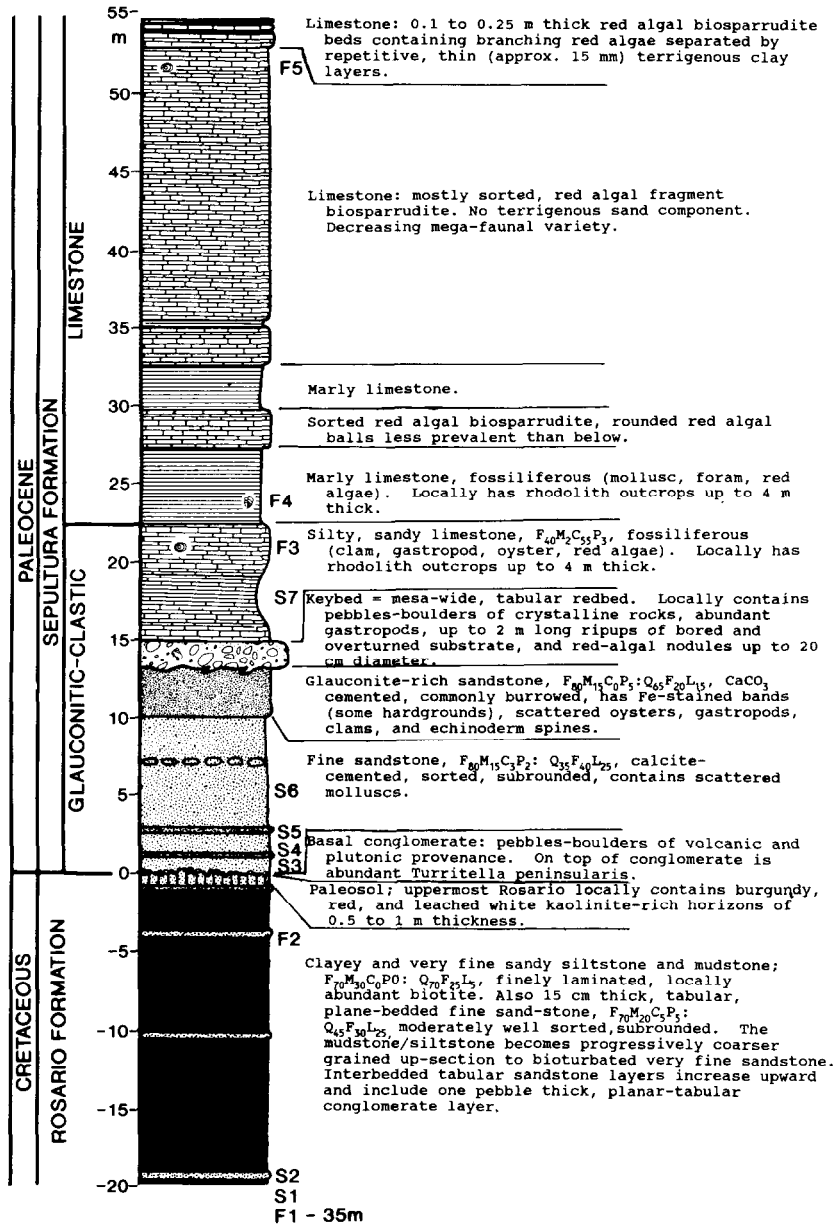


Figure 2. Generalized stratigraphic section for Mesa de La Sepultura. F = microfossil sample; S = sandstone thin section.

Figura 2. Sección estratigráfica generalizada de Mesa de la Sepultura. F = muestra microfósil; S = sección delgada de arenisca.

Table 1. Point-count data for sandstones.
Tabla 1. Datos de la cuenta de puntos para areniscas.

Samples	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Quartz	28.5	28.5	22.5	25.5	38.5	24.0	34.0
Plagioclase	19.0	22.0	17.5	18.0	14.0	17.5	10.5
K-spar	9.5	4.0	2.5	7.5	3.5	8.5	7.5
VRF	5.0	6.0	2.0	3.5	5.0	10.0	2.0
MRF	2.0	0	7.5	0.5	7.0	1.0	0
SRF	0	0	0	0.5	0	0	0
Dense minerals	18.5	23.5	17.0	18.0	16.0	10.5	11.5
Biotite	1.5	0.5	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0
Cement	16.0	15.5	30.5	25.5	14.0	28.0	11.0

VRF = volcanic rock fragments; MRF = metamorphic rock fragments; SRF = sedimentary rock fragments.

LITHOLOGY OF THE ROSARIO FORMATION

At Mesa de La Sepultura, the Rosario Formation consists of black to dark grey, planar laminar mudstone and siltstone interbedded with occasional 0.5 m thick beds of fine-grained arkose and lithic arkose. These sandstone beds are planar-tabular masses, contain planar laminations, and show no signs of post-depositional reworking by currents or deep waves. The likely origin of these sandstones was via episodic deposition from storm return-surge flows. The frequency of the sandstone beds increases upsection while the overall grain size coarsens slightly and gradually as well.

Sandstone samples were examined petrographically (table 1) using thin sections which were stained for potassium feldspar and counted at 200 points per slide. The parameters of Dickinson *et al.* (1983) were utilized for provenance discrimination. Results are reproducible within 5% (van der Plas and Tobi, 1965).

Samples S1 and S2 are from the Rosario Formation (see Fig. 2 for stratigraphic position). Both samples are fine-grained arkose with quartz-feldspar-lithic fragment (QFL) ratios averaging Q₄₆F₄₄L₁₀. The low percentage of quartz and high percentage of feldspar with plagioclase percentage much greater than potassium feldspar indicate mineralogic immaturity. This probably reflects nearness to source, short transportation dis-

Formación Sepultura son comunes fragmentos de moluscos fósiles y algas rojas calcáreas.

LITOLOGIA DE LA FORMACION ROSARIO

En Mesa de la Sepultura, la Formación Rosario consiste en lodolita y limolita de color negro y gris oscuro, laminadas y planas, interestratificadas, con capas ocasionales, de 0.5 m de grueso, de arcosa de grano fino y arcosa lítica. Estas capas de arenisca son masas planas tabulares que contienen laminaciones planas y no muestran signos de alteraciones postdeposicionales causadas por corrientes u olas profundas. Probablemente, el origen de estas areniscas fue vía depositación episódica, proveniente del reflujó de oleajes de tormenta. La frecuencia de las capas de arenisca aumenta en la sección de arriba, a la vez que el tamaño general del grano se engrosa ligera y gradualmente.

Se examinaron muestras de arenisca petrográficamente (tabla 1), usando secciones delgadas que fueron teñidas para identificar el feldespato de potasio y contadas a 200 puntos por placa. Para determinar la procedencia, se utilizaron los parámetros de Dickinson *et al.* (1983). Los resultados son reproducibles dentro del 5% (van der Plas y Tobi, 1965).

Las muestras S1 y S2 corresponden a la Formación Rosario (posición estratigráfica en Fig. 2). Ambas muestras son arcosa de grano fino con razones de fragmentos líticos de feldespato de cuarzo (QFL) promedio de Q₄₆F₄₄L₁₀. Los porcentajes bajo de cuarzo y

tance, and little effect of chemical weathering. The low percentages of lithic fragments are partly due to the fine grain size. The provenance is plutonic with associated metamorphic and volcanic masses which is consistent with the Peninsular Ranges batholith and pre-batholithic cover that lies to the east of Mesa de La Sepultura.

Approaching the top of the Rosario Formation, the sand grain size increases to include fine-grained sandstone beds and one-clast thick, planar-based conglomerates. Locally, the uppermost 2 m is enriched in clay minerals and has dark-red, light-red, and white horizons interpreted to be a paleosol. This ancient soil is best exposed in the northeastern part of Mesa de La Sepultura. Table 2 contrasts the clay mineralogy of the colored horizons with that of the overlying Sepultura Formation. The presence of abundant kaolinite in the colored horizons suggests an advanced state of cation stripping and chemical weathering consistent with terrestrial exposure and weathering. The overlying Sepultura Formation has an abundance of expandable clays with subsidiary amounts of illite reflecting its submarine depositional site.

MICROPALAEONTOLOGY OF THE ROSARIO FORMATION

Eighteen samples were collected from the Rosario Formation and were analyzed for four fossil groups: pollen and spores, siliceous microfossils, calcareous nannofossils (coccolithophores) and foraminifera. However, only the latter two provided assemblages with age and/or environmental significance.

Of the 18 Rosario samples only one provided a definitive faunal assemblage. The Maastrichtian stratigraphy in northern Baja California is very silty and sandy and the occurrence of samples barren in microfossils is a common phenomenon. The few microfossils present have been diluted by the increase in clastic material and post-burial solution is also likely to have dissolved many fossils. Sample F1 was collected 35 m below the Rosario-Sepultura contact. It contained *Globotruncana elevata*, *G. arca*, *Rugoglobigerina rugosa*, *Fronicularia cf. inversa*, *Nodosaria septemcostata*, *N. spinifera*, *Praeulimina spinata*, *Pyramidina rudita*, *Anomalina rubiginosa*, *Gyroidinoides goudkoffi*, *G. cf. bandyi*, *Bolivina incrassata*, *Eponides ingra-*

alto de feldespato, con porcentaje de plagioclasa mucho mayor que de feldespato de potasio indican inmadurez mineralógica. Esto probablemente refleja cercanía con la fuente, corta distancia de transportación y poco efecto de intemperismo químico. Los bajos porcentajes de fragmentos líticos se deben en parte al tamaño fino del grano. La procedencia es plutónica con masas volcánicas y metamórficas asociadas, lo cual concuerda con la cubierta batolítica y prebatolítica del Batolito Peninsular que se extiende al este de Mesa de la Sepultura.

Cerca de la cima de la Formación Rosario, el tamaño del grano de arena aumenta hasta incluir capas de arenisca de grano fino y conglomerados gruesos de un solo tamaño de grano, de base plana. Localmente, los 2 m superiores están enriquecidos en minerales de arcilla y tienen horizontes de colores rojo oscuro, rojo claro y blanco, que se interpretan como un paleosuelo. La mejor exposición de este suelo antiguo está en la parte noreste de Mesa de la Sepultura. La tabla 2 contrasta la mineralogía de la arcilla de los horizontes coloreados con la de la superpuesta Formación Sepultura. La presencia de abundante caolinita en los horizontes coloreados sugiere un avanzado estado de denudación catiónica y química, acorde con la exposición terrestre y el intemperismo. La Formación Sepultura superpuesta tiene abundancia de arcillas expandibles con cantidades subsidiarias de ilita que reflejan su lugar de deposición submarina.

MICROPALAEONTOLOGIA DE LA FORMACION ROSARIO

Se tomaron 18 muestras de la Formación Rosario y se analizaron en relación con cuatro grupos fósiles: polen y esporas, microfósiles silíceos, nanofósiles calcáreos (coccolitóforos) y foraminíferos. Sin embargo, sólo los dos últimos grupos fueron significativos en cuanto a edad o/y ambiente.

De las 18 muestras, únicamente una proporcionó un grupo faúnico definitivo. La estratigrafía Maastrichtiana en el norte de Baja California es muy cenagosa y arenosa, por lo que las muestras carentes de microfósiles son frecuentes. Los pocos microfósiles presentes se han diluido por el aumento de material clástico, y es probable también que la solución posterior al enterramiento haya disuelto mu-

Table 2. Clay analysis.
Tabla 2. Análisis de arcilla.

Sepultura Formation				
	< 4 microns		< 1 micron	
+ 5 m above contact	Illite	33%	Illite	15%
	Kaolinite	6%	Kaolinite	7%
	Expandable	61%	Expandable	78%
Rosario Formation				
-0.3 m below contact	Illite	9%	Illite	5%
	Kaolinite	51%	Kaolinite	49%
	Expandable	40%	Expandable	46%
-1 m	Illite	6%	Illite	2%
	Kaolinite	34%	Kaolinite	4%
	Expandable	60%	Expandable	94%
-1.5 m	Illite	23%	Illite	15%
	Kaolinite	17%	Kaolinite	30%
	Expandable	60%	Expandable	55%

mensis, *Dentalina basiplanata*, *D. vistulae*, *Lenticulina spachholtzi*, *L. muensteri*, and *Lagena paucicosta*. This assemblage is placed in the D2 zone of Goudkoff (1945) which is of earliest Maastrichtian age (Fig. 3). This correlates with the zone assigned to the uppermost Rosario Formation by Patterson (1978). Her lower El Viento member yielded a *Praebulimina spinata* zonule and was placed in the Goudkoff D2 zone which suggests that the top of the Rosario Formation near El Rosario overlaps with the base of the Rosario Formation at Mesa de La Sepultura. Sample F1 also revealed a low diversity coccolithophore assemblage: *Micula decussata*, *Prediscosphaera?* sp., and *Watznaueria barnesae*, which are consistent with the Campanian-Maastrichtian age date. The paleoenvironment is restricted by the occurrence of *Praebulimina spinata*, *Gyroidinoides goudkoffi* and *G.* cf. *bandyi* foraminifera and is interpreted to be upper to middle bathyal (c. 500 m) water depth. Sample F2 at 4.5 m below the Sepultura-Rosario contact contains a sparse *Praebulimina spinata* assemblage that suggests the same D2 zone.

chos fósiles. La muestra F1 se recogió 35 m debajo del contacto Rosario-Sepultura. Contuvo *Globotruncana elevata*, *G. arca*, *Rugoglobigerina rugosa*, *Fronicularia* cf. *inversa*, *Nodasaria septemcostata*, *N. spinifera*, *Praebulimina spinata*, *Pyramidina rudita*, *Anomalina rubiginosa*, *Gyroidinoides goudkoffi*, *G.* cf. *bandyi*, *Bolivina incrassata*, *Eponides ingramensis*, *Dentalina basiplanata*, *D. vistulae*, *Lenticulina spachholtzi*, *L. muensteri* y *Lagena paucicosta*. Este conjunto está situado en la zona D2 de Goudkoff (1945), que es del Maastrichtiano temprano (Fig. 3). Esto corresponde a la zona asignada por Patterson (1978) a la Formación Rosario superior. Su miembro inferior, El Viento, aportó una pequeña zona de *Praebulimina spinata* y fue asignada a la zona D2 de Goudkoff, lo que hace suponer que la cima de la Formación Rosario cercana a El Rosario se superpone a la base de la Formación Rosario en Mesa de la Sepultura. La muestra F1 revela además un grupo poco diverso de coccolitóforos: *Micula decussata*, *Prediscosphaera?* sp. y *Watznaueria barnesae*, que coinciden con la edad del Campaniano-Maastrichtiano. El paleoambiente está

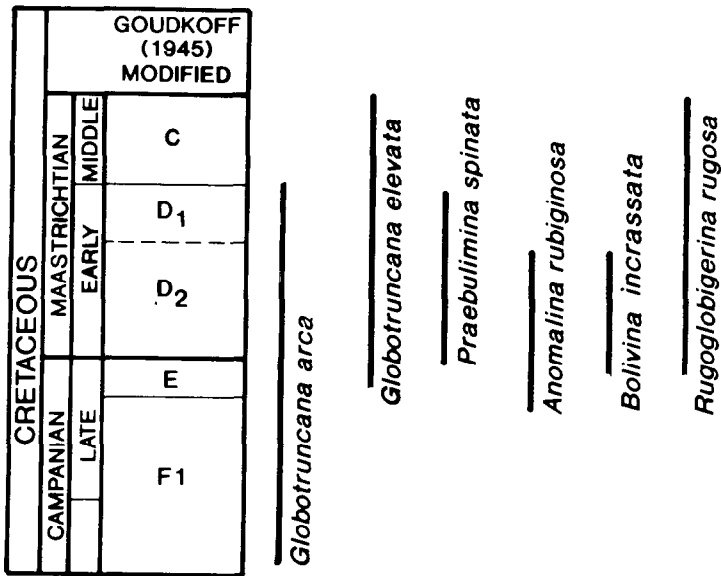


Figure 3. Ranges of some Rosario Formation foraminifera from sample F1.

Figura 3. Extensión temporal de algunos foraminíferos de la muestra F1 de la Formación Rosario.

LITHOLOGY OF SEPULTURA FORMATION: LOWER GLAUCONITIC-CLASTIC MEMBER

The basal bed of the Sepultura Formation is a jumbled, pebble- to boulder-size, crystalline-clast conglomerate that is 0.5 m thick and overlies the paleosol in the north-eastern area of the mesa. This conglomeratic interval thickens to form a set of nested channels totaling 5 m thickness on the eastern side of the mesa where the paleosol has apparently been removed. The axes of the channels trend N 35°W, i.e., the direction of paleocurrent flow. Clast counts made in the basal Sepultura Formation at two sites (NE mesa, E mesa) show a dominance of volcanic clasts, subsidiary plutonic clasts, and lesser metamorphic and sedimentary clasts (table 3). The plutonic clasts within this conglomerate are highly weathered whereas the volcanic clasts are relatively unweathered. The clast assemblage is quite similar to that in the Sepultura Formation at San Telmo which lies about 110 km to the north (Miller and Abbott, 1988) (Fig. 1). Clast assemblages at both localities reflect the bedrock lithologies present in the Peninsular Ranges to the east.

restringido por la presencia de foraminíferos *Praebulimina spinata*, *Gyroidinoides goudkoffi* y *G. cf. bandyi*, y se interpreta como de profundidad batial (c. 500 m) superior a media. La muestra F2, de 4.5 m debajo del contacto Sepultura-Rosario, contiene un grupo escaso de *Praebulimina spinata*, lo que sugiere la misma zona D2.

LITOLOGIA DE LA FORMACION SEPULTURA: MIEMBRO INFERIOR CLASTICO-GLAUCONITICO

El lecho basal de la Formación Sepultura es un conglomerado clástico cristalino de tamaño de guijarros a cantos, no gradado, que tiene 0.5 m de espesor y se superpone al paleosuelo en la parte noreste de la meseta. Este intervalo conglomerático se ensancha hasta formar un conjunto de canales encajados, que abarca 5 m de grosor, sobre el lado oriental de la meseta, donde el paleosuelo ha sido, al parecer, removido. La orientación de los ejes de los canales es N 35°O, es decir, la dirección del flujo de la paleocorriente. Las cuentas de clastos efectuadas en dos sitios de la Formación Sepultura basal (al noreste y este de la meseta) muestran preponderancia de clastos volcánicos, clastos plutónicos sub-

Table 3. Conglomerate clast counts.

Tabla 3. Cuentas de clasto conglomerado.

	NE mesa n = 109	E mesa n = 107	San Telmo
Phenocrystic volcanic	30	40	37
Aphanitic volcanic	27	25	27
Plutonic	22	22	22
Metamorphic	16	5	8
Sedimentary	2	5	3
Other	3	3	3
Total percentage	100	100	100

On the northeastern and northwestern sides of the mesa, the bed above the basal conglomerate is a fossiliferous sandstone rich in invertebrate fossils including abundant turrnellids, oysters, clams, worm tubes, and echinoid debris. The orientation of elongate turrnellid shells exposed on soles of beds on the northwest side again indicate a N 35°W paleocurrent direction. These turrnellid shells almost at the base of the Sepultura Formation have been identified by Lou Ella Saul of the Los Angeles County Museum (personal communication, 1992) as *Turrnellia peninsularis* Anderson and Hanna (1935) of late-early or early-late Paleocene age. It appears that the base of the Sepultura Formation at Mesa de La Sepultura is no older than late early Paleocene and that the uppermost Rosario Formation is likely to be no younger than mid-Maastrichtian age. Thus the Cretaceous/Tertiary boundary section is missing due to nondeposition, weathering and erosion.

The lower member is resistant and stands as steep slopes due to abundant calcite cement. On the outcrop and in hand specimen, the interval commonly looks like calcite-cemented, fossiliferous volcanic litharenite. However, deep acid etching of hand samples and thin-section analyses show that the dark sand grains are actually peloids of glauconite. The common components of the lower member are terrigenous sand (S), calcium carbonate cement and fossils (C), and glauconite (G). Beds range from S₈₉C₁₀G₁ to S₂C₉₇G₁ to S₄₃C₃₂G₂₅.

The normalized QFL terrigenous sand fractions range from Q₆₃F₃₃L₄ to Q₃₉F₄₃L₁₈

and clasts sedimentarios y metamórficos menores (tabla 3). Dentro de este conglomerado, los clastos plutónicos son altamente intemperizados, mientras que los clastos volcánicos están relativamente sin erosionar. El ensamble de clastos es muy similar al de la Formación Sepultura en San Telmo, aproximadamente 110 km al norte (Miller y Abbott, 1988; Fig. 1). Los ensamblajes de clastos de ambas localidades reflejan las litologías de los basamentos presentes al este en el Batolito Peninsular. En los costados noreste y noroeste de la mesa, la capa sobre el conglomerado basal es arenisca fosilífera, rica en fósiles invertebrados, con abundantes turrnellidos, ostiones, almejas, tubos de gusanos y restos de equinoideos. La orientación de las conchas alargadas de turrnellidos expuestas en las bases de las capas del lado noroeste también indican dirección N 35°O de la paleocorriente. Estas conchas de turrnellidos, casi en la base de la Formación Sepultura, fueron identificadas por Lou Ella Saul del *Los Angeles County Museum* (comunicación personal, 1992) como *Turrnellia peninsularis* Anderson y Hanna (1935) del Paleoceno temprano tardío o tardío temprano. Al parecer, la base de la Formación Sepultura en Mesa de la Sepultura no es anterior al Paleoceno temprano tardío y la Formación Rosario Superior no es, probablemente, posterior a la edad media Maastrichtiana. En consecuencia, falta la sección límite Cretácico-Terciaria, debido a carencia de depósitos, intemperismo y erosión.

El miembro inferior es resistente y se levanta como escarpadas pendientes a causa del abundante cemento de calcita. En el

with all samples (S3 to S7) being either arkose or lithic arkose. The sand grain populations were similar in both the upper Rosario and lower Sepultura Formations (table 1). The upper member of the Sepultura is effectively free of terrigenous sands.

Glaucónite is a distinctive component and is unique to the lower member of the Sepultura Formation. It has a characteristic green color and occurs mostly as structureless peloids although some show internal cracking. Glaucónite commonly makes up 1 to 15% of the framework grains but is concentrated up to 38% in some beds of storm or tsunami origin. In general, glaucónite is made of green, iron-rich ($>15\% \text{Fe}_2\text{O}_3$) clay minerals. They are most abundant in deposits containing burrows and fossil debris that are associated with condensed zones and corrosion surfaces/hardgrounds. In the stratigraphic record their greatest abundance is associated with the transgressions and sea-level highstands of 1) early Cambrian to middle Ordovician and 2) mid-Cretaceous to Eocene time. Glaucónite is commonly found in depositional environments ranging from embayment to 200 m water depth but is most abundant on current-swept shelves of 10-50 m depth (Van Houten and Purucker, 1984).

The glaucónite at Mesa de La Sepultura fits the global generalizations. It is found in Paleocene strata deposited in a sea that transgressed over a paleosol and its greatest concentrations are in marine shelf tempestites. The glaucónite-bearing beds are burrowed, contain abundant fossil debris and some iron-stained horizons that may be corrosion surfaces.

A most distinctive bed occurs throughout Mesa de La Sepultura in the lower member of the Sepultura Formation. It is an easily visible, unique redbed that derives its color from oxidized glaucónite. It was deposited as a tabular mass of jumbled crystalline rock clasts, terrigenous sand, fossils, and glaucónite that were concentrated by hurricane or tsunami waves and swept seaward by a storm-return surge. The high energy moving sediment mass dug into the marine floor in several places and injected sediment into the underlying bed (negative flame structures). The injection features show a paleoslope/paleoflow direction of $N 35^\circ W$ consistent with the nested conglomeratic channels and aligned *Turritella* shells. The redbed ranges in thickness from 0.2 to 1.5 m and locally contains

afloramiento y en especímenes de mano, el intervalo generalmente tiene apariencia de litarenita volcánica fosilífera cementada con calcita. Sin embargo, el lavado con ácido de las muestras de mano y análisis de sección delgada muestran que los granos oscuros de arena son en realidad oolitas de glaucónite. Los componentes comunes del miembro inferior son arena terrígena (S), cemento de carbonato de calcio y fósiles (C), y glaucónite (G). Las capas van de $S_{89}C_{10}G_1$ a $S_{2}C_{97}G_1$ a $S_{43}C_{32}G_{25}$.

Las fracciones normalizadas de arena terrígena de QFL van de $Q_{63}F_{33}L_4$ a $Q_{39}F_{43}L_{18}$ y todas las muestras (S3 a S7) son arcosa o arcosa lítica. Las poblaciones de granos de arena fueron similares en las formaciones Rosario superior y Sepultura inferior (tabla 1). El miembro superior de la Sepultura está prácticamente libre de arenas terrígenas.

La glaucónite es un componente característico, que únicamente se encuentra en el miembro inferior de la Formación Sepultura. Tiene un peculiar color verde y se encuentra principalmente como oolitas sin fábrica, aunque a veces con agrietamiento interno. La glaucónite comúnmente constituye de 1 a 15% de los granos de la fábrica, pero se concentra hasta 38% en algunas capas originadas por tormenta o tsunami. En general, la glaucónite está compuesta de minerales arcillosos verdes, ricos en hierro ($>15\% \text{Fe}_2\text{O}_3$). Estos son más abundantes en depósitos que contienen restos de perforaciones y restos de fósiles, que se asocian con zonas condensadas y corrosión de superficies o suelos duros. En el registro estratigráfico, su mayor abundancia se asocia con las transgresiones y niveles de pleamar del: 1) Cámbrico temprano al Ordoviciano medio y 2) del Cretácico medio al Eoceno. La glaucónite se encuentra comúnmente en ambientes depositacionales que van desde ensenadas hasta aguas de 200 m de profundidad, pero es más abundante en plataformas de 10 a 50 m de profundidad barridas por corrientes (Van Houten y Purucker, 1984).

La glaucónite de Mesa de la Sepultura se ajusta a las generalizaciones globales. Se encuentra en estratos del Paleoceno depositados en un mar que trasgredió un paleosuelo y sus mayores concentraciones están en las tempestitas de la plataforma marina. Las capas portadoras de glaucónite están perforadas, contienen abundantes restos fósiles y algunos horizontes manchados de hierro que pueden ser superficies de corrosión.

varying concentrations of red algal-encrusted balls (rhodoliths), oysters-clams-snails, and crystalline rock pebbles-cobbles-boulders. Also entrained in the redbed were pieces of wood up to 1 m long, once occupied by calcareous worm colonies, and a 0.7 m long sandstone clast with bore holes now lying upside down in the deposit.

MICROPALAEONTOLOGY OF SEPULTURA FORMATION

The lowest productive microfossil sample (F3) in the Sepultura Formation was near the top of the lower member. The nannofossil species *Coccolithus pelagicus*, *Ericsonia subpertusa*, *Prinsius* sp., *Toweius eminens?* and *T. pertusus?* are parts of a late Paleocene assemblage that overlaps calcareous nannofossil zones CP5 to CP8 (Fig. 4). The first definitive foraminiferal fauna was recovered in the lower upper member (sample F4). It contained *Bulimina* aff. *whitei*, *Cibicides sandiegensis*, *Anomalinoidea aragonensis*, *A.* aff. *crassiseptus*, *A. garzaensis*, *Alabamina* sp., *Frondicularia* sp., *Astacolus* sp., *Textularia* sp., *Lenticulina* spp., *Vaginulina* sp., *Globulina* sp., "*Valvulinera*" cf. *childsi*, *Subbotina triangularis*, *S. t. cancellata*, *S. triloculinoides*, *S. linaperta*, *Globorotalia quadrilocula*, *G. pseudobulloides*, *G. compressa*, *Globigerina* cf. *spiralis*, *Morozovella crosswicksensis?*, *M. convexa?* and *M.* spp. The genus *Morozovella* did not appear until P3 time and its occurrence helps bracket the sample; this is early late Paleocene time (Fig. 5). The lack of large benthic foraminifera and the abundance of *Anomalinoidea garzaensis* and *Bulimina* aff. *whitei* (both are species which do not inhabit the shallow shelf) suggest a middle to outer shelf depositional environment and a water depth of about 100 m to possibly 200 m.

The uppermost productive sample (F5) was collected near the top of the tombstone on the west side of the mesa. It was barren of foraminifera but revealed a low diversity coccolithophore flora. A late Paleocene age was indicated by the overlapping ranges of *Fasciculithus tympaniformis* and *Placozygus signoides* (late Maastrichtian to Paleocene). Other taxa found were *Braarudosphaera bigelowii*, *Coccolithus* sp. aff. *C. pelagicus*, and *Coccolithus pelagicus*.

Una capa muy característica se encuentra a través de toda Mesa de la Sepultura, en el miembro inferior de la Formación Sepultura. Es una única capa roja, fácil de observar, cuyo color se deriva de la glauconita oxidada. Se depositó como una masa tabular de clastos rocosos cristalinos mezclados, arena terrígena, fósiles y glauconita que fueron concentrados, por olas de huracán o tsunami y barridos hacia el mar por una oleada de reflujos de tormenta. La masa de sedimento movida con gran energía cavó en diferentes lugares del suelo marino e inyectó sedimento en la capa subyacente (estructuras de flama negativa). Las características de la inyección muestran una paleopendiente o paleoflujo en dirección N 35°O, que concuerda con la de los canales encajados de conglomerático y la alineación de las conchas de *Turritella*.

El espesor de la capa roja varía de 0.2 a 1.5 m y contiene localmente concentraciones diferentes de bolas con algas rojas incrustadas (rodolitos), así como ostiones, almejas y caracoles, además de guijarros, guija y cantos de roca cristalina. Alineadas en la capa roja hay además piezas de madera de hasta 1 m de largo, ocupadas en otro tiempo por colonias de gusanos calcáreos, así como un clasto de arenisca de 0.7 m de largo con perforaciones que ahora yacen con la parte superior hacia abajo sobre el depósito.

MICROPALAEONTOLOGIA DE LA FORMACION SEPULTURA

La muestra microfossil menos productiva (F3) de la Formación Sepultura se tomó cerca de la cima del miembro inferior. Las especies nanofósiles *Coccolithus pelagicus*, *Ericsonia subpertusa*, *Prinsius* sp., *Toweius eminens?* y *T. pertusus?* son partes de un escaso conjunto del Paleoceno tardío que se superpone a las zonas de nanofósiles calcáreos CP5 a CP8 (Fig. 4). La primera fauna foraminifera definitiva fue recuperada en la parte inferior del miembro superior (F4). Esta contuvo *Bulimina* aff. *whitei*, *Cibicides sandiegensis*, *Anomalinoidea aragonensis*, *A.* aff. *crassiseptus*, *A. garzaensis*, *Alabamina* sp., *Frondicularia* sp., *Astacolus* sp., *Textularia* sp., *Lenticulina* spp., *Vaginulina* sp., *Globulina* sp., "*Valvulinera*" cf. *childsi*, *Subbotina triangularis*, *S. t. cancellata*, *S. triloculinoides*, *S. linaperta*, *Globoro-*

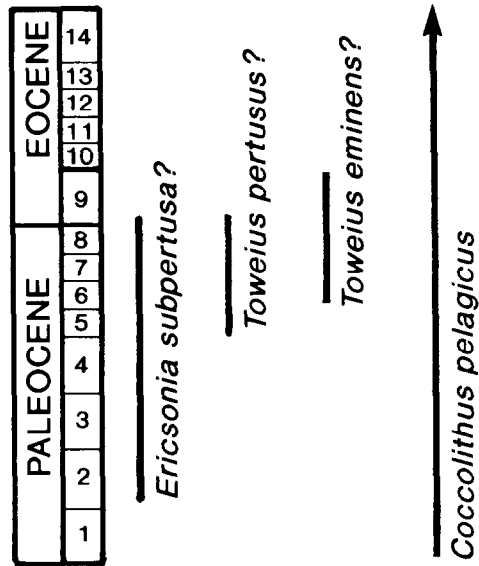


Figure 4. Ranges of some Sepultura Formation coccoliths from sample F4.
 Figura 4. Extensión temporal de algunos cocolitos de la muestra F4 de la Formación Sepultura.

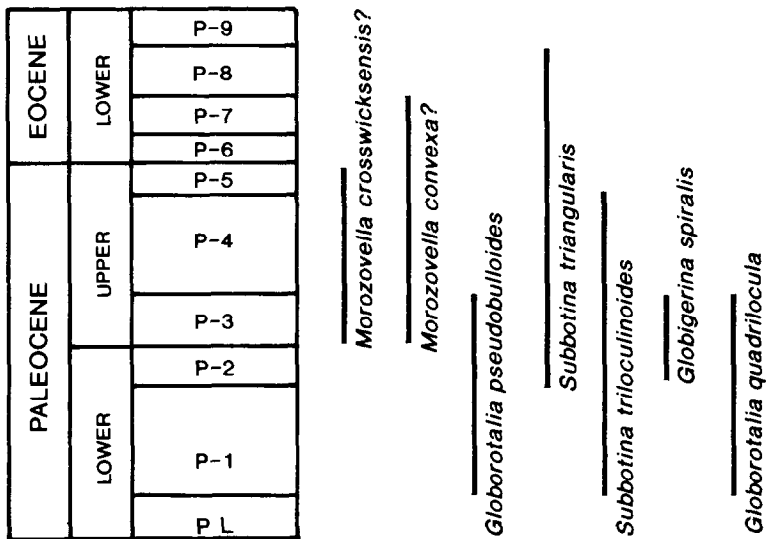


Figure 5. Ranges of some Sepultura Formation foraminifera from sample F4.
 Figura 5. Extensión temporal de algunos foraminíferos de la muestra F4.

LITHOLOGY OF SEPULTURA FORMATION: UPPER LIMESTONE MEMBER

Conformably overlying the lower member of the Sepultura Formation is an upper limestone member which caps the entire mesa. The limestone beds are resistant to weathering and stand tall along steep faces. In many places the nearly flat-lying beds form stair-step ledges.

Samples were collected from varying stratigraphic levels on the east, central, and west sides of the mesa. Petrographical analyses of 13 thin sections revealed that all samples are cemented with very fine- to medium-crystalline sparry calcite; no micrite was noted. Syntaxial rims have formed around some echinoid fragments to create a poikilotopic texture. Visible in thin-section is abundant fossil debris: ubiquitous coralline red algae, common foraminifera such as miliolids, rotalids, uniserial and biserial benthic forams, gastropods, oysters, clams, echinoid debris, calcareous worm tubes, bryozoa and some ostracods. The diversity of fauna decreases with increasing stratigraphic level and at the western tombstone summit of the mesa, only red algae and foraminifera are observed. The abundance of fauna does not show a corresponding decrease.

Architectural analysis (percentages of framework, matrix, cement, porosity = FMCP) reveals no porosity in any thin sections. Additionally, most samples have zero to minor (5%) matrix component. Where matrix material is seen, it is generally very fine-grained biotite and less commonly white mica.

The remaining components show a framework/cement ratio greater than one. Framework values range from 55 to 90% and cement values correspondingly range from 45 to 10%. Although no statistical trend exists, it appears that the amount of cement slightly increases upsection with a corresponding decrease in framework. In all samples the primary framework component is skeletal debris. The most commonly identified grains are red algae which range from 58 to 98% with an average of 70 to 90%. Other biological grains in decreasing order are foraminifera, echinoderm, bryozoa, oyster, and ostracod.

The red algae display morphological changes at differing stratigraphic levels. In the

talia quadrilocula, *G. pseudobulloides*, *G. compressa*, *Globigerina* cf. *spiralis*, *Morozovella crosswicksensis*?, *M. convexa*? y *M.* spp. El género *Morozovella* no apareció hasta el tiempo P3 y su ocurrencia ayudó a delimitar la muestra; ésta es del Paleoceno tardío temprano (Fig. 5). La falta de foraminíferos béticos grandes y la abundancia de *Anomalinoidea garzaensis* y *Bulimina* af. *whitei* (ambas son especies que no habitan la plataforma somera) sugieren un ambiente de plataforma de media a exterior y una profundidad en el agua de aproximadamente 100 m hasta posiblemente 200 m.

La muestra productiva de la parte más alta (F5) se recogió cerca de la cumbre de la lápida en el lado oeste de la meseta. Carecía de foraminíferos pero reveló una baja diversidad de flora coccolitófora. Se estableció que correspondía a la época tardía del Paleoceno, por la superposición de las extensiones temporales de *Fasciculithus tympaniformis* y *Placozygus signoides* (Mastrictiano tardío a Paleoceno) El resto de las especies encontradas, *Braarudosphaera bigelowii*, *Coccolithus* sp. af. *C. pelagicus* y *Coccolithus pelagicus* no fueron específicas para ninguna biocronozona.

LITOLOGIA DE LA FORMACION SEPULTURA: MIEMBRO SUPERIOR CALIZO

Sobreyaciendo de conformidad con el miembro inferior de la Formación Sepultura hay un miembro superior calizo que corona la meseta entera. Las capas calizas son resistentes al intemperismo y se yerguen altas a lo largo de los empinados costados. En muchos lugares estas capas que yacen casi planas forman salientes escalonados.

Se recogieron muestras de diferentes niveles estratigráficos sobre los lados oriental, central y occidental de la meseta. El análisis petrográfico de trece secciones delgadas reveló que todas las muestras estaban cementadas con calcita espática cristalina de muy fina a mediana; no se observó micrita. Alrededor de algunos fragmentos de equinoideos se han formado anillos sintaxiales que crean una textura poiquilotópica. En sección delgada son visibles abundantes restos fósiles: ubicuas algas rojas coralinas, foraminíferos comunes como los miliólidos, rotálidos, foraminíferos béticos uniseriales y biseriales, gastrópodos,

lower part of the limestone member the algae occur as subspherical rhodoliths. These are up to 20 cm in diameter and some outcrops are composed entirely of clast-supported rhodoliths. The most abundant rhodoliths are in the southeastern mesa. Going upsection the size of the rhodoliths decreases and the algae take on a branching morphology. This variation is present on both the macro- and microscopic scale. At the western summit of the mesa the layers of limestone that contain the branching red algal fragments are intercalated with thin (<10 mm) laminations of clay.

In thin section, the red algae display the characteristic feature of "closely packed layers or threads of cells, rectangular in section" (Ginsburg *et al.*, 1971), placing them in the Family Coralliñaceae. This family is divided into the subfamilies Melobesioideae (forming crusts, nodules, and rigid branched forms) or Corallinoideae (having erect, articulated or jointed shape). The red algae of Mesa de La Sepultura clearly belong in the Melobesioideae subfamily.

Using the classification scheme of Wray (1977), the genera *Lithothamnion* Heydrich (1897) and *Archeolithothamnion* Foslie (1898) were identified. These classifications are based upon the presence of sporangial sori and a multilayered hypothallium for *Archeolithothamnion*, and the presence of multipored conceptacles and a multilayer hypothallium for *Lithothamnion*. In some thin sections the two genera are actually encrusting upon each other.

DEPOSITIONAL HISTORY

From a broad perspective, the Rosario Formation at Mesa de La Sepultura records a shallowing-upward sequence in early and middle Maastrichtian time. Subaerial exposure created soils that were flooded by a deepening-upward succession recorded in the Sepultura Formation in late-early to late Paleocene time.

The lowermost Rosario Formation at Mesa de La Sepultura is mainly gray, organic-rich mudstone with rare tabular packages of plane-bedded sandstones apparently brought by energetic storm-return flows and deposited below storm-wave base. Foraminifera suggest water depths as deep as 500 m corresponding to an upper slope environment. All sedimen-

ostras, almejas, restos de equinoideos, tubos calcáreos de gusanos, briozoarios y algunos ostrácodos. La diversidad de la fauna disminuye según aumenta el nivel estratigráfico y, en la cima occidental de la lápida de la meseta, sólo se observaron algas rojas y foraminíferos. La abundancia de fauna no muestra una disminución correspondiente.

El análisis arquitectural (porcentajes de fábrica, matriz, cemento, porosidad = FMCP) no revela porosidad en ninguna de las secciones delgadas. Además, la mayoría de las muestras tienen de cero a menor (5%) componente de matriz. Donde se observa material de matriz, este es, en general, biotita de grano muy fino y, menos comúnmente, mica blanca.

El resto de los componentes muestra una proporción de cemento/fábrica mayor de uno. Los valores de fábrica van de 55 a 90% y los de cemento de 45 a 10%. Aunque no hay una tendencia estadística, parece que la cantidad de cemento aumenta ligeramente sección arriba, con la disminución correspondiente de fábrica. En todas las muestras, el componente primario de la fábrica lo constituyen restos de esqueletos. Los granos más comúnmente identificados son algas rojas que van de 58 a 98%, con un promedio de 70 a 90%. Otros granos biológicos en orden decreciente son foraminíferos, equinodermos, briozoos, ostiones y ostrácodos.

Las algas rojas exhiben cambios morfológicos en diferentes niveles estratigráficos. En la parte inferior del miembro calizo las algas se encuentran como rodolitos subsféricos. Estos son de hasta 20 cm de diámetro y algunos afloramientos se componen enteramente de rodolitos sustentados en clasto. Los rodolitos más abundantes están en la meseta sureste. Hacia arriba de la sección, la talla de éstos disminuye y las algas adoptan una morfología ramificada. Esta variación está presente tanto a escala microscópica como macroscópica. En la cumbre occidental de la meseta, las capas de caliza que contienen los fragmentos de algas rojas ramificadas están intercaladas con láminas delgadas (<10 mm) de arcilla.

En sección delgada, las algas rojas muestran el rasgo característico de "capas empacadas apretadamente o sartas de celdas, en sección rectangular" (Ginsburg *et al.*, 1971), que las ubica en la familia Coralinaceae. Esta familia se divide en las subfamilias Melobesioideae (que forma cortezas, nódulos y

rary features exposed show flat-lying, tabular beds and laminae without evidence of scour or gravity-pulled slippage; this suggests an outer shelf environment.

Moving upsection through the Rosario Formation, the grain sizes begin to increase until very fine sands dominate and more tabular packages of plane beds occur. Near the top of the Formation, planar-based, one-clast thick conglomerates appear suggesting proximity to the shoreline. This uppermost Rosario Formation is a shallowing-upward sequence consistent with sediment buildup but the 50 m of section probably represents about 400 m of shallowing thus suggesting that regression/uplift occurred.

The uppermost Rosario Formation was exposed to subaerial soil-forming processes. How much sedimentary record was lost to this weathering plus nondeposition/erosion is not known at this time. However, it is likely that several million years of time is not represented by rock and that the Cretaceous/Tertiary boundary is not preserved.

When sedimentation was preserved again in the Sepultura Formation during Paleocene time it began as high energy, conglomeratic deposits in shallow marine water. Sedimentation rates were low as suggested by the abundance of glauconite, the presence of corrosion surfaces, and the importance of storm deposits. Paleocene sedimentation records a deepening of marine water and progressive separation from the terrigenous sediment influx of plutonic-volcanic-metamorphic gravels and sands. The lower member displays other features indicative of a shallow marine environment including burrows, abundant marine invertebrate fossils, nested conglomerate-filled channels, oriented gastropods, abundant glauconite, and red algae.

Coralline red algae live in normal marine salinity environments and since they utilize sunlight they are restricted to the photic zone (Wray, 1977). Morphological changes noted in the red algae have been shown by Bosence (1991) to be the result of turbulence and water energy. The rhodolith variety is typical of higher energy conditions whereas the branching forms are found in quieter, presumably deeper water. Bosence also lists bathymetric ranges of 40 to 100 m for *Lithothamnion* and *Archeolithothamnium*. The up-section increase in branching red algae and decrease in rhodoliths support a model of

ramas rígidas) o Corallinoideae (que tiene forma erecta, articulada o de coyuntura). Las algas rojas de Mesa de la Sepultura pertenecen claramente a la subfamilia Melobesioideae.

Usando el esquema de clasificación de Wray (1977), se identificaron los géneros *Lithothamnion* Heydrich (1897) y *Archeolithothamnion* Foslie (1898). Estas clasificaciones se basan en la presencia de soros esporangiales e hipotalo de varias capas, para *Archeolithothamnion*, y de conceptáculos multiporosos y hipotalo de varias capas, para *Lithothamnion*. En algunas secciones delgadas, los dos géneros están en realidad incrustados uno sobre el otro.

HISTORIA DEPOSITACIONAL

Desde una perspectiva amplia, la Formación Rosario en Mesa de la Sepultura registra una secuencia que se hace más somera hacia arriba en la época temprana y media del Mastritciano. La exposición subaérea creó suelos que fueron inundados por una sucesión que se profundiza hacia arriba, grabada en la Formación Sepultura entre el Paleoceno tardío temprano y tardío.

La Formación Rosario inferior en Mesa de la Sepultura es principalmente lodolita gris, orgánicamente rica, con escasos paquetes tabulares de areniscas en lechos planos, aparentemente traídos por energías corrientes de reflujo y depositados bajo la base de la ola de tormenta. Los foraminíferos hacen suponer profundidades acuáticas tan hondas como 500 m, que corresponden a un ambiente de pendiente superior. Todos los rasgos sedimentarios expuestos muestran lechos tabulares planos y láminas sin evidencia de estrías o deslizamientos causados por gravedad, lo que hace suponer un ambiente de plataforma exterior.

Moviéndose hacia la sección de arriba a través de toda la Formación Rosario, los tamaños del grano comienzan a aumentar hasta que dominan arenas muy finas y se encuentran más paquetes tabulares de lechos planos. Cerca de la parte superior de la Formación aparecen gruesos conglomerados de un solo tamaño de grano, con base plana, que sugieren la proximidad de la costa. Esta Formación superior Rosario es una secuencia que se hace somera hacia arriba, consistente con la acumulación de sedimentos, pero los 50 m de sección probablemente representan

deepening water depths. Micropaleontology data from foraminifera suggest a middle to outer shelf environment for the upper limestone member.

Additionally, Adey and Macintyre (1973) list *Archeolithothamnium* as a warm water genus and *Lithothamnium* as a cool water genus. Both genera occur together at Mesa de La Sepultura suggesting that these rocks were deposited at some mid-latitude where the geographic distributions of these genera could overlap.

By early late Paleocene time, only carbonate sediments were accumulating (along with minor amounts of phyllosilicates) even though terrigenous coarse sands and gravels were being deposited apparently at the same time at San Telmo, 110 km to the north (Miller and Abbott, 1988) and at Mesa San Carlos, 25 km due south (Zinsmeister and Paredes-Mejía, 1988). The late Paleocene paleogeographic picture is of a micrite-free, current-washed marine shelf separated from the mountains to the east at the same time areas to the north and south were still being inundated with coarse terrigenous sediments. Presumably, some local structural trough diverted the terrigenous sediments and allowed the carbonate sediments to accumulate.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Jorge Ledesma-Vázquez and José Luis Fermán-Almada for first introducing us to the geology of Mesa de La Sepultura. Our interpretations of the geologic history at Mesa de La Sepultura have been invaluable aided by micropaleontologic analyses graciously provided by Dick Boettcher and Mike Mickey who examined the foraminifera, Stanley A. Kling provided the coccolith and siliceous microfossil data and Hideyo Haga inspected pollen and spores, all of Micropaleo Consultants, Inc. of San Diego and Encinitas. Coccolith analyses were also generously done by Dave Bukry of the U.S. Geological Survey in Menlo Park. A key identification of *Turritella peninsularis* in the lowermost Sepultura Formation was made by Lou Ella Saul of the Los Angeles County Museum. Thin sections were prepared for us in a timely fashion by Kevin Bryan. Field assistance was given by Aaron Yoshinobu and Michelle Mische. The manuscript was improved by the reviews of Miguel Téllez-Duarte and Jorge Ledesma-Vázquez.

cerca de 400 m de cambio hacia menor profundidad, así que debe de haber habido regresión o levantamiento

La Formación Rosario superior estuvo expuesta a procesos subaéreos de formación de suelo. No se sabe hasta la fecha cuánto registro sedimentario se ha perdido por esta combinación de intemperismo sumado a falta de depósito o erosión. Sin embargo, es probable que muchos millones de años no estén representados por roca y no se haya conservado la frontera entre Cretácico y Terciario.

Cuando se preservó nuevamente la sedimentación, en la Formación Sepultura durante el Paleoceno, empezó como depósitos conglomeráticos muy enérgicos en aguas marinas someras. Las tasas de sedimentación fueron bajas, como sugieren la abundancia de glauconita, la presencia de superficies con corrosión y la importancia de los depósitos de tormenta. La sedimentación del Paleoceno registra una profundización del agua marina y progresiva separación del flujo de sedimento terrígeno de las arenas y gravas metamórficas plutónicas volcánicas. El miembro inferior exhibe otros rasgos indicativos de un medio marino somero como son perforaciones, abundantes fósiles marinos invertebrados, canales encajados rellenos de conglomerado, turritélidos orientados, abundante glauconita y algas rojas.

Las algas rojas coralinas viven en medios de salinidad marina normal y, dado que utilizan luz solar, están restringidas a la zona fótica (Wray, 1977). Los cambios morfológicos notados en las algas rojas son resultado de turbulencia y energía del agua, según lo demostró Bosence (1991). La variedad rodolita es típica de condiciones de mayor energía mientras que las formas ramificadas se encuentran en aguas más tranquilas, muy probablemente más profundas. Bosence enumera también los alcances batimétricos, de 40 a 100 m, de *Lithothamnium* y *Archeolithothamnium*. El incremento de algas rojas ramificadas y la disminución de rodolitos, en la parte de arriba, corresponde a un modelo de aguas que se hacen más profundas. Los datos de micropaleontología sobre los foraminíferos sugieren un ambiente de plataforma de media a exterior para el miembro calizo superior.

Adicionalmente, Adey y Macintyre (1973) listaron *Archeolithothamnium* como un género de aguas calientes y *Lithothamnium*, como uno de aguas frías. Ambos géneros se encuentran juntos en Mesa de la Sepultura, lo

REFERENCES

- Adey, W.H. and Macintyre, I.G. (1973). Crustose coralline algae: a re-evaluation in the geological sciences. **Geological Society America Bulletin**, 84: 883-904.
- Beal, C. (1924). Informe sobre la exploración geológica de la Baja California, por la Marland Oil Company of México. **Boletín del Petróleo**, 17: 417-453 y 18: 14-53.
- Beal, C. (1948). Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California. **Geological Society America Memoir** 31, 138 pp.
- Bosence, D.W.J. (1991). Coralline-Algae: mineralization, taxonomy, and palaeoecology. In: R. Riding (ed.), **Calcareous Algae and Stromatolites**. Springer-Verlag, New York, pp. 98-113.
- Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., Erjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Lindberg, F.A. and Ryberg, P.T. (1983). Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. **Geological Society America Bulletin**, 94: 222-235.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P. and Allison, E.C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. **Geological Society America Memoir** 140, 170 pp.
- Ginsburg, R., Rezak, R. and Wray, J. (1971). **Geology of Calcareous Algae**. Comparative Sediment. Lab., Univ. Miami, 64 pp.
- Goudkoff, P.P. (1945). Stratigraphic relations of Upper Cretaceous in Great Valley, California. **American Assoc. Petroleum Geologists Bull.**, 29: 956-1007.
- Kilmer, F.H. (1963). Cretaceous and Cenozoic stratigraphy and paleontology, El Rosario area, Baja California, Mexico. Ph.D. dissertation, **Univ. California**, Berkeley, 216 pp.
- Ledesma-Vázquez, J. (1991). Upper Cretaceous-Paleocene storm deposits in Baja California, Mexico. M.S. thesis, **San Diego State Univ.**, 81 pp.
- Miller, V.V. and Abbott, P.L. (1988). Sedimentology of the Upper Paleocene/Lower Eocene Sepultura Formation near Colonet, Baja California. In: M.V.

que indica que estas rocas se depositaron en alguna latitud media, donde las distribuciones geográficas de dichos géneros pudieron trasladarse.

Por el Paleoceno temprano tardío, sólo se acumulaban sedimentos de carbonato (junto con cantidades menores de filosilicatos), aun cuando se hayan depositado, al mismo tiempo aparentemente, arenas gruesas y gravas terrígenas en San Telmo, 110 km al norte (Miller y Abbott, 1988) y en Mesa San Carlos, 25 km hacia el sur (Zinsmeister y Paredes-Mejía, 1988). La imagen paleográfica del Paleoceno tardío es la de una plataforma marina libre de micrita lavada por la corriente, separada de las montañas al este, mientras áreas del norte y sur seguían todavía inundadas con bastos sedimentos terrígenos. Probablemente, alguna depresión estructural desvió los sedimentos terrígenos y permitió que se acumularan los sedimentos de carbonato.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Jorge Ledesma-Vázquez y José Luis Fermán-Almada la introducción al conocimiento de la geología de Mesa de la Sepultura. Las interpretaciones de la historia geológica de Mesa de la Sepultura fueron invaluablemente apoyadas por análisis micropaleontológicos amablemente provistos por Dick Boettcher y Mike Mickey, quienes examinaron los foraminíferos; Stanley A. Kling proporcionó los datos sobre cocolitos y microfósiles silíceos, y Hideyo Haga examinó polen y esporas; todos de *Micropaleo Consultants, Inc.* de San Diego y Encinitas. Los análisis de cocolitos fueron también generosamente realizados por Dave Bukry del *U.S. Geological Survey* en Parque Menlo. Una identificación clave de *Turritella peninsularis* en la Formación Sepultura inferior fue realizada por Lou Ella Saul del *Los Angeles County Museum*. Kevin Bryan nos preparó secciones delgadas en forma oportuna. La asistencia en el campo fue proporcionada por Aaron Yoshinobu y Michelle Mische. El manuscrito fue mejorado con las revisiones de Miguel Téllez-Duarte y Jorge Ledesma-Vázquez.

Traducido al español por Olivia Gómez Mora.

- Filewicz and R.L. Squires (eds.), **Paleogene Stratigraphy, West Coast of North America**. Pacific Section, Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, 58: 23-34.
- Patterson, D. (1978). The foraminiferal biostratigraphy and paleoecology of the type Rosario Formation, El Rosario, Baja California del Norte, Mexico. M.A. thesis, **Univ. California**, Santa Barbara, 150 pp.
- Santillán, M. y Barrera, T. (1930). Las posibilidades petrolíferas en la costa occidental de la Baja California entre los paralelos 30° y 32° latitud norte. **Anales del Instituto Geológico de México**, 5: 1-37.
- Van der Plas, L. and Tobi, A.C. (1965). A chart for judging the reliability of point counting results. **American J. Science**, 263: 87-90.
- Van Houten, F.B. and Purucker, M.E. (1984). Glauconitic peloids and chamositic ooids - favorable factors, constraints, and problems. **Earth-Science Reviews**, 20: 211-243.
- Wray, J. (1977). **Calcareous Algae**. Elsevier Scientific Pub., 185 pp.
- Zinsmeister, W.J. and Paredes-Mejía, L.M. (1988). Paleocene biogeography of the west coast of North America: a look at the molluscan fauna from Sepultura Formation, Mesa San Carlos, Baja California Norte. In: M.V. Filewicz and R.L. Squires (eds.), **Paleogene Stratigraphy, West Coast of North America**. Pacific Section, Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, 58: 9-22.