

**BIOSTRATIGRAPHY AND DEPOSITIONAL HISTORY OF THE
TEPETATE FORMATION AT ARROYO COLORADO (EARLY-MIDDLE
EOCENE), BAJA CALIFORNIA SUR, MEXICO**

**BIOESTRATIGRAFÍA E HISTORIA DEPOSICIONAL DE LA
FORMACIÓN TEPETATE EN EL ARROYO COLORADO
(EOCENO MEDIO-TEMPRANO), BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO**

Ana Luisa Carreño¹
Jorge Ledesma-Vázquez²
Rosalía Guerrero-Arenas¹⁺

¹ Instituto de Geología
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
México, DF, 04510, México
E-mail: anacar@servidor.unam.mx

² Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, CP 22800, Baja California, México
E-mail: ledesma@bahia.ens.uabc.mx

Recibido en marzo de 1999; aceptado en septiembre de 1999

ABSTRACT

An integrated study of Foraminifera, Ostracoda and lithostratigraphy was conducted on samples of the Tepetate Formation from the Arroyo Colorado locality, Baja California Sur (Mexico). Based on the planktonic Foraminifera, *Acarinina pentacamerata* (latest lower Eocene) and *Hantkenina nuttalli* (earliest middle Eocene) zones were recognized that indicate an age range from 51.2 to 48.4 Ma. Benthic Foraminifera suggest correlation with the Penutian to Narizian California stages, which agrees with the planktonic foraminiferal biozones. The sedimentary structures and microfossils throughout the sequence indicate deposition within a transgressive-regressive-transgressive cycle, including environments from the inner to outer marine shelf in depths shallower than 150 m. Gravity flows dominate the sequence, and storm-deposited beds are present in the middle of the section. Considering the nature of this formational unit, we recommend the designation of a composite stratotype, according to the North American Stratigraphic Code.

Key words: Eocene, Baja California Sur, Mexico, Tepetate Formation, biostratigraphy.

⁺ Dirección actual: Facultad de Ciencias, Museo de Paleontología, Universidad Nacional Autónoma de México, Delegación de Coyoacán, México, DF, 04510.

RESUMEN

Se llevó a cabo un análisis integrado de foraminíferos, ostrácodos y litoestratigrafía de muestras de la Formación Tepetate provenientes de la localidad de Arroyo Colorado, Baja California Sur (México). Con base en foraminíferos planctónicos, se reconocen las zonas de *Acarinina pentacamerata* y *Hantkenina nuttalli* del Eoceno inferior tardío y del Eoceno medio temprano, respectivamente, indicando una edad de 51.2 a 48.4 Ma para la secuencia. Los foraminíferos bentónicos de la secuencia indican que ésta queda incluida en los pisos clásicos para California del Penutiano al Nariziano, coincidiendo con la edad proporcionada por los foraminíferos planctónicos. Las estructuras sedimentarias y los conjuntos de microfósiles a través de la secuencia indican depósito dentro de un ciclo transgresivo-regresivo-transgresivo, a profundidades no mayores que 150 m, en un mar desde somero hasta el límite exterior de la plataforma. Flujos gravitacionales caracterizan a la secuencia y en la parte media de la sección se encuentran evidencias de eventos de tormenta. Debido a la naturaleza de esta unidad formacional, se recomienda la designación de un estratotipo compuesto de acuerdo con el *North American Stratigraphic Code*.

Palabras clave: Eoceno, Baja California Sur, México, Formación Tepetate, bioestratigrafía.

INTRODUCTION

The Tepetate Formation was named by Heim (1922) for exposures near Rancho El Tepetate, in Arroyo Colorado, Baja California Sur (Mexico). This author described a gently folded formation of soft greenish sandstone, hard, well-stratified gray sandstone, and greenish to violet clay several thousand feet in thickness, dipping 4° to the northeast and with macroforaminifers. Heim (1922) did not designate a formal type locality for the Tepetate Formation. However, he did describe several localities: one, to the east of Santa Margarita Island; a second near Rancho El Tepetate, following Arroyo Colorado from a place 3 km southwest of Rancho El Tepetate towards the northeast, to the north end of Llano el Judillo; a third locality near the oasis San Hilario; and a fourth one, 4 km west of San Hilario. This author proposed that the Tepetate Formation is 1000 m thick and that it was probably deposited in a neritic environment, sometime during the late Eocene, based on the presence of *Orthophragmina pratti*.

Beal (1948) reported that the Tepetate Formation crops out in three general areas. The

INTRODUCCIÓN

La Formación Tepetate fue nombrada por Heim (1922) para designar los afloramientos cercanos al rancho El Tepetate en el Arroyo Colorado, Baja California Sur (México). Este autor describe a la formación como una unidad ligeramente plegada, constituida por arenisca suave verdosa, arenisca dura, gris, bien estratificada y por lutita verde a violeta de varios cientos de pies de espesor y con una inclinación de 4° al noreste con macroforaminíferos abundantes. Heim (1922) no designa formalmente una localidad tipo para la Formación Tepetate, pero describe varias localidades: la primera, localizada al este de la Isla Santa Margarita; la segunda cerca del rancho El Tepetate, siguiendo el lecho del Arroyo Colorado, desde un punto situado a 3 km al sudoeste del rancho hacia el noreste, hasta el norte del Llano el Judillo; la tercera localidad situada cerca del oasis de San Hilario; y la cuarta, ubicada a 4 km al oeste de San Hilario. Heim (1922) sugiere que la Formación Tepetate tiene un espesor de 1000 m y que se depositó en un ambiente nerítico durante el Eoceno por la presencia de *Orthophragmina pratti*.

first spreads from Punta San Isidro southeastward for about 250 km near the Pacific Ocean, to a point not far from the southeast of Punta Canoas, and the second is near the Desierto de Santa Clara. In both areas the sequence was later recognized by Lozano-Romen (1975) as a part of different units, either the Sepultura or the Bateque formations. The third area crops out to the east and southeast of Bahía Magdalena, where Beal (1948) described several sections. The sections at Arroyo Salada, near Rancho El Sauce, and at Arroyo Colorado, near Rancho El Tepetate, are described in detail. The last sequence is described as 25-feet-thick gray sandstone beds containing *Pseudophragminae*, imprints of seaweed, and tracks of animals, worms and birds overlain by hard, slabby, thin strata consisting of brown, fine-grained sandstone. These brown strata are in turn overlain by a series of massive cross-bedded sandstone, which are brown or tan, medium-grained, and in a few places contain abundant fossils. The uppermost strata are fine-grained, somewhat nodular sandstone. Based on the presence of *Pseudophragmina cloptoni*, Beal (1948) assigned a middle Eocene age to those sandstone units, and inferred a deposit in a shallow marine environment. This author established its upper limit as unconformably underlying the Salada Formation in Arroyo Salada and Santa Margarita Island, whereas at Arroyo Colorado and in San Hilario it is unconformably underlying rocks of the Comondú Formation and of a unit that this author named the San Gregorio Formation (= El Cien Formation of Applegate, 1986), respectively.

Mina-Uhink (1957) is the first author to consider the Arroyo Colorado section as the type locality for the Tepetate Formation. Unfortunately, this author never described this section or its upper and lower boundaries. On the basis of the Foraminifera present in nearby localities, this author considered that this unit was deposited during the early Eocene in a coastal to neritic environment.

Beal (1948) describe la Formación Tepetate en tres áreas. La primera comprende cerca de 250 km a través y muy cercana a la costa del Océano Pacífico, desde Punta San Isidro y, en dirección sudeste, hasta el sudoeste de Punta Canoas, y la segunda se localiza adyacente al desierto de Santa Clara. En ambas áreas la secuencia ha sido reconocida por Lozano-Romen (1975) como perteneciente a las formaciones Sepultura y/o Bateque. En la tercera área, localizada al este y al sudeste de Bahía Magdalena, Beal (1948) describe varias secciones, algunas muy detalladamente como la de Arroyo Salada, cerca del rancho El Sauce, y la de Arroyo Colorado, cercana al rancho El Tepetate. Esta última secuencia fue descrita como de 25 pies de espesor y constituida por estratos de arenisca gris conteniendo *Pseudophragminae*, huellas de algas y pistas de gusanos y pájaros, sobreyacida por estratos delgados de arenisca dura, marrón de grano fino, la cual a su vez infrayace una arenisca masiva diastratificada marrón a crema, de grano medio y que en algunas partes contiene fósiles abundantes. Los estratos superiores corresponden a arenisca de grano fino y nodular. Beal (1948) asignó a esta serie de areniscas, por la presencia de *Pseudophragmina cloptoni*, una edad eocénica media infiriendo un ambiente de depósito marino somero. Estableció su límite superior como sobreyacido discordantemente en el Arroyo Salada y en la Isla Santa Margarita por rocas de la Formación Salada, y en el Arroyo Colorado como discordante bajo rocas de la Formación Comondú y en San Hilario discordante bajo una unidad sedimentaria que llamó Formación San Gregorio (= Formación El Cien de Applegate, 1986).

Mina-Uhink (1957) es el primer autor en considerar como localidad tipo a la secuencia de Arroyo Colorado; infortunadamente, nunca describió esta sección ni sus límites inferior y superior. Este autor, con base en foraminíferos identificados en localidades cercanas,

Several authors have described the lithostratigraphy of the Tepetate Formation (Knappe, 1974; Lozano-Romen, 1975; Fulwider, 1976; Minch and Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986; López-Ferreira *et al.*, 1991; Vázquez-García *et al.*, 1995; Vázquez-García, 1996), as well as its paleontology (Squires and Demetrion, 1991, 1994; Perrilliat, 1996). However, the lower and upper boundaries and its lateral relationships are poorly known, due to the fact that most of those papers do not include complete sections, detailed measurements, stratigraphical control, precise localities and/or because the main part of the information remains unpublished.

In any case, it seems that most of the authors consider Mina-Uhink's (1957) proposal as valid, and regard the cliffs that crop out near Rancho El Tepetate as the type locality for the Tepetate Formation.

According to the North American Stratigraphic Code (American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 1983), a definition of a lithostratigraphic unit should be based, if possible, on a stratotype which is the type section consisting of readily accessible rocks in place (Art. 22b). For this reason, we carried out a lithostratigraphic and biostratigraphic study at the Arroyo Colorado locality, in order to evaluate its possible formal designation as the type locality for the Tepetate Formation. The age and depositional history are also analyzed, based on the microfossils and ichnofossils recorded in the sequence.

STUDY AREA

The Arroyo Colorado locality is situated 80km south of Ciudad Constitución, La Paz County, Baja California Sur, west of the Transpeninsular Highway [MEX 1] in front of the town of Las Pocitas (fig. 1). The section studied is 55 m thick and dips 6° to the northeast (Loc. IGM-2984; 24°23'17.7" N,

consideró que la Formación Tepetate se depositó en un ambiente costero a nerítico durante el Eoceno inferior.

Varios autores han descrito a la Formación Tepetate litoestratigráficamente (Knappe, 1974; Lozano-Romen, 1975; Fulwider, 1976; Minch y Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986; López-Ferreira *et al.*, 1991; Vázquez-García *et al.*, 1995; Vázquez-García, 1996), así como paleontológicamente (Squires y Demetrion, 1991, 1994; Perrilliat, 1996). Sin embargo, debido a que la mayoría de estos trabajos no incluyen secciones estratigráficas completas, espesores detallados, control estratigráfico estricto, ubicación precisa de las localidades y/o porque algunos trabajos permanecen inéditos, los límites inferior y superior y sus relaciones laterales son poco conocidos.

En cualquier caso, la mayor parte de los autores coinciden en considerar como válida la ascunción de Mina-Uhink (1957) con respecto a conceptuar a los cantiles que afloran en las inmediaciones del rancho El Tepetate como localidad tipo de la Formación Tepetate.

De acuerdo con el *North American Stratigraphic Code* (American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 1983), la definición litoestratigráfica de una unidad debe estar basada, hasta donde sea posible, en un estratotipo formado por rocas *in situ* que permitan el fácil acceso al lugar donde se encuentra (Art.22b). Por esta razón, se llevó a cabo un estudio litoestratigráfico en la localidad de Arroyo Colorado con la intención de evaluar su posible designación formal como localidad tipo de la Formación Tepetate. Adicionalmente, se documentó la edad y ambiente de depósito de la misma, basada en los microfósiles e icnofacies presentes en la misma.

ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Arroyo Colorado está ubicada a 80 km al sur de Ciudad Constitución,

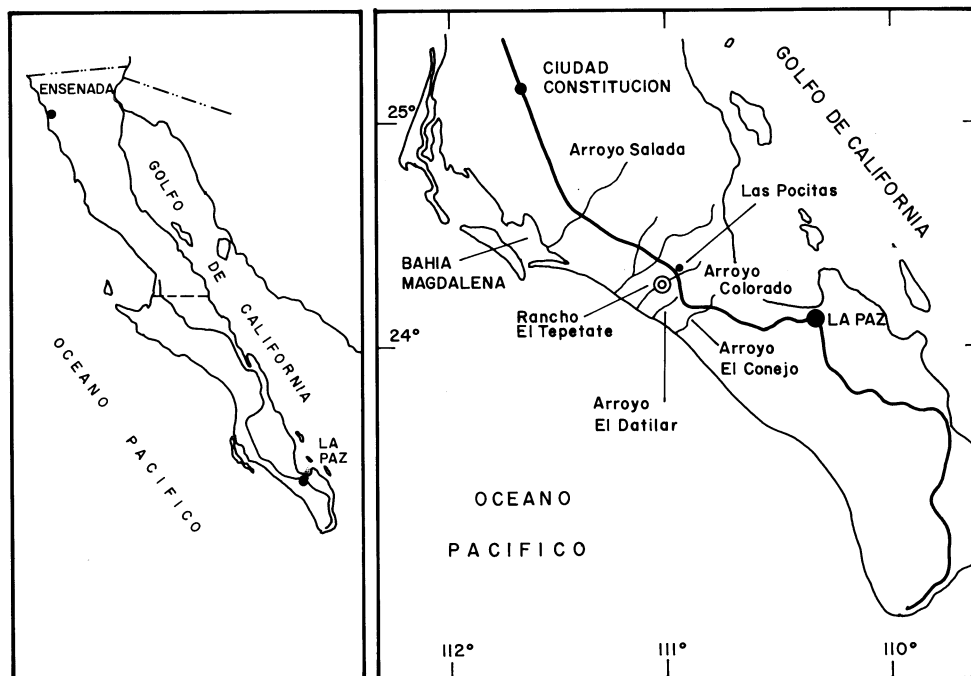


Figure 1. Location of the the Arroyo Colorado locality (loc. IGM-2984), Baja California Sur, Mexico.
Figura 1. Ubicación de la localidad de Arroyo Colorado (loc. IGM-2984), Baja California Sur, México.

111°07'53.2" W, Las Pocitas Quadrangle, Baja California Sur, Mexico, 1:50,000, G12C79, CGSINEGI, 1983). It is located in the bed of Arroyo Colorado, 1 km southwest of Rancho El Tepetate.

The sequence was divided into seven units differentiated by erosive contacts. The lower boundary is not exposed, and the sequence consists of a series of well-bedded, fine-grained gray to tan sandstone, interbedded with graded sandy layers, silty sandstone, reddish to gray cross-bedded sandstone and shally sandstone with abundant *Pseudophragmina* (*Pseudophragmina*) *advena*. Higher in the section, the sequence consists of hard, slabby, thin strata of brown shale, and gray to tan, hummocky cross-bedded sandstone, also with

Municipio de La Paz, Baja California Sur, al oeste de la carretera Transpeninsular [MEX 1], frente al poblado de Las Pocitas (fig. 1). La sección de 55 m de espesor con una dirección de las capas de 6° al nordeste (Loc. IGM-2984; 24°23'17.7" N, 111°07'53.2" W, Carta Topográfica Las Pocitas, Baja California Sur, México, 1:50,000, G12C79, CGSINEGI, 1983), está situada en el lecho del Arroyo Colorado a 1 km al sudoeste del rancho El Tepetate (fig. 1). La columna fue dividida en siete unidades, diferenciadas por contactos principalmente erosivos. El límite inferior no está expuesto; la secuencia consiste de una serie de arenisca de grano fino gris a crema, bien estratificada, con estratos de arena gradada interdigitada con arenisca limosa,

abundant *P. (P.) advena*. The uppermost part of the section consists of hard, slabby, thin strata of brown, fine-grained sandstone with abundant ichnofossils (fig. 2). The sequence is unconformably covered by transported fragments from the Comodú Formation or by alluvium. The criteria followed to collect the biostratigraphic samples consisted of obtaining a sample every 2 m, and/or when a lithological change was determinate, as well as any erosional surface. Twenty samples were collected for biostratigraphic analysis (fig. 2, table 1).

MICROPALEONTOLOGY

Fifty-four species of benthic and planktonic Foraminifera were encountered throughout the section (appendix). Because of the poor preservation (recrystallized, deformed or broken), some of them were left in open nomenclature, as were most of the Ostracoda recorded, of which only one species was identified with confidence. In spite of its abundance, most of the specimens recovered of *P. (P.) advena* are pyritized or recrystallized internally. This poor data, together with scarce planktonic Foraminifera index species, the relatively short time interval represented by the measured section and the common presence of reworked Cretaceous or Paleogene species make the age interpretation difficult. Nevertheless, some approximations can be made with confidence. The presence or absence of one or more species from one level to another is not considered to be related to their stratigraphic range. More likely, they reflect another set of conditions (paleoclimatic, tectonic) and, in view of the objective and extent of this study, will not be included here.

Biostratigraphy

The basal part of the lithological column does not contain any planktonic species

arenisca rojiza a gris diastratificada y lutita arenosa con *Pseudophragmina (Pseudophragmina) advena* abundantes. Sección arriba, la secuencia consiste de estratos delgados de lutita fina, dura, marrón y de estratos de arenisca diastratificada irregular gris a crema con *P. (P.) advena* abundantes; la parte superior de la sección consiste de estratos delgados de arenisca dura, marrón, de grano fino con icnofósiles abundantes (fig. 2). La secuencia está discordantemente cubierta por fragmentos transportados de la Formación Comodú o por aluvión. El criterio que se siguió para la recolección de muestras para el estudio bioestratigráfico fue la toma cada 2 m y/o cuando ocurre un cambio: litológico, de textura, gradación o cuando existe una superficie de erosión. El número total de muestras fue de 20 (fig. 2, tabla 1).

MICROPALEONTOLOGÍA

Cincuenta y cuatro especies de foraminíferos bentónicos y planctónicos fueron identificadas a través de la secuencia estudiada (apéndice). Debido a la preservación pobre (recristalizados, deformados o rotos), algunas especies fueron dejadas en nomenclatura abierta, al igual que las especies de ostrácodos de las cuales sólo fue posible identificar con certitud una sola. A pesar de su abundancia, la mayoría de los especímenes de *P. (P.) advena* están piritizados o recristalizados internamente. Lo anterior, aunado a la escasez de foraminíferos planctónicos índices, al intervalo relativamente corto que abarca la sección medida y a la presencia constante de especies re TRABAJADAS del Cretácico o del Paleógeno, dificultaron la interpretación bioestratigráfica. La presencia o ausencia de una o más especies de foraminíferos de un nivel a otro no se considera relacionado con su alcance estratigráfico, sino que muy probablemente constituya el reflejo de otro tipo de factores

Figure 2. Stratigraphic section studied at the Arroyo Colorado locality (IGM-2984), Baja California Sur.
Figura 2. Sección estratigráfica estudiada en la localidad de Arroyo Colorado (IGM-2984), Baja California Sur.

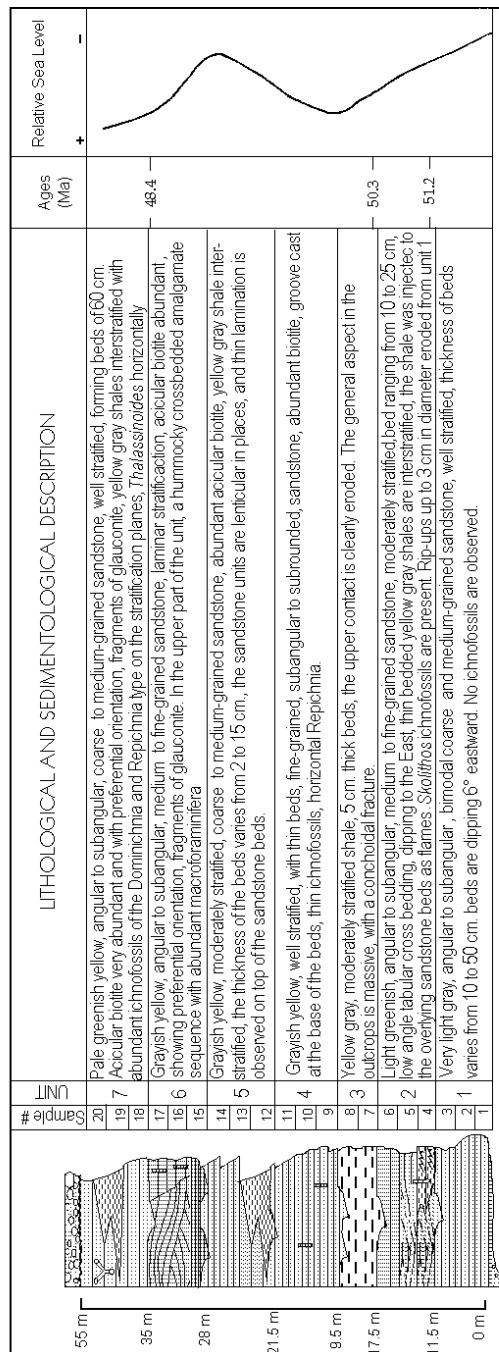


Table 1. Distribution of Foraminifera (planktonic and benthonic) in the section studied.
Tabla 1. Distribución de los foraminíferos (bentónicos y planctónicos) en la sección estudiada.

CENOZOIC										ERA										
PALEOGENE										PERIOD										
EOCENE										EPOCH										
early			middle																	
51.2			50.3							48.4										
Zone P9 <i>pentacamerata</i>			Zone P10 <i>Acarinina</i> <i>nubifili</i>			Zone P10 <i>Hankamerina</i> <i>nubifili</i>				Planktonic Foraminiferal Zones (Toumarkine & Luterbacher, 1985)										
PENJUAN			ULATSIAN							MARZIAN										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Sample #
																				Miliólidos
																				<i>Cibicides</i> sp.1
																				<i>Cibicides</i> sp.2
																				<i>Cibicides pseudoungerianus</i>
																				<i>Eponides lodoensis</i>
																				<i>Cibicides kernensis</i>
																				<i>Lenticulina pseudocultratus</i>
																				<i>Pyramidulina laterjugata</i>
																				<i>Trochammina advena californica</i>
																				<i>Uvigerina elongata</i>
																				<i>Bulimina whitei</i>
																				<i>Acarinina bulbroski</i>
																				<i>Morozovella aragonensis</i>
																				<i>Acarinina broedemanni</i>
																				<i>Morozovella caucasica</i>
																				<i>Globigeninatheca s. subconglobata</i>
																				<i>Lenticulina trinitatis</i>
																				<i>Globigerina inaequiespira</i>
																				<i>Dorothy cubana</i>
																				<i>Acarinina pentacamerata</i>
																				<i>Vaginulopsis verruculosa</i>
																				<i>Nodosaria</i> sp.
																				<i>Pseudonodosaria</i>
																				<i>Valvulamina aequilateralis</i>
																				<i>Morozovella formosa formosa</i>
																				<i>Pseudoclavulina aff. P. mexicana</i>
																				<i>Anomalinoidea aragonensis</i>
																				<i>Dorothy bulleta</i>
																				<i>Bulimina curtissima</i>
																				<i>Nodosarella cocoaensis</i>
																				<i>Dentalina jacksonensis</i>
																				<i>Vaginulopsis mexicana nudicostata</i>
																				<i>Pullenia quinqueloba</i>
																				<i>Valvulamina depressus</i>
																				<i>Dorothy</i> sp.
																				<i>Cibicides pseudowellestori</i>
																				<i>Subbotina frontosa boweri</i>
																				<i>Globigerina lozanoi</i>
																				<i>Truncarotaloides topilensis</i>
																				<i>Cibicides</i> sp.
																				<i>Eponides plummerae</i>
																				<i>Gyrogonia girardanus</i>
																				<i>Laevidentalina legumen</i>
																				<i>Nodosaria</i> sp.
																				<i>Cibicides spiropunctata</i>
																				<i>Textularia</i> sp.

(table 1) and, therefore, no age is assigned with confidence to this part of the sequence. The presence in samples 4 to 7 (table 1) of the planktonic Foraminifera *Acarinina broedermanii*, *A. bullbrooki*, *A. pentacamerata*, *Globigerina inaequispira*, *G. lozanoi*, *Morozovella aragonensis aragonensis*, *M. caucasica* and *Subbotina frontosa boweri* indicates an age ranging from late early Eocene to early middle Eocene. Since no stratigraphical discontinuities are observable between samples 3 and 4, we suggest the same, or slightly older, age assignment for samples 1 to 3 in the basal part of the sequence (table 1).

The co-occurrence of the above species with *Truncorotaloides topilensis*, which according to Toumarkine and Luterbacher (1985) has its first appearance datum (FAD) in the middle part of Zone P₉ (*Acarinina pentacamerata* Zone), reinforces the late early Eocene age assignment for this part of the column. Higher in the section, in samples 8 to 17 the occurrence of *Globigerinatheka subconglobata subconglobata*, which has its FAD in Zone P₁₀ (*Hantkenina nuttalli* Zone), indicates an early middle Eocene age. Unfortunately, samples 18 to 20 have no planktonic Foraminifera; however, due to the continuity of the deposit it is highly probable that this part of the sequence might be slightly younger.

Benthonic Foraminifera occur throughout the section studied and, even when many of them are time transgressive, as a whole, according to the Mallory (1959) biozonation for the Californian Stages modified by Almgren *et al.* (1988), they represent a characteristic assemblage of the Penutian to Narizian stages, which indicates an age of 51.2 to 48.4 Ma, and reinforces the age assignment made on the basis of planktonic Foraminifera.

The presence in samples 10, 13, 14 and 16 of the macroforaminifera *P. (P.) advena*, characteristic of the middle and late Eocene

(paleoclimáticos, tectónicos), que dado el objetivo central del estudio presente y su alcance, no pueden ser definidos con precisión. Sin embargo, algunas aproximaciones pueden realizarse con certitud.

Biostratigrafía

La parte basal de la columna litológica (muestras 1 a 3) no contiene ninguna especie planctónica de foraminíferos (tabla 1); por lo tanto, ninguna asignación de edad confiable es posible para esta parte de la secuencia. La presencia en las muestras 4 a 7 de *Acarinina broedermanii*, *A. bullbrooki*, *A. pentacamerata*, *Globigerina inaequispira*, *G. lozanoi*, *Morozovella aragonensis*, *M. caucasica* y *Subbotina frontosa boweri* sugiere una edad del Eoceno temprano tardío al Eoceno medio temprano. Debido a que no se observa ninguna discontinuidad estratigráfica entre las muestras 3 y 4 (fig. 2, tabla 1), se sugiere que la edad para la parte basal de la sección debe ser aproximadamente la misma o ligeramente más antigua que para esta parte de la sección.

La presencia de las especies antes mencionadas junto con *Truncorotaloides topilensis*, que de acuerdo con Toumarkine y Luterbacher (1985) tiene su primer registro estratigráfico en la porción media de la Zona P₉ (Zona de *Acarinina pentacamerata*), refuerza para esta parte de la columna la edad asignada de Eoceno temprano.

Sección arriba (muestras 8 a 17), la presencia de *Globigerinatheka subconglobata subconglobata*, cuyo primer registro estratigráfico se sitúa en la Zona P₁₀ (Zona de *Hantkenina nuttalli*), indica una edad del Eoceno medio temprano. Infortunadamente, los estratos 18 a 20 no contienen foraminíferos planctónicos; sin embargo, debido a la continuidad del depósito, es altamente probable que esta parte de la secuencia sea de la misma edad

(Butterlin, 1981), agrees with the age assignment made here on the basis of benthic and planktonic Foraminifera (table 1).

Paleoenvironments

Some authors (Heim, 1922; Beal, 1948; Lozano-Romen, 1975; Minch and Leslie, 1979; Squires and Demetron, 1991, 1994; Perrilliat, 1996) have suggested that the Tepetate Formation was deposited in an environment located close to the coast, while others (Knappe, 1974; Fulwider, 1976; Galli-Olivier *et al.*, 1986) inferred a delta fan deposit.

In spite of the erratic distribution of the microfossils found in the samples collected in the Arroyo Colorado section of the Tepetate Formation, some interpretations about the depositional environment of the sequence are possible, based on the lithology and distribution of the Foraminifera, Ostracoda and ichnofossils.

The Foraminifera and Ostracoda (plates I and II) throughout the section represent, in their majority, species from temperate and warm waters. According to the upper bathymetric limits of the species and genera of Foraminifera provided by Berggren and Aubert (1975), Ingle (1980) and Thomas (1991), the association represents a biofacies characteristic of the inner and outer shelf (0–150 m), representing a mixture of species from neritic and upper bathyal biofacies.

The Ostracoda, with the exception of *Jugosocythereis monrealensis*, a species recognized as related to shallow, warm and temperate seas (Carreño and Cronin, 1993), could not be identified to a specific level. However, most of the genera are robust, highly calcified, ornamented forms (*Pokornella*, *Trachyleberis* and *Ambocythere*), morphotype indicative of neritic biofacies. On the other hand, the upper bathymetric limits for these genera (Morkhoven, 1963) indicate biofacies

que los estratos subyacentes o ligeramente más reciente.

Los foraminíferos bentónicos están presentes a través de la sección estudiada y, a pesar del hecho de que la mayoría de ellos transgreden el tiempo, éstos representan en su conjunto una asociación característica de los pisos Penutiano a Nariziano establecidos para California por Mallory (1959) y modificados más tarde por Almgren *et al.* (1988); por lo tanto, esto indica una edad de 51.2 a 48.4 Ma, reforzando la edad propuesta con base en foraminíferos planctónicos.

La presencia en las muestras 10, 13, 14 y 16 del macroforaminífero *P. (P.) advena*, característico del Eoceno medio-tardío (Butterlin, 1981), también concuerda con la edad asignada por foraminíferos planctónicos y bentónicos (tabla 1).

Paleoambientes

Algunos autores (Heim, 1922; Beal, 1948; Lozano-Romen, 1975; Minch y Leslie, 1979; Squires y Demetron, 1991, 1994; Perrilliat, 1996) han sugerido que la Formación Tepetate se depositó en un ambiente cercano a la costa, mientras que otros (Knappe, 1974; Fulwider, 1976; Galli-Olivier *et al.*, 1986) infieren un depósito de abanico deltáico.

A pesar de la distribución errática de los microfósiles presentes en las muestras provenientes de la sección de Arroyo Colorado de la Formación Tepetate, es posible hacer algunas interpretaciones acerca del ambiente de depósito de la secuencia, basadas en su litología y en la distribución de los conjuntos de foraminíferos, ostrácodos e icnofósiles.

Los foraminíferos y ostrácodos (láminas I y II) a través de la sección representan en su mayoría especies de aguas templadas a cálidas. De acuerdo con los límites batimétricos superiores de las especies y géneros de foraminíferos proporcionados por Berggren y Aubert



Plate I/Lámina I

Plate I. Benthonic Foraminifera at the Arroyo Colorado section, Baja California Sur. LV = lateral view.
Lámina I. Foraminíferos bentónicos de la sección de Arroyo Colorado, Baja California Sur. LV = vista lateral.

1. *Dorothia bulleta* (Carsey), LV × 88; **2.** *Dorothia cubana* (Cushman and Bermúdez), LV × 43; **3.** *Clavulinoides trilaterus* (Cushman), LV × 13; **4.** *Pseudoclavulina* sp. aff. *P. mexicana* (Cushman), LV × 30; **5.** *Dentalina jacksonensis* (Cushman and Applin), LV × 34; **6.** *Pyramidulina latejugata* (Gümbel), LV × 46; **7.** *Trifarina advena californica* Mallory, LV × 200; **8.** *Bulimina guayabalensis* Cole, LV × 117. **9.** *Bulimina whitei* Martin, LV × 200; **10.** *Vaginulopsis verruculosa* Martin, LV × 80; **11.** *Vaginulopsis mexicana* (Cushman) *nudicostata* (Cushman and Hanna), LV × 38; **12.** *Pullenia quinqueloba* (Reuss), LV × 150; **13.** *Cibicidoides pseudoungerianus* (Cushman), LV × 74; **14.** *Lenticulina trinitatensis* (Cushman and Jarvis), LV × 81; **15.** *Lenticulina pseudovortex* (Cole), LV × 57; **16.** *Anomalinoidea aragonensis* (Nuttall), LV × 102.

Plate II. Biostratigraphic index of the planktonic Foraminifera and Ostracoda at the Arroyo Colorado section, Baja California Sur. SP = spiral view, RV = right valve and LV = left valve.

Lámina II. Índices bioestratigráficos de foraminíferos planctónicos y ostrácodos de la sección de Arroyo Colorado, Baja California Sur. SP = vista espiral, RV = valva derecha y LV = valva izquierda.

1. *Cibicides spiropunctatus* Galloway and Morrey, SV × 73; **2.** *Gyroidinoides girardanus* (Reuss), SV × 72; **3.** *Globigerina lozanoi* Colom, SV × 65; **4.** *Morozovella formosa formosa* Bolli, SV × 120; **5.** *Morozovella caucasica* (Glaessner), SV × 130; **6.** *Morozovella caucasica* (Glaessner), SV × 160; **7.** *Acarinina pentacamerata* (Subbotina), SV × 220; **8.** *Acarinina bulbrooki* (Bolli), SV × 200; **9.** *Acarinina* aff. *soldadoensis* (Brönnimann), SV × 150; **10.** *Jugosocythereis monrealensis* Carreño and Cronin, RV × 57; **11.** *Cytheropteron* sp., LV × 110; **12.** *Ambocythere* sp., RV × 82.

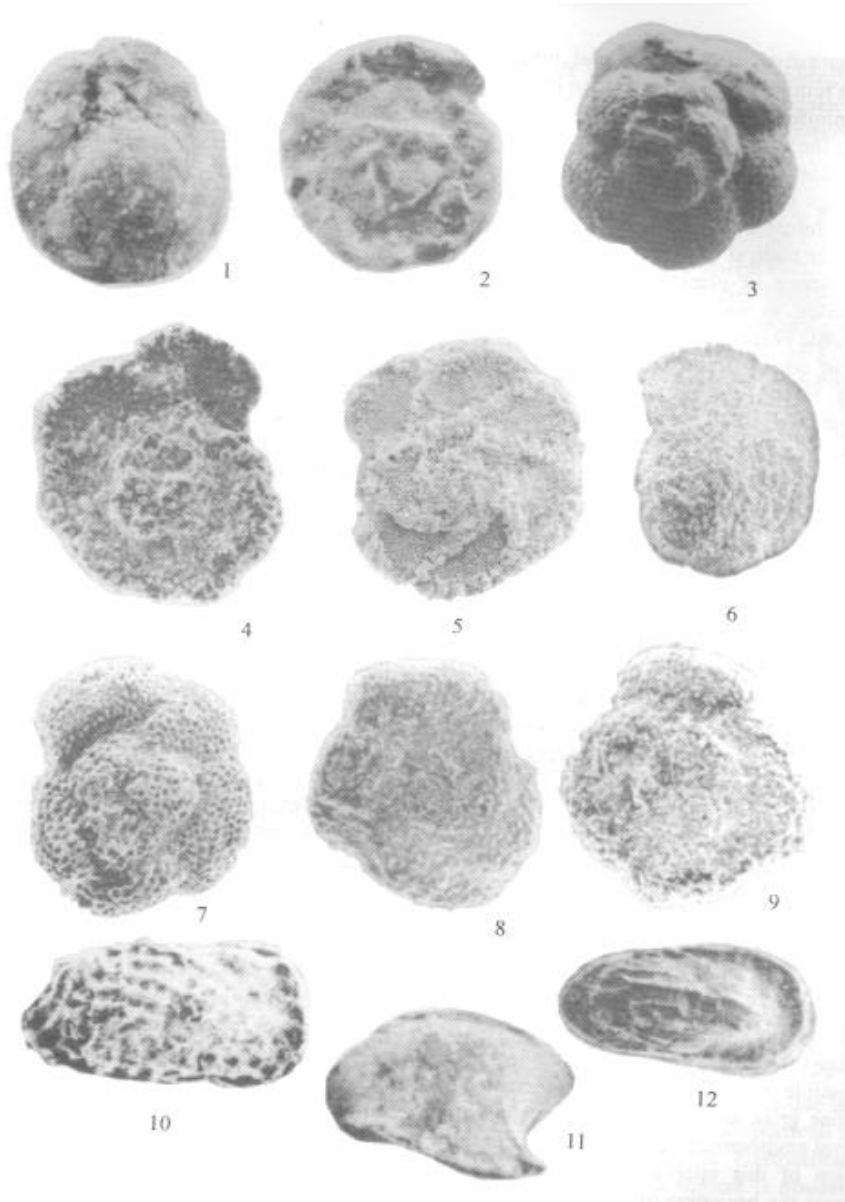


Plate II/Lámina II

representative of the outer and inner shelf, which reinforces the interpretation based on the Foraminifera.

At the base of the column (samples 1 to 3), only benthonic Foraminifera were recovered. Although most are indicative of a neritic biofacies, forms like *Eponides lodoensis* suggest an upper bathyal or deeper deposit. However, the absence of planktonic Foraminifera and Ostracoda, as well as the conservation of the benthonic Foraminifera, in addition to the presence of coarse- to medium-grained sandstone (fig. 2, table 1) suggest a shallow, high-energy environment, closer to the coast. Sample 4 is characterized by a high diversity of planktonic and benthonic Foraminifera and Ostracoda. Although their abundance is relatively low, the predominant association is constituted by organisms associated with a neritic biofacies, recording an increase of organisms associated with an upper bathyal environment, which suggests a slightly deeper deposit. This interpretation is reinforced by the presence of shale interfingering with medium- to fine-grained sandstone, suggesting a position farther from the coast, in a medium- to low-energy environment with a smooth bottom that allowed the installation of benthonic fauna with more ornamented morphotypes.

The interval corresponding to samples 5 through 17 shows a mixture of neritic and bathyal fauna, with the bathyal species slightly more dominant than the neritic ones in the first samples (5 to 8), while in the upper section (samples 9 to 17) this relationship reverses. Lithologically, the sandstone shows reverse grading towards the upper part of the sequence. A possible transgressive climax represented by the fine grain and benthonic microfauna of a bathyal environment is interpreted for the early portion of this interval (samples 7 and 8), whereas the beginning of a regressive event is represented by the neritic organisms and the gradation towards the coarse grain. This

(1975), Ingle (1980) y Thomas (1991), la asociación en su conjunto representa una biofacies característica de la plataforma interna y externa (0–150 m), representando una mezcla de especies características de biofacies neríticas y batiales superiores.

Con excepción de *Jugosocythereis monrealensis*, especie reconocida como de mares cálidos a templados y someros (Carreño y Cronin, 1993), no fue posible identificar los ostrácodos a nivel específico. Sin embargo, la mayoría de los géneros corresponden a formas robustas, fuertemente calcificadas y ornamentadas (*Pokornyella*, *Trachyleberis* y *Ambocythere*), morfotipo indicativo de biofacies nerítica. Por otro lado, los límites batimétricos superiores para estos géneros (Morkhoven, 1963) indican biofacies representativas de la plataforma externa e interna, lo cual refuerza la interpretación basada en foraminíferos.

En la base de la columna (muestras 1 a 3), sólo foraminíferos bentónicos fueron recuperados. Aunque la mayoría son indicativos de una biofacies nerítica, formas como *Eponides lodoensis* sugieren un depósito batial superior o más profundo. Sin embargo, la ausencia de foraminíferos planctónicos y de ostrácodos, así como la conservación de las especies de foraminíferos bentónicos y la presencia de arenisca de grano grueso a medio (fig. 2, tabla 1) sugieren un ambiente somero, de alta energía y cercano a la costa. La muestra 4 se caracteriza por una diversidad alta de foraminíferos planctónicos, bentónicos y ostrácodos. Aunque su abundancia es relativamente baja, la asociación predominante la constituye los organismos asociados con una biofacies nerítica, registrándose un aumento de organismos asociados con un ambiente batial superior, lo que sugiere un depósito ligeramente más profundo. Esta interpretación se ve reforzada por la presencia de lutita interdigitada en arenisca media a fina, sugiriendo una menor cercanía a la costa, en un

interpretation is reinforced by the abundance in sample 10 of *P. (P.) advena*, characteristic of shallow and even lagoonal environments, whose disposition within the stratum reflects minimal transport, if any, from the point of origin.

The interval that corresponds to strata 11 through 16 contains moderate to poorly conserved microfossils and with a relatively low abundance, particularly of planktonic Foraminifera and Ostracoda. This association (fig. 2, table 1) suggests a maximum depth of 150 m, although few Foraminifera indicative of slightly deeper depths are always present and are associated with eventual bottom currents generated by storms or gravitational flows. Sample 16 contains *P. (P.) advena* with a chaotic distribution that indicates high-energy events that transported these materials. The presence of hummocky cross-bedding strongly suggests the possibility that macroforaminifera were transported and redeposited by a storm event.

The top of the sequence studied (samples 18 to 20) exclusively contains benthonic Foraminifera from an inner-shelf environment, where miliolids are the dominant element, although in a poor state of conservation. The lithology associated with this part of the sequence and the presence of *Thalassinoides*, ichnogenus associated with a shallow environment, reinforces the paleoenvironmental interpretation.

According to the microfossil biofacies inferred, it is suggested that the Arroyo Colorado sequence includes outer-shelf to upper bathyal deposits. The presence of upper bathyal Foraminifera, as well as reworked forms and the lithological sequence, suggest a transgressive-regressive-transgressive deposit, with an average depth no greater than 150 m.

Sedimentologically, the sequence represents deposition in a shallow marine environment between the shoreface, with low-angle

ambiente de moderada a baja energía con fondos suaves que permitieron la instalación de una fauna bentónica con morfotipos más ornamentados.

Para el intervalo que comprenden las muestras 5 a 17, se observa una mezcla marcada entre fauna característica de biofacies neríticas y batiales, siendo en las primeras (5 a 8) ligeramente dominantes las especies batiales sobre las neríticas, mientras que sección arriba (muestras 9 a 17), esta relación se invierte. Litológicamente, las areniscas muestran una gradación secuencia arriba hacia los gruesos. Lo anterior es interpretado como un posible clímax transgresivo (muestras 7 y 8), representado por los finos y la microfauna bentónica de ambiente batial y el inicio de un evento regresivo, representado por los organismos neríticos y la gradación hacia los gruesos. Esta interpretación se refuerza por la presencia abundante en la muestra 10 de *P. (P.) advena*, característica de ambientes someros e incluso lagunares, cuya disposición dentro del estrato refleja transporte mínimo, si lo hubo, desde el lugar de origen.

El intervalo que corresponde a los estratos 11 a 16 contiene microfósiles con un estado de conservación de moderado a pobre y con una abundancia relativa baja, particularmente de foraminíferos planctónicos y ostrácodos. Esta asociación (fig. 2, tabla 1) sugiere profundidades máximas de 150 m, aunque escasos foraminíferos indicativos de aguas ligeramente más profundas están siempre presentes y se asocian con eventuales acciones de corrientes de fondo generadas por tormentas o flujos gravitacionales. La muestra 16 contiene *P. (P.) advena* con una distribución caótica que indica eventos de alta energía que transportaron estos materiales. La presencia de diastratificación irregular en este estrato sugiere la posibilidad de que el evento que transportó y redepositó a los macroforaminíferos pudiera estar relacionada con una tempestita.

cross-bedded sandstone, and the offshore, with minor amounts of interbedded shaley sandstone and sandstone beds. These interbedded units are interpreted as the result of gravity flows moving from an inner shelf to an outer shelf area, very similar to the Type I turbiditic deposits of Mutti (1985), that include large-scale submarine erosion and thick-bedded sandstone lobes, in non-channeled elongated bodies. At the middle of the column, hummocky cross-bedded sandstone is present. Hummocky cross-stratification and swaley cross-stratification have been recognized as being formed under storm-dominated processes, below the normal wave base and above the storm wave base (Myrow and Southard, 1996). The spacing (λ) of the hummocky cross-stratification measured in the field has an amplitude of 1.4 to 2.2 m (Cupul-Magaña and Ledesma-Vázquez, 1993), indicating that the wave height before breaking was from 1.29 to 2.2 m, in a water depth of 35 to 65 m, which represents waves displacing in open sea, at intervals of 8 seconds. The hard slabby, thin strata of brown, fine-grained sandstone contain abundant ichnofossils identified as *Thalassinoides*, as well as abundant structures of the Domichnia type (fig.3). This is a burrow formed probably by an anomurid, such as *Callianassa*, *Callichirus* or *Upogebia* (Bromley, 1996). Even so, it is hard to recognize which one is responsible for the structures recorded in this study. The shafts and tunnels are joined at Y-shaped or T-shaped junctions; in some cases, the tunnels are branched and anastomosed (Ekdale, 1992).

The abundant presence of *Thalassinoides* represents a Cruziana ichnofacies (Bromley, 1996). This ichnofacies characterizes the region between the daily wavebase and storm wavebase and represents one of the most widespread trace fossil associations (Ekdale *et al.*, 1984). Cruziana has a very high biological diversity, reflected by a high ethological

La cima de la secuencia estudiada (muestras 18 a 20) contiene exclusivamente foraminíferos bentónicos de ambiente nerítico interno, donde el elemento dominante está constituido por miliólidos, aunque con un estado pobre de conservación. La litología asociada con esta parte de la secuencia y la presencia de *Thalassinoides*, icnogénero asociado con un ambiente somero, refuerza la interpretación anterior.

De acuerdo con las biofacies inferidas para los diferentes conjuntos de microfósiles, se interpreta que la secuencia de Arroyo Colorado fue depositada en ambientes que incluyen desde la plataforma interna hasta el batial superior. La presencia constante de foraminíferos característicos de una biofacies batial superior, la presencia de formas retrabajadas y la litología de la secuencia sugieren que ésta corresponde a un depósito transgresivo-regresivo-transgresivo, en un mar con profundidades promedio no mayores que 150 m.

Sedimentológicamente, la secuencia representa un ambiente de depósito marino somero entre la línea de costa, con areniscas diastratificadas de ángulo bajo, y mar abierto, con cantidades menores de arenisca limosa interdigitada y capas de arenisca. Estas unidades interdigitadas se interpretan como el resultado del movimiento de flujos gravitacionales transportados desde la plataforma interna a la externa, de manera similar a los depósitos turbidíticos Tipo I de Mutti (1985), que incluyen erosión submarina de escala amplia y arenisca lobulada de estratificación gruesa en cuerpos alargados no canalizados. La parte media de la columna está constituida por arenisca con diastratificación acunada y con diastratificación irregular, ambas interpretadas como formadas por debajo de la base normal de la ola y por encima de la base de la ola de tormenta (Myrow y Southard, 1996). El espaciado de la diastratificación irregular (λ) tiene una amplitud de 1.4 a 2.2 m, indicando, de acuerdo con Cupul-Magaña y

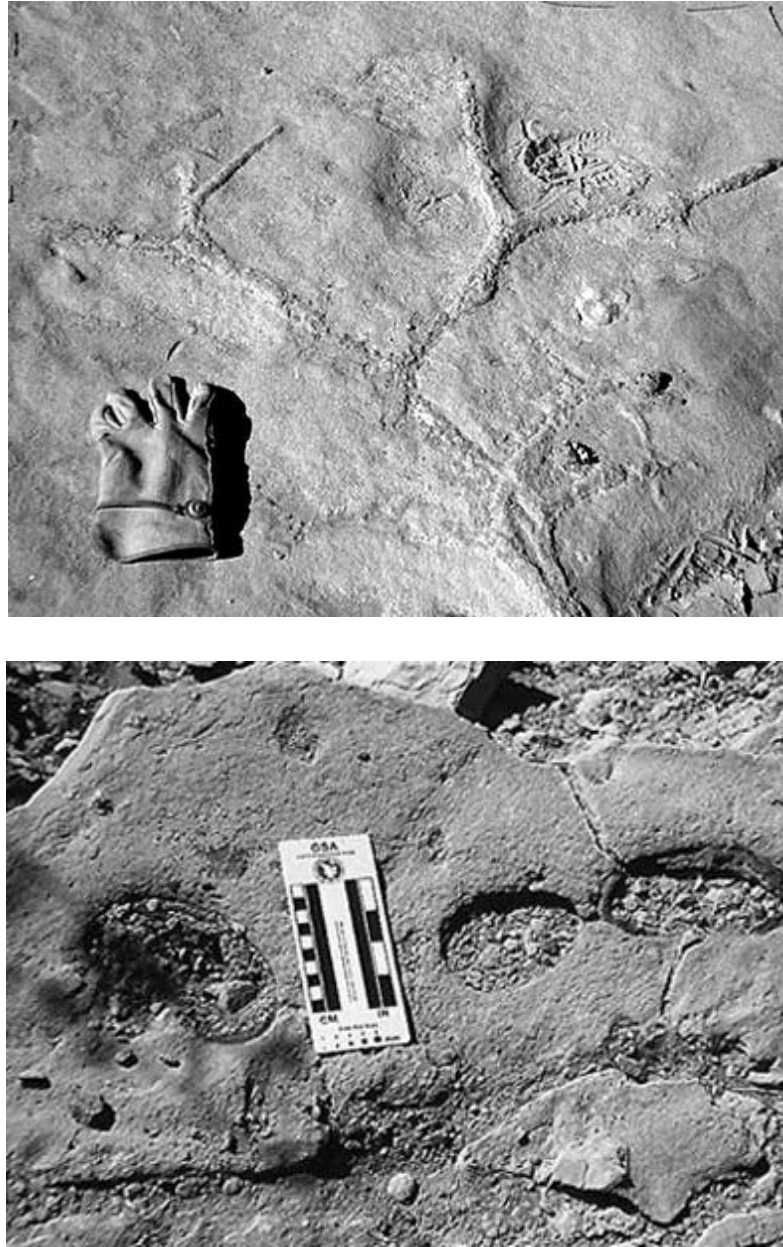


Figure 3. Ichnofossils of the *Cruziana* ichnofacies at the Arroyo Colorado section, Baja California Sur.
Figura 3. Icnofósiles de la icnofacies de *Cruziana* en la sección de Arroyo Colorado, Baja California Sur.

diversity of horizontal and vertical tracks of the Domichnia or Fodinichnia type (Bromley, 1996). The presence of *Thalassinoides* is indicative of biological activity between each gravity flow event, in diminished energy conditions, when erosion was not a major factor. Neither *Arenicolites* nor *Nereites* ichnofacies were clearly established as expected, due to the frequency of both processes, gravity flows and the possible associated storm events, as well as the low volume of sediment transported by them and the bathymetric shallowness in the depositional area.

The section studied represents two transgressive-regressive cycles (fig. 2). The first transgression started with the deposition in inner neritic environments of a coarse- to medium-grained, very angular, quartz rich sandstone of unit 1. This transgression reached its maximum in the middle to outer neritic environments, with the deposition of the massive shale of unit 3. The second transgression started with the inner neritic deposits of coarse, quartzose sandstones of unit 5, and reached a maximum middle neritic environment with deposition of the medium- to fine-grained sandstone of unit 6.

Stratigraphic nomenclature

The Tepetate Formation was named before the establishment of the first Committee on Stratigraphic Nomenclature (1933). Since then, it is a well-known and commonly used name in the current geological work in Baja California; therefore, we propose to consider it a formal lithological unit. Nevertheless, as Heim's (1922) original description of the Tepetate Formation fails to accurately describe its lithology and limits, we believe that a revision following the North American Stratigraphic Code would be appropriate.

Mina-Uhink (1957) was the first to suggest that the cliffs cropping out near Rancho El

Ledesma-Vázquez (1993), que la altura de la ola antes de romper fue de 1.29 a 2.2 m en profundidades de entre 35 y 65 m, lo cual representa olas desplazándose en mar abierto, en intervalos de 8 segundos. Sección arriba, la arenisca dura, marrón de grano fino con estratificación delgada contiene icnofósiles abundantes identificados como *Thalassinoides*, así como estructuras abundantes tipo Domichnia (fig. 3). Estas huellas probablemente fueron formadas por un anomúrido del tipo de *Callianassa*, *Callichirus* o *Upogebia* (Bromley, 1996), aunque definir exactamente a cual de éstos corresponden las estructuras observadas en la secuencia de estudio no fue posible. Las pistas y túneles forman una Y o T en el sitio de la unión; en algunos casos, los túneles se ramifican y se anastomosan (Ekdale, 1992).

Thalassinoides es aquí interpretada como parte de la icnofacies denominada Cruziana (Bromley, 1996), misma que es característica del área que queda comprendida entre la zona intermareal diaria hasta la base de la ola de tormenta y representa una de las asociaciones de huellas fósiles más ampliamente distribuidas (Ekdale *et al.*, 1984). Cruziana es una facies de diversidad biológica alta, reflejada por una variedad etológica importante de huellas horizontales y verticales del tipo Domichnia o Fodinichnia (Bromley, 1996). La presencia de *Thalassinoides* es indicativa de una actividad biológica entre cada evento de caída de flujos en condiciones de energía baja, donde la erosión no representa el riesgo mayor. No fue posible establecer con claridad, como se esperaba, la presencia de las facies de *Arenicolites* o *Nereites*, debido probablemente a su pobre desarrollo asociado con los flujos de gravedad, eventos de tormenta, así como con el volumen alto de sedimentos transportados en un ambiente relativamente somero.

La secuencia estudiada representa dos ciclos transgresivos-regresivos (fig. 2). La primera transgresión se inicia con el depósito en

Tepetate could be used and may represent the type locality of the formation. However, this author did not describe or establish its boundaries.

Work done by several authors (Beal, 1948; Mina-Uhink, 1957; Knappe, 1974; Lozano-Romen, 1975; Fulwider, 1976; Minch and Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986; López-Ferreira *et al.*, 1991; Vázquez-García *et al.*, 1995) and the present study demonstrate that the Tepetate Formation is predominately constituted by sandstones. Nevertheless, these rocks have a broad range in composition, texture, primary structures and structural attitudes and therefore the Arroyo Colorado section represents only part of the Tepetate Formation.

Even when the age inferred should not be part of the definition, this and the fossil contained in the strata are important features of the unit. According to data reported by previous authors, the Tepetate Formation was deposited during a relatively large time interval. Data from this study suggest deposition during the latest early Eocene-earliest middle Eocene, which strongly reinforces the position to consider that the Arroyo Colorado sequence is not representative of the Tepetate Formation.

CONCLUSIONS

The study carried out by Vázquez-García (1996) and this paper are in agreement with early works (Beal, 1948; Mina-Uhink, 1957; Lozano-Romen, 1975) inasmuch as that the Tepetate Formation, at least for the latest upper Eocene-earliest middle Eocene, was deposited in an oscillating shallow neritic environment, associated with high-energy, and possibly related with a transgressive-regressive-transgressive event that placed sediments in deeper areas. Nevertheless, our results do not permit us to rule out that this unit might have been deposited in a broader interval as has been

un ambiente nerítico interno de arenisca gruesa a media, muy angulosa, rica en cuarzo (unidad 1). Esta transgresión alcanza su máximo en un ambiente nerítico externo medio, con el depósito de lutita masiva (unidad 3). La segunda transgresión se inicia en un ambiente nerítico medio con el depósito de arenisca de grano grueso rica en cuarzo (unidad 5) y alcanza su máximo en un ambiente nerítico medio con el depósito de arenisca de grano medio a fino (unidad 6).

Nomenclatura estratigráfica

Como la Formación Tepetate (Heim, 1922) fue nombrada previamente al establecimiento del primer Comité de Nomenclatura Estratigráfica (Committee on Stratigraphic Nomenclature, 1933) y debido a que es un nombre ampliamente conocido y empleado en el trabajo geológico en Baja California, en este estudio se le ha considerado como una unidad litológica formal. Sin embargo, como la designación original no incluye una descripción litológica detallada y sus límites fueron pobremente definidos, se considera que es necesario llevar a cabo una revisión de esta unidad en los términos que establece el *North American Stratigraphic Code*.

Mina-Uhink (1957) es el primero en sugerir que los cantiles que afloran en las inmediaciones del rancho El Tepetate pudieran representar la localidad tipo de la Formación Tepetate. Sin embargo, no describe o establece sus límites. La información litoestratigráfica publicada (Beal, 1948; Mina-Uhink, 1957; Lozano-Romen, 1975; Minch y Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986; López-Ferreira *et al.*, 1991; Vázquez-García *et al.*, 1995), la inédita (Knappe, 1974; Fulwider, 1976), así como el estudio presente, pone de manifiesto que la Formación Tepetate está dominada litológicamente por areniscas de composición, textura, estructuras primarias y actitudes estructurales

reported by other authors (Fulwider, 1976) and in several paleoenvironments (Knappe, 1974; Fulwider, 1976; Minch and Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986).

Based on the study of a very well-preserved section of thin-bedded lobe fringe deposits around the town of Las Pocitas, located east-northeast of Arroyo Colorado, Ledesma *et al.* (1988) concluded that the sediments of the sequence here studied were transported to the northeast towards a large number of environments.

The available lithostratigraphic information and the present study indicate that the Arroyo Colorado sequence represents only part of the Tepetate Formation, and due to its different characteristics, we recommend that it not be adopted as type locality, and strongly advise a revision of this unit as well as the establishment of a composite stratotype according to the North American Stratigraphic Code (American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 1983).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially supported by DGAPA, grant number INI-102995, and by UABCS-UNAM Intercambio Académico. J. Ledesma-Vázquez acknowledges UABC support to participate in this project. Thanks are extended to J. Minch for reviewing early drafts of the manuscript. The authors acknowledge the detailed critical review made by J. Helenes (CICESE) and one anonymous reviewer; their suggestions and criticisms improved the final manuscript.

REFERENCES

Almgren, A.A., Filewiczand, M.V. and Heitman, H.L. (1988). Lower Tertiary and calcareous nannofossil zonation of California: An overview and recommendation. In: M.V. Filewicz and R.I.

amplias, por lo que la localidad de Arroyo Colorado representa sólo parte de esta formación.

Aún cuando la edad no debe ser parte de la definición de una unidad formacional, ésta y el contenido fósil son características importantes de la unidad. De acuerdo con la información consignada en los trabajos antes mencionados, la Formación Tepetate se depositó en un intervalo mayor que el establecido en el estudio presente (Eoceno inferior tardío-Eoceno medio temprano). Lo anterior refuerza la posición de no considerar a la secuencia de Arroyo Colorado como representativa de la unidad.

CONCLUSIONES

El estudio realizado por Vázquez-García (1996) y el presente concuerdan con trabajos previos (Beal, 1948; Mina-Uhink, 1957; Lozano-Romen, 1975), los cuales sugieren que la Formación Tepetate se depositó durante el Eoceno inferior tardío y el Eoceno medio temprano en un ambiente nerítico de alta energía, posiblemente relacionado con un evento transgresivo-regresivo-transgresivo, que emplazó los sedimentos en áreas profundas. Sin embargo, los resultados presentados aquí no permiten descartar que la unidad se haya depositado en un intervalo mayor, como ha sido señalado por algunos autores (Fulwider, 1976), y en ambientes diversos (Knappe, 1974; Fulwider, 1976; Minch y Leslie, 1979; Galli-Olivier *et al.*, 1986).

Con base en el estudio de una sección que representa depósitos delgados marginales, localizada en las inmediaciones del poblado de Las Pocitas, al este-nordeste del Arroyo Colorado (Ledesma *et al.*, 1998), se concluye que los sedimentos que constituyen la secuencia aquí estudiada fueron transportados al nordeste hacia un gran número de ambientes al menos durante el Eoceno.

- Squires (eds.), *Paleogene Stratigraphy, West Coast of North America. Pacific Section, SEPM, West Coast Paleogene Symp.*, 58: 83–105.
- American Commission on Stratigraphic Nomenclature (1983). *North American Stratigraphic Code. Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists*, 67: 841–875.
- Applegate, S.P. (1986). The El Cien Formation, strata of Oligocene and early Miocene age in Baja California Sur. *Rev. Inst. Geología, Univ. Nac. Aut. México*, 6: 145–162.
- Beal, H.C. (1948). Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California, Mexico. *Mem. Geol. Soc. America*, 31: 1–138.
- Berggren, W.A. and Aubert, J. (1975). Paleocene benthonic foraminiferal biostratigraphy, paleobiogeography and paleoecology of Atlantic-Tethyan regions; Midway-type fauna. *Palaeogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 18: 73–192.
- Bromley, R.G. (1996). *Trace Fossils: Biology, Taphonomy and Applications*. Chapman and Hall, London, 361 pp.
- Butterlin, J. (1981). Claves para la determinación de macroforaminíferos de México y del Caribe, del Cretácico Superior al Mioceno Medio. Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Tecnología y Exploración, México, pp. 1–219.
- Carreño, A.L. and Cronin, T.M. (1993). Middle Eocene Ostracoda from Baja California Sur, Mexico. *J. Micropalaeontol.*, 12 (part 2): 141–153.
- CGSINEGI (1983). Las Pocitas, Baja California Sur, México. Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía, Carta Topográfica No. G12C79, escala 1:50,000.
- Committee on Stratigraphic Nomenclature (1933). Classification and nomenclature of rock units. *Bull. Geol. Soc. America*, 44: 423–459; and *Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists*, 17: 843–868.
- Cupul-Magaña, L. y Ledesma-Vázquez, J. (1993). Evaluación de las condiciones de paleooleaje a partir de estructuras de tipo oscilatorio preservadas en sedimentos del Cretácico de Baja California. *Ciencias Marinas*, 19: 387–406.

La información litoestratigráfica contenida en trabajos previos y el estudio presente indican que la sección de Arroyo Colorado de la Formación Tepetate representa sólo parte de esta unidad, por lo que debido a su naturaleza, no es recomendable emplearla como localidad tipo y se recomienda hacer una revisión de la unidad de acuerdo con el *North American Stratigraphic Code* (American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 1983), así como la designación de un estratotipo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por DGAPA, proyecto número INI-102995, y por la Dirección General de Intercambio Académico UABCS-UNAM. Jorge Ledesma-Vázquez agradece el apoyo para participar en este proyecto de la Universidad Autónoma de Baja California. Se agradece a J. Minch por la revisión crítica del manuscrito. Los autores agradecen la meticulosa revisión crítica realizada por J. Helenes (CICESE) y las sugerencias de un revisor anónimo, todas perfectamente justificadas que contribuyeron a mejorar sustancialmente el manuscrito final.

Traducido al español por los autores.

-
- Ekdale, A.A. (1992). Muckraking and mudslinging: the joys of deposit-feeding. In: C.G. Maples and R.R. West (eds.), *Trace Fossils. 15th Annual Short Course of the Paleontological Soc.*, 5: 145–171.
- Ekdale, A.A., Bromley R.G. and Pemberton, S.G. (1984). *Ichnology: Trace fossils in sedimentology and stratigraphy. SEPM Short Course No.15*, 317 pp.
- Fulwider, W.R. (1976). *Biostratigraphy of the Tepetate Formation, Baja California Sur. M.Sc.thesis, University of Southern California*, 111 pp.

- Galli-Olivier, C., Márquez-Enríquez, T.E., Reyes-Sarabia, J.A. y Rosas-Cortés, C. (1986). Estructuras sedimentarias primarias y litofacies de corrientes densas de un paleoambiente de talud, El Conejo, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*, 12: 7–15.
- Heim, A. (1922). Notes on the Tertiary of Southern Lower California. *Geol. Mag.*, 59: 529–547.
- Ingle, J.C. Jr. (1980). Cenozoic paleobathymetry and depositional history of selected sequences within the southern California continental borderland. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Spec. Publ., 19: 163–195.
- Knappe, R. Jr. (1974). The micropaleontology of a section of the Tepetate Formation and a comparison with equivalent Foraminifera along the West Coast of the United States. M.Sc. thesis, University of Ohio, 114 pp.
- Ledesma-Vázquez, J., Rendón-Márquez, G. y Carreño, A.L. (1998). Caracterización de ambientes sedimentarios en la Formación Tepetate. En: S. Alaniz-Álvarez, L. Ferrari y A.F. Nieto-Samaniego (eds.), Primera Reunión en Ciencias de la Tierra, 21–25 septiembre de 1998, México DF. *Soc. Geol. Mex., Soc. Mex. Geól. Petrol., Soc. Mex. Geomorfología, Soc. Mex. Mineralogía, Resúmenes*, p. 99.
- López-Ferreira, C., Martínez-Jiménez, A., Rojas-Soriano, H., Sevilla-Unda, V. y Vázquez-García, A. (1991). Reconocimiento geológico en el área de San Hilario, Baja California Sur, de la Formación Tepetate. *Sociedad Geológica Peninsular y Universidad Autónoma de Baja California Sur, First International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula, La Paz, Baja California Sur, Mexico*, p. 46 (abstract).
- Lozano-Romen, F. (1975). Evaluación petrolífera de la península de Baja California, México. *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros*, 27: 1–329.
- Mallory, V.S. (1959). Lower Tertiary biostratigraphy of the California Coast Ranges. *American Association of Petroleum Geologists, Tulsa*, 416 pp.
- Mina-Uhink, F. (1957). Bosquejo geológico del territorio sur de la Baja California. *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros*, 9: 188–192.
- Minch, J. and Leslie, T.A. (1979). Geologic Road Log, La Paz to Tijuana. In: P.L. Abbott and G. Gastil (eds.), *Baja California Geology, Field Guides and Papers*. San Diego State Univ., San Diego, pp. 159–189.
- Morkhoven, F.P.C.M., van (1963). Post-Paleozoic Ostracoda: Their Morphology, Taxonomy and Economic Use. Vol. II. *Generic Descriptions*. Elsevier, New York, 478 pp.
- Mutti, E. (1985). Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: G.G. Zuffa (ed.), *Provenance of Arenites*. NATO ASI Ser. C. *Mathematical and Physical Science*, 148: 65–93.
- Myrow, P.M. and Southard, J.B. (1996). Tempestite deposition. *J. Sedimen. Res.*, 66(5): 875–887.
- Perrilliat, M.C. (1996). Occurrence of the Tethyan Gastropods *Campanile* and *Gisortia* in the Lower Eocene part of the Tepetate Formation, Baja California Sur, Mexico. *The Veliger*, 39: 178–183.
- Squires, R.L. and Demetron, R.A. (1991). Early Eocene macrofaunal comparison between the Tepetate and Bateque Formation, Baja California Sur, Mexico. *Geological Society of America, Annual Meeting 23*, p. 124 (abstract).
- Squires, R.L. and Demetron, R.A. (1994). A new species of the Oligopygoid Echinid *Haima* from the lower Eocene of Baja California Sur, Mexico. *J. Paleontol.*, 68: 846–851.
- Thomas, F.C. (1991). Paleocology of Late Eocene-Oligocene foraminiferal assemblages in a two-well transect across the north-east Newfoundland shelf. *J. Micropaleontol.*, 10: 57–67.
- Toumarkine, M. and Luterbacher, H. (1985). Paleocene and Eocene planktic foraminifera. In: H.M. Bolli, J.B. Saunders and K. Perch-Nielsen (eds.), *Plankton Stratigraphy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 87–154.
- Vázquez-García, A. (1996). Litología y ambientes de depósito de la Formación Tepetate en el Arroyo El Conejo, Baja California Sur, México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, 72 pp.
- Vázquez-García, A., Schwennicke, T. y Sevilla-Unda, V. (1995). Estudio preliminar sedimentológico de la Formación Tepetate en el Arroyo El Conejo, Baja California Sur, México. *Third International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula, La Paz, Baja California Sur, Mexico*, p. 212 (abstract).

APPENDIX

Species of Foraminifera and Ostracoda found in the type locality of the Tepetate Formation in Arroyo Colorado, Baja California Sur, Mexico. Well-preserved hypotypes are housed in the Micropaleontological Collection of the Museo de Paleontología, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, under IGM-Mi.

Foraminíferos y ostrácodos presentes en la localidad de Arroyo Colorado de la Formación Tepetate, Baja California Sur, México. Especímenes bien preservados fueron depositados como hipotipos en la Colección de Micropaleontología del Museo de Paleontología, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, bajo las siglas IGM-Mi.

Foraminifera

- Acarinina broedermanii* (Cushman and Bermúdez)
Acarinina bullbrooki (Bolli), IGM-641-Mi
Acarinina pentacamerata (Subbotina), IGM-642-Mi
Acarinina soldadoensis s. 1 (Brönnimann), IGM-643-Mi
Anomalinoides aragonensis (Nuttall), IGM-661-Mi
Bulimina curtissima Cushman and Siegfus, IGM-649-Mi
Bulimina guayabalensis Cole, IGM-650-Mi
Bulimina whitei Martin
Cibicides beatus Martin, IGM-656-Mi
Cibicides kernensis Mallory, IGM-657-Mi
Cibicides pseudowuellerstorfi Cole
Cibicides spiropunctatus Galloway and Morrey
Cibicides cf. *C. lawi* Howe
Cibicides sp. 1
Cibicides sp. 2
Cibicidoides cederstromi McLean, IGM-655-Mi
Cibicidoides pseudoungerianus (Cushman)
Cibicidoides sp.
Clavulinoides trilaterus (Cushman), IGM-627-Mi
Clavulinoides sp., IGM-628-Mi
Dentalina jacksonensis (Cushman and Applin), IGM-630-Mi
Discorbis midwayensis Cushman, IGM-654-Mi
Dorothia bulleta (Carsey), IGM-624-Mi
Dorothia cubana (Cushman and Bermúdez), IGM-625-Mi
Dorothia sp. 1
Dorothia sp. 2
Ellipsopolymorphina velascoensis (Cushman)
Eponides lodoensis Martin, IGM-652-Mi
Eponides plummerae Cushman, IGM-653-Mi
Gaudryna pyramidata Cushman, IGM-623-Mi
Glandulina ovata (d'Orbigny), IGM-640-Mi
Globigerina lozanoi Colom, IGM-647-Mi
Globigerinatheka subconglobata subconglobata (Shutsaya), IGM-648-Mi
Globulina lacrima (Reuss), IGM-639-Mi
Gyroidinoides girardanus (Reuss), IGM-662-Mi

Laevidentalina legumen (Reuss), IGM-631-Mi
Lenticulina pseudocultratus (Cole)
Lenticulina pseudovortex (Cole), IGM-634-Mi
Lenticulina trinitatensis (Cushman and Jarvis), IGM-635-Mi
Miliólidos
Morozovella aragonensis (Nuttall), IGM-644-Mi
Morozovella caucasica (Glaessner), IGM-645-Mi
Morozovella formosa formosa (Bolli)
Nodosarella cocoaensis (Cushman)
Nodosaria sp. 1
Nodosaria sp. 2
Pseudoclavulina aff. *P. mexicana* (Cushman) Phleger and Parker, IGM-629-Mi
Pseudonodosaria sp. IGM-632-Mi
Pseudophragmina (*Pseudophragmina*) *advena* Cushman
Pullenia quinqueloba (Reuss), IGM-658-Mi
Pyramidulina latejugata (Gümbel), IGM-633-Mi
Spiroplectinella richardi (Martin), IGM-622-Mi
Subbotina linaperta (Finlay)
Textularia aff. *T. crescentiformis* Cushman, 1911
Textularia sp., IGM-626-Mi
Trifarina advena californica Mallory, IGM-651-Mi
Truncorotaloides topilensis (Cushman), IGM-646-Mi
Uvigerina elongata Cole
Vaginulinopsis mexicana (Cushman) *kelleyi* Martin, IGM-636-Mi
Vaginulinopsis mexicana (Cushman) *nudicostata* (Cushman and Hanna), IGM-637-Mi
Vaginulinopsis verruculosa Martin, IGM-638-Mi
Valvalabamina aequilaterus (Plummer) Cushman, IGM-659-Mi
Valvalabamina depressus (Alth), IGM-660-Mi
Vulvulina sp.

Ostracoda

Ambocythere sp. IGM-671-Mi
Argilloecia aff. *A. faba* Alexander, 1934, IGM-672-Mi
Bairdoppilata sp. 1, IGM-666-Mi
Bairdoppilata sp. 2, IGM-667-Mi
Bairdoppilata sp. 3, IGM-668-Mi
Buntonia sp.
Costa sp. IGM-669-Mi
Cytherella sp. 1, IGM-663-Mi
Cytherella sp. 2, IGM-664-Mi
Cytherella sp. 3, IGM-665-Mi
Henryhowella sp., IGM-670-Mi
Jugosocythereis monrealensis Carreño and Cronin, 1993
Loxoconcha aff. *L. perdecora* Alexander, 1934
Paracytheridea sp.
Pokornyella sp.
Trachyleberis sp.