

Nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos mio-pliocenos del área de Navidad (33°00'-34°30'S), Chile central

Alfonso Encinas

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
Román Díaz 264, Santiago, Chile
encinas@cec.uchile.cl

Jacobus P. Le Roux

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
jroux@cec.uchile.cl

Luis A. Buatois

Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, 114 Science Place,
Saskatoon, SK S7N 5E2, Canada
luis.buatois@usask.ca

Sven N. Nielsen

GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion 3.1, Telegrafenberg,
14473 Potsdam, Germany
nielsen@geowiss.uni-hamburg.de

Kenneth L. Finger

University of California, Museum of Paleontology, 1101 Valley Life Sciences
Building, Berkeley, CA 94720-4780
kfinger@berkeley.edu

Elizabeth Fourtanier

Diatom Collection, California Academy of Sciences, 875 Howard Street,
San Francisco, CA 94103
efourtanier@CalAcademy.org

Alain Lavenu

Institut de Recherche pour le Développement (IRD-LMTG-UMR5563-UR154),
14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France
Alain.Lavenu@ird.fr

RESUMEN

Varios autores han propuesto diferentes esquemas estratigráficos para los depósitos sedimentarios neógenos marinos que afloran en la zona costera de Chile central entre Valparaíso (~33°00'S) y Punta Topocalma (~34°30'S), sin que exista un consenso al respecto. Tampoco existe acuerdo respecto a las correlaciones entre los depósitos que afloran en la parte norte de dicha zona, entre Valparaíso y San Antonio (~33°30'S) con aquellos que aparecen en la parte sur, entre San Antonio y Punta Topocalma. Sobre la base de nuevos estudios estratigráficos, sedimentológicos y paleontológicos se propone, de manera formal, un nuevo esquema estratigráfico para estos depósitos. De acuerdo con este nuevo esquema se definen la Formación Navidad (Mioceno Superior-Plioceno Inferior) y las formaciones Licancheu, Rapel y La Cueva (Plioceno). Se propone la elevación de las tres primeras unidades (Navidad, Licancheu y Rapel), generalmente consideradas como miembros en clasificaciones anteriores, al rango de formaciones debido a que se encuentran separadas por discontinuidades (paraconformidades) de escala regional. En el presente trabajo se definen estas unidades, se revisan los esquemas anteriores y se justifica la proposición de este nuevo esquema.

Palabras claves: Estratigrafía, Mioceno, Plioceno, Chile central, Navidad.

ABSTRACT

New stratigraphic scheme for the Mio-Pliocene marine deposits of the Navidad area (33°00'-34°30'S), central Chile. Different stratigraphic schemes have been proposed by various authors for the Neogene marine sedimentary deposits cropping out along the central Chilean coast between Valparaíso (~33°00'S) and Punta Topocalma (~34°30'S), without any consensus having been reached. Neither does any agreement exist with respect to the correlation between the deposits cropping out in the northern part of this area, between San Antonio (~33°30'S) and Valparaíso, and those of the southern part, between San Antonio and Punta Topocalma. Based on new stratigraphic, sedimentologic and paleontologic studies we propose a formal, new stratigraphic classification for this area. According to this scheme we define the Navidad Formation (Upper Miocene-Lower Pliocene) and the Licancheu, Rapel and La Cueva formations (Pliocene). We propose that the rank of the three first cited units (Navidad, Licancheu and Rapel), generally considered to be members in previous classifications, be elevated to formations, because they are separated by regional unconformities (paraconformities). In this paper we define these units, revise the previous classifications, and explain the basis for the new classification.

Key words: Stratigraphy, Miocene, Pliocene, Central Chile, Navidad

INTRODUCCIÓN

Los depósitos marinos neógenos que afloran en el área de Navidad (~33°00'-34°30'S) (Fig. 1) fueron estudiados por primera vez por Darwin (1846) quien visitó dicha zona durante su viaje abordo del 'H/M Beagle' a América del Sur. Desde la visita del famoso naturalista inglés numerosos paleontólogos (e.g., Philippi, 1887; Tavera, 1979; Martínez-Pardo y Valenzuela, 1979; Covacevich y Frassinetti, 1986; Troncoso, 1991; Frassinetti y Covacevich, 1993; Méon *et al.*, 1994; Nielsen *et al.*, 2004; Nielsen, 2005) han estudiado la variada fauna y flora que presentan dichos depósitos. También se han realizado varios estudios estratigráficos y sedimentológicos (e.g., Brüggén, 1934; Herm, 1969; Etchart, 1973; Cecioni, 1978, 1980; Tavera, 1979). Sin embargo, existen diferencias significativas entre las clasificaciones estratigráficas propuestas por estos autores, no existiendo hasta la fecha un consenso con respecto a la estratigrafía de estas sucesiones sedimentarias. Tampoco existe acuerdo con respecto a la correlación entre los depósitos que afloran en la parte norte del área, entre Valparaíso y San Antonio (~33°00'-

33°30'S), con aquellos que aparecen en el área de Navidad, entre San Antonio y Punta Topocalma (33°30'-34°30'S) (Fig. 1), como fue señalado por Covacevich y Frassinetti (1990). Además, en la mayor parte de estos trabajos o bien no existe una definición formal de las unidades estratigráficas propuestas o no se cumplen los requisitos señalados por la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980) para efectuar dicha definición (e.g., Darwin, 1846; Fuenzalida y Varela, 1964; Tavera, 1968, 1979). Nuevos estudios estratigráficos, sedimentológicos y paleontológicos efectuados por los autores de este trabajo, permiten proponer formalmente una nueva clasificación estratigráfica para los depósitos neógenos del área de Navidad. En el presente artículo se presenta dicha clasificación, siguiendo las directrices señaladas por la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999), se señalan, de forma sintética, las características más importantes de las unidades que se describen, se justifica la elección del nuevo esquema estratigráfico y se revisan las clasificaciones anteriores.

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada en la zona costera y en la parte oeste de la Cordillera de la Costa de Chile central, aproximadamente entre Valparaíso al norte y Punta Topocalma al sur. Esta área se ubica

inmediatamente al sur de la zona de subducción de la dorsal asísmica Juan Fernández, la cual se sitúa aproximadamente frente a las costas de Valparaíso y constituye el límite sur de una zona de subducción plana

situada entre los 28° y 33°S (Yáñez *et al.*, 2001). Litológicamente, la zona de estudio está formada por un basamento constituido por rocas plutónicas y metamórficas del Paleozoico, Triásico y Jurásico, por rocas sedimentarias marinas del Cretácico, Eoceno y Neógeno y por sedimentos cuaternarios (Gana *et al.*, 1996; Wall *et al.*, 1996) (Fig. 1).

Las rocas cretácicas presentan una edad del Campaniano Tardío-Maastrichtiano (Cretácico Tardío) y afloran en la zona de Punta Topocalma y en un pequeño sector de la playa de Algarrobo. Las rocas de edad eocena afloran tan sólo en la playa de Algarrobo, donde sobreyacen a la sucesión cretácica (Gana *et al.*, 1996).

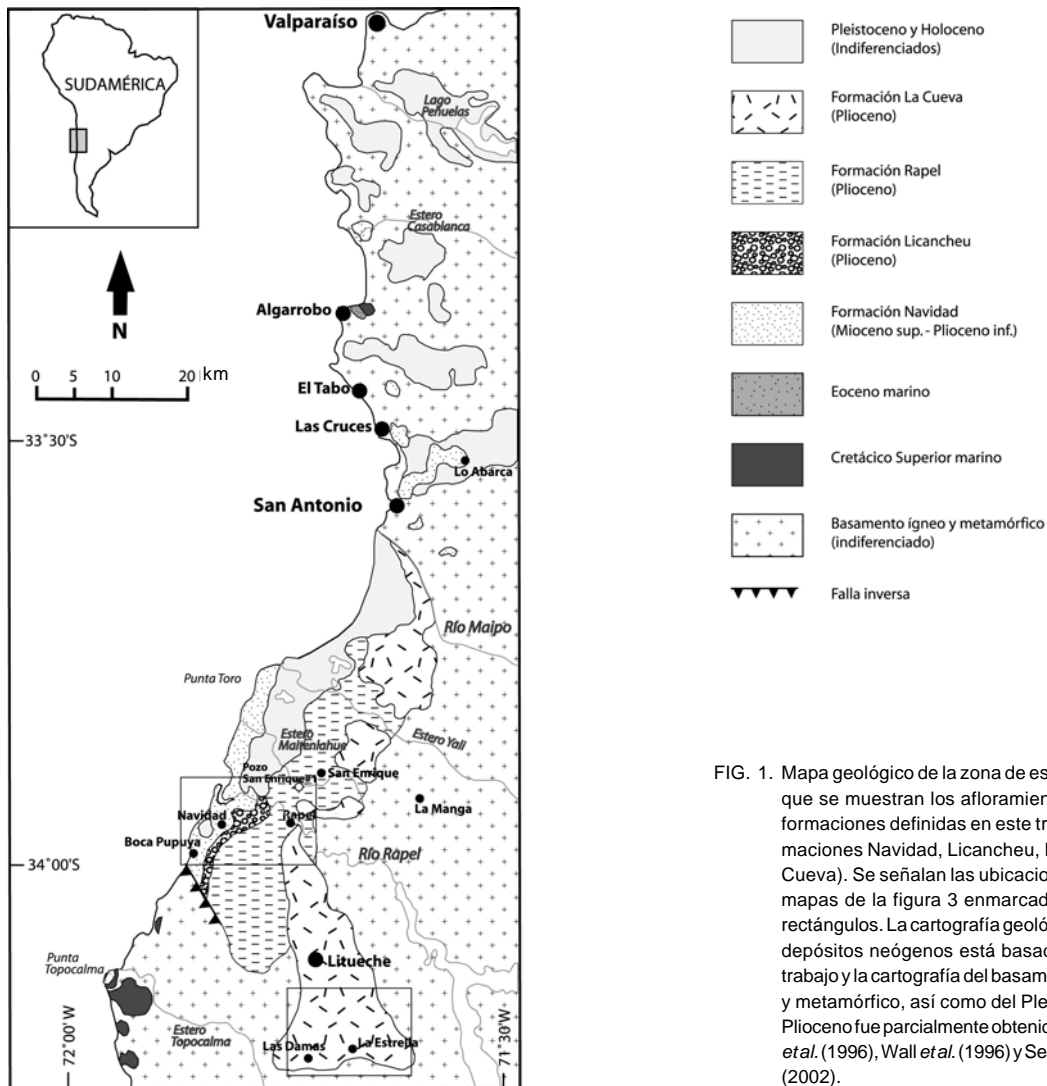


FIG. 1. Mapa geológico de la zona de estudio en el que se muestran los afloramientos de las formaciones definidas en este trabajo (formaciones Navidad, Licanheu, Rapel y La Cueva). Se señalan las ubicaciones de los mapas de la figura 3 enmarcadas en dos rectángulos. La cartografía geológica de los depósitos neógenos está basada en este trabajo y la cartografía del basamento ígneo y metamórfico, así como del Pleistoceno y Plioceno fue parcialmente obtenida de Gana *et al.* (1996), Wall *et al.* (1996) y Sernageomin (2002).

Las rocas neógenas afloran en buena parte de la zona costera al sur de San Antonio, fundamentalmente en las inmediaciones del pueblo de Navidad, y presentan afloramientos más dispersos y restringidos en la zona situada al norte de San Antonio. Finalmente,

los sedimentos cuaternarios se encuentran representados por arenas y gravas continentales, de probable edad pleistocena, y por depósitos marinos, fluviales y aluviales del Holoceno (Gana *et al.*, 1996).

CLASIFICACIONES ANTERIORES

El primero en estudiar los estratos neógenos costeros del área de Navidad fue Darwin (1846), quien se refirió a ellos como 'Formation of Navidad' (formación de Navidad) o como 'Sandstone formation at Navidad' (formación de areniscas en Navidad) a

que asignó una edad 'terciaria muy antigua'. Darwin describió estos estratos como una unidad formada por areniscas amarillentas con venas ferruginosas, concreciones calcáreas y con abundantes fósiles (Fig. 2).

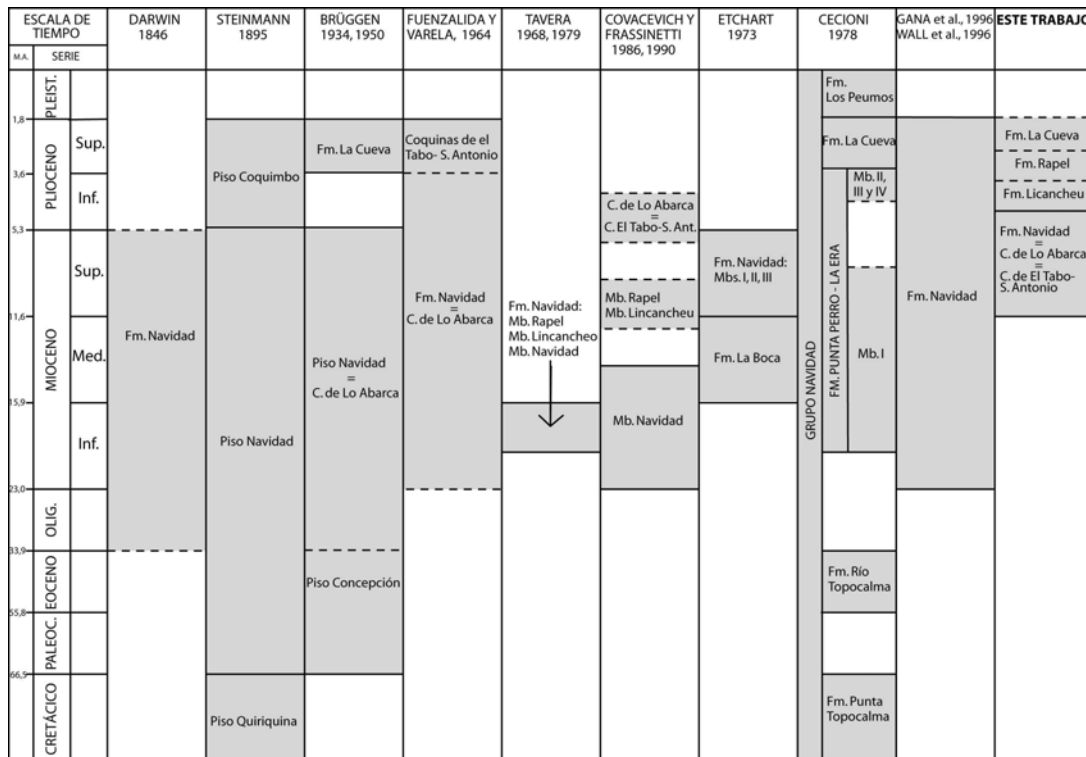


FIG. 2. Cuadro con los esquemas estratigráficos definidos por diversos autores para el área de Navidad y el propuesto en este trabajo (ver texto para mayor información). Las líneas discontinuas indican incertidumbre en las edades.

Posteriormente, Steinmann (1895) definió el Piso de Navidad, el cual estaría formado por estratos del Terciario inferior y medio que afloran en Chile centro-sur. De acuerdo con este autor el Piso de Navidad sobreyace al Piso de Quiriquina, de edad cretácica, y subyace al Piso de Coquimbo, de edad pliocena.

Brüggen (1934) demostró que el Piso de Navidad de Steinmann (1895) está en realidad formado por dos secuencias separadas por una discordancia y distinguió el Piso de Concepción, de edad paleocena-eocena, y el Piso de Navidad, de edad oligocena-miocena, que sobreyace al anterior y que

correspondería a la formación original de Darwin y a las unidades correlacionables con esta que afloran en el resto de Chile.

Tavera (1968, 1979) asignó una edad miocena temprana (Burdigaliano) al conjunto de la Formación Navidad, distinguiendo en ella, de base a techo, los miembros Navidad, Lincancho y Rapel. Este autor consideró que las faunas de moluscos características de dichos miembros constituían un conjunto unitario y que las diferencias entre las mismas se debían a diferencias de facies, por lo que asignó la misma edad a todos ellos. Covacevich y Frassinetti (1986), sin

embargo, consideraron que las faunas de estos miembros eran diferentes y asignaron al Miembro Navidad una edad que va del Mioceno Temprano a la parte media del Mioceno Medio, basándose en las dataciones de foraminíferos y discoastéridos propuestas por Martínez-Pardo y Valenzuela (1979), y una edad comprendida entre la parte alta del Mioceno Medio y el Mioceno Tardío para los miembros Lincancho y Rapel, basándose tan sólo en la posición estratigráfica de estos miembros, situados por encima del Miembro Navidad de Tavera.

Etchart (1973) dividió la clásica Formación Navidad de Darwin (1846) en dos formaciones: Formación La Boca, de edad miocena media, y Formación Navidad, de edad miocena tardía, a la cual subdividió a su vez en tres miembros (miembros I, II y III). Por las descripciones que hace de estas unidades se puede inferir que la Formación La Boca y el Miembro I de la Formación Navidad son equivalentes al Miembro Navidad de Tavera (1968, 1979), mientras que los miembros II y III corresponden a los miembros Lincancho y Rapel de este autor.

Cecioni (1978) definió el Grupo Navidad, que comprende las siguientes formaciones: Formación Punta Topocalma, de edad cretácica; Formación Río Topocalma, de edad eocena; Formación Punta Perro-La Era, de edad mio-pliocena; Formación La Cueva, de edad pliocena tardía, y Formación Los Peumos del Pleistoceno. La Formación Punta Perro-La Era es equivalente a la Formación Navidad de Darwin (1846) y se divide en cuatro miembros: Miembro I, del Burdigaliano-Tortoniano, y Miembros II, III y IV, asignados al Plioceno Medio. El Miembro I sería equivalente a la parte inferior del Miembro Navidad de Tavera (1968, 1979). El Miembro II sería equivalente a la parte superior del Miembro Navidad y al Miembro Lincancho de este autor. El Miembro III sería equivalente al conglomerado basal del Miembro Rapel y el Miembro IV, al resto del Miembro Rapel de Tavera (1968, 1979).

Por último Gana *et al.* (1996) y Wall *et al.* (1996) consideraron la Formación Navidad como una unidad continua de edad miocena-pliocena que comprendería el conjunto de los miembros definidos por Tavera (1979), incluyendo, además, las capas de Lo Abarca y las coquinas de El Tabo-San Antonio (Fuenzalida y Varela, 1964).

Con respecto a los afloramientos neógenos marinos del área comprendida aproximadamente entre San Antonio y Valparaíso, Brügggen (1950) señaló la presencia de estratos pertenecientes al Piso de Navidad cerca de la localidad de Lo Abarca (Fig. 1).

Fuenzalida y Varela (1964) dieron el nombre de 'capas de Lo Abarca' a estos estratos, correlacionándolos con el Piso de Navidad y asignándoles una edad miocena-pliocena. En este mismo trabajo mencionaron la presencia de unas coquinas en el área de El Tabo, Las Cruces y San Antonio (Fig. 1) que asignaron al Plioceno Tardío. Posteriormente, Covacevich y Frassinetti (1990) se refirieron a estos estratos como las 'coquinas de El Tabo-San Antonio' y los consideraron equivalentes al conglomerado basal de las 'capas de Lo Abarca' por la presencia de fauna de moluscos similares, asignándoles una edad que va de la parte superior del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano y situando estratigráficamente esta unidad entre la Formación Navidad (*sensu* Tavera, 1979) y la Formación La Cueva.

En el sector sur del área de estudio, Brügggen (1950) mencionó la presencia de una sucesión fosilífera marina en el área de La Cueva a la que asignó una edad pliocena tardía (Fig. 3a). Este autor describió una sucesión de areniscas y conglomerados coronada por un conglomerado, que interpretó como de origen glacial, en dicha área. Posteriormente Cecioni (1978) definió formalmente las formaciones La Cueva, del Plioceno Tardío, y Los Peumos, del Pleistoceno, que serían equivalentes al conjunto de estratos estudiados por Brügggen (1950) en la zona de La Cueva.

NUEVA CLASIFICACIÓN

Sobre la base de nuevos estudios estratigráficos, sedimentológicos y paleontológicos se propone de manera formal un nuevo esquema estratigráfico para los depósitos neógenos marinos del área comprendida entre Valparaíso y Punta Topocalma (Fig. 1). De

acuerdo con este nuevo esquema se definen las formaciones Navidad, Lincancho, Rapel y La Cueva (Fig. 2). Con respecto a las unidades denominadas informalmente como 'capas de Lo Abarca' y 'coquinas de El Tabo-San Antonio', consideramos a éstas como

identificables a la Formación Navidad y por tanto les asignamos este nombre. La justificación de la elección de este nuevo esquema se presenta más adelante, en el capítulo de discusión. En el presente capítulo se señalan, de forma sintética, las características más importantes de las unidades definidas, siguiendo los

parámetros señalados por la Guía Estratigráfica Internacional (ver Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999). Todas las unidades descritas pueden ser representadas en mapas a escalas adecuadas (1:50.000, 1:100.000), requisito necesario para la definición de nuevas formaciones (Hedberg, 1980).

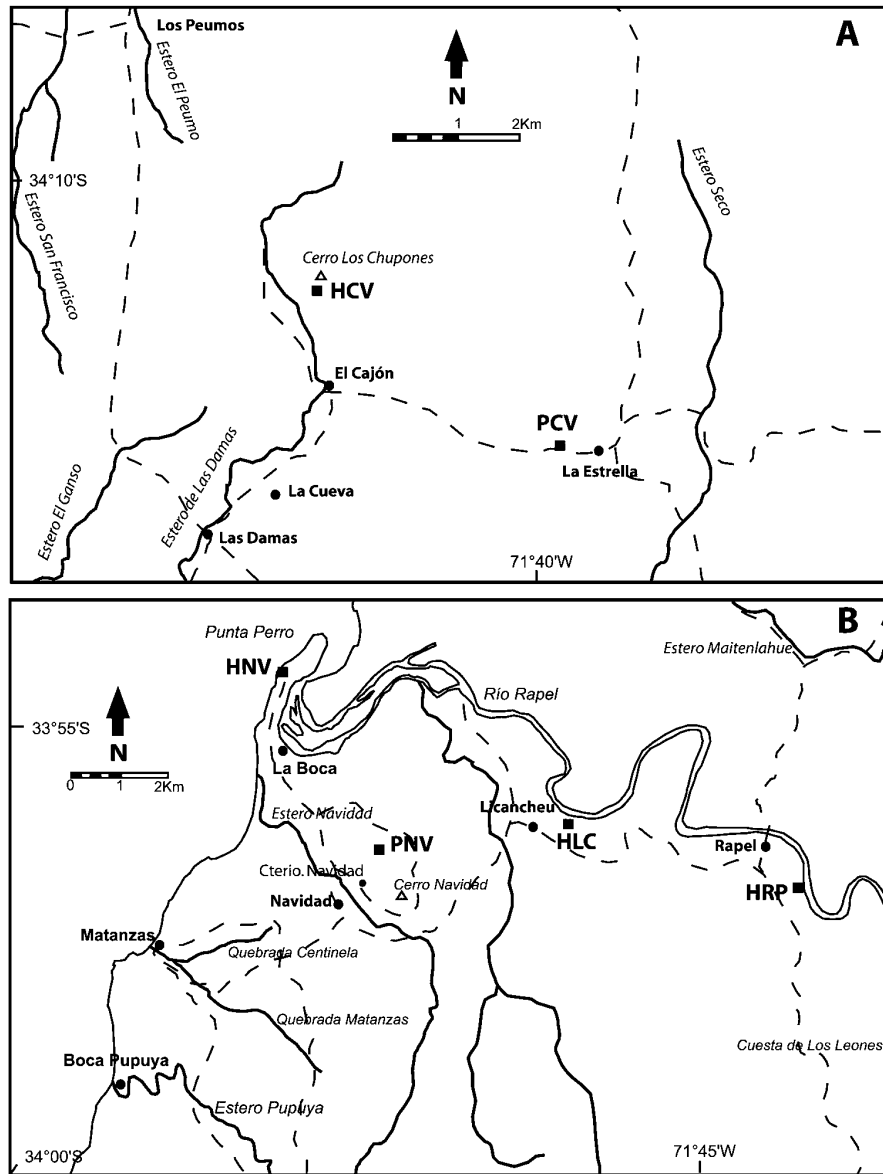


FIG. 3. Mapas con la localización de los estratotipos de las Formaciones Navidad, Licancheu, Rapel y La Cueva. Las líneas punteadas representan las principales carreteras y caminos. **A.** Área de La Estrella. **HCV:** Holoestratotipo de la Formación La Cueva. **PCV:** Paraestratotipo de la Formación La Cueva; **B.** Área de Navidad. **HNv:** Holoestratotipo de la Formación Navidad. **PNv:** Paraestratotipo de la Formación Navidad. **HLC:** Holoestratotipo de la Formación Licancheu. **HRP:** Holoestratotipo de la Formación Rapel.

FORMACIÓN NAVIDAD

Esta formación está compuesta de areniscas, limolitas, conglomerados y coquinas. Sobreyace en discordancia de erosión al basamento plutónico y metamórfico del Paleozoico y Mesozoico y a los estratos cretácicos de la Formación Punta Topocalma (Cecioni, 1978) y subyace, en contacto concordante, a la Formación Licancheu. Con respecto a su espesor, no existe ninguna zona donde se pueda medir una columna que contenga la base y el techo de esta unidad; sin embargo, considerando que la base aflora en la playa de Punta Perro y el techo en los cerros situados al norte del cementerio de Navidad (Fig. 3b), a tan sólo unos 3 km de distancia, y teniendo en cuenta que no se observan grandes fallas en el área situada entre ambos puntos y que las capas son subhorizontales, se puede calcular una potencia de unos 120 m para este sector. En el área de San Enrique (Fig. 1) la ENAP (Empresa Nacional del Petróleo) perforó el pozo San Enrique#1 que atravesó unos 220 m de estratos marinos antes de llegar al basamento (Etchart, 1973). Teniendo en cuenta que en los alrededores del pozo aflora la Formación Rapel, los citados 220 m constituirían una potencia máxima para la Formación Navidad. Por último, en la zona de Matanzas se observa un acantilado de 100 m de altura formado por estratos pertenecientes a la Formación Navidad. Sin embargo, en dicha localidad el pozo Navidad#5, perforado por la ENAP cerca de la base del acantilado, alcanzó una profundidad de 101 m de potencia sin llegar al basamento, el cual aflora en las proximidades. Teniendo en cuenta estos datos se estima una potencia máxima de entre 100 y 200 m para esta formación, aunque no se descarta que localmente pueda ser mayor. En los alrededores de Rapel la Formación Licancheu se apoya directamente sobre el basamento, lo que implica que el espesor de la Formación Navidad varía entre unos 200 y 0 m, probablemente debido a que el basamento presenta una topografía muy irregular. Con respecto a su expresión geomorfológica la Formación Navidad forma acantilados en la zona costera y relieves suaves en el interior, constituyendo los mejores afloramientos aquellos ubicados en la costa.

Aflora de manera continua entre Punta Toro y Boca Pupuya y al sur de esta última de manera discontinua hasta Punta Topocalma (Fig. 1). Al norte de Punta Toro presenta escasos afloramientos entre San Antonio y Valparaíso. La Formación Navidad presenta un conglomerado y/o coquina basal sobreyacido por una

alternancia de areniscas, limolitas y escasos conglomerados, en la cual se pueden distinguir las siguientes facies: areniscas macizas, alternancias de limolitas y areniscas con ciclos de Bouma, conglomerados, areniscas con laminación paralela, limolitas, brechas sedimentarias, capas deslizadas ('slides'), capas plegadas ('slumps') y diamictitas (Encinas *et al.*, 2003a y b; 2005). En las capas de limolitas y de areniscas de grano muy fino se encuentran abundantes *Chondrites* isp. y *Zoophycos* isp.

La característica distintiva más importante de esta formación es la predominancia de alternancias de areniscas y limolitas en capas de potencias que varían entre centímetros y metros. Las capas de areniscas presentan colores variables entre el ocre y el gris, mientras que el de las limolitas varía entre gris oscuro y blanquecino. Esta unidad presenta frecuentes variaciones verticales y laterales de facies lo que hace difícil correlacionar los distintos afloramientos, incluso aquellos relativamente cercanos entre sí.

La Formación Navidad presenta localmente abundantes fósiles de moluscos (Sowerby, 1846; Hupé, 1854; Philippi, 1887; Stuardo y Villarroel, 1975; Tavera, 1979; Frassinetti y Covacevich, 1984; Covacevich y Frassinetti, 1986; Nielsen y Frassinetti, 2003; Nielsen *et al.*, 2004; Nielsen, 2005), foraminíferos (Martínez-Pardo y Valenzuela, 1979; Finger *et al.*, 2003), ostrácodos (Finger *et al.*, 2003), corales (Philippi, 1887), briozoos (Philippi, 1887), equinodermos (Kutscher *et al.*, 2004), cangrejos (Feldmann *et al.*, 2005), peces (Suárez *et al.*, 2006) y plantas (Troncoso, 1991; Troncoso y Romero, 1993; Méon *et al.*, 1994; Troncoso y Encinas, 2006).

EDAD

La edad de esta formación ha sido objeto de debate durante varias décadas. Tavera (1968, 1979) asignó el conjunto de la Formación Navidad (que incluiría sus miembros Navidad, Licancheu y Rapel) al Burdigaliano (Mioceno Temprano), basándose en la comparación de la fauna de moluscos de esta unidad con la del Patagoniano de Argentina. Diversos autores estudiaron foraminíferos obteniendo edades que varían entre el Mioceno Temprano (Herm, 1969), Mioceno Medio (Martínez-Pardo y Valenzuela, 1979), Mioceno Temprano a Mioceno Tardío (Martínez-Pardo, 1990) y Mioceno Tardío (Martínez-Pardo y Osorio, 1964; Cecioni, 1978; Ibaraki, 1992). Osorio (1978), por medio del estudio de ostrácodos, obtuvo también una edad miocena tardía para esta unidad.

Nuevos estudios de foraminíferos planctónicos indican una edad que va del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano para esta formación (zonas N16-N19) (Finger *et al.*, 2003; Encinas *et al.*, 2005; Encinas, 2006).

Con respecto a los depósitos neógenos que afloran entre San Antonio y Valparaíso las 'capas de Lo Abarca' fueron consideradas como equivalentes a la Formación Navidad por Brügggen (1950) y Fuenzalida y Varela (1964), quienes les asignaron una edad miocena-pliocena basada en moluscos, que indican una edad miocena, y en diatomeas 'propias del Plioceno sudamericano', de acuerdo con sus palabras, y cuyas especies no mencionan. Posteriormente, Martínez-Pardo y Parada (1968) asignaron una edad pliocena a esta unidad por medio del estudio de foraminíferos bentónicos y consideraron que no es equivalente a la Formación Navidad. Covacevich y Frassinetti (1990) compararon la fauna de moluscos de estas capas con las faunas de las Formaciones Navidad (*sensu* Tavera, 1979) y La Cueva. Estos autores consideraron que las 'capas de Lo Abarca' presentan una edad intermedia a la de las dos formaciones citadas y le asignaron una edad que va de la parte superior del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano. En lo que concierne a las 'coquinas de El Tabo-San Antonio', Fuenzalida y Varela (1964) asignaron una edad pliocena tardía a esta unidad, basándose en las especies de moluscos encontradas. Sin embargo, Covacevich y Frassinetti (1990) establecieron la equivalencia de esta unidad con el conglomerado basal de las 'capas de Lo Abarca' debido a que presentan faunas de moluscos similares y a la proximidad de sus afloramientos.

Nuevos estudios estratigráficos y paleontológicos realizados durante este trabajo señalan la presencia de diatomeas pertenecientes a las especies *Thalassiosira brunii* Akiba and Yanagisawa y *Craspedodiscus coscinodiscus* Ehrenberg en las 'capas de Lo Abarca'. Los rangos estratigráficos de estas especies en el Pacífico ecuatorial van de 12,2 a 8,9 Ma y de 16,9 a 11,3 Ma, respectivamente, (Barron, 2003), lo que indica un rango concurrente de entre 12,2 a 11,3 Ma (parte superior del Mioceno Medio a Mioceno Tardío) (Fournanier, E.; información inédita). Al mismo tiempo Martínez-Pardo y Parada (1968) encontraron foraminíferos bentónicos en esta unidad que sugieren una edad pliocena, lo que ha sido confirmado por nuevos estudios (Encinas *et al.*, 2005). La formación 'capas de Lo Abarca' tendría entonces un rango de edad que iría del intervalo Mioceno Medio terminal-Mioceno Tardío basal al Plioceno y que sería por tanto similar al señalado para la Formación Navidad. Al mismo tiempo, las 'capas de Lo Abarca'

presentan facies sedimentarias en las que predominan las alternancias de limolitas y areniscas con ciclos de Bouma, icnofacies dominadas por *Chondrites* isp. y *Zoophycos* isp. y foraminíferos bentónicos indicativos de una profundidad batial inferior. El rango de edad de esta unidad, así como las facies sedimentarias, icnofacies y especies de foraminíferos bentónicos, que son similares a aquellas características de la Formación Navidad e indicativos de un ambiente marino profundo, señalarían que las 'capas de Lo Abarca' y la Formación Navidad son unidades equivalentes.

CORRELACIONES

La correlación de la Formación Navidad con otros depósitos marinos neógenos en Chile resulta, en ocasiones, problemática debido a las diferencias de facies que existen entre algunas de estas unidades y a la falta de buenas dataciones para algunos de estos depósitos. No obstante, los estudios estratigráficos realizados recientemente en varios de estos depósitos permiten establecer que la Formación Navidad es correlacionable con, al menos, parte de la Formación Bahía Inglesa, que aflora en el área de Caldera (~27°S) (Marquardt, 1999; Achurra, 2004); con la parte basal de la Formación Coquimbo, en el área de Carrizalillo (~29°S) (Moscoso *et al.*, 1982; Gómez, 2003; Le Roux *et al.*, 2005) y Tongoy (Le Roux *et al.*, 2006); con la Formación Ranquil, en el área de Arauco (~37°S) (García, 1968; Martínez-Pardo, 1990; Finger *et al.*, 2003; Encinas *et al.*, 2005) y con la Formación Lacuí, en el área de Chiloé (~42°S) (Valenzuela, 1982; Finger *et al.*, 2003; Encinas *et al.*, 2005), debido a que estas unidades presentan rangos de edades y facies sedimentarias similares a las de la Formación Navidad.

AMBIENTE SEDIMENTARIO

La Formación Navidad ha sido interpretada como depositada en un ambiente de talud continental. Esta interpretación está basada en la presencia de facies indicativas de una sedimentación dominada por flujos de gravedad, fundamentalmente corrientes de turbidez y flujos de detritos, por la abundancia de trazas fósiles *Chondrites* isp. y *Zoophycos* isp., típicas de ambientes de talud (Frey y Pemberton, 1984; Buatois *et al.*, 2002) y por la presencia de foraminíferos bentónicos indicativos de profundidades batiales, entre los cuales se encuentran los géneros *Bathysiphon*, *Melonis*, *Osangularia*, *Pleurostomella*, *Siphonodosaria* y *Sphaeroidina* (Finger *et al.*, 2003; Encinas *et al.*, 2003a y b, 2005; Encinas, 2006).

ESTRATOTIPO

La ausencia de una sección que comprenda la base y techo de la Formación Navidad hace necesario el uso de dos estratotipos componentes (Hedberg, 1980). De esta forma se define como holoestratotipo la sección situada en la parte este de Punta Perro, cerca de la localidad de La Boca (Figs. 3b y 4a), y como paraestratotipo, la sección situada en los cerros ubicados justo al norte del cementerio de Navidad (Figs. 3b y 4b). En la columna de Punta Perro aflora la base de la unidad, mientras que en la del cementerio de Navidad aflora el techo de la misma que está en contacto con la Formación Licancheu. Se escogen estos estratotipos, fundamentalmente el situado en Punta Perro, por su facilidad de acceso, por las buenas condiciones de los afloramientos, que permiten observar las facies características de la unidad, y porque en las zonas donde afloran se han realizado la mayor parte de los estudios sedimentológicos y paleontológicos en esta unidad (e.g., Etchart, 1973; Tavera, 1979; Martínez-Pardo y Valenzuela, 1979; Méon *et al.*, 1994).

ESTRATOTIPO DE BASE (HOLOESTRATOTIPO)

Para acceder al mismo desde la parte norte de la localidad de La Boca se baja por un camino que conduce a la parte este de Punta Perro. Se continúa por la playa en dirección norte hasta llegar a un punto en que afloran grandes bloques de granito (coordenadas UTM: N6244393-E237107) (Fig. 3b). La columna fue medida en el acantilado costero y se continúa a lo largo de este hacia el sur (Figs. 4a y 5a). Tiene una potencia de 110 m. Presenta un conglomerado basal clastosoportado, de unos tres metros de potencia, que está formado por clastos de granitoides de tamaños centimétricos a métricos. No es posible observar el basamento pero se infiere que se encuentra debajo del conglomerado, debido a que algunos de los bloques de granito tienen más de un metro de diámetro y a que algunos de estos bloques, debido a su forma piramidal y gran tamaño, parece que corresponden en realidad a altos de la parte superior del basamento que sobresalen entre el conglomerado. El conglomerado basal está sobreyacido por una alternancia de areniscas y limolitas que forman una sucesión de 107 m de potencia (Fig. 4a). Localmente, contiene abundantes gastrópodos, bivalvos, braquiópodos, corales solitarios, foraminíferos, ostrácodos, dientes de tiburón, cangrejos, briozoos, hojas y troncos. Los estratos se encuentran horizontales a levemente inclinados.

ESTRATOTIPO DE TECHO (PARAESTRATOTIPO)

El estratotipo está situado al norte del cerro Navidad. Para acceder al mismo se toma el camino que va al cementerio de Navidad y, pasado este, se continúa el camino por un kilómetro aproximadamente. Se sigue a pie en dirección norte por una quebrada hasta llegar a la base de los cerros (coordenadas UTM: N6241005-E239151) (Fig. 3b). La columna se continúa desde este punto hasta lo alto del cerro situado al sur. La Formación Navidad tiene una potencia de 15 m en este sector (Figs. 4b y 5b). La litología consiste en areniscas de color ocre y aspecto macizo que forman capas métricas con una estratificación mal definida y que presentan escasos fósiles de bivalvos y algunas concreciones de tamaños decimétricos a métricos. Al techo presenta un contacto plano y mal definido con la Formación Licancheu. Los estratos se presentan subhorizontales.

FORMACIÓN LICANCHEU

Esta formación consiste en areniscas y escasos conglomerados y limolitas. Sobreyace en contacto concordante (paraconformidad) a la Formación Navidad y en contacto discordante al basamento granítico. Subyace concordantemente (paraconformidad) a la Formación Rapel. Tiene un espesor máximo de 41 m medido en la localidad de Licancheu, aunque en las proximidades de Rapel hay una zona donde la Formación Rapel se apoya directamente sobre el basamento (Figs. 6 y 7a). Esto implica que el espesor de la Formación Licancheu varía entre unos 40 y 0 m. Esta unidad presenta escasos afloramientos que se sitúan por lo general en los cerros ubicados en las cercanías de la costa, aproximadamente entre el río Rapel al norte y Boca Pupuya al sur, siendo los más importantes los situados en la orilla sur del río Rapel en Licancheu y al norte del cementerio de Navidad (Figs. 1 y 3b). No existen afloramientos de esta formación en la zona costera ni tampoco al norte de San Antonio. Las rocas que forman esta unidad dan lugar a relieves suaves por lo general, con la excepción de algunos acantilados en la orilla del río Rapel.

La facies más característica de la Formación Licancheu consiste en areniscas macizas de color gris oscuro, cemento carbonatado y aspecto compacto. Intercaladas con estas facies localmente se observan escasas capas de potencia centimétrica de limolitas, con abundantes moldes de hojas, de conglomerados clastosoportados con clastos bien redondeados y de niveles fosilíferos con abundantes conchas de

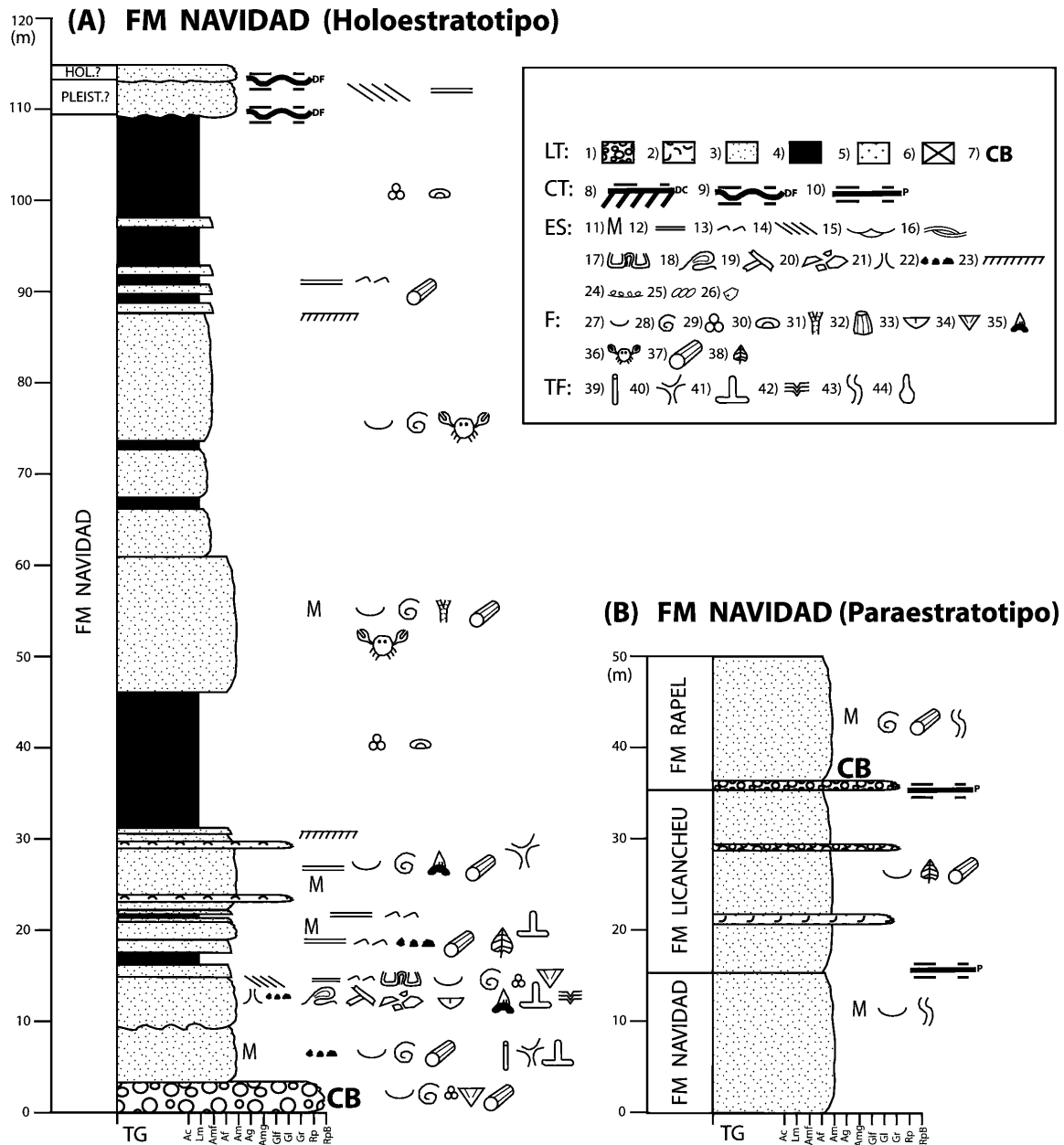


FIG. 4. **A.** Columna del estratotipo de base (Holoestratotipo) de la Formación Navidad; **B.** Columna del estratotipo de techo (Paraestratotipo) de la Formación Navidad (ver figura 3 para localización de las columnas). **TG:** Tamaño de grano. **Ac:** arcilla, **Lm:** Limo, **Amf:** arena muy fina, **Af:** arena fina, **Am:** arena media, **Ag:** arena gruesa, **Amg:** arena muy gruesa, **Gif:** gravilla fina, **Gi:** gravilla, **Gr:** grava, **Rp:** ripio, **Rpb:** Ripio de bolones, **LT:** Litología. 1. conglomerado, 2. coquina, 3. arenisca, 4. lutita y limolita, 5. granito, 6. tramo cubierto, 7. conglomerado basal de la unidad. **CT:** Tipo de contacto entre unidades. 8. discordancia, 9. disconformidad, 10. paraconformidad. **ES:** Estructuras sedimentarias. 11. estructura maciza, 12. laminación paralela, 13. ondulitas asimétricas, 14. estratificación cruzada planar, 15. estratificación cruzada en artesa, 16. estratificación cruzada 'hummocky', 17. laminación convoluta, 18. pliegues sinsedimentarios ('slumps'), 19. capas deslizadas ('slides'), 20. capas brechificadas, 21. estructuras de escape de fluidos, 22. intraclastos, 23. superficie firme ('firm ground'), 24. lag de clastos, 25. clastos imbricados, 26. clastos líticos flotantes. **F:** Fósiles. 27. bivalvos, 28. gastrópodos, 29. foraminíferos, 30. ostrácodos, 31. briozoos, 32. balanoideos, 33. braquiópodos, 34. corales solitarios, 35. dientes de tiburón, 36. crustáceos, 37. troncos y fragmentos vegetales indeterminados, 38. moldes de hojas. **TF:** Trazas fósiles. 39. *Skolithos*, 40. *Thalassinoides*, 41. *Ophiomorpha*, 42. traza de escape, 43. bioturbación indiferenciada, 44. perforaciones ('borings'). **PLEIST.?:** arenas y conglomerados de paleoplayas y paleodunas de probable edad pleistocena. **HOL.?:** arenas de paleodunas de probable edad holocena.

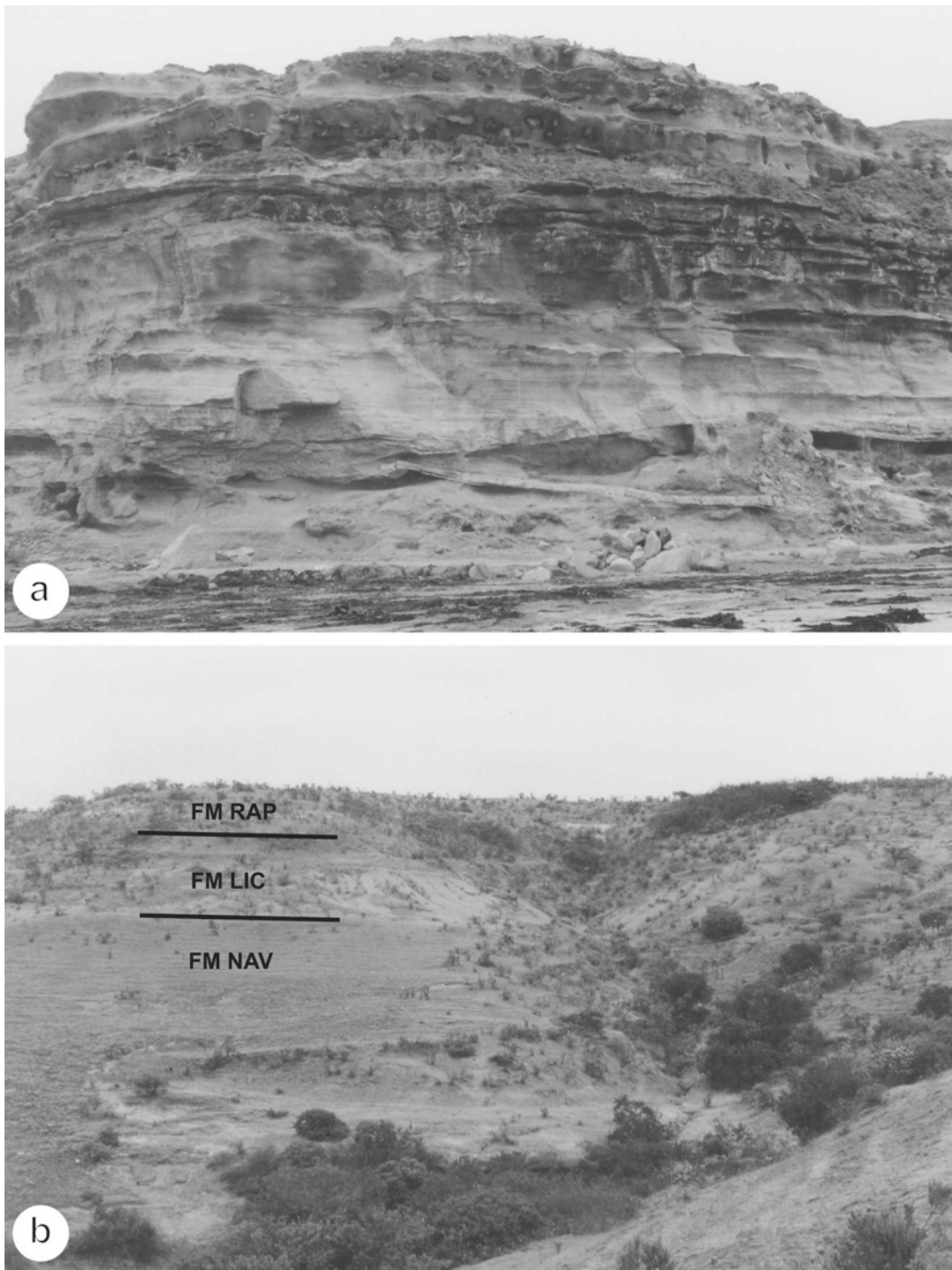


FIG. 5. Fotos de los estratotipos de base y techo de la Formación Navidad. **a.** Estratotipo de base (Holoestratotipo) en Punta Perro mostrando una sucesión de areniscas y limolitas. La foto corresponde aproximadamente a los 30 m basales de la columna (ver figura 3 para su localización y figura 4 para observar la columna). El conglomerado de base no es visible en la foto y se encuentra en la zona de playa, al oeste del acantilado; **b.** Estratotipo de techo (Paraestratotipo) situado al norte del cerro Navidad (ver figura 3 para su localización). La foto corresponde a la totalidad de la columna (ver figura 4). En este sector se pueden observar las formaciones Navidad (Fm Nav), Licancheu (Fm Lic) y Rapel (Fm Rap).

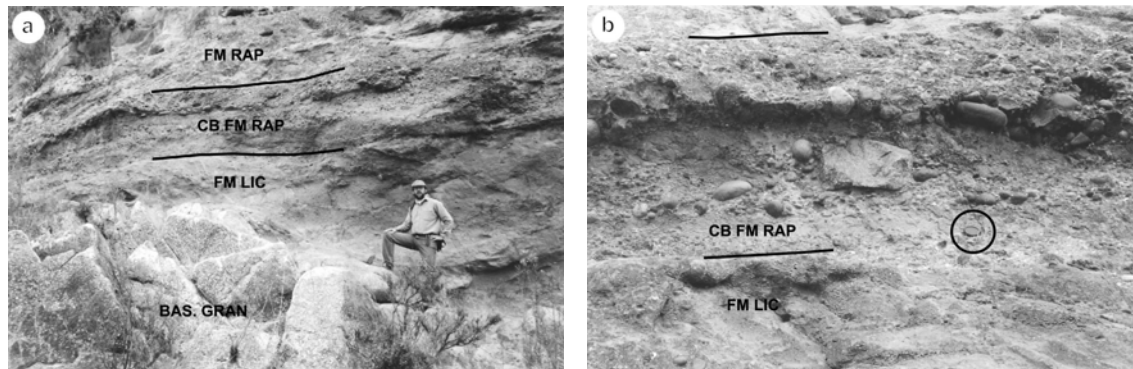


FIG. 6. Foto de la parte basal del estratotipo de la Formación Rapel (Holoestratotipo) situado a unos 500 m de la localidad de Rapel, en la orilla sur del río del mismo nombre (ver figura 3 para su localización y figura 7 para observar la columna). a. De base a techo se pueden observar el basamento granítico (Bas. Gran), la Formación Licancheu (Fm Lic), el conglomerado de base de la Formación Rapel (Cb Fm Rap) y la continuación de la Formación Rapel (Fm Rap). La foto corresponde aproximadamente a los 10 m basales de la columna (ver figura 7); b. Detalle del conglomerado basal de la Formación Rapel. El protector de cámara usado como escala se destaca con un círculo.

moluscos. En las inmediaciones de Rapel, sobre el contacto con el basamento granítico, se observan fósiles de balanoideos en posición de vida y por encima una sucesión de unos 5 m de potencia formada por facies de areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada en artesa. La Formación Licancheu se reconoce fácilmente en terreno debido a que presenta un color gris oscuro característico, a que las capas de areniscas generalmente se rompen en abundantes fragmentos de tamaño centimétrico y consistencia bastante dura, a la presencia de finas intercalaciones de conglomerados y de capas ricas en fósiles de moluscos y a que presentan un escaso desarrollo de vegetación actual. No se observan variaciones laterales de facies significativas en esta unidad. Localmente, contiene abundantes fósiles de moluscos (Tavera, 1979), hojas y troncos. También presenta los icnofósiles *Ophiomorpha* isp. y *Skolithos* isp. En esta formación se aprecia un empobrecimiento general, en géneros y especies, en la fauna de moluscos con respecto a la Formación Navidad que alcanza su máxima declinación en la Formación Rapel. También se observa la aparición de varias especies nuevas (Covacevich y Frassinetti, 1986).

EDAD

No se encontraron foraminíferos ni otro tipo de micro o macrofósiles u otro tipo de indicadores que permitiesen acotar la edad de esta formación. No

obstante, las relaciones estratigráficas indicarían una edad pliocena indeterminada para esta unidad, debido a que la Formación Licancheu sobreyace a la Formación Navidad del Mioceno Tardío-Plioceno Temprano y subyace a la Formación Rapel la cual subyace, a su vez, a la Formación La Cueva del Plioceno.

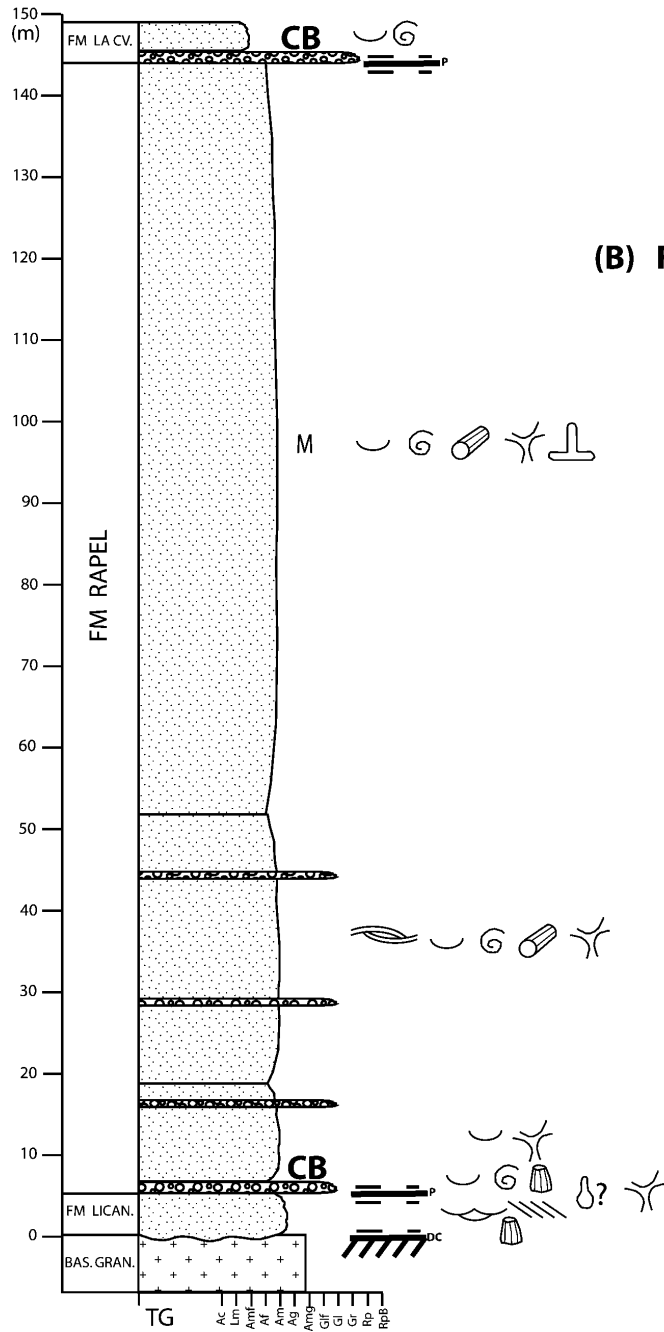
CORRELACIONES

No se han encontrado otras formaciones neógenas marinas a lo largo de Chile que presenten facies sedimentarias o un contenido fosilífero similar al de la Formación Licancheu. Por lo tanto, no fue posible establecer correlaciones confiables con otras unidades.

AMBIENTE SEDIMENTARIO

La presencia de balanoideos adheridos al basamento granítico indicaría que tras la sedimentación de la Formación Navidad probablemente se produjo una regresión y posterior transgresión marina. La presencia de estos fósiles, la neta predominancia de arenas, la existencia de las trazas fósiles *Ophiomorpha* isp. y *Skolithos* isp. y de areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada en artesa, indicarían un ambiente marino somero de alta energía (Encinas *et al.*, 2003a). La ausencia general de estructuras en las facies de areniscas macizas, que probablemente se debe a la buena selección que presentan las arenas, no permite una mejor identificación del ambiente.

(A) FM RAPEL (Holoestratotipo)



(B) FM LICANCHEU (Holoestratotipo)

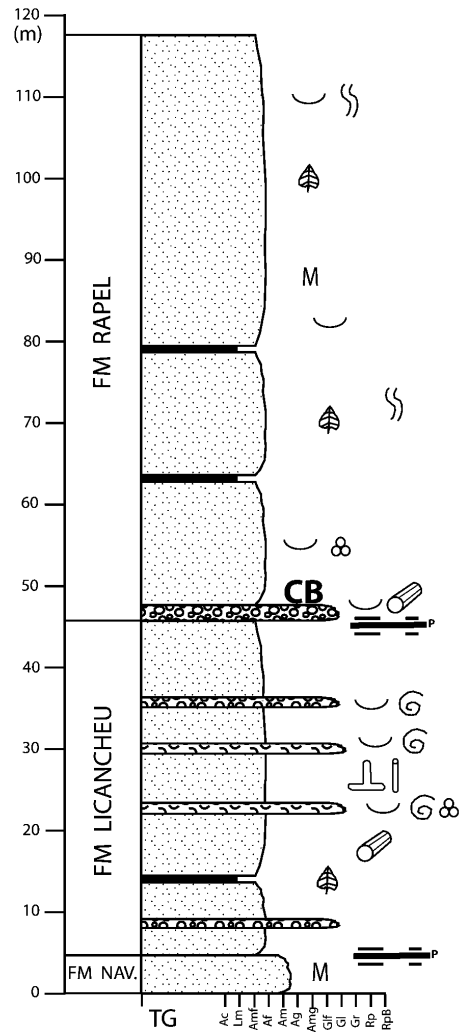


FIG. 7. Columnas de los Holoestratotipos de las formaciones Rapel y Licancheu (ver figura 3 para localización de las columnas). La leyenda de esta figura se encuentra en la figura 4.

ESTRATOTIPO

El holoestratotipo de la Formación Licancheu se define en la localidad homónima. Se escoge este estratotipo porque en él es donde mejor se observan las características de esta unidad, por su facilidad de acceso y porque es la zona donde Tavera (1979) recolectó la mayor cantidad de fósiles de moluscos en el único trabajo realizado hasta la fecha sobre la fauna de esta unidad. La base de la columna se encuentra en la carretera entre Navidad y Licancheu, la mayor parte de la misma en el acantilado sur del río Rapel, en una zona donde hay una estatua de la Virgen, y el techo en la carretera entre Licancheu y Rapel (coordenadas UTM: N6241058-E242836) (Fig. 3b). La Formación Licancheu tiene una potencia de 41 m en esta zona (Figs. 7b y 8). En la base presenta un contacto plano y nítido con la Formación Navidad, con la que es concordante, y en el techo un contacto del mismo tipo con el conglomerado basal de la Formación Rapel, con la que también presenta concordancia. Se caracteriza por la presencia de areniscas de grano fino y escasas capas de conglomerados, limolitas y niveles fosilíferos ricos en conchas de moluscos. Localmente, se observan abundantes fósiles de bivalvos, gastrópodos, hojas y troncos. Los estratos se presentan horizontales.

FORMACIÓN RAPEL

Esta formación está compuesta de areniscas y escasos conglomerados y limolitas. Sobreyace en paraconformidad a la Formación Licancheu y discordantemente al basamento granítico. Subyace en paraconformidad a la Formación La Cueva. En el contacto con la Formación Licancheu se observa un conglomerado clastosoportado y fosilífero de unos 80 cm de potencia, formado por clastos centimétricos de andesita bien redondeados, que ha sido interpretado como un conglomerado transgresivo marino (Buatois y Encinas, 2006) (Fig. 6). Esta unidad tiene un espesor máximo de 154 m, aunque en las proximidades de La Estrella la Formación La Cueva se apoya directamente sobre el basamento. Esto implica que el espesor de la Formación Rapel varía entre 154 y 0 m. Aflora de manera continua, por lo general, en los cerros situados en las cercanías de la costa aproximadamente entre San Antonio, al norte y Punta Topocalma, al sur (Fig. 1). No existen afloramientos de esta formación en la zona costera. Los mejores afloramientos se ubican en los acantilados de la orilla

sur del río Rapel, al este de la localidad del mismo nombre, y en la cuesta de Los Leones, en la carretera Rapel-Litueche (Fig. 3b). Esta unidad forma relieves suaves en las zonas con cerros y acantilados en las orillas del río Rapel.



FIG. 8. Foto del estratotipo de la Formación Licancheu en la localidad del mismo nombre, orilla sur del río Rapel (ver figura 3 para localización de la columna). La foto corresponde al intervalo que va aproximadamente de los 20-40 m de la parte basal de la columna (ver figura 7). El afloramiento mostrado en la foto corresponde por completo a la Formación Licancheu y muestra una sucesión de areniscas y escasos conglomerados. La cruz que aparece en la foto tiene aproximadamente un metro de altura.

La Formación Rapel se caracteriza, por lo general, por la presencia de facies de areniscas de grano fino, color amarillento y aspecto macizo que presentan una estratificación muy mal definida y forman capas de potencias decimétricas a métricas, constituyendo las facies más características de esta unidad y formando sucesiones de decenas de metros de espesor. Sin embargo, en la orilla sur del río Rapel, cerca del pueblo con el mismo nombre, esta formación presenta, en su parte basal, por encima de su contacto con el basamento granítico, una sucesión de unas pocas decenas de metros de potencia, caracterizada por tamaños de grano más gruesos y en la que se distinguen como

facies más características aquellas formadas por conglomerados mal seleccionados, clasto y matriz soportados y con abundantes clastos angulosos; facies de areniscas macizas con clastos angulosos del basamento de tamaños centimétricos a métricos y facies de areniscas con estratificación cruzada 'hummocky' en las cuales a veces es posible observar clastos flotantes del basamento de tamaños decimétricos (Encinas *et al.*, 2003a). Esta facies constituye capas decimétricas a métricas. Intercaladas con las facies de areniscas macizas de grano fino, se observan muy escasas intercalaciones centimétricas de limolitas que generalmente presentan abundantes moldes de hojas. Esta unidad no presenta variaciones laterales de facies significativas. Su contenido fosilífero es escaso, por lo general, y consiste en fósiles de moluscos (Tavera, 1979), hojas y troncos. También se observan los icnofósiles *Thalassinoides* isp. y *Ophiomorpha* isp.

EDAD

Al igual que en la Formación Licancheu, no se encontraron foraminíferos ni otro tipo de micro o macrofósiles u otro tipo de indicadores que permitiesen acotar la edad de la Formación Rapel. No obstante, las relaciones estratigráficas indicarían una edad pliocena indeterminada para esta unidad, debido a que la Formación Rapel sobreyace a la Formación Licancheu, la cual sobreyace, a su vez, a la Formación Navidad del Mioceno Tardío-Plioceno Temprano y subyace a la Formación La Cueva del Plioceno.

CORRELACIONES

Como se indicó para la Formación Licancheu, no se han encontrado otras formaciones Neógenas marinas a lo largo de Chile que presenten facies sedimentarias o un contenido fosilífero similar al de la Formación Rapel. Por lo tanto, no fue posible establecer correlaciones fiables con otras unidades.

AMBIENTE SEDIMENTARIO

En las proximidades de Rapel, sobreyaciendo al basamento granítico, se observa la presencia de una sucesión de unos 20 m de potencia en la que predominan capas constituidas por sedimentos de grano grueso. Las facies más características de las mismas las constituyen facies de conglomerados mal seleccionados, clasto a matriz soportados, interpretadas como

depositadas por flujos de detritos y facies de areniscas macizas con grandes clastos angulosos, interpretadas como depositadas por transportes en masa de arena ('sandy debris flows'). La presencia de este tipo de facies sugiere que, al menos la parte basal de esta formación, se depositó en un ambiente de abanico deltaico ('fan-delta'). Por encima de estas facies se encuentran facies de areniscas con estratificación cruzada 'hummocky'. Este tipo de estructuras sedimentarias se interpretan generalmente como producto de la actividad de olas de tormentas (*e.g.*, Swift *et al.*, 1983), siendo típicas de ambientes de plataforma situados entre el nivel del oleaje en tiempo normal y el nivel del oleaje en tiempo de tormentas, aunque también pueden formarse en el frente de playa (Walker y Plint, 1992). Sin embargo, Mutti *et al.* (1996, 2000) proponen que estas estructuras pueden formarse también por el efecto de grandes avenidas en sistemas de deltas de abanicos ('fan-deltas') y sistemas deltaicos fluviales ('river-deltas') dominados por flujos catastróficos ('flood-dominated deltas'). Sobreyaciendo a las areniscas con estratificación cruzada 'hummocky', aparecen sucesiones de areniscas macizas de grano fino en las que se encontraron trazas fósiles *Thalassinoides* isp. y *Ophiomorpha* isp. Es probable que esta facies presente estructuras sedimentarias, pero que éstas no se puedan distinguir debido a la buena selección de las arenas. La predominancia de arenas, la presencia de estratificación cruzada 'hummocky' y de las trazas fósiles *Thalassinoides* isp. y *Ophiomorpha* isp. indicarían un ambiente marino somero de alta energía (Walker y Plint, 1992; Buatois *et al.*, 2002). La Formación Rapel, por tanto, presenta una parte basal en la que predominan sedimentos de grano grueso y que se interpreta como depositada por abanicos deltaicos y una parte superior de grano más fino e interpretada como depositada en un ambiente marino somero de alta energía.

ESTRATOTIPO

El holoestratotipo de esta unidad se define en la margen sur del río Rapel, unos 500 m al sureste del pueblo de Rapel (coordenadas UTM: N6240300-E247950) (Fig. 3b). Se escoge este estratotipo porque es el único sector donde afloran la base y techo de la Formación Rapel, por su facilidad de acceso, por sus buenas condiciones que permiten observar las facies características de esta formación, al menos en la

parte basal de la columna, y porque en esta zona es donde se han realizado la mayor cantidad de los estudios sedimentológicos y paleontológicos (e.g., Cecioni, 1978; Tavera, 1979; Chambers, 1985). La columna comienza en la orilla del río, unos pocos metros al sureste de un afloramiento del basamento granítico, y continúa hasta lo alto del cerro situado al suroeste del río. La Formación Rapel presenta una potencia de unos 140 m en esta zona (Fig. 7a). Sobreyace en paraconformidad a la Formación Licancheu, la cual tiene una potencia de 5 m en este sector y sobreyace, a su vez, al basamento granítico. Subyace en paraconformidad a la Formación La Cueva, que en esta zona presenta un espesor de 2,5 m y muestra un conglomerado en la base. La Formación Rapel presenta un conglomerado transgresivo de unos 0,5 m de potencia que se apoya sobre una superficie firme ('firmground'), desarrollada al techo de la Formación Licancheu, en el que se observan las trazas fósiles ?*Gastrochaenolites* isp. y *Thalassinoides* isp., que penetran en esta unidad y están rellenas por material de la Formación Rapel, representando un ejemplo de la icnofacies de *Glossifungites*. Por encima se sitúa una sucesión de areniscas en las que en la mitad inferior se observa estratificación cruzada 'hummocky' y en la mitad superior areniscas macizas de grano fino, en las que se distinguen restos vegetales y moldes de bivalvos y gastrópodos. Los estratos se presentan horizontales.

FORMACIÓN LA CUEVA

Esta unidad está compuesta de areniscas, escasos conglomerados y muy escasas limolitas. Sobreyace en paraconformidad a la Formación Rapel y discordantemente al basamento granítico. Está cubierta por medio de una disconformidad por depósitos continentales pleistocenos, en algunas zonas. El contacto con la Formación Rapel consiste en una superficie firme ('firmground') y plana desarrollada a techo de esta unidad, en la que se distinguen abundantes perforaciones de tipo ?*Gastrochaenolites* isp., o bien en un contacto erosivo. Por encima de estas superficies se observa un conglomerado clastosoportado de potencia decimétrica, formado por clastos centimétricos y bien redondeados de andesita que ha sido interpretado como un conglomerado transgresivo marino (Buatois y Encinas, 2006) (Fig. 9). El espesor máximo calculado para esta formación es de aproximadamente 100 m en la carre-

tera San Antonio-Rapel, justo al norte del Estero Yali (Fig. 1). Más al sur, en la zona de La Estrella, se estima una potencia similar, aunque los afloramientos generalmente no tienen más de 40 m. Esta formación aflora de manera continua entre las localidades de Rapel y Las Damas al sur, donde forma cerros en forma de mesa que presentan un conglomerado a techo, y entre Rapel y San Antonio al norte, donde forma cerros de relieve suave (Fig. 1). No existen afloramientos de esta formación en la zona costera ni tampoco al norte de San Antonio. Por encima del conglomerado basal, la Formación La Cueva presenta facies de areniscas de color gris claro con abundante estratificación cruzada planar, estratificación cruzada espigada ('herringbone') y en artesa, así como trazas fósiles *Ophiomorpha* isp. y *Thalassinoides* isp., las cuales localmente son muy abundantes. Las facies de areniscas descritas son netamente predominantes y permiten diferenciar fácilmente esta formación en terreno. Localmente, presenta algunas intercalaciones de conglomerados clastosoportados, que muestran contactos erosivos y que forman cuerpos con forma de canales y potencias decimétricas a métricas. En los cerros situados entre Litueche y Las Damas, se observan capas de conglomerados de unos pocos metros de potencia y lateralmente muy continuos, situados por encima de las facies de areniscas. Dichos conglomerados son clasto a matriz soportados, presentan una abundante matriz volcánica y están formados por grandes clastos, en su mayoría volcánicos, que pueden llegar a alcanzar varios metros de diámetro (Encinas *et al.*, 2006). Estos conglomerados no se observan en los afloramientos al norte del río Rapel donde sí se observan intercalaciones de areniscas muy ricas en clastos de pómez, que indicarían la existencia de un vulcanismo explosivo sincrónico con la sedimentación. Localmente, contiene abundantes fósiles de moluscos (Brüggen, 1950; Herm, 1969) y, en menor medida, huesos de cetáceos y dientes de tiburón (Encinas *et al.*, 2006).

EDAD

La edad de esta formación se considera pliocena indeterminada, basada en fósiles de moluscos y dientes de tiburón, así como en dataciones radiométricas efectuadas en un clasto de escoria (K-Ar en roca total) y en clastos de pómez ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita y anfíbola) contenidos en la sucesión (Herm, 1969; Encinas *et al.*, 2006).

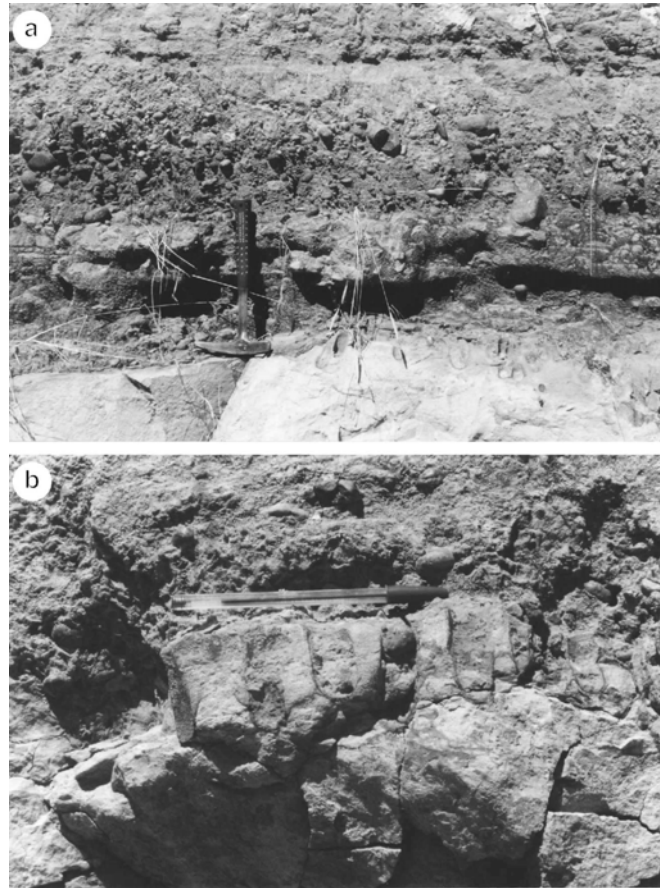


FIG. 9. **a.** Conglomerado de base de la Formación la Cueva en la cuesta de Los Leones, carretera de Rapel a Litueche (figura 3). La punta del martillo marca la base del conglomerado y el límite con la Formación Rapel; **b.** Detalle de la base del conglomerado en el que se puede observar una superficie firme ('firmground') con abundantes perforaciones de tipo ? *Gastrochaenolites* isp. debajo del bolígrafo.

CORRELACIONES

Esta formación ha sido correlacionada con la formación Bahía Horcón (~32°40'S) por su similar contenido faunístico (Tavera, 1960).

AMBIENTE SEDIMENTARIO

La presencia de areniscas con abundante estratificación cruzada planar, espigada y en artesa así como las abundantes trazas fósiles de *Ophiomorpha* isp. y *Thalassinoides* isp., indican un ambiente marino somero de alta energía (Encinas *et al.*, 2006). Los conglomerados volcanoclásticos situados en el techo de la sucesión, en el área situada entre Litueche y Las Damas, han sido interpretados como depósitos de lahares (Encinas *et al.*, 2006).

ESTRATOTIPO

La definición de un estratotipo para la Formación La Cueva presenta el problema de que no se conoce cuál es el techo de la misma. Es probable que la etapa final de la sedimentación de esta unidad y relleno de la cuenca, corresponda a los depósitos de lahares ubicados en el techo de la sucesión en el área situada entre Litueche y Las Damas. Se define entonces un estratotipo de base en la localidad de La Estrella (paraestrotipo) (Fig. 10a) y un estratotipo de techo en la localidad de El Cajón (holoestrotipo) (Fig. 10b). Ambas localidades se encuentran tan sólo a unos 5 km de distancia. A pesar de que en la carretera San Antonio-Rapel, justo al norte del estero Yali, existe una sección continua de la Formación La Cueva, preferimos ubicar los estratotipos en las citadas loca-

lidades, por un lado porque se encuentran en la zona donde se han realizado la mayor parte de los estudios estratigráficos y paleontológicos en esta formación (Philippi, 1887; Brüggén, 1950; Herm, 1969; Cecioni, 1978) y por otro, porque en esta área afloran los depósitos de lahares a los que consideramos como facies importantes dentro de esta unidad.

ESTRATOTIPO DE BASE (PARAESTRATOTIPO)

Se encuentra ubicado en la carretera entre Las Damas y La Estrella, justo al comienzo de las primeras casas de la última localidad (coordenadas UTM:

N6212104-E254787) (Fig. 3a). La columna fue medida en el corte de la carretera y tiene un espesor de 23 m (Figs. 10a y 11a). Presenta un contacto discordante con el basamento granítico y por encima una sucesión de areniscas y conglomerados con contactos erosivos, por lo general. Las areniscas son macizas o presentan estratificación cruzada planar y laminación paralela, en menor medida. Se observa intensa bioturbación (*Ophiomorpha* isp. y *Thalassinoides* isp.) responsable del aspecto macizo de algunas capas. Los conglomerados son clastosoportados con clastos bien redondeados y generalmente imbricados. No se observan fósiles. Las capas son horizontales.

(A) FM LA CUEVA (Paraestratotipo)

(B) FM LA CUEVA (Holoestratotipo)

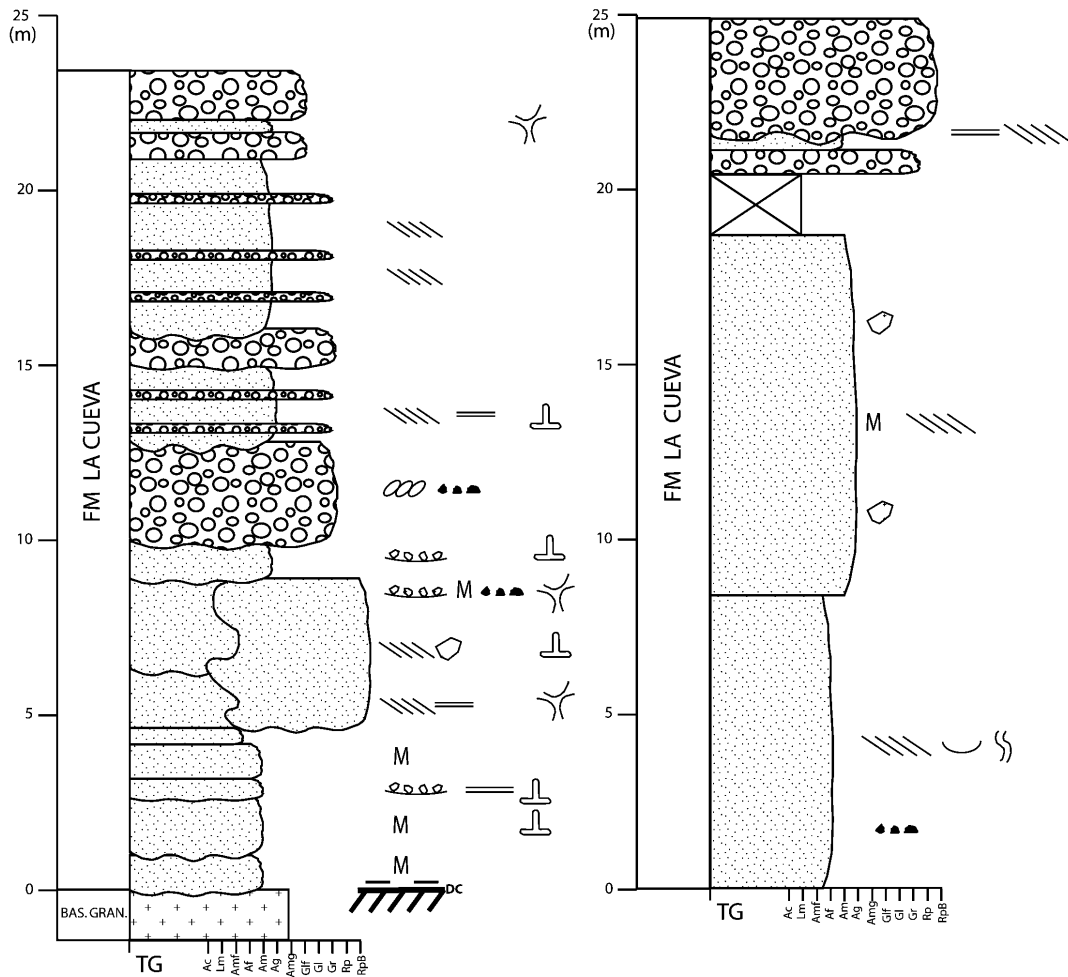


FIG. 10. Columnas del estratotipo de base (Paraestratotipo) y estratotipo de techo (Holoestratotipo) de la Formación La Cueva (ver figura 3 para localización de las columnas). **Bas.Gran.:** Basamento granítico. La leyenda de esta figura se encuentra en la figura 4.

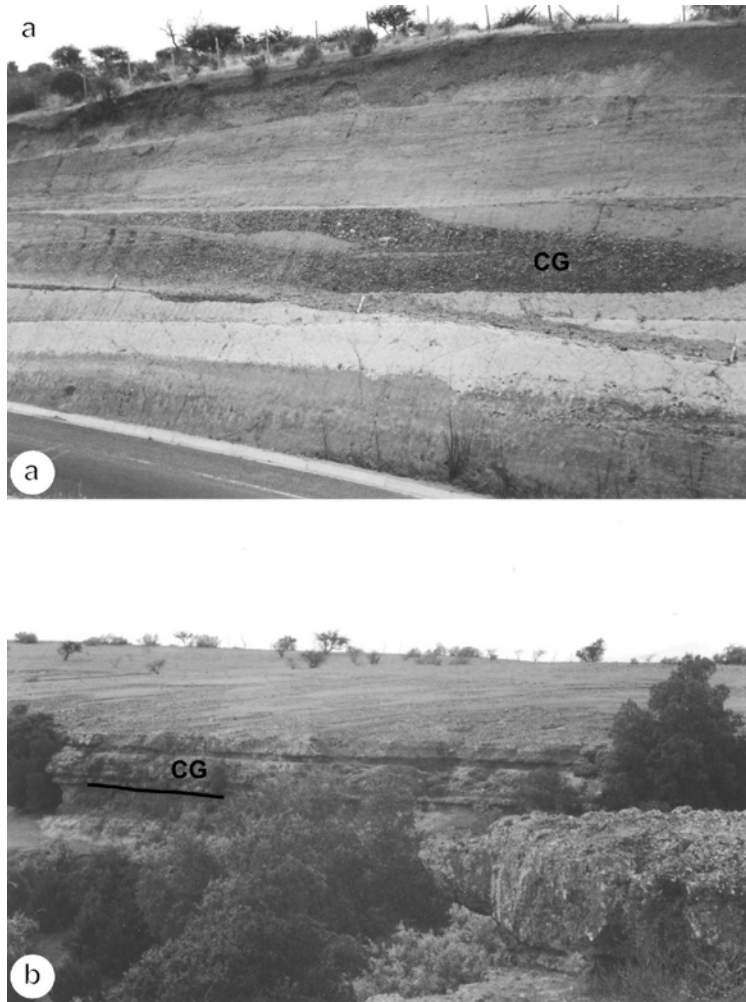


FIG. 11. Fotos de los estratotipos de base y techo de la Formación La Cueva. **a.** Estratotipo de base (Paraestratipo) en La Estrella mostrando una sucesión de areniscas y conglomerados (CG) (ver figura 3 para su localización y figura 10 para observar la columna). La foto corresponde a la mayor parte de la columna; **b.** Estratotipo de techo (Holoestratipo) en El Cajón mostrando una sucesión de areniscas y un conglomerado depositado por un lahar a techo (CG) (ver figura 3 para su localización y figura 10 para observar la columna). La foto corresponde aproximadamente a los últimos 15 m de la columna.

ESTRATOTIPO DE TECHO (HOLOESTRATOTIPO)

Aunque se escogió la zona de El Cajón como estratotipo de techo debido a su proximidad con el estratotipo de base, todos los afloramientos situados en los cerros que se encuentran entre El Cajón y Litueche son correlacionables y similares entre sí. El estratotipo se sitúa en el cerro Los Chupones, en las inmediaciones de la localidad de El Cajón. Para acceder al mismo se toma la carretera entre Las Damas y La Estrella y a unos 3 km de Las Damas un desvío a El Cajón. El cerro está a aproximadamente un km al

norte de dicho desvío (coordenadas UTM: N6214254-E251014) y tiene forma de mesa (Fig. 3a). La columna tiene 25 m de potencia y consiste en areniscas con estratificación cruzada planar y areniscas macizas en la base y conglomerados clasto a matriz soportados y con abundante matriz volcánica (depósitos de lahares) en el techo (Figs. 10b y 11b). Las areniscas con estratificación cruzada planar, localmente contienen abundantes moldes de bivalvos. Las capas se presentan horizontales.

DISCUSIÓN

El objeto de proponer una nueva clasificación estratigráfica para los depósitos marinos neógenos del área de Navidad obedece fundamentalmente a dos razones, que se explican con detalle más adelante: **1.** La mayor parte de los autores confieren el rango de miembros a algunas de las unidades definidas en este trabajo, mientras que en el mismo se propone que dichas unidades deben ser elevadas al rango de formaciones. **2.** Estamos en desacuerdo con las clasificaciones anteriores en algunos casos porque las unidades definidas corresponden, en nuestra opinión, no a unidades litoestratigráficas sino tan sólo a facies diferentes de la misma unidad, por discrepancias con el rango de las unidades o con los nombres propuestos para las mismas y porque la mayor parte de las clasificaciones no obedecen las reglas establecidas por la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980) para su definición.

ELEVACIÓN DE PARTE DE LAS UNIDADES DEFINIDAS ANTERIORMENTE AL RANGO DE FORMACIONES

Las tres unidades basales propuestas en este trabajo (formaciones Navidad, Licancheu y Rapel) son equivalentes a los miembros Navidad, Licancheu y Rapel de Tavera (1979), es decir, corresponden a los mismos cuerpos litológicos. Sin embargo, a pesar de que los miembros definidos por este autor presentan litologías en general similares entre sí, la existencia de discontinuidades regionales en el contacto entre los mismos aconseja que éstos sean elevados al rango de formaciones, como señala la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999). El contacto entre las Formaciones Navidad y Licancheu, a pesar de que se trata de un contacto plano en el que no se observa erosión, bioturbación ni un conglomerado transgresivo, pone en contacto dos unidades con diferencias litológicas fácilmente reconocibles en terreno y en las que una de ellas (Formación Navidad) se formó en un ambiente marino profundo, mientras que la otra (Formación Licancheu) se formó en un ambiente marino somero, lo que implica que debió producirse un hiato entre el depósito de ambas unidades. Es probable que la cuenca sufriera emersión tras la sedimentación de la Formación Navidad, ya que la Formación Licancheu, en los alrededores de Rapel, se apoya sobre el basamento

granítico en el que se observan balanoideos en posición de vida, lo que probablemente implica que se produjo una regresión y posterior transgresión entre la sedimentación de ambas unidades. No se descarta la existencia de una discordancia cartográfica entre las Formaciones Licancheu y Navidad, ya que el contacto entre ambas unidades pasa de los 65 m s.n.m. al norte del cementerio de Navidad a los 10 m s.n.m. en Licancheu, situado a tan sólo 4 km de distancia del punto anterior. Sin embargo, no podemos saber si esto se debe a una discordancia angular entre estas formaciones o a que ambas unidades sean concordantes y se encuentren basculadas en esta zona. Tampoco se puede descartar la presencia de una falla entre las citadas localidades, a pesar de que no se evidenció en terreno.

Con respecto a los contactos entre las formaciones Licancheu-Rapel y Rapel-La Cueva, en ambos se observa la presencia de superficies firmes ('firmgrounds') con abundantes trazas fósiles (?*Gastrochaenolites* isp. y *Thalassinoides* isp.), rellenas por material de la unidad sobreyacente, y un conglomerado transgresivo marino sobre las mismas (Buatois y Encinas, 2006) (Figs. 6 y 9). La presencia de las superficies firmes y de trazas rellenas por material de la unidad sobreyacente, características de la icnofacies de *Glossifungites*, implican que se produjeron hiatos de duración desconocida entre la sedimentación de estas unidades, mientras que la presencia de los conglomerados transgresivos indicaría que se produjo una regresión y posterior transgresión marina.

Todos los contactos descritos se consideran paraconformidades, ya que implican un lapso temporal sin sedimentación, las unidades que separan son concordantes entre sí (al menos a escala de afloramiento) y las superficies de contacto son planas o bien no presentan cavidades erosivas de más de un metro de profundidad, límite convencional que se utiliza para diferenciar una paraconformidad de una disconformidad (Vera, 1994). Dichas paraconformidades son reconocibles en varias columnas distribuidas a lo largo del área y alejadas decenas de kilómetros entre sí, por lo que se consideran discontinuidades regionales, en oposición a las discontinuidades locales que son aquellas visibles tan sólo en una sección estratigráfica concreta (Vera, 1994). El rango regional de estas discontinuidades, que es debido a que éstas han sido

generadas por cambios relativos del nivel del mar, aconseja la elevación de las unidades que limitan al rango de formaciones (Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999), como se señaló anteriormente.

DISCREPANCIAS CON LAS CLASIFICACIONES ANTERIORES

Darwin (1846) describió por primera vez los estratos marinos neógenos del área de Navidad. A juzgar por sus descripciones no parece que este autor haya querido hacer una definición formal de la misma (Hoffstetter *et al.*, 1957). Aparentemente, tan sólo estudió los estratos que afloran en los acantilados de la zona costera y que corresponden a la Formación Navidad y no estudió las Formaciones Licanheu, Rapel y La Cueva, que afloran más hacia el interior.

Steinmann (1895) definió el Piso de Navidad que más tarde Brüggén (1934) dividió en dos pisos diferentes. Ambos autores consideraron a la Formación Navidad de Darwin (1846) como una unidad cronoestratigráfica, lo que no consideramos correcto, ya que dicha unidad constituye un conjunto de estratos caracterizados por sus características litológicas distintivas y no por el periodo de tiempo que abarcan (Murphy y Salvador, 1999). Este aspecto ha sido también criticado por otros autores (Cecioni, 1978).

Tavera (1968, 1979) es el primer autor que dividió la Formación Navidad originalmente definida por Darwin (1846) en tres miembros: Navidad, Licanheu y Rapel. Sin embargo, Tavera (1968, 1979) utilizó el mismo nombre para designar la Formación y el Miembro Navidad a pesar de que, de acuerdo a la Guía Estratigráfica Internacional, no debe emplearse el mismo nombre de la unidad original para designar alguna de sus subdivisiones (Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999). Además, este autor utilizó el nombre de Licanheu para su miembro intermedio cuando el nombre correcto de esta localidad es el de Licanheu. Aparte de los problemas citados con los nombres de las unidades consideramos que la diferenciación de las mismas efectuada por Tavera (1968, 1979) es acertada y corresponde a cuerpos litológicos diferenciables entre sí y separados por discontinuidades. Consideramos los miembros de Tavera equivalentes a las Formaciones Navidad, Licanheu y Rapel definidas en este trabajo. No obstante, pensamos que deben ser elevadas al rango de formaciones por las razones expuestas en el apartado anterior.

Con respecto a la clasificación de Etchart (1973), de acuerdo a sus descripciones el conjunto de su

Formación La Boca más el Miembro I de su Formación Navidad son equivalentes a la Formación Navidad definida en este trabajo, mientras que los Miembros II y III de su Formación Navidad son equivalentes a nuestras formaciones Licanheu y Rapel. Este autor describió la existencia de una discordancia angular entre sus formaciones La Boca y Navidad. En nuestro trabajo de terreno no se encontró ninguna discordancia angular como la descrita por Etchart (1973), la que tampoco es descrita por otros autores posteriores (Cecioni, 1978; Tavera, 1979; Gana *et al.*, 1996; Wall *et al.*, 1996). De acuerdo a la descripción de las localidades donde Etchart (1973) observó dicho contacto y a las fotografías de las mismas, llegamos a la conclusión de que la supuesta discordancia corresponde tan sólo a capas deslizadas ('slides') que están sobreyacidas por capas horizontales, todas ellas pertenecientes a la formación Navidad (*sensu* este trabajo), que son comunes en las zonas descritas por el citado autor y que son facies características de ambientes sedimentarios de talud submarino debido a la inestabilidad de estos ambientes.

No estamos de acuerdo con la agrupación que hace Cecioni (1978) de las unidades sedimentarias marinas del Cretácico, Eoceno y Neógeno dentro del Grupo Navidad. El utilizar un nombre clásico como el de Navidad para designar una unidad diferente a la original crea confusión (Hedberg, 1980). Por otro lado, tampoco estamos de acuerdo con la división de la formación neógena Punta Perro-La Era. El Miembro I es equivalente a la mayor parte de nuestra Formación Navidad. Sin embargo, el Miembro II de este autor es equivalente a la parte superior de la Formación Navidad y, aparentemente, a la Formación Licanheu. Cecioni (1978) incluyó la parte superior de la Formación Navidad en este miembro porque observó un contacto erosivo, así como una leve discordancia, entre una capa de areniscas de 8 m de potencia y unas limolitas en la parte noroeste de Punta Perro. La inclusión de dicha capa como parte de su Miembro II ha sido criticada por otros autores (Martínez-Pardo y Valenzuela, 1979; Chambers, 1985). En nuestra opinión, la citada capa de areniscas constituye tan sólo una facies de areniscas macizas. Este tipo de facies son bastante típicas de la Formación Navidad a la que consideramos pertenece. No es raro que dichas facies de areniscas muestren contactos erosivos y un manto ligeramente diferente al de las capas subyacentes, pero estos obedecen a causas sedimentarias y no tectónicas. Por otro lado, Cecioni (1978) describe como Miembro III lo que para nosotros no es más que

el conglomerado basal de la Formación Rapel y que, por tanto, debe formar parte de la misma unidad. Finalmente, Cecioni (1978) definió de manera formal la Formación La Cueva, primero descrita por Brüggén (1950). Sin embargo, de acuerdo a sus descripciones, este autor incluyó dentro de esta formación algunos estratos que nosotros pensamos pertenecen a la Formación Navidad (e.g., unas capas de limolitas negras que afloran cerca de Pupuya y que, de acuerdo a nuestros estudios, presentan foraminíferos típicos de la Formación Navidad). Además, aparte de la Formación La Cueva, este autor definió la Formación Los Peumos, que sobreyace a la anterior, en la localidad del mismo nombre, a unos 7 km de La Cueva (Fig. 3a). Entre ambas localidades los estratos se presentan horizontales, formando sucesiones similares y perfectamente correlacionables entre sí. En nuestra opinión la supuesta Formación Los Peumos de Cecioni (1978) tan sólo corresponde a las capas superiores de la Formación La Cueva.

Gana *et al.* (1996) y Wall *et al.* (1996), al contrario que los citados autores, consideraron la Formación Navidad como una unidad continua, es decir, no encuentran razones para establecer divisiones en la misma. Nuestros estudios, sin embargo, indicarían la presencia de unidades con características litológicas distintivas y separadas por discontinuidades.

Finalmente, con respecto a los depósitos marinos que afloran entre San Antonio y Valparaíso, sobre la base de los nuevos antecedentes paleontológicos y sedimentológicos presentados en este trabajo que indican edades, facies y ambientes de sedimentación similares para la Formación Navidad y las 'capas de Lo Abarca', consideramos que la última unidad también debe ser nombrada como Formación Navidad. Las 'coquinas de El Tabo-San Antonio' serían equivalentes al conglomerado/coquina basal de las 'capas de Lo Abarca' de acuerdo a los estudios paleontológicos realizados por Covacevich y Frassinetti (1990), que indican faunas similares. Creemos, por tanto, que se deben abolir las denominaciones informales de 'coquinas de El Tabo-San Antonio' y 'capas de Lo Abarca' y nombrar estas unidades como Formación Navidad, nombre más antiguo y con más arraigo en la literatura, tal y como establece la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980).

Para concluir, el nuevo esquema estratigráfico comprende las formaciones neógenas Navidad, Licancheu, Rapel y La Cueva. Las tres primeras son equivalentes a los miembros Navidad, Lincancho y Rapel de

Tavera (1968, 1979). Sin embargo, preferimos elevar dichas unidades al rango de formaciones debido a que presentan discontinuidades regionales entre ellas (Hedberg, 1980; Murphy y Salvador, 1999). Decidimos mantener los nombres clásicos de las unidades definidas debido a su arraigo en la literatura y a que el cambio de dichos nombres podría generar confusión (Hedberg, 1980). En este sentido conservamos el nombre de Formación Navidad a pesar de que los mejores afloramientos de esta unidad se encuentran en otras localidades, como La Boca o Matanzas, y no en el pueblo de Navidad. La razón es que es un nombre muy arraigado en la literatura y que Darwin (1846), aparentemente, se refirió a los estratos costeros que pertenecen a esta unidad, y no a las otras unidades definidas en este trabajo, cuando mencionó la 'sandstone formation at Navidad'. Consideramos que las 'capas de Lo Abarca' y las 'coquinas de el Tabo-San Antonio' son homologables a la Formación Navidad y deben ser nombradas como tal, debido a que esta denominación es más antigua y tiene mayor arraigo que las otras dos (Hedberg, 1980). Con respecto a la Formación Licancheu, se propone un pequeño cambio de nombre a pesar de que la Guía Estratigráfica Internacional (Hedberg, 1980) aconseja que se debe respetar un nombre estratigráfico publicado repetidamente, aunque tenga una ortografía diferente a la de su derivación geográfica. No obstante, preferimos utilizar el nombre de Licancheu, verdadero nombre de la localidad tipo de esta unidad¹, debido a que Covacevich y Frassinetti (1986), a pesar de que siguen la clasificación de Tavera (1979), aconsejan el uso del término Lincancho para esta unidad, lo que genera confusión. Con la excepción de la modificación del nombre de la Formación Licancheu, tanto ésta como la Formación Rapel corresponden a los miembros Lincancho y Rapel de Tavera (1968, 1979), debido a que estos nombres han sido los más utilizados por la comunidad científica, sobre todo la paleontológica (e.g., Covacevich y Frassinetti, 1990; De Vries y Frassinetti, 2003). Finalmente, definimos la Formación La Cueva, que sería equivalente al conjunto de la formación homónima y Formación Los Peumos, definidas por Cecioni (1978). Preferimos mantener el nombre clásico de Formación La Cueva y no utilizar el de otras localidades cercanas más importantes, como Litueche, Las Damas o La Estrella, debido al arraigo de este nombre en la literatura.

1 Una investigación llevada a cabo en la biblioteca del Instituto Geográfico Militar indica que en diversos mapas y documentos publicados desde el año 1877 hasta la fecha se han utilizado indistintamente los nombres de Lincancho, Licancheu, Lincancho, Lincancho, Lincancho, Lincancho y Licanten para referirse a la misma localidad del área de Navidad. Incluso en algunos casos se utilizan dos nombres diferentes en distintas partes de la misma publicación. Sin embargo, la información proporcionada por la Municipalidad de Navidad indica que el nombre oficial de esta comunidad es el de Licancheu.

CONCLUSIONES

Nuevos estudios estratigráficos, sedimentológicos y paleontológicos nos llevan a proponer de manera formal un nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos neógenos que afloran en el área ubicada entre Valparaíso (~33°S) y Punta Topocalma (~34°30'S). De acuerdo a este nuevo esquema se definen, de base a techo, la Formación Navidad, de edad miocena tardía-pliocena temprana, y las formaciones Licancheu, Rapel y La Cueva, de edad pliocena. Los estratos neógenos que afloran de ma-

nera dispersa entre San Antonio y Valparaíso y que reciben los nombres de 'capas de Lo Abarca' y 'coquinas de El Tabo-San Antonio' se considera que corresponden a la Formación Navidad. Las tres primeras unidades descritas (Navidad, Licancheu y Rapel), clásicamente consideradas como miembros por la mayor parte de los autores, se elevan al rango de formaciones por estar separadas por discontinuidades (paraconformidades) regionales.

AGRADECIMIENTOS

El estudio de A. Encinas fue financiado por el Proyecto Fondecyt 1010691, el Programa MECE Educación Superior UCH0010 y la Beca PG/50/02 del Departamento de Posgrado y Postítulo de la Universidad de Chile. El trabajo de S.N. Nielsen fue financiado por los proyectos Ba675/25 y Ni699/4 de la Deutsche Forschungsgemeinschaft. K.L. Finger fue financiado por el University of California Museum of Paleontology, Estados Unidos de América. Este artículo fue terminado mientras J.P. Le Roux realizaba una estadia en el Hanse Institute for Advanced Study en Delmenhorst, Alemania. Agradecemos cordialmente el financiamiento y apoyo prestado por dichas

instituciones. También queremos agradecer a los revisores D. Frassinetti (Museo Nacional de Historia Natural, Chile), N. Malumán (SEGEMAR y CONICET, Argentina) y G. Vargas (Sociedad Geológica de Chile) así como al editor M. Suárez (Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile) por sus sugerencias en la corrección del manuscrito. Finalmente, queremos agradecer al personal del Servicio Nacional de Geología y Minería de Puerto Varas, especialmente a P. Duhart, por facilitarnos el uso de sus oficinas y computadores en las correcciones finales del manuscrito.

REFERENCIAS

- Achurra, L. 2004. Cambios del nivel del mar y evolución tectónica de la cuenca Neógena de Caldera, III Región. Tesis de Magister (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*: 138 p.
- Barron, J. 2003. Planktonic marine diatom record of the past 18 m.y.: appearances and extinctions in the Pacific and Southern Oceans. *Diatom Research*, **18** (2): 203-224.
- Brüggen, J. 1934. Grundzüge der Geologie und Lagerstättenkunde Chiles. *Heidelberg Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*: 362 p.
- Brüggen, J. 1950. Fundamento de la Geología de Chile. *Instituto Geográfico Militar*: 374 p.
- Buatois, L.; Encinas, A. 2006. La icnofacies de *Glossifungites* en el contacto entre las formaciones Navidad (Miembro Rapel) y La Cueva, Plioceno de la Cordillera de la Costa, Chile: Su significado estratigráfico-secuencial. *Ameghiniana* **43** (1): 3-9.
- Buatois, L.; Mángano, M.; Aceñalozza, F. 2002. Trazas fósiles: señales de comportamiento en el registro estratigráfico. *Museo Paleontológico Egidio Feruglio*: 382 p. Trelew
- Cecioni, G. 1978. Petroleum possibilities of the Darwin's Navidad Formation near Santiago, Chile. *Publicación Ocasional del Museo Nacional de Historia Natural, Chile* **25**: 3-28.
- Cecioni, G. 1980. Darwin's Navidad Embayment Santiago Region, Chile, as a model of the southeastern Pacific shelf. *Journal of Petroleum Geology* **2**: 309-321.
- Chambers, M. 1985. Sedimentology of the Miocene-

- Pliocene Navidad Formation. Central Chile. Tesis de Magíster (Inédito), *The Ohio State University*: 213 p.
- Covacevich, V.; Frassinetti, D. 1986. El género *Cancellaria* en el Mioceno de Chile, con descripción de cuatro especies nuevas (Gastropoda: Cancellariidae). *Revista Geológica de Chile* **28-29**: 33-67.
- Covacevich, V.; Frassinetti, D. 1990. La Fauna de Lo Abarca: Hito biocronoestratigráfico y paleoclimático en el Terciario Superior marino de Chile Central. *In Segundo Simposio sobre el Terciario de Chile*: 51-71. Concepción.
- Darwin, C. 1846. Geological observations on South America. *Smith, Elder and Co.*: 279 p. London.
- De Vries, T.J.; Frassinetti, D. 2003. Range extensions and biogeographic implications of Chilean Neogene mollusks found in Perú. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural* **52**: 119-135. Chile
- Encinas, A. 2006. Estratigrafía y sedimentología de los depósitos marinos mio-pliocenos del área de Navidad (33°00'-34°30'S), Chile central. Implicaciones con respecto a la tectónica del antearco. Tesis de Doctorado (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*: 177 p.
- Encinas, A.; Finger, K.; Nielsen, S.; Suárez, M.; Peterson, D.; Le Roux, J. 2003a. Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca Neógena de Navidad (33°40'S-34°15'S), Chile Central. *In Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas, CD-ROM*: 10 p. Concepción.
- Encinas, A.; Le Roux, J.; Finger, K.; Peterson, D.; Suárez, M.; Nielsen, S. 2003b. Age and Deposition of the Lower Navidad Formation in Central Chile. *In Latinamerican Congress of Sedimentology, No. 3*: 160-161. Bélem-Pará, Brasil.
- Encinas, A.; Finger, K.; Nielsen, S.; Lavenu, A.; Buatois, L.; Peterson, D. 2005. Late Miocene coastal subsidence in central Chile. Tectonic implications. *In International Symposium on Andean Geodynamics, No. 6*: 246-249. Barcelona.
- Encinas, A.; Maksiav, V.; Pinto, L.; Le Roux, J.; Munizaga, F.; Zentilli, M. 2006. Pliocene lahar sediments deposited in a marine delta system, Coastal Cordillera of Central Chile: their relation with avalanche deposits, uplift and porphyry copper systems in the Main Andean Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, **20**: 369-381.
- Etchart, H. 1973. Geología del área San Enrique-Bucalemu, provincia de Santiago. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*: 176 p.
- Feldmann, R.M.; Schweitzer, C.E.; Encinas, A. 2005. New decapods from the Navidad Formation (Miocene) of Chile. *Journal of Crustacean Biology* **25** (3): 427-449.
- Finger, K.; Encinas, A.; Nielsen, S.; Peterson, D. 2003. Microfaunal indications of Late Miocene deep-water basins off the Central coast of Chile. *In Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas, CD-ROM*: 8 p. Concepción.
- Frassinetti, D.; Covacevich, V. 1984. Estudio del género *Glycymeris* da Costa, 1778 en el Terciario de Chile con descripción de dos nuevas especies (Mollusca: Bivalvia). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, **40**: 107-133. Chile
- Frassinetti, D.; Covacevich, V. 1993. Bivalvos del Mioceno de Matanzas (Formación Navidad, Chile Central). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural* **44**: 73-97. Chile
- Frey, R.W.; Pemberton, S. 1984. Trace fossils facies models. *In Facies Models* (Walker, R.G.; editor), *Geoscience Canada Reprint Series*: 189-207.
- Fuenzalida, H.; Varela, J. 1964. Geología del Cenozoico de la región de Cartagena y San Antonio. *Sociedad Geológica de Chile, Resúmenes*, **6**: 17-18.
- Gana, P.; Wall, R.; Gutiérrez, A. 1996. Mapa geológico del área Valparaíso-Curacaví, regiones de Valparaíso y Metropolitana. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, 1, escala 1:100.000*: 20 p. Santiago.
- García, F. 1968. Estratigrafía del Terciario de Chile Central. *In El Terciario de Chile Central* (Cecioni, G.; editor). *Editorial Andrés Bello*: 25-57. Santiago.
- Gómez, C. 2003. Cambios relativos del nivel del mar durante el Cenozoico Tardío en la zona de Carrizalillo, III Región, Chile. Tesis de Magíster (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*: 100 p.
- Hedberg, H. 1980. Guía Estratigráfica Internacional. *Editorial Reverté*: 205 p. Barcelona.
- Herm, D. 1969. Marines Pliozän und Pleistozän in Nord- und Mittel-Chile unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Mollusken-Faunen. *Zitteliana* **2**: 1-159.
- Hoffstetter, R.; Fuenzalida, H.; Cecioni, G. 1957. Chile-Chili. *In Lexique Stratigraphique International. Amérique Latine, Centre National de la Recherche Scientifique*: **5** (7): 444 p. París.
- Hupé, H. 1854. Malacología y conchiliología. *In Historia física y política de Chile* (C. Gay; editor). *Maulde et Renou*: 449 p. París.
- Ibaraki, M. 1992. Planktonic foraminifera from the Navidad Formation, Chile: Their geologic age and paleoceanographic implications. *In Centenary of Japanese Micropaleontology* (Ishizaki, K.; Saito, T.; editors). *Terra Scientific Publishing Company*: 91-95. Tokyo.
- Kutscher, M.; Neumann, C.; Nielsen, S.; Reich, M.; Villier, L. 2004. Echinoderms from the Miocene of Chile. *In Echinoderms* (Heinzeller, T.; Nebelsick, J.H.; editors). Proceedings of the 11th International Echinoderm Conference, Munich, Germany, 6-10 October, 2003. *A.A. Balkema Publishers*: 453-456. Leiden.
- Le Roux, J.P.; Gómez, C.; Venegas, C.; Fenner, J.; Middleton, H.; Marchant, M.; Buchbinder, B.; Frassinetti, D.; Marquardt, C.; Gregory-Wodzicki, K.M.; Lavenu, A. 2005. Neogene-Quaternary coastal and offshore sedimentation in north-central Chile: Record of sea level changes and implications for Andean tectonism. *Journal of South American Earth Sciences* **19**: 83-98.
- Le Roux, J.P.; Olivares, D.M.; Nielsen, S.N.; Smith, N.D.; Middleton, H.; Fenner, J.; Ishman, S.E. 2006. Miocene-

- Pliocene bay sedimentation as controlled by regional crustal behaviour, local tectonics and eustatic sea-level changes in the Coquimbo Formation at the Bay of Tongoy, central Chile. *Sedimentary Geology*, **184** (1-2): 133-153.
- Marquardt, C. 1999. Neotectónica de la franja costera y aportes a la geología regional entre Caldera y Caleta Pajonal (27°00'-27°45'), III Región de Atacama. Tesis de Magister (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*: 297 p.
- Martínez-Pardo, R.; Osorio, R. 1964. Discoasterídeos y Foraminíferos de la Formación Navidad. Nuevos antecedentes para su datación. *Sociedad Geológica de Chile, Resúmenes* **9**: 5-6.
- Martínez-Pardo, R.; Parada, C. 1968. Foraminíferos Pliocénicos de San Sebastian (Laguna de los Patos), provincia de Santiago. In *El Terciario de Chile, Zona Central* (Cecioni, G.; editor). *Sociedad Geológica de Chile, Editorial Andrés Bello*: 167-189. Santiago.
- Martínez-Pardo, R.; Valenzuela, M. 1979. Discoasterídeos de la Formación Navidad (emend. Etchard, 1973), en Punta Perro, Prov. de San Antonio, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas*: H77-H100. Arica.
- Martínez-Pardo, R. 1990. Major Neogene events of the Southeastern Pacific: the Chilean and Peruvian record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **77**: 263-278.
- Méon, H.; Torres, T.; Martínez-Pardo, R. 1994. Sporopollinic analysis in the Navidad Formation near Navidad (Chile). In *Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas*: 488-490. Concepción.
- Moscoso, R.; Nasi, C., Salinas, P. 1982. Hoja de Vallenar y parte norte de la Serena. *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Carta Geológica de Chile, 55: 49-52. Santiago.
- Murphy, M.A.; Salvador, A. 1999. International Stratigraphic Guide. An abridged version. *Episodes*, **22** (4): 255-171.
- Mutti, E., Davoli, G.; Tinterri, R.; Zavala, C. 1996. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. *Estratto da Memorie di Scienze Geologiche*, **48**: 233-291.
- Mutti, E.; Tinterri, R.; di Biase, D.; Fava, L.; Mavilla, N.; Angella, S.; Calabrese, L. 2000. Delta-front facies associations of ancient flood-dominated fluvio-deltaic systems. *Revista de la Sociedad Geológica de España* **13** (2): 165-190.
- Nielsen, S.N. 2005. Cenozoic Strombidae, Aporrhaidae, and Struthiolaridae (Gastropoda, Stromboidea) from Chile: their significance to biogeography of faunas and climate of the south-east Pacific. *Journal of Paleontology* **79**: 1120-1130.
- Nielsen, S.N.; Frassinetti, D. 2003. New and little known species of Pseudolividae (Gastropoda) from the Tertiary of Chile. *The Nautilus* **117**: 91-96.
- Nielsen, S.N.; Frassinetti, D.; Bandel, K. 2004. Miocene Vetigastropoda and Neritimorpha (Mollusca, Gastropoda) of Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* **17**: 73-88.
- Osorio, R. 1978. Ostracoda from the Navidad Formation (Miocene), Chile. *Journal of the Faculty of Sciences, Hokkaido University*, **IV** (18), Nos. 1-2: 57-84.
- Philippi, R. A. 1887. Los fósiles terciarios y cuaternarios de Chile. *Brockhaus*: 256 p. Leipzig.
- Sernageomin. 2002. Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Santiago, Chile.
- Sowerby, G.B. 1846. Descriptions of Tertiary fossil shells from South America. In *Geological observations on South America. Being the third part the geology of the voyage of the Beagle, under command of Capt. Fitzroy, R.N. during the years 1832 to 1836* (Darwin, C.; editor). *Smith, Elder and Co.*: 249-264. London.
- Steinmann, G. 1895. Das Auftreten und Alter der Quiriquina-Schichten. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Beilage Band* **10**: 1-31.
- Stuardo, J.; Villarroel, M. 1975. On some living and fossil volutes referred to *Miomelon* Dall, 1907 and *Proscaphella* von Ihering, 1907. *The Veliger* **17**: 139-155.
- Suárez, M.; Encinas, A.; Ward, D. 2006. Early Miocene Elasmobranch Fauna from the Navidad Formation, Central Chile, South America. *Cainozoic Research* **4** (1-2): 3-18.
- Swift, D.J.P.; Figueiredo, A.G.; Freeland, G.L.; Oertel, G.F. 1983. Hummocky cross-stratification and megaripples: a geological double standard? *Journal of Sedimentary Petrology* **53** (4): 1295-1317.
- Tavera, J. 1960. El Plioceno de Bahía Horcón en la provincia de Valparaíso. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Anales*, **17**: 346-367.
- Tavera, J. 1968. Estudio de la formación Navidad en el Provincia de Santiago con referencia especial a las localidades tipos de Navidad, Matanza, Boca Rapel y Topocalma. *Sociedad Geológica de Chile, Resúmenes*: 59-60.
- Tavera, J. 1979. Estratigrafía y paleontología de la Formación Navidad, Provincia de Colchagua, Chile (Lat. 30°50'-34°S). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, **36**: 176 p. Chile.
- Troncoso, A. 1991. Paleomegafauna de la Formación Navidad, Miembro Navidad (Mioceno), en el área de Matanzas, Chile central occidental. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, **42**: 131-168. Chile
- Troncoso, A.; Romero, E.J. 1993. Consideraciones acerca de las Coníferas del Mioceno de Chile central occidental. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, **44**: 47-71. Chile
- Troncoso, A.; Encinas, A. 2006. La taflofauna de cerro Centinela (Chile, VI Región): vegetación y clima de Chile central a fines del Mioceno-comienzos del Plioceno. *Ameghiniana* **43** (1): 171-178.
- Valenzuela, E.A. 1982. Estratigrafía de la boca occidental del canal de Chaco, X Región, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas*, **1**: A343-A376.

- Concepción.
- Vera, J.A. 1994. Estratigrafía, principios y métodos. *Editorial Rueda*: 806 p. Madrid.
- Walker, R.G.; Plint, A.G. 1992. Wave-and Storm-Dominated Shallow Marine Systems. *In* Facies Models, response to sea level change (Walker, R.G.; James, N.P.; editors), *Geological Association of Canada*: 219-238.
- Wall, R.; Gana, P.; Gutiérrez, A. 1996. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos*, **2**: 19 p. Santiago.
- Yáñez, G.; Ranero, C.; Von Huene, R.; Díaz, J. 2001. Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research* **106** (B4): 6325-6345.