

RITMITAS MAREALES EN LA FORMACIÓN PUNCOVISCANA (S.L.) EN LA LOCALIDAD DE RANCAGUA, NOROESTE ARGENTINO: DINÁMICA MAREAL Y CONSIDERACIONES PALEOASTRONÓMICAS

Vanina L. LÓPEZ DE AZAREVICH^{1,2}, Ricardo H. OMARINI^{1,2}, Ricardo J. SUREDA^{1,2} y Miguel B. AZAREVICH¹.

¹ Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Geología, Salta.

² CONICET.

E-mails: villopez@yahoo.com.ar; rhomarini@arnet.com.ar; sureda@sinectis.com.ar; miguel_azarevich@yahoo.com.ar

RESUMEN

Las ritmitas mareales constituyen una clara evidencia de sedimentación afectada por las mareas pudiendo preservar los períodos mareales inducidos astronómicamente al momento del depósito. Las investigaciones de secuencias periódicas mareales, acrecionadas vertical o lateralmente, en unidades modernas y antiguas, han experimentado notables avances en los últimos 25 años, excepto en la transición Neoproterozoico-eocámbrico. La Formación Puncoviscana (NO argentino) está compuesta en la localidad de Rancagua por litofacies de cara de playa hasta plataforma distal, la cual incluye ritmitas mareales de edad neo-proterozoico-cámbrica temprana. Los períodos lunares involucrados en la sedimentación pueden ser aproximados mediante análisis armónicos con transformadas rápidas de Fourier a partir de datos crudos de espesores de láminas. Un sistema semidiurno con períodos tropicales de 26,64 días fue reconocido, a partir del cual se calculó la distancia Tierra-Luna en $3,78 \times 10^{10}$ cm. Estos resultados proporcionan información relevante acerca de la evolución de la órbita lunar a través del tiempo geológico. Los datos sugieren un evento astrofísico singular e irrepetible durante la transición Paleo-Mesoproterozoico con incremento en la velocidad de alejamiento hasta el Cámbrico Temprano, con eventos menores discretos en el Cámbrico Temprano y Paleozoico Superior con disminución del 50% de la velocidad de alejamiento.

Palabras clave: *Ritmitas mareales, Transformadas de Fourier, Distancia Tierra-Luna, Formación Puncoviscana, Noroeste argentino.*

ABSTRACT: *Tidal rhythmites in the Puncoviscana Formation (s.l.) at Rancagua locality, Northwestern Argentina: tidal dynamics and paleoastronomic considerations.* Tidal rhythmites are clear evidence of sedimentation affected by tides and could preserve tidal periods astronomically induced during the time of deposition. Investigations of tidal periodic sequences lateral or vertically accreted on modern and ancient units had improved notable advances during the last 25 years, but, there are no data on the Neoproterozoic-Early Cambrian transition. The Puncoviscana Formation (NW Argentina) at Rancagua locality is composed by shoreface to offshore lithofacies, which includes tidal rhythmites of Neoproterozoic-Early Cambrian age. Lunar periods involved in sedimentation by tides can be approach by harmonic analysis carried out with fast Fourier transforms from raw data on lamina thickness. A semidiurnal tidal system with tropical periods of 26.64 days was obtained, from which Earth-Moon distance was calculated as 3.78×10^{10} cm. These results provide relevant information about the evolution of the lunar orbit through geological time. Results suggest an astrophysical event of singular characteristics during the Paleo-Mesoproterozoic transition with an increment in retreat velocity up to Early Cambrian, with minor discreet events in Early Cambrian and Upper Paleozoic with decrease in retreat velocity in a 50%.

Keywords: *Tidal rhythmites, Fourier transforms, Earth-Moon distance, Puncoviscana Formation, Northwest Argentina.*

INTRODUCCIÓN

Recientes investigaciones basadas en correlaciones estratigráficas y geoquímicas sugieren que las secuencias sedimentarias de la Formación Puncoviscana s.l. (Aceñolaza *et al.* 1989), basamento del NO argentino, han sido depositadas en un ambiente intracontinental. La apertura exitosa del rift

Puncoviscana en el Neoproterozoico (véase Omarini *et al.* 1999, y literatura incluida) produjo el desarrollo de una cuenca marina con sus diferentes ambientes sedimentarios y volcánicos, asociados a un mismo contexto geotectónico, que conforma la columna de dicha unidad estratigráfica. El registro geológico comprende: i) secuencias turbidíticas espesas (Turner 1960, Omarini

1983, Jêzek 1990), ii) sedimentitas clásticas de ambiente marino somero, con influencia de olas y tormentas (Buatois y Mángano 2004), iii) secuencias de plataforma carbonática (Salfity *et al.* 1976), iv) volcanitas alcalinas sinsedimentarias (Chayle y Coira 1987, Omarini *et al.* 1999, Hauser *et al.* 2008). Las facies clásticas contienen diversos icnogéneros de edad Vendiano-Tommotiano (Aceño-

laza *et al.* 1999, Aceñolaza 2004). Sin embargo, no es clara su filiación cronológica o paleoambiental, como se evidencia a partir de los trabajos de Sureda *et al.* (1999), Durand y Aceñolaza (1990), Buatois y Mángano (2003, 2004), Aceñolaza (2004). Pese a los aportes científicos ya publicados, no existe aún un modelo de evolución de esta cuenca compatible con todos los detalles propios de los diferentes ambientes sedimentarios documentados en su registro estratigráfico y fosilífero.

La presencia de ritmitas intramareales, tanto en secuencias clásticas como carbonáticas de la Formación Puncoviscana, ha sido difundida en investigaciones recientes por López de Azarevich y Omarini (2008a y b). Estas secuencias, originadas por procesos de flujo-reflujo mareal, permiten identificar bordes de cuenca constituidos por facies intermareales clásticas en las localidades de Escalchi-Rancagua, San Antonio de los Cobres y en el sector occidental de la quebrada de Humahuaca, entre los ríos Chacalayo y Putumayo (Fig. 1). Los equivalentes carbonáticos se encuentran en los afloramientos de Las Tienditas y Volcán.

Este trabajo se apoya en estudios desarrollados en los últimos 25 años en secuencias periódicas mareales, acrecionadas vertical o lateralmente. En tal sentido, numerosos autores (Allen y Homehood 1984, Yang y Nio 1985, Williams 1989, Kvale *et al.* 1994, Miller y Erikson 1997, Archer y Johnson 1997, Ehlers y Chan 1999; entre otros) han desarrollado investigaciones en tidalitas actuales con el propósito de comprender los factores sedimentológicos y astronómicos que rigen su depósito. Muchas secuencias que muestran ciclicidad en las láminas depositadas permiten identificar, no solo aquellas condiciones paleo-climáticas, hidrosféricas y paleo-geográficas, sino también los diferentes períodos seculares debidos a las posiciones relativas del sistema Tierra-Luna (Fig. 2). Estos ciclos controlan directamente la sedimentación y se definen como: i) diurnos, ii) mes sinódico, iii) mes anomalístico, iv) mes tropical. El primero responde a la diferente magnitud de las corrientes de flujo y reflujo de marea, y se encuentra representado por láminas de mayor y menor

espesor, respectivamente. El segundo se ajusta a las condiciones mareales entre luna llena-cuarto menguante o luna nueva-cuarto creciente (períodos de sicigia y cuadratura lunar), que definen períodos de 14,8 días cada uno, conformando la suma de ambos el mes sinódico de 29,6 días. Durante estos ciclos se suceden períodos de mareas de mayor y menor intensidad, reflejadas en secuencias de bancos más gruesos y más finos, respectivamente.

El mes anomalístico se define como el tiempo que la Luna tarda en recorrer la distancia entre las posiciones de apogeo y perigeo (27,55 días), y el mes tropical queda definido entre su máxima declinación norte y sur (27,32 días). En tal sentido, la diferencia diaria será igual a cero cuando la Luna pasa por el cenit del punto terrestre considerado. Se ha comprobado que el análisis detallado de las ritmitas mareales y de la teoría de mareas puede ser utilizado para definir las características de la órbita paleo-lunar. Los ciclos lunares definidos como meses anomalístico y tropical ayudan a determinar la distancia Tierra-Luna, tanto en registros mareales actuales como antiguos (Kvale *et al.* 1999). Detalle que se ajusta al paulatino alejamiento de la Luna respecto a la Tierra a lo largo del tiempo geológico (Williams 2000). De este modo, su estudio en los registros de la Formación Puncoviscana resulta de singular importancia para definir la situación astronómica durante el límite Proterozoico-Eocámbrico.

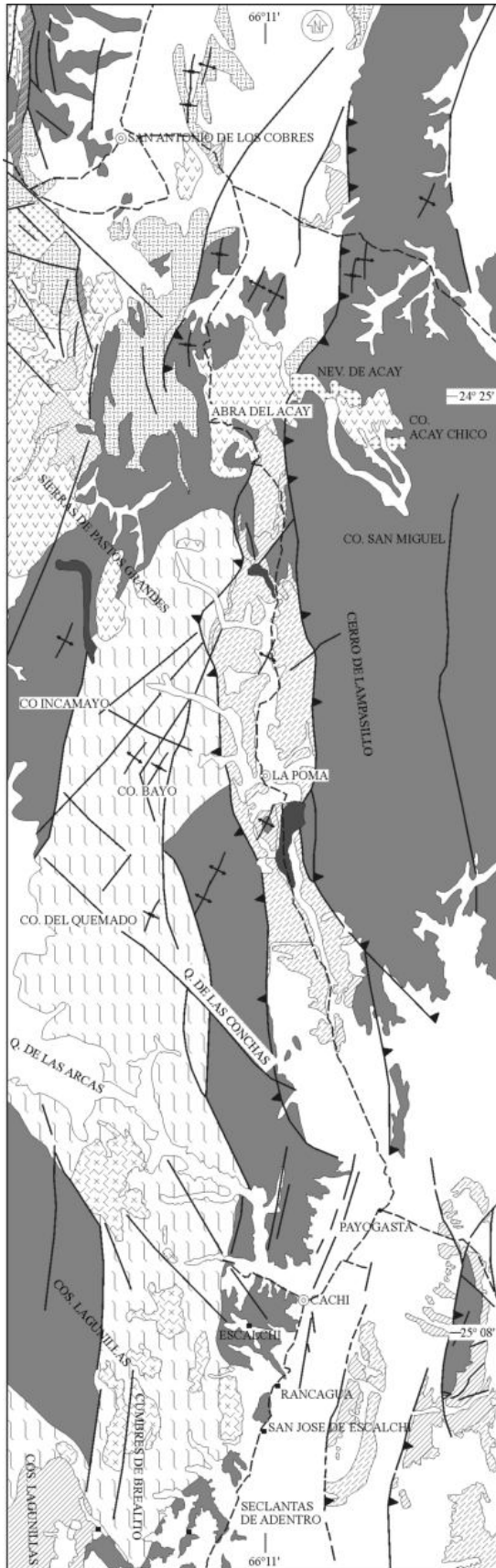
El análisis de los sistemas mareales modernos, tanto así como su extrapolación a la interpretación de los antiguos, demuestra la existencia de cierta desviación sobre los vaticinios realizados, en atención a que los océanos terrestres y los ambientes sedimentarios asociados no conforman un sistema en equilibrio y no deben ser considerados como sistemas idealizados (Kvale *et al.* 1995, 1999). Esta dificultad puede superarse con la estadística y el análisis de series armónicas y transformadas rápidas de Fourier, metodología que ha sido aplicada con interesantes resultados en trabajos experimentales y secuencias rocosas de diversos lugares del mundo (Yang y Nio 1985, Archer 1996, Kvale *et al.* 1999, Mazumder y Arima

2005). Sin embargo, las investigaciones de Williams (2000) destacan variables a ser consideradas al calcular el alejamiento de la Luna en el tiempo a partir de estudios, tanto paleontológicos (ciclos de crecimiento) como de ritmitas mareales (ciclos de sedimentación), ambos afectados por los períodos seculares del sistema Tierra-Luna-Sol. Dicho autor advierte la importancia de corroborar los resultados arribados con la geofísica de los cuerpos celestes. En este sentido, las únicas secuencias con cálculos precisos son las de Elatina-Reynella (~620 Ma, Australia).

Se debe aceptar que la investigación de la dinámica de mareas, desde el punto de vista experimental, presenta ciertos factores diferentes de los astronómicos que deben ser tenidos en cuenta, tales como la geometría de la cuenca, la pendiente de la plataforma, volumen de sedimentos aportados a la cuenca y la hidrodinámica del sistema mareal, ya que pueden afectar los patrones de variación en el análisis de la serie de datos (Kvale *et al.* 1995, Deloffre *et al.* 2007). En base a estas consideraciones, la presente contribución pretende analizar desde una perspectiva estratigráfica, sedimentológica y estadística las series rítmicas mareales clásticas que integran el basamento de la Cordillera Oriental (NOA), conocido como Formación Puncoviscana (s.l.). En la localidad seleccionada de Rancagua, las series muestran un patrón cíclico ordenado compatible con los fundamentos establecidos precedentemente. Así, el objetivo principal del presente trabajo es determinar las condiciones dinámicas de sedimentación y presentar los primeros datos identificando los ciclos mareales y paleo-astronómicos que afectan la distancia Tierra-Luna en los tiempos considerados.

GEOLOGÍA REGIONAL

La Formación Puncoviscana s.l. (Aceñolaza *et al.* 1989) conforma el basamento neoproterozoico-eocámbrico del NO argentino (Fig. 1b). Diferencias faciales han propiciado su posterior división en cuatro unidades depositadas sucesivamente (Salfty *et al.* 1976): i) Formación Sancha, turbiditas grises con



MAPA GEOLOGICO

REFERENCIAS

- Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno): Rodados, arenas y arcillas
 - Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno): Formación Piedras Blancas (Basaltos)
 - ▨ Neogeno (Plioceno): Formación Abra del Gallo (ignimbritas y tobas)
 - ▧ Neogeno (Plioceno): Formación Rumbola (andecita y basaltos)
 - ▩ Neogeno (Mioceno): Formación Aguas Calientes y equivalentes (dacitas)
 - ▤ Paleogeno (Oligoceno): Formación Acay (granitos y monzonitas)
 - ▥ Paleogeno - Neogeno: Depósitos continentales, fluviales y lacustres
 - ▦ Cretácico-Paleoceno: Grupo Salta (depósitos continentales, marinos someros y fluviales)
 - ▧ Ordoivico intrusivo: Complejo Eruptivo Oire (granodioritas, pegmatitas, porfidos, etc.)
 - ▨ Ordoivico explosivo: Formación Agua de Castilla (ignimbritas y tobas riolíticas)
 - ▩ Ordoivico marino: Formación Parcha, las Vícuilas, etc. (lutitas, calizas y coquinas intercaladas)
 - ▤ Precámbrico-Cámbrico: Formación Cahu y equivalentes (trindjemitas/pegmatitas)
 - ▥ Precámbrico: Formación Puncoviscana (facies metamórfica/facies sedimentarias)
- ⋈ Plegamineto anticlinal
 - ⋉ Plegamineto sinclinal
 - Falla sin diferenciación de bloque ni inclinación
 - Corrimiento paleozoicos
 - ⊙ Poblados
 - Caseríos- puestos

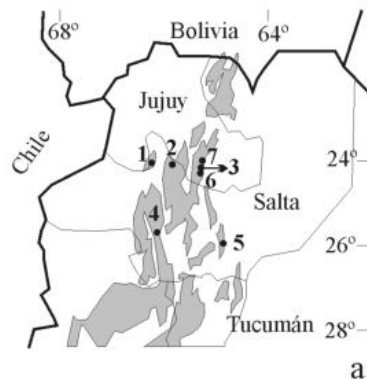


Figura 1: a) Secuencias clásicas de la Formación Puncoviscana *s.l.* (gris). Ritmitas: 1: San Antonio de los Cobres, 2: Cuesta Muñano, 3: Quebrada de Humahuaca, 4: Escalchi-Rancagua, 5: Las Tienditas, 6: Quebrada de Humahuaca (entre los ríos Chacalayo y Putumayo), 7: Volcán; b) Mapa geológico regional, fotointerpretado a partir de imágenes LANDSAT.

b

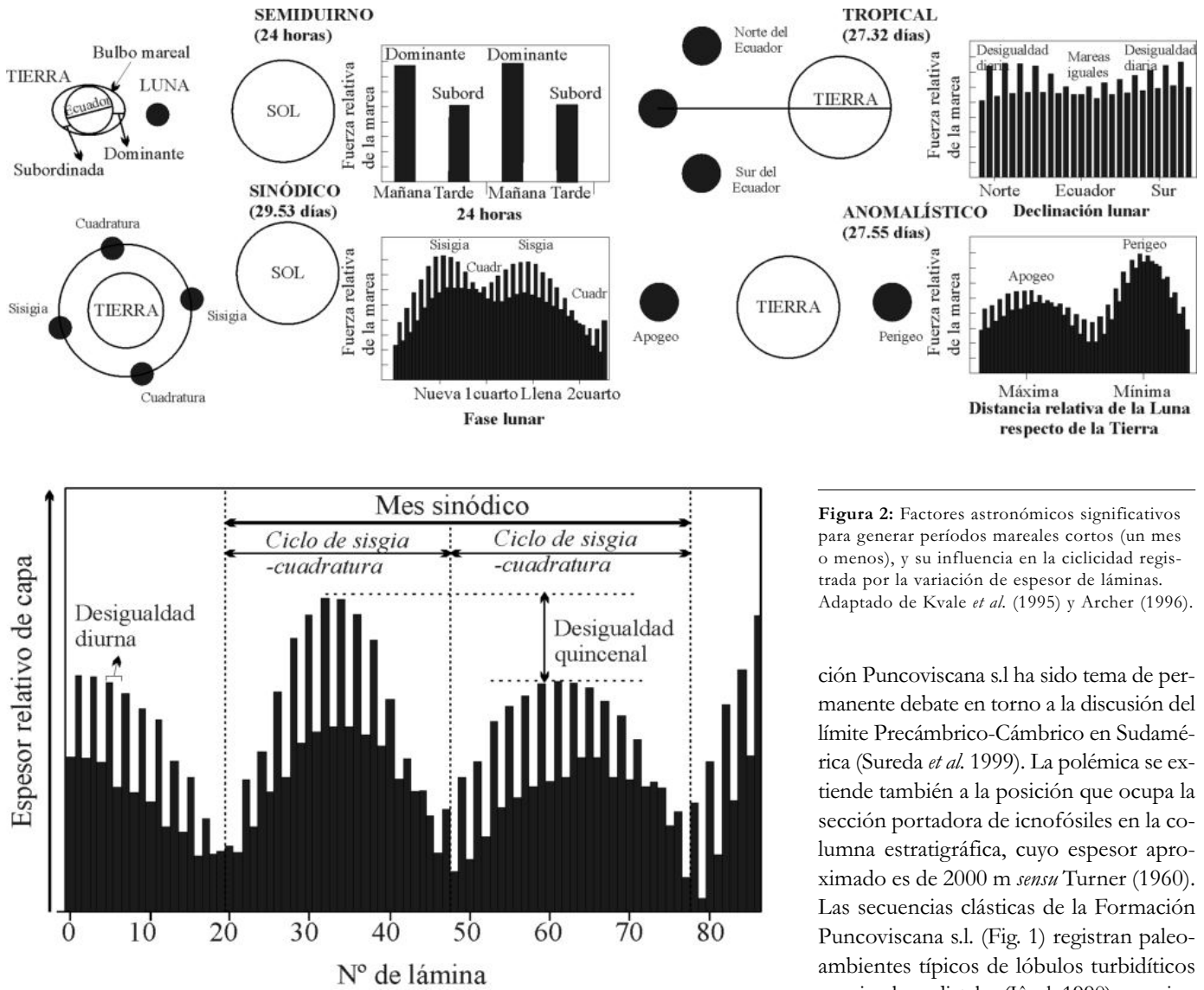


Figura 2: Factores astronómicos significativos para generar períodos mareales cortos (un mes o menos), y su influencia en la ciclicidad registrada por la variación de espesor de láminas. Adaptado de Kvale *et al.* (1995) y Archer (1996).

ción Puncoviscana s.l ha sido tema de permanente debate en torno a la discusión del límite Precámbrico-Cámbrico en Sudamérica (Sureda *et al.* 1999). La polémica se extiende también a la posición que ocupa la sección portadora de icnofósiles en la columna estratigráfica, cuyo espesor aproximado es de 2000 m *sensu* Turner (1960). Las secuencias clásticas de la Formación Puncoviscana s.l. (Fig. 1) registran paleoambientes típicos de lóbulos turbidíticos proximales a distales (Jêzek 1990) y marino somero con influencia de oleaje y tormentas (Buatois y Mángano 2003, 2004, López de Azarevich y Omarini 2008a, b), preferentemente localizados al este de la Cordillera Oriental. El estudio de las secuencias mareales en las localidades de Escalchirancagua y San Antonio de los Cobres brindó datos acerca de la configuración de mareas en el Proterozoico-Eocámbrico (López de Azarevich y Omarini 2008a). La Formación Puncoviscana s.l., desde el punto de vista geológico regional, forma parte de una de las cuencas más extensas del Proterozoico-Eocámbrico de Sudamérica, con unidades equivalentes en Boquí, Tucavaca, Ararás, Bodoquena, Itapucumí,

tonalidades verdosas; ii) Formación Volcán-Las Tienditas, calizas micríticas negras, iii) Formación Puncoviscana, turbiditas amarillas, iv) Formación Corralito, conglomerados rojizos. Sin embargo, las sucesiones calcáreas se encuentran intercaladas en las secuencias clásticas y no estratigráficamente debajo (Turner y Mon 1979). La Formación Sancha, si bien tiene características de ser una discontinuidad estructural, ha sido interpretada como diamictitas y, al encontrarse en contacto con la sección basal de las calizas de Formación Las Tienditas, el conjunto ha sido interpretado como una secuencia de carbonatos postglaciales (*cap-*

carbonates) del Neoproterozoico Tardío-Cámbrico basal (Toselli *et al.* 2005). La extensión de la sedimentación de la Formación Puncoviscana s.l. hasta el inicio del Cámbrico (Vendianno-Tommotiano) está confirmada por la presencia de trazas fósiles (Mirré y Aceñolaza 1972, Aceñolaza y Durand 1973, Aceñolaza *et al.* 1999, Aceñolaza y Aceñolaza 2007). Estos icnogéneros se encuentran impresos en ambientes tan dispares como lo son sedimentos de ambiente somero con influencia de oleaje y turbidítico profundo (Buatois y Mángano 2003, 2004). No obstante, el valor cronológico de las trazas fósiles en la Forma-

Murciélago (Brockmann *et al.* 1972) y Corumbá (Almeida *et al.* 1976), entre otras. Estas cuencas, generadas durante la dispersión del supercontinente Rodinia, se desarrollaron en márgenes continentales activos y/o pasivos, presentan un importante registro de trazas fósiles y volcanismo sinsedimentario asociado (Omarini *et al.* 1999, Hauser *et al.* 2008).

En discordancia angular sobre la Formación Puncoviscana se deposita la secuencia silicoclástica Cámbrico Medio-Superior del Grupo Mesón (Turner 1960), que comprende una secuencia transgresiva-regresiva. Los depósitos registran una plataforma somera de mar epicontinental dominada por corrientes gradando hacia ambientes de llanura mareal (Formaciones Lizoite y Campanario) y finalmente litorales (Formación Chalhualmayoc) durante un episodio de descenso global del nivel del mar (Sánchez 1994). En discordancia sobre la cuenca cámbrica se depositan los sedimentos ordovícicos marinos del Grupo Santa Victoria (Turner 1960), que comprende conglomerados basales, areniscas, lutitas y grauvacas de ambientes de plataforma somera próxima a la costa (Tremadociano) evolucionando hacia plataforma abierta (Arenigiano-Llanvirniano). Presenta gran cantidad de fósiles de trilobites y graptolites. En la zona de Cachi, se reconocen secuencias ordovícicas asociadas con intrusivos calco-alcalinos que registran edades U-Pb (circon) de 491-510 Ma (Hauser *et al.* 2008). Se interpretan como una cuenca de retroarco remanente desarrollada a partir del Cámbrico Tardío - Ordovícico Temprano.

Por encima y en discordancia sobre las secuencias proterozoicas y paleozoicas se desarrolla la cuenca del Grupo Salta. Este se compone de los Subgrupos Pirgúa (areniscas rojas continentales, etapa de *syn-rift*), Balbuena (areniscas calcáreas y calizas oolíticas y estromatolíticas, etapa de *post-rift*) y Santa Bárbara (sistemas lacustres y efímeros de colmatación de cuenca). El Subgrupo Balbuena se halla integrado por las Formaciones Lecho y Yacoraité que representan sistemas fluviales y eólicos y un ambiente marino somero de sabhka, respectivamente (Galli y Hernández 1999).

En discordancia sobre las unidades anteriores se depositan los sedimentos del Terciario Medio-Superior del Grupo Orán, que representan una cuenca de antepaís representada por ambientes lacustres y marinos abiertos (Hernández *et al.* 2005). Los sedimentos poco consolidados del Cuaternario cubren las zonas bajas de los núcleos sinclinales y corresponden a depósitos de bolsón, conos aluviales y gravas de terrazas.

La estructura de la Cordillera Oriental revela plegamientos complejos, con ejes submeridianos, que involucran la columna estratigráfica, proterozoicas a terciarias (Fig. 1b). Los pliegues son en general asimétricos, con anticlinales bien definidos y sinclinales con flancos extendidos. La deformación se complementa con fracturación frágil de naturaleza inversa y directa, que afecta la zona durante el Terciario y Cuaternario, durante el Ciclo Andino.

La importancia del estudio de las secuencias rítmicas mareales dentro de la Formación Puncoviscana s.l. radica en sus implicancias geológicas en la configuración de la cuenca, paleo-geográficas y paleo-astronómicas. Las secuencias rítmicas mareales se analizarán en la zona de Rancagua, donde yacen bien expuestas y con abundante registro en trazas fósiles.

METODOLOGÍA

El estudio de las secuencias mareales rítmicas en la localidad de Rancagua reviste dos aspectos fundamentales: i) Estudio sedimentológico y estratigráfico de las secuencias sedimentarias, que permita caracterizar el ambiente de deposición y las condiciones paleo-climáticas, ii) Estudio estadístico-matemático de la variación de los espesores de lámina, que ayude a determinar las condiciones paleo-astronómicas que influyeron en el régimen de mareas para el tiempo del depósito.

Los ambientes sedimentarios han sido determinados a partir de perfiles estratigráficos detallados (Fig. 3), de los cuales se ha seleccionado un sector para analizar los patrones de ciclicidad. Los espesores fueron medidos con calibre digital y representa-

dos en un papel milimetrado junto con la litología correspondiente.

A partir de los datos obtenidos y aplicando una sistemática similar a la propuesta por Ehlers y Chan (1999), De (2001), Saadi *et al.* (2003), Deloffre *et al.* (2007), se procedió a la interpretación paleo-ambiental de las condiciones de sedimentación y la preservación de las secuencias. Desde el punto de vista cuantitativo, en un sistema mareal semidiurno (dos eventos de inundación diarios) hasta cuatro láminas pueden ser depositadas en 24 horas y un promedio de 28 eventos en un ciclo de sicigia-cuadratura-sicigia (Mazumder y Arima 2005).

Los patrones de ciclicidad se evidencian por la acumulación sucesiva de paquetes arenosos más espesos y niveles pelíticos más delgados, y/o por la variación sistemática de láminas finas-gruesas (Fig. 6). Estos datos, representados en un gráfico número de lámina vs espesor, muestran una ciclicidad marcada, con diversas escalas de repetición: i) cada dos láminas, ii) cada 10-15 láminas, y/o iii) cada 23-24 láminas. Con el propósito de analizar cómo estas variaciones reflejan las condiciones mareales imperantes durante el depósito, se modelan estos datos mediante análisis armónicos con transformadas rápidas de Fourier - FFT (Archer 1996, Archer y Johnson 1997, Kvale *et al.* 1995, 1999, Mazumder y Arima 2005). El análisis de Fourier resuelve la secuencia temporal en componentes armónicos, cuyas contribuciones individuales se identifican por su amplitud o potencia = (amplitud)² (Yang y Nio 1985). Estos datos pueden registrarse en un diagrama de PE vs F (Potencia espectral vs Frecuencia del componente armónico).

Aplicando el programa *Matlab 7.2* (versión libre en internet), se obtuvo un diagrama oscilatorio que identifica las series numéricas analizadas con las FFT, y diagramas Período (= 1/frecuencia) vs Potencia espectral (Fig. 4), en los cuales se identifican diversos picos de mayor poder espectral. Estos identifican los componentes dominantes del ciclo mareal, que en las ritmitas mareales corresponden al número de días que duran los distintos períodos seculares: i) sinódico, ii) tropical, iii) anomalístico. Estos ci-

los lunares son actualmente de 29,60, 27,32 y 27,55 días, respectivamente. Empero, cambios en la posición orbital de la Luna y la rotación de la Tierra han ocurrido a lo largo del tiempo geológico, incluyendo variaciones en el valor de la gravedad terrestre (Archer 1996, Sonett *et al.* 1996, Kvale *et al.* 1999, Williams 2000, Mazumder y Arima 2005). Particularmente, estos autores han reconocido un alejamiento de la Luna respecto de la Tierra, por lo cual los ciclos mencionados son más extensos actualmente que en el pasado. No siempre es posible reconocer cada uno de estos picos espectrales como componentes de frecuencia. Sin embargo, el estudio detallado de las variaciones reconocidas a cada paso del análisis es necesario para evitar una interpretación errónea de los datos.

TIDALITAS CLÁSTICAS

Facies

La naturaleza mareal de las secuencias rítmicas clásticas de la Formación Puncoviscana ha sido reconocida en el perfil de la locali tipo. La columna estratigráfica comprende una secuencia grano y estrato decreciente en general, en la cual tres secciones han sido identificadas: i) inferior, ii) media, iii) superior, con las siguientes facies (Figs. 3 y 4):

Sección inferior

Facies 1: areniscas medias a gruesas de color verdoso pálido, con estratificación tabular plana gruesa de 7 a 14 cm, estratificadas en bancos tabulares de 40 cm de superficies estratales bien definidas planas en la base y onduladas al techo, e intercalaciones de areniscas finas verdosas estratificadas en bancos de 15 a 45 cm, con laminación plana u oblicua tabular plana de pequeña escala y ocasionalmente artesas.

Facies 2: areniscas finas de color verde claro con estratificación entrecruzada tangencial simple y doble, y oblicua tabular plana de pequeña escala, intercaladas con areniscas medianas de color verde claro, con base plana erosiva y techo ondulado (Fig. 4b-g). Ondulitas de interferencia se reconocen en algunas superficies.

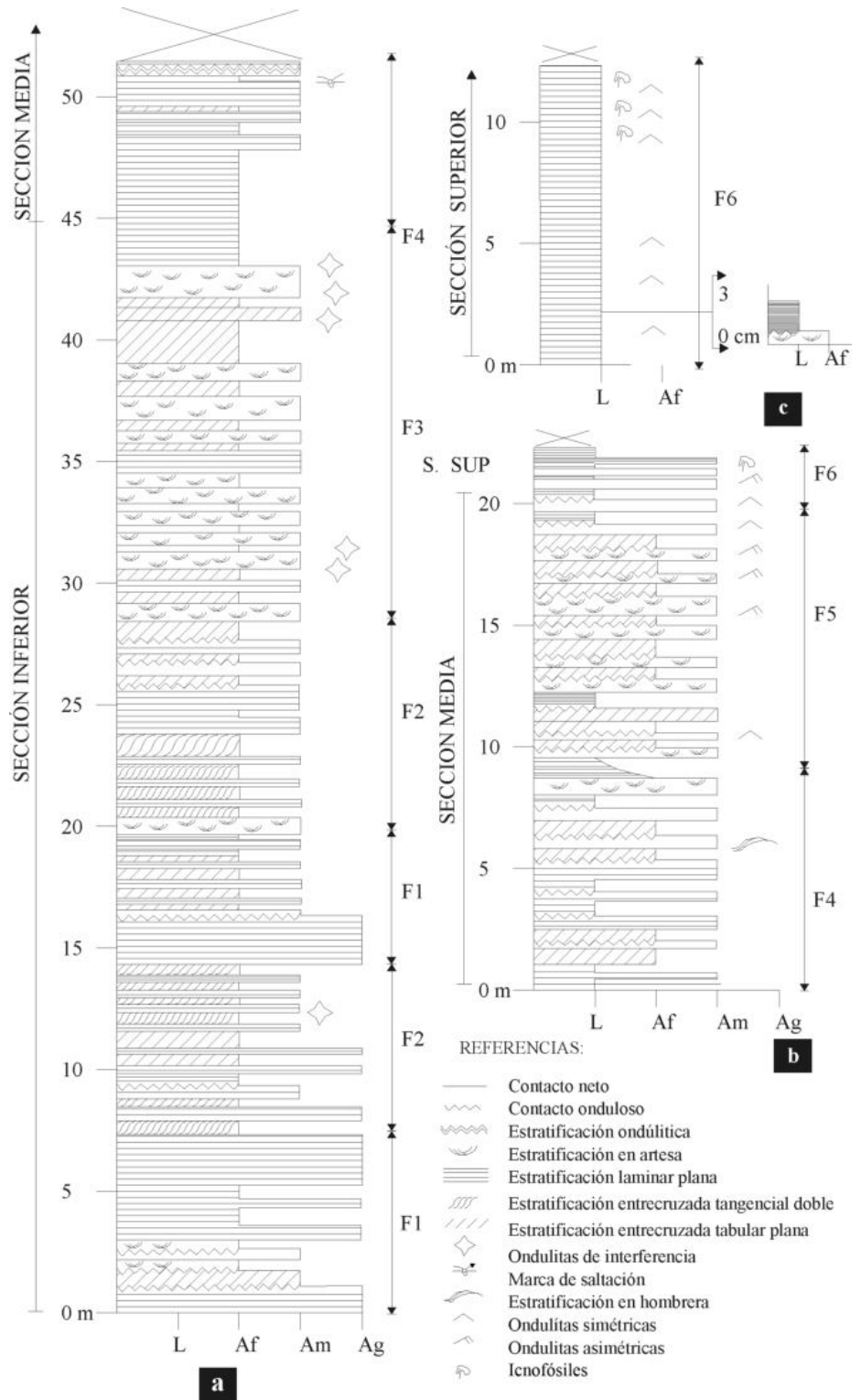


Figura 3: Perfiles estratigráficos relevados en Rancagua (Salta). a) Sección inferior; b) Sección media; c) Sección superior. El espesor total de la secuencia alcanza los 90 m.

Facies 3: areniscas finas a medianas de color rojizo a morado, con estratificación tangencial simple, entrecruzada tabular plana y estructuras en artesa y con ondulitas

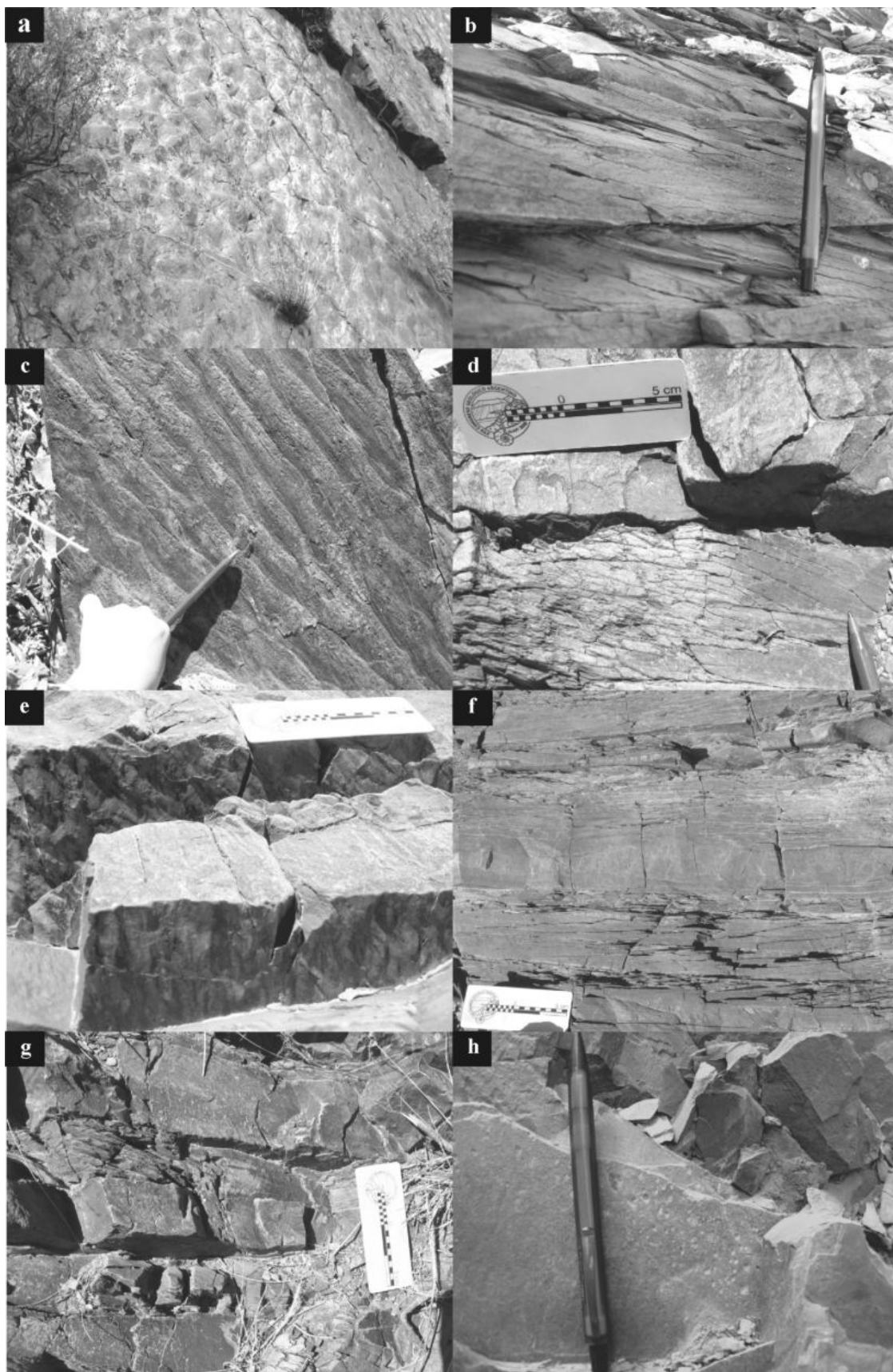


Figura 4: Fotografías de las principales estructuras características de las distintas facies. a) Ondulitas de interferencia (Facies 3); b) Estructuras tangenciales simples (Facies 2); c) Calcos de ondulitas lineales asimétricas (Facies 5); d) Estructura en hombrera o *hummocky* (Facies 4); e) Ondulitas asimétricas en dos niveles sucesivos, con orientaciones diferentes que evidencian la multidireccionalidad de las corrientes (Facies 3); f) Capa de areniscas medias con base erosiva y techo ondulado, cubierta por limolitas laminadas (Facies 4); g) Estructura tangencial doble (Facies 2); h) Marcas de saltación (Facies 4).

de interferencia en el techo de bancos sucesivos, u ondulitas de crestas rectas con direcciones a 40° en bancos sucesivos (bidireccionalidad de la corriente) (Fig. 4a-e). También se encuentran calcos de surco y punzamiento debido a escurrimiento.

Sección media

Facies 4: intercalación de areniscas medianas con estratificación entrecruzada, areniscas finas con laminación paralela u ondulante, y limolitas laminadas o con estratificación entrecruzada, en bancos de espesor constante entre 10 y 15 cm (Fig. 4d-f-h). El conjunto presenta tonalidades verdosas claras a gris y castaño. Estratificación entrecruzada monticular de pequeña escala (*microhummocky*), moldes de estructuras de escurrimiento y relleno (*gutter casts*) y marcas de saltación evidencian episodios de tormentas.

Facies 5: intercalación de areniscas medianas pardo-rojizas con estructuras en artesa y ondulitas simétricas y asimétricas en el techo, estratificadas en bancos de 15 cm, con limolitas verdosas laminadas y con estratificación entrecruzada tabular plana que copian la estructura de la ondulita basal (Fig. 4c).

Sección superior

Facies 6: limolitas de color verdoso a morado, estratificadas en bancos rítmicos de escala decimétrica, con laminación interna milimétrica, intercaladas con areniscas finas a medianas color castaño, masiva o con estructura en artesa, en niveles de 3 cm con base plana erosiva y techo con ondulitas simétricas (Fig. 5b). El contacto es neto o transicional, conformando la laminación interna secuencias gradadas donde las areniscas son claramente subordinadas.

ASOCIACIONES LITOFACIALES

Asociación de cara de playa (*shoreface*)

Estas litofacies abarcan la sección inferior. La relación arenisca gruesa a mediana-arenisca fina es de 3:1.

Se caracteriza por presentar facies de ondulitas simétricas pasando a asimétricas, lo que indica un cambio sistemático de flujos intermedios orbitales a unidireccionales, res-

pectivamente. Asimismo la combinación de capa plana, artesas (Fig. 5d) y ondulitas indica también flujos intermedios unidireccionales orbitales que permiten la migración de óndulas 2D y 3D. Las ondulitas de interferencia y ondulitas de crestas rectas con direcciones a 40° en bancos sucesivos indican flujos de corrientes multidireccionales (flujos combinados). La cara de playa se caracteriza por la interacción de corrientes paralelas a la costa con corrientes normales a la línea de costa produciendo dunas subácuas orientadas en diversos sentidos.

Los *sets* de capas planas de alto régimen de flujo asociadas con *sets* de entrecruzamiento, y los calcos de surco y punzamiento debidos al flujo en bajamar indican sistemas de cara de playa proximal (*shoreface*) a cara de playa frontal (*foreshore*).

Asociación de plataforma proximal (*nearshore*)

Estas litofacies incluyen la sección media. La relación arenisca-limolita es 3:1. Se caracteriza por intercalación de areniscas medianas en bancos de 10 a 15 cm con estratificación entrecruzada, y areniscas finas y limolitas de igual color, con laminación paralela u ondulante (Fig. 5c), con ondulitas simétricas, estructuras entrecruzadas monticulares de pequeña escala (*microhummocky*), moldes de estructuras de escurrimiento y relleno (*gutter casts*) y marcas de saltación y de corrientes (Fig. 5e). Esta asociación litofacial indica un registro de períodos de baja energía con depósitos por decantación y períodos de alta energía dominados por corrientes mareales y episodios de tormenta, en ambiente de plataforma proximal (*proximal offshore*).

Presenta los icnogéneros *Helminthorapbe* y *Treptichnus*.

Asociación de plataforma distal (*offshore*)

Estas litofacies comprenden la sección superior. La relación arenisca-limolita es 1:10. La asociación facial de areniscas basales con superficies ondulosas, gradando hacia facies heterolíticas con lentes arenosos e incremento de la proporción de arcillas, es

propia de una plataforma dominada por mareas. Las sucesiones gradadas rítmicas (Fig. 5b) de bancos areno-limolíticos granodecrecientes con trazas fósiles y escasos niveles de tormentas con estructuras entrecruzadas, monticulares (*hummocky*) y en artesa implican un ambiente de planicie de marea en posición submareal y transicional hacia plataforma distal (*nearshore* a *offshore*). Presenta los icnogéneros *Nereites*, *Helminthodichnites*, *Treptichnus* y *Cochlichnus*.

Este ambiente, protegido de la acción de las olas ha permitido la preservación de la secuencia rítmica mareal. Los sedimentos finos (limosos o arenosos finos) entran en movimiento por las corrientes de reflujos (*ebb tides*) y son transportados mayormente en suspensión a través de los canales mareales de reflujos hacia aguas más profundas en la plataforma distal (*offshore*). Allí, los sedimentos en suspensión se depositan en series gradadas granodecrecientes finamente laminadas. Las láminas fangosas (limos) pueden depositarse sobre las arenosas durante el repunte entre mareas (*slack water*). Estas ritmitas gradadas de origen mareal son similares a las de Reynella Siltstone, del Neoproterozoico Superior del sur de Australia (Williams 2000).

El análisis de las asociaciones de litofacies implica una secuencia de profundización desde ambientes intermareales de cara de playa dominada por olas y mareas, que evoluciona a ambientes submareales de plataforma proximal con predominio de procesos mareales y episodios de tormentas y finalmente hacia ambientes submareales debajo del nivel de tormentas en una plataforma distal dominada por mareas.

Estas asociaciones responden a un ambiente de plataforma somera (< 200 de profundidad) pericontinental con un perfil de costa-plataforma distal (*shoreline-shelf*) que registra un período de agradación con buen aporte de sedimentos (Johnson y Baldwin 1996).

Desde el punto de vista cronológico, los icnogéneros presentes en esta sucesión representan una edad neoproterozoica tardía - cámbrica temprana (Aceñolaza *et al.* 1999, Aceñolaza y Aceñolaza 2005, y literatura incluida).

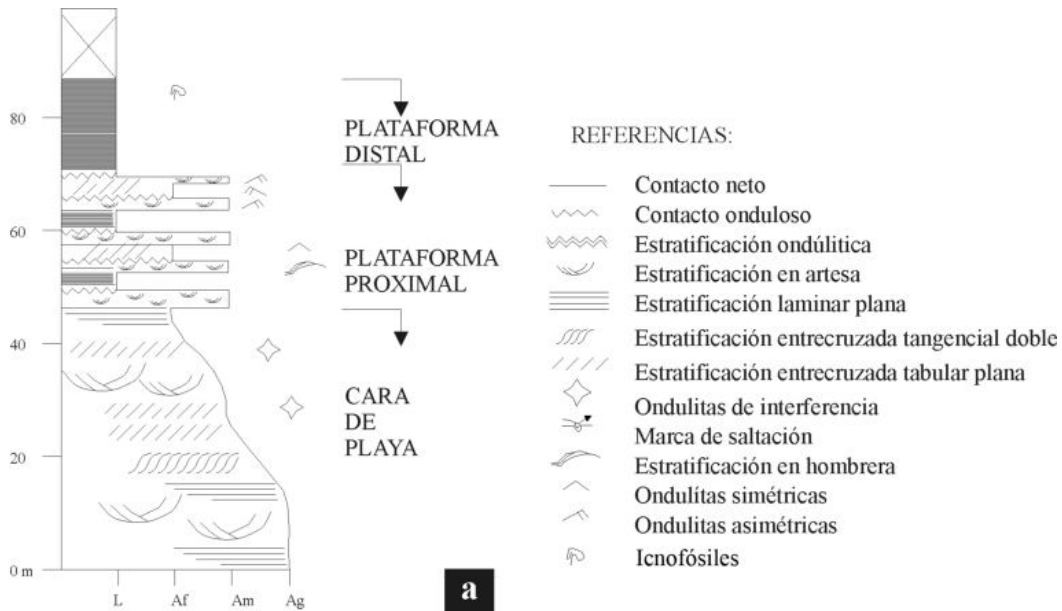
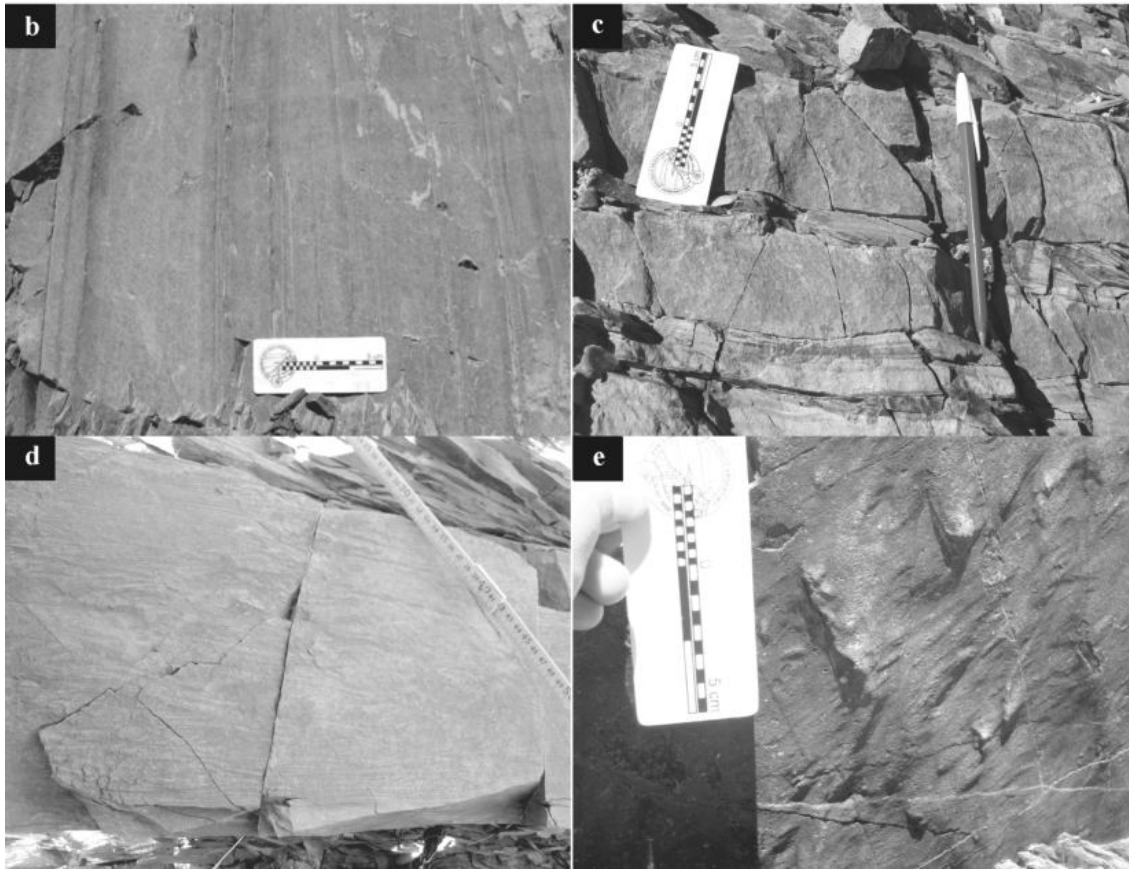


Figura 5: a) Asociación litofacial de la secuencia somera de la Formación Puncovicana en Rancagua: Cara de playa, caracterizada por multidireccionalidad de las corrientes, migración de ondulitas asimétricas y tridimensionales (Sección inferior); Plataforma proximal, caracterizada por episodios de tormenta en ambiente intermareal (Sección media); Plataforma distal, caracterizada por laminación milimétrica de limolitas depositadas en ambientes submareales (Sección superior); b) Bancos de 3 a 8 cm de limolitas laminadas (plataforma distal); c) Bancos areniscos medianos de 5 cm con interfase limosa (plataforma proximal); d) Banco de arenisca con estratificación en artesa producto de migración de óndulas tridimensionales (cara de playa); e) Marcas de surco, punzamiento y roce (plataforma proximal).



ANÁLISIS DE CICLICIDAD - PERÍODOS ASTRONÓMICOS

El movimiento de sedimentos por las mareas puede cesar debajo de un rango ma-

real límite o de una determinada velocidad de corriente (Allen 1982, Fitzgerald y Nummedal 1983). Como consecuencia de ello, el sistema sedimentario mareal puede actuar como filtro y el registro rítmico pue-

de incluir períodos mareales modulados, es decir no completos (Williams 2000). En este sentido puede filtrar los efectos del componente semidiurno subordinado, produciendo patrones diarios aparentes, o pre-

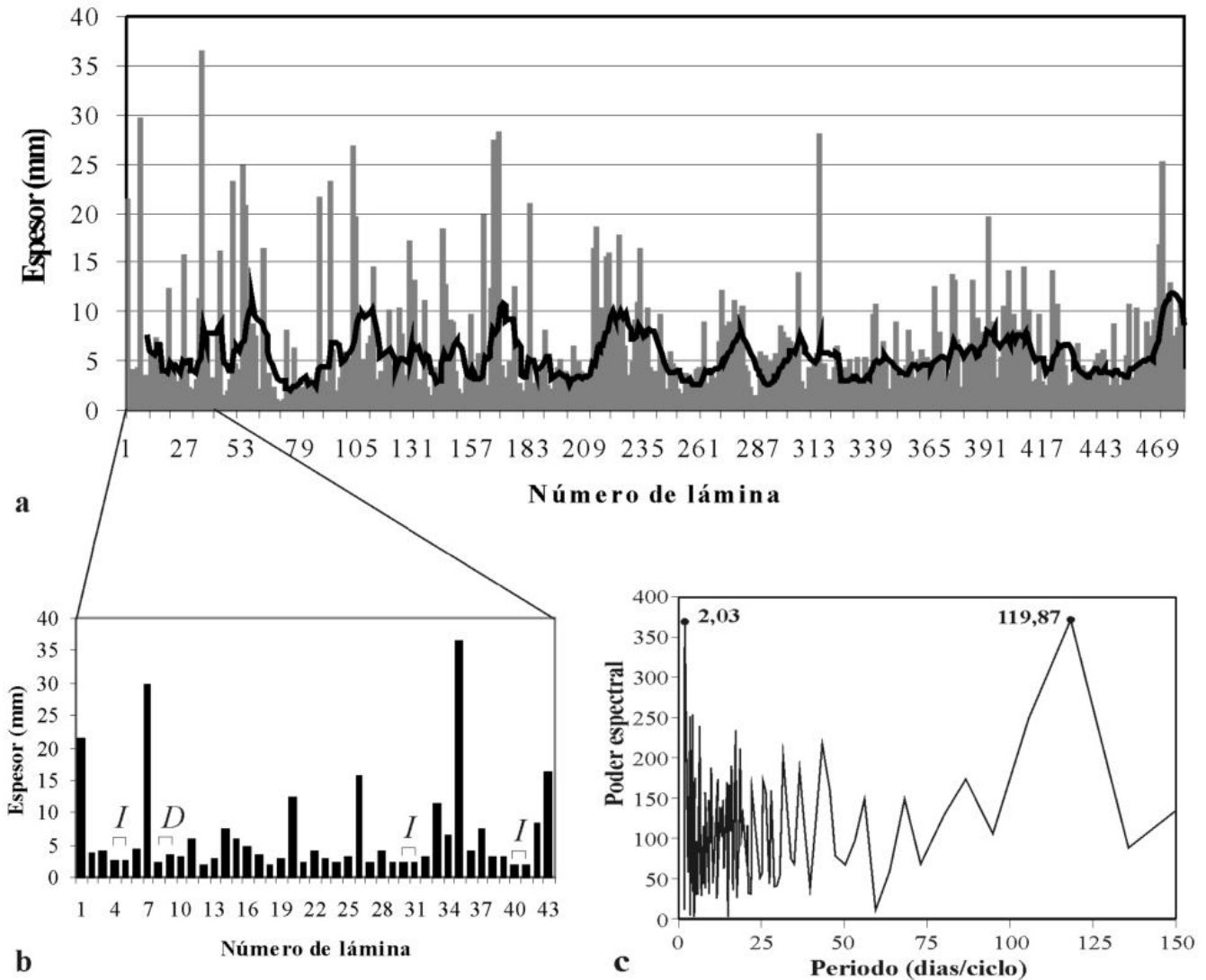


Figura 6: Gráfica de la variación de Espesor vs N° de lámina para las ritmitas mareales de Rancagua, con identificación de patrones oscilatorios producido de a) período sinódico (relacionado a la fase lunar) y b) período tropical (relacionado a la declinación lunar); c) Gráfica del Poder Espectral vs Período (eventos/ciclo), con dos picos en 2,03 y 119,87 relacionados con el sistema mareal semidiurno y el ciclo semianual.

sentar una falta de registro debido a pausas de sedimentación durante los ciclos de cuadratura lunar, cuando las mareas y corrientes son mínimas.

El origen mareal de las ritmitas gradadas en la secuencia de Rancagua ha sido reconocido a partir del análisis litofacial presentado en el apartado anterior. La secuencia rítmica ha sido evaluada a través de la medición de 480 láminas con espesores comprendidos entre 0,4 y 36,5 mm. La variación de los espesores de lámina presenta un patrón oscilatorio que evidencia curvas gaussianas con diferente grado de

simetría (Fig. 6). A partir de estos diagramas es posible identificar variaciones temporales debido a condiciones paleo-astronómicas que rigieron las mareas al momento del depósito.

La alternancia sistemática de láminas con espesores relativos delgados y gruesos de esta serie es común en los depósitos mareales modernos, y representan la desigualdad diurna de las mareas. En las ritmitas mareales de Rancagua éstas pueden representar los incrementos semidiurnos del día lunar (*D* en Fig. 6b). A su vez, el paso de la Luna por el cenit del punto terrestre so-

bre la costa activa al momento del depósito (donde se registran las tidalitas) impone que la diferencia diaria sea igual a cero (*I* en la Fig. 6b), dejando un registro sucesivo de igual espesor de depósito en flujo y reflujo. Esta posición astronómica de la Luna define el mes tropical (máxima declinación norte y sur).

El adelgazamiento de espesores en determinadas secciones de la secuencia responde a ciclos de cuadratura cuando las mareas muestran menor intensidad, seguidos por ciclos de mayor espesor, tal como se identifican en las figuras 6a y 7a. En este

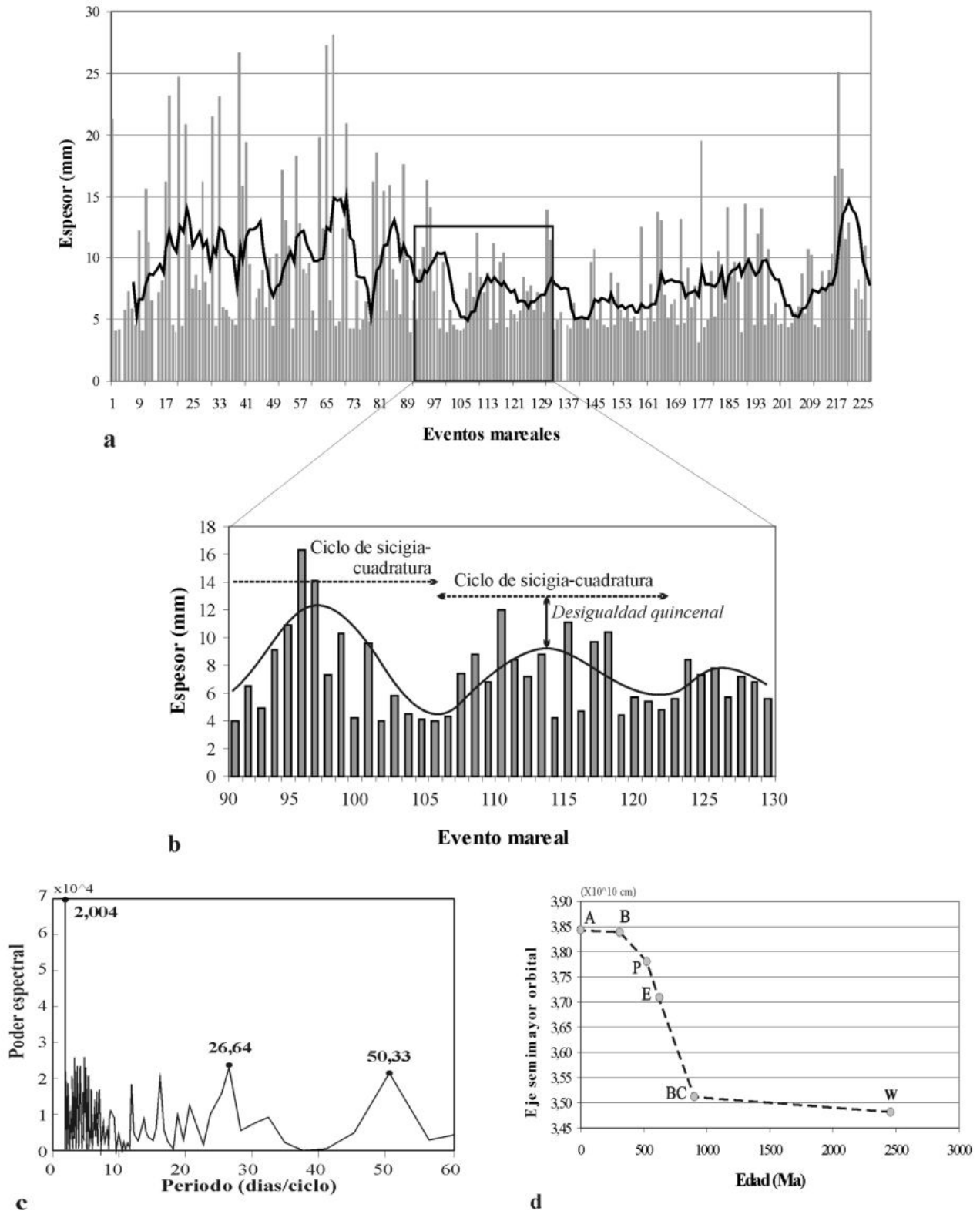


Figura 7: a), b) Gráfica de la variación de Espesor vs N° de lámina para las ritmitas mareales de Rancagua en los cuales se ha realizado un filtro de los componentes subordinados. Se identifican patrones oscilatorios producto del período sinódico y la desigualdad quincenal, que no había sido reco-cida en los datos crudos; c) Gráfica del Poder Espectral vs Período (días/ciclo), con tres picos en 2,004, 26,64 y 50,33 relacionados con el sistema mareal semidiurno, el período tropical y un ciclo estacional. d) Variación de la distancia Tierra-Luna a lo largo del tiempo geológico, calculada como el Eje Semimayor Orbital en cm. W: Formación Weeli Wolli (2450 Ma), BC: Formación Big Cottonwood (900 Ma, valor calculado por Sonett y Chan 1998), E: Formación Elatina (620 Ma), P: Formación Puncoviscana en Rancagua (540-520 Ma), B: Formación Brazil (Carbonífero), A: valor actual.

caso la sedimentación está regida por la alineación de Tierra-Luna-Sol en el mes sinódico.

El análisis armónico de los datos crudos mediante transformadas rápidas de Fourier permite obtener un diagrama de Poder espectral vs Período (eventos/ciclo) con dos picos claramente dominantes (Fig. 6c): i) 2,03 eventos/ciclo, ii) 119,87 eventos/ciclo. El primero representa los dos eventos de inundación y depósito por día lunar reconocido en la secuencia deposicional. El segundo pico representa la conjunción de los períodos sinódico, tropical y anomalístico, que ocurre dos veces al año (período semianual), momento en que las fuerzas mareales alcanzan un máximo debido a los refuerzos de cada período (Kvale *et al.* 1995). Sin embargo, la destrucción o amplificación de ciertos componentes mareales en cada cuenca dominada por mareas determina la posibilidad de detectar o no períodos astronómicos específicos en el análisis espectral de las ritmitas (Kvale *et al.* 1999). Por lo tanto, es conveniente realizar una serie de tratamientos estadísticos destinados a reconocer otros períodos astronómicos a partir de los datos crudos.

A partir de una sucesión completa de ciclos de sicigia-cuadratura se puede extraer el período del ciclo o mes tropical en días, para lo cual se aplica un filtro a los datos medidos de espesores de lámina. Este filtro consiste en eliminar los espesores de lámina más finos de los sucesivos registros semidiurnos, asumiendo entonces que cada depósito mareal (lámina) representa el depósito de un día (Kvale *et al.* 1999). El análisis armónico es desarrollado a partir de los datos filtrados, obteniéndose el ciclo mareal dominante expresado en días (no en eventos). Esta metodología es aplicada aún en secuencias modernas relativamente cortas de 4 meses, con buenos resultados en la duración de los períodos sinódico y/o tropical, y por ende en el cálculo de la distancia Tierra-Luna.

El filtro aplicado a las ritmitas mareales de Rancagua permite identificar, además del período tropical, los ciclos de sicigia-cuadratura con una desigualdad quincenal marcada (Fig. 7b). El análisis armónico de es-

tos datos mediante transformadas rápidas de Fourier registra 3 picos destacados (Fig. 7): i) 2,004 días, ii) 26,64 días, iii) 50,33 días. El período caracterizado por 2,004 días es un remanente del ciclo semidiurno de la marea, ya que el análisis armónico de los datos sin filtrar registra un pico de similares características y poder espectral en 2,03 eventos/ciclo, lo cual es equivalente a dos eventos de inundación y depósito por día lunar.

El período caracterizado por 26,64 días podría corresponder tanto al período sinódico (relacionado a la fase lunar) como tropical (relacionado a la declinación lunar). Este último es el responsable de la desigualdad de las mareas en los sistemas semidiurnos. Este patrón se registra también a partir de la figura 6, y tiene una mejor impronta en los depósitos y datos sin filtrar respecto al correspondiente al período sinódico. Por lo tanto se asignará este pico espectral al período tropical.

Finalmente, el pico espectral correspondiente a 50,33 días parece ser representativo de la superposición de algunos de los ciclos mareales sinódico, tropical o anomalístico, de carácter estacional a lo largo del año.

DISTANCIA TIERRA - LUNA

Los ciclos sinódico y tropical han sufrido a lo largo del tiempo geológico una reducción anual (menos ciclos anuales de mayor duración) debido al paulatino alejamiento de la Luna respecto a la Tierra, llegando actualmente a una duración de 29,53 y 27,3186 días, respectivamente. Estos ciclos lunares son los que permiten determinar la distancia Tierra-Luna y la duración del año solar, tanto en registros mareales actuales como antiguos (Kvale *et al.* 1999). Su identificación a partir de los registros sedimentarios de la Formación Puncoviscana es relevante en función de las implicancias paleo-astronómicas a nivel mundial.

El cálculo Tierra-Luna requiere de la duración del mes sideral, el cual se mide a partir de un punto fijo en el cielo. Como esta medición es solamente posible en los tiempos presentes, para las secuencias antiguas

se considera éste como equivalente al mes tropical, ($P_{sid} = P_{trop}$). Esta conversión se basa en que si bien el año tropical es más corto que el sideral, la fracción de tiempo es lo suficientemente pequeña como para considerarse insignificante respecto al grado de precisión esperado para las ritmitas mareales (Kvale *et al.* 1999).

La distancia Tierra-Luna puede ser calculada mediante la fórmula: $(P_{sid}/P_{sid0})^2 = (a/a_0)^3$, donde P_{sid0} : número de días en el mes sideral actual (27,3186 días), a_0 : distancia Tierra-Luna actual ($3,844 \times 10^{10}$ cm), P_{sid} : número de días en el mes sideral en el tiempo pasado, a : distancia Tierra-Luna en el tiempo pasado. De acuerdo con los resultados obtenidos a partir del análisis armónico, $P_{trop} = P_{sid} = 26,64$ días, por lo cual la distancia T-L para el límite Neoproterozoico-Cámbrico Temprano, expresada como eje semimayor, es de $3,78 \times 10^{10}$ cm.

DISCUSIÓN

Las ritmitas mareales de la Formación Puncoviscana en la localidad de Rancagua presentan características sedimentológicas similares a aquellas reconocidas en el Grupo Semri (1.4-1.0 Ga, India), y las Formaciones Big Cottonwood (900 Ma, Utah, USA), Elatina (620 Ma, Australia), Brazil (Carbonífero, Indiana, USA), unidades que han sido estudiadas en detalle por De (2001), Ehlers y Chan (1999), Archer y Johnson (1997), Williams (2000) y Kvale *et al.* (1999), respectivamente. Todas ellas, incluyendo la Formación Puncoviscana presentan similitudes con secuencias mareales modernas estudiadas por de Boer *et al.* (1989), Dalrymple *et al.* (1991), Kvale *et al.* (1995), Archer y Jonson (1997), Deloffre *et al.* (2007). Los ciclos geológicos en que se desarrollan las ritmitas mareales muestran un número interesante de similitudes. Un nivel del mar relativamente bajo durante períodos de glaciación continental registra un notable incremento en períodos post-glaciales, generándose importantes descargas fluviales y grandes áreas estuarinas (Archer 1996). En este sentido, las secuencias de las Formaciones Big Cottonwood

(900 Ma) y Elatina (620 Ma) se asocian con secuencias glaciales bien definidas, un rango ausente en la Formación Brazil (305 Ma).

Temporalmente, las ritmitas de la Formación Puncoviscana (540-520 Ma) se formaron durante el período post-glacial que sucede a la glaciación Varangeriana (~600 Ma), documentado por un progresivo aumento del nivel de mar a escala global y consecuente inundación del antepaís. Esta situación coincide con la dispersión continental generada en el desmembramiento del supercontinente Rodinia (a partir de los 750 Ma, Torsvik *et al.* 1996) y la expansión local de los nuevos mares intracontinentales.

El alejamiento de la Luna, registrado por las series rítmicas en la localidad de Rancagua, permite reconstruir una evolución gradual del radio orbital medio lunar desde el Mesoproterozoico hasta el Cámbrico Temprano, con una velocidad de alejamiento de 7 cm/año (Fig. 7d). La finalización de esta época coincidió con la dispersión del supercontinente Pangea durante el Pannotiano, con un incremento del 50 % en la frecuencia de mareas respecto al tiempo actual y la formación de capas de hielo y amplias plataformas peneplanizadas, tal como fue reconocido por Kvale *et al.* (1999).

Kvale *et al.* (1999) proponen que el alejamiento de la Luna sería mayor cuando los continentes convergen y se amalgaman, como aconteció en el Mesoproterozoico (Grenville) y el Paleozoico superior, y resultaría mucho menor cuando se dispersan, como habría sucedido en el Neoproterozoico-Paleozoico inferior y en el Mesozoico superior-Cenozoico. La tasa de alejamiento de la Luna ha sido calculada en ~ 1,24 cm/año en el lapso 2450-620 Ma, y de ~2,17 cm/año en promedio desde los 620 Ma a la actualidad (Williams 2000). Sin embargo, al considerar la distancia Tierra-Luna para el Neoproterozoico - Cámbrico temprano (Formación Puncoviscana, Fig. 7d), la tasa de alejamiento del satélite debe ser analizada desde un nuevo enfoque.

La Luna se ha ido alejando a una razón de 0,20 cm/año durante el Paleoproterozoico, 7,0 cm/año durante el Mesoproterozoico

hasta el Cámbrico Temprano (620-520 Ma), 2,74 cm/año durante la mayor parte del Paleozoico y finalmente 0,26 cm/año desde el Carbonífero hasta la actualidad (Fig. 7d). Se aprecia una velocidad de alejamiento del satélite bastante estable durante todo el Mesoproterozoico hasta el límite Neoproterozoico-Cámbrico. Luego la Luna sufrió una disminución en su velocidad de alejamiento, manteniendo una tasa de alejamiento inferior a 3 cm/año.

Los datos sugieren un evento astrofísico singular discreto e irreplicable durante el Neoproterozoico-Cámbrico Temprano, que provoca la disminución de la velocidad de alejamiento del cuerpo celeste en un 50%.

CONCLUSIONES

La presente investigación permite reconocer que la Formación Puncoviscana registra, en la localidad de Rancagua, litofacias de ambientes litorales entre cara de playa (*shoreface*) y plataforma distal (*offshore*) somera. La asociación de litofacias implica una secuencia de profundización hacia una plataforma somera (< 200 m de profundidad) dominada por mareas. Este ambiente protegido de la acción de las olas ha permitido la preservación de la secuencia rítmica mareal, caracterizada por una sucesión limosa micro-laminada. La variación en los espesores de lámina es propia de un régimen de marea semidiurno, con ciclos lunares sinódico y tropical bien definidos.

El análisis armónico de los datos mediante transformadas rápidas de Fourier permite identificar períodos cuyo componente dentro del ciclo mareal presenta mayores poderes espectrales. Estos son semidiurno (2,03 eventos/ciclo), tropical (26,64 días/ciclo), estacional (50,33 días/ciclo) y semianual (119 eventos/ciclo).

La distancia Tierra-Luna, calculada a partir del valor de la distancia T-L actual, el período sideral actual y en el pasado (= período tropical Neoproterozoico-Cámbrico Temprano = 26,64 días), es de $3,78 \times 10^{10}$ cm. El alejamiento de la Luna a lo largo del tiempo geológico muestra un comportamiento estable que puede ser analizado en cuatro épocas: i) Paleoproterozoico (0,20

cm/año), ii) Mesoproterozoico-Cámbrico Temprano (7 cm/año), iii) Paleozoico (2,7 cm/año) y iv) Mesozoico-actual (0,3 cm/año)

Los datos sugieren un evento astrofísico singular e irreplicable durante la transición Paleo-Mesoproterozoico con incremento en la velocidad de alejamiento hasta el Cámbrico Temprano, con eventos menores discretos en el Cámbrico Temprano y Paleozoico tardío con disminución del 50% de la velocidad de alejamiento. Podríamos decir que a partir del Cámbrico Temprano la estabilización progresiva (en dos etapas separadas 215 Ma) de la velocidad de alejamiento de la Luna coincide con el desarrollo de las especies sobre la Tierra. Sin embargo, las relaciones entre un fenómeno y otro deben ser analizadas detalladamente en otros estudios.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es una contribución del proyecto de investigación N° 1684, Consejo de Investigaciones, Universidad Nacional de Salta y al proyecto: Agencia de Investigación Científica y Tecnológica PICTO N° 36637. Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Salta y al CONICET por los apoyos institucionales brindados al grupo de trabajo. Se agradece asimismo al Dr. Allen Archer por compartir su amplia experiencia en el tema a través de comunicaciones personales, y a los árbitros Dr. Gerardo Perillo y Dr. Roberto Scasso por los comentarios y sugerencias para mejorar la presente contribución.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, G.F. 2004. Precambrian-Cambrian ichnofossils, an enigmatic "annelid tube" and microbial activity in the Puncoviscana Formation (La Higuera; Tucumán Province, NWArgentina). *Geobios* 37: 127-133.
- Aceñolaza, F. y Aceñolaza, G. 2005. La Formación Puncoviscana y unidades estratigráficas vinculadas en el Neoproterozoico - Cámbrico temprano del noroeste argentino. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 12(2): 65-87.

- Aceñolaza, G.F. y Aceñolaza, F.G. 2007. Insights in the Neoproterozoic - Early Cambrian transition of NW Argentina: Facies, environments and fossils in the proto-margin of western Gondwana. Geological Society, Special Publications 286: 1-13, London.
- Aceñolaza, F.G. y Durand, F.R. 1973. Trazas fósiles del basamento cristalino del noroeste argentino. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba 1: 45-55.
- Aceñolaza, F.G., Durand, F. y Sosa Gómez, J. 1989. Cuenca del Precámbrico Superior-Cámbrico Inferior del Noroeste Argentino. En Chebli, G. y Spalletti, L. (eds.), Cuencas Sedimentarias Argentinas. INSUGEO, Serie de Correlación Geológica, 6: 9-18, Tucumán.
- Aceñolaza, F.G., Aceñolaza, G.F. y Esteban, S.B. 1999. Bioestratigrafía de la Formación Puncoviscana y unidades equivalentes en el NOA. En González Bonorino, G., Omarini, R. y Viramonte, J. (eds.), Geología del Noroeste Argentino. 14º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 91-114, Salta.
- Almeida, F., Hasui, Y. y Brito Neves, B. 1976. The Upper Precambrian of South America. Boletín Instituto de Geociencias Universidad de Sao Pablo 7: 45-80.
- Allen, J.R.D. 1982. Mud drapes in sand-wave deposits: A physical model with application to the Folkestone Beds (Early Cretaceous, southeast England). Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A 306: 291-345.
- Allen, P.A. y Homehood, P. 1984. Evolution and mechanics of a Miocene tidal sandwave. Sedimentology 31(1): 63-81.
- Archer, A.W. 1996. Reliability of lunar orbital periods extracted from ancient cyclic tidal rhythmites. Earth and Planetary Science Letters 141: 1-10.
- Archer, A.W. y Johnson, T. 1997. Modelling of cyclic tidal rhythmites (Carboniferous of Indiana and Kansas, Precambrian of Utah, USA) as a basis for reconstruction of intertidal positioning and paleotidal regimes. Sedimentology 44: 991-1010.
- Brockmann, C., Castañón, A., Suárez, R. y Tomasi, P. 1972. Estudio geológico de la Cordillera Oriental de los Andes en la zona central de Bolivia (Región de Chapare). Sociedad Geológica Boliviana 18: 3-36.
- Buatois, L. y Mángano, M. 2003. Early colonization of the deep sea: ichnologic evidence of deep-marine benthic ecology from the Early Cambrian of northwest Argentina. Palaios 18: 572-581.
- Buatois, L. y Mángano, M. 2004. Terminal Proterozoic-Early Cambrian ecosystems: ichnology of the Puncoviscana Formation, northwestern Argentina. Fossils and Strata 51:1-16.
- Chayle, W. y Coria, B. 1987. Vulcanitas básicas a ultrabásicas y mesosilíceas de la Formación Puncoviscana en el área del cerro Alto de Minas, Departamento Tilcara-Jujuy, Argentina. 10º Congreso Geológico Argentino 2: 296-298, Tucumán.
- Dalrymple, R.W., Makino, Y. y Zaitlin, B.A. 1991. Temporal and spatial patterns of Rhythmite deposition on mud flats in the macrotidal Cobequid Bay, Salmon river estuary, Bay of Fundy, Canada. En Smith, D.G., Reinson, G.E., Zaitlin, B.A. y Rahmani, R.A. (eds.), Clastic Tidal Sedimentology, Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 16: 137-160.
- De, Ch. 2001. Billion-year-old rain-imprinted tidal sea-cost in eastern Madhya Pradesh, India. Current Science 81(8): 1116-1124.
- de Boer, P.L., Oost, A.P. y Visser, M.J. 1989. The diurnal inequality of the tide as a parameter for recognising tidal influences. Journal of Sedimentary Petrology 59: 912-921.
- Deloffre, J., Verney R., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S. y Cundy, A.B. 2007. Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. Marine Geology 241(1-4): 19-32.
- Durand, F.R. y Aceñolaza, F.G. 1990. Caracteres biofaunísticos, paleoecológicos y paleogeográficos de la Formación Puncoviscana (Precámbrico superior - Cámbrico inferior) del noroeste argentino. En Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (eds.) El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino. Serie Correlación Geológica 4: 71-112, Tucumán.
- Ehlers, T.A. y Chan, M.A. 1999. Tidal sedimentology and estuarine deposition of the Proterozoic Big Cottonwood Formation, Utah. Journal of Sedimentary Research 69(6): 1169-1180.
- Fitzgerald, D. y Nummedal, D. 1983. Response characteristics of fan ebb-dominated tidal inlet channel. Journal of Sedimentary Petrology 53: 833-845.
- Galli, C.I. y Hernández, M. 1999. Evolución de la cuenca de Antepais desde la zona de la Cumbre Calchaquí hasta la Sierra de Santa Bárbara. En: Colombo, F., Queralt, I. y Petrinovic I. A. (eds), Geología de los Andes Centrales Meridionales: El Noroeste de Argentina. Acta Geológica Hispánica 82(3): 167-185.
- Hauser, N., Matteini, M., Pimentel, M. y Omarini, R. 2008. K-Ar y Sr-Nd geochronology of alkaline lamprophyre dykes, from the Rio Grande valley, Eastern Cordillera, NW Argentina: origin of parental magma from a metasomatized mantle. 6º South American Symposium on Isotope Geology, Actas en CD, Bariloche.
- Hernández, R.M., Jordan, T.E., Dalenz Farjat, A., Echavarría, L., Idleman, B.D. y Reynolds, J.H. 2005. Age, distribution, tectonics, and eustatic controls of the Paranense and Caribbean marine transgressions in southern Bolivia and Argentina. Journal of South American Earth Sciences 19: 495-512.
- Jézek, P. 1990. Análisis sedimentológico de la Formación Puncoviscana entre Tucumán y Salta. En Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (eds.), El Ciclo Pampeano en el noroeste argentino. INSUGEO, Serie de Correlación Geológica 4: 9-36, Tucumán.
- Johnson, H.D. y Baldwin, C.T. 1986. Shallow siliclastic seas. En Reading, H.G. (ed.), Sedimentary Environments and Facies. 2nd ed. Blackwell, p. 229-282, Oxford.
- Kvale, E.P., Fraser, G.S., Archer, A.W., Zawistoski, A., Kemp, N. y McGough, P. 1994. Evidence of seasonal precipitation in Pennsylvanian sediments of the Illinois Basin. Geology 22: 331-334.
- Kvale, E.P., Cutright, J., Bilodeau, D., Archer, A.W., Johnson, H.R. y Pickett, B. 1995. Analysis of modern tides and implications for ancient tidalites. Continental Shelf Research 15: 1921-1943.
- Kvale, E.P., Johnson, H.R., Sonett, C., Archer, A.W. y Zawistoski, A. 1999. Calculating lunar retreat rates using tidal rhythmites. Journal of Sedimentary Research 69: 1154-1168.
- López de Azarevich, V. y Omarini, R. 2008a. Tidal rhythmites in the Puncoviscana Formation (s.l.): The lost Precambrian-Eocambrian coast of NW Argentina. 12º Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 100, Buenos Aires.
- López de Azarevich, V. y Omarini, R. 2008b. Mixed paleotidal system for the Proterozoic-Cambrian carbonate platform in NW Argentina. 12º Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 99, Buenos Aires.
- Mazumder, R. y Arima, M. 2005. Tidal rhythmites and their implications. Earth-Science Reviews 69: 79-95.
- Miller, D. y Eriksson, K.A. 1997. Late Mississippian Prodeltaic rhythmites in the Appalachian basin:

- a hierarchical record of tidal and climatic periodicities. *Journal of Sedimentary Research* 67: 653- 660.
- Mirré, J.C. y Aceñolaza, F.G. 1972. El hallazgo de *Oldhamia* sp. (Traza fósil) y su valor como evidencia de edad cámbrica para el supuesto Precámbrico del borde occidental del Aconquija, provincia de Catamarca. *Ameghiniana* 9: 72-78.
- Omarini, R. 1983. Caracterización litológica, diferenciación y génesis de la Formación Puncoviscana entre el Valle de Lerma y La Faja Eruptiva de la Puna. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, (inédita), 202 p., Salta.
- Omarini, R., Sureda, R., Götze, H., Seilacher, A. y Pflüger, F. 1999. Puncoviscana folded belt in northwestern Argentina: testimony of Late Proterozoic Rodinia fragmentation and pre-Gondwana collisional episodes. *International Journal of Earth Science* 88: 76-97.
- Saadi, Z., Fedan, B., Laadila, M. y Kaoukaya, A. 2003. Les tidalites liasiques de la Haute Moulouya et du Moyen Atlas meridional (Maroc): dynamique sédimentaire et contexte paléogéographique. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre* 25: 55-71.
- Salfity, J., Omarini, R., Baldis, B. y Gutierrez, W. 1976. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del norte argentino. 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 4: 341-361, Buenos Aires.
- Sánchez, M.C. 1994. El Grupo Mesón (Cámbrico) en el tramo austral de la Cordillera Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, (inédita), 248 p., Salta.
- Sonett, C.P., Kvale, E.P., Zakharian, A., Chan, M.A. y Demko, T.M. 1996. Late Proterozoic and Palaeozoic tides, retreat of the Moon, and rotation of the Earth. *Science* 273: 100-104.
- Sonett, C.P. y Chan, M.A. 1998. Neoproterozoic Earth-Moon dynamics: Rework of the 900 Ma Big Cottonwood Canyon tidal rhythmites, *Geophysical Research Letters* 25: 539-542.
- Sureda, R., Omarini, R. y Alonso, R. 1999. El Ciclo Pannotiano, la perspectiva histórica y las nuevas definiciones. En González Bonorino, G., Omarini, R. y Viramonte, J. (eds.), *Geología del Noroeste Argentino*. 14º Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1: 21-27.
- Torsvik, J.H., Smethurst, M.A., Meert, J.G., Van der Voo, R., Mckerrow, W.S., Brasier, M.D., Sturt, B.A. y Walderhaug, H.J. 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Paleozoic: A Tale of Baltica and Laurentia. *Earth and Science Reviews* 40: 229-258.
- Toselli, A.J., Aceñolaza, F.G., Sial, A.N., Rossi, J.N. y Ferreira, V.P. 2005. Los carbonatos de la Formación Puncoviscana s.l.: Correlación quimioestratigráfica e interpretación geológica. 16º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 327-333, La Plata.
- Turner, J. C. M. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacentes. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 41(2): 163-196, Córdoba.
- Turner, J.C.M. y Mon, R. 1979. Cordillera Oriental. En Turner, J.C.M. (Coord.), 2º Simposio de Geología Regional Argentina, I: 57-94, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Yang, C-S y NIO, S-D. 1985. The estimation of palaeohydrodynamic processes from subtidal deposits using time series analysis methods. *Sedimentology* 32(1): 41-57.
- Williams, G.E. 1989. Late Proterozoic tidal rhythmites in South Australia and the history of the earth rotation. *Journal of the Geological Society* 146: 97-111, London.
- Williams, G.E. 2000. Geological constraints on the precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit. *Reviews of Geophysics* 38(1): 37-59.

Recibido: 18 de septiembre, 2008

Aceptado: 9 de diciembre, 2009.