

Hallazgo del primer *seep* fósil en la costa emergida de Chile central (33°56' S). Caracterización e implicancias

Ximena Contardo-Berrios¹, Emilio Mena-Hodges^{1,2}, Eduardo Quiroga²

¹ Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Geología, Quillota 980, Viña del Mar, Chile.
ximena.contardo@unab.cl; emiliodmh@gmail.com

² Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Escuela de Ciencias del Mar, Avda. Altamirano 1480, Valparaíso, Chile.
eduardo.quiroga@pucv.cl

RESUMEN. Se describen las características determinativas del primer *seep* de hidrocarburo fósil, identificado en la costa emergida de Chile central, preservado en la playa de la localidad de Navidad. El *paleoseep* de Navidad (PSN) corresponde a una acumulación de carbonato de calcio autigénico con organismos fósiles, dispuesto perpendicular a la línea de costa con una orientación N45° W, discordante con las secuencias de rocas miocenas que afloran en el área. El PSN consiste mayoritariamente de carbonato de calcio, presente como matriz y en costras irregulares, muy bien compactado. Sobre la base de sus características texturales, se identifican predominantemente facies de *mudstone* y *wackstone*. El PSN en términos mineralógicos consiste en calcita magnésica, predominantemente como micrita y en menor grado esparita. Otros componentes minoritarios, no carbonáticos son cuarzo, albita, anfíboles, ortoclasa y microclina, además de fragmentos líticos, principalmente volcánicos. El afloramiento contiene una variedad de organismos tales como bivalvos, gasterópodos, teredos en madera fósil, microbialitas y otros. La presencia de la especie *Lucinoma promaucana* permite establecer su contemporaneidad con las rocas de la Formación Navidad. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ determinados en la matriz de carbonato y en conchas de bivalvos presentes en el PSN, varían entre -41,4‰ y -29,5‰ PDB representando los típicos valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ registrados en *seeps* de hidrocarburos. La existencia del PSN en la costa emergida de la localidad de Navidad constituye el primer registro fósil de la migración de hidrocarburos desde el subsuelo marino en ambiente de talud con una importante actividad al menos desde el Mioceno Temprano.

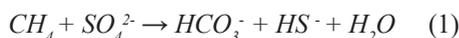
Palabras clave: Paleoseep, Formación Navidad, Quimiosíntesis, Carbonato Autigénico, Hidrocarburo, Tectónica, *Lucinoma Promaucana*.

ABSTRACT. Finding of the first fossil *seep* in the emerged coast of Central Chile (33°56' S). Characterization and implications. This study presents the main characteristics of the first fossil hydrocarbon *seep* documented on the emerged coast of Central Chile. The Navidad *Paleoseep* (NPS) is an outcrop of carbonate and fossil organisms preserved on the beach of the Navidad locality. The carbonate structure is oriented N45° W, perpendicular to the coastline and discordant with sub horizontal Miocene sequences found in the area. This type of authigenic carbonate accumulation, originates on the sea floor as the result of anaerobic oxidation of methane, generated by low temperature fluids released through seafloor fractures. The NPS consists mainly of calcium carbonate in the form of matrix and crystallized precipitate. Based on textural features, dominant facies of the outcrop were defined as mudstone and wackstone. The associated mineralogy consists of magnesian calcite, predominantly as micrite matrix, minor components of quartz, albite, amphibole, orthoclase, microcline and fragments of volcanic lithics are also identified. The NPS also contains a variety of fossils, such as bivalves, gastropods, tube worms, teredolites, microbialites and others. The occurrence of *Lucinoma promaucana* in the *paleoseep*, evidences a temporal and spatial correlation with the Navidad Formation *i.e.*, would ranges from lower to middle Miocene. The $\delta^{13}\text{C}$ values vary between -41.4‰ in the matrix and -29.5‰ PDB in bivalve shells, representing the typical negative $\delta^{13}\text{C}$ values seen in hydrocarbon *seeps*.

Keywords: Paleoseep, Navidad Formation, Chemosynthesis, Authigenic Carbonate, Hydrocarbon, Tectonic, *Lucinoma Promaucana*.

I. Introducción

Los “*cold seeps*” o sumideros fríos de hidrocarburos, constituyen sitios de emisión de fluidos de baja temperatura, a través de fracturas en el fondo marino. Estos flujos están típicamente enriquecidos en metano, ácido sulfhídrico y otros componentes reductores (Sahling *et al.*, 2002; Campbell, 2006). Los fluidos pueden contener metano biogénico, termogénico o ambos, los cuales emanan a través de fallas y fracturas por incrementos de presión en las capas subyacentes. Estos pueden liberarse desde el subsuelo mediante inyecciones de arena con acumulaciones de gases a través de volcanes y diapiros de fango (Contardo y Jensen, 2009), o bien por desestabilización de los hidratos de metano (Dimitrov, 2003; Campbell, 2006). Asociado a los *cold seeps* se desarrollan comunidades de organismos que utilizan un consorcio microbiano entre las arqueas oxidadoras de metano y las bacterias reductoras de azufre. Los productos de este consorcio incluyen la fijación de carbono a través de la oxidación anaeróbica del metano (OAM), la producción de sulfuros a través de la reducción del sulfato y la precipitación de carbonato autigénico (Valentine, 2002). El conjunto de reacciones, de oxidación del metano (OM) y la reducción del sulfato (SR) se sintetiza mediante la siguiente ecuación neta (1):



Esta reacción se produce en los sedimentos, en la interface entre las zonas OM y SR, donde el metano que proviene de capas subyacentes, se encuentra con el sulfato del agua de mar. Como resultado se origina bicarbonato, lo que aumenta la alcalinidad en el ambiente, favoreciendo la precipitación del carbonato de calcio autigénico (Valentine, 2002; Levin, 2005; Nyman *et al.*, 2010).

El estudio de los *cold seeps* tanto fósiles como actuales es importante para dilucidar el desarrollo de los ecosistemas quimiosintéticos, siendo cruciales para el entendimiento de la evolución de la atmósfera y el desarrollo de vida en ambientes extremos. Las comunidades de microorganismos asociados a estos sistemas serían equivalentes a las primeras formas de vida desarrolladas en la primitiva atmósfera terrestre. Asimismo, los *cold seeps* se consideran análogos terrestres de procesos que se desarrollarían *e.g.*, en Marte, las lunas de Saturno (Titán) y Júpiter (Europa) (Kasting y Siefert, 2002;

Kasting, 2004). Otras implicancias del estudio de los fluidos provenientes desde el fondo marino son por ejemplo, su potencial como guía de exploración de hidrocarburos (Abrams, 2005), o bien su relación con zonas de inestabilidad de taludes y generación de grandes deslizamientos (*e.g.*, Conti y Fontana, 2002). La liberación repentina de grandes volúmenes de metano -potente gas invernadero- asociado a la desestabilización y disociación de los hidratos de gas, habría influenciado cambios climáticos en el pasado geológico (Dickens *et al.*, 1995; Kennett *et al.*, 2003; Judd *et al.*, 2002). Por otra parte, los *cold seeps* se han establecido como ecosistemas claves en el escenario del cambio climático, debido a su influencia en los ciclos biogeoquímicos en el océano (Levin *et al.*, 2016).

Desde su descubrimiento (Paull *et al.*, 1984; Kennicutt *et al.*, 1985; Suess *et al.*, 1985; Kulm *et al.*, 1986; Le Pichon *et al.*, 1987), se han identificado cientos de *cold seeps*, tanto en márgenes continentales activos como pasivos (Campbell *et al.*, 2002; Levin, 2005). Los *cold seeps* fósiles o “*paleoseeps*” detectados alrededor del mundo se encuentran en estratos marinos exhumados que fluctúan en edad desde el Devónico al Cuaternario (Campbell *et al.*, 2002; Peckmann *et al.*, 1999, 2001; Gómez-Pérez, 2001; Campbell, 2006).

Los criterios desarrollados para identificar *paleoseeps* (*e.g.*, Beauchamp *et al.*, 1989; Campbell, 1992; Campbell y Bottjer, 1995; Peckmann *et al.*, 1999) se basan en las características tectono-estratigráficas, estructurales, petrográficas, paleontológicas y particularmente en las firmas isotópicas de estas acumulaciones carbonáticas. La determinación de la posición relativa del paleo fondo marino se basa en el estudio de los fósiles contenidos en ellos. Es importante, además, identificar la geometría del afloramiento y su relación con las unidades de la columna estratigráfica, para determinar la edad y períodos de actividad del *cold seep*.

La composición isotópica del carbono en el carbonato autigénico presente en los *cold seeps* y *paleoseeps* se caracteriza por contener valores negativos del $\delta^{13}C$. Esto se explica en su origen, a partir de la oxidación anaeróbica del metano (OAM), cuyos valores de $\delta^{13}C$ oscilan entre -20 a -50‰ PDB en el metano termogénico y valores desde -50 a -110‰ PDB en el metano biogénico (Whiticar, 1999; Jiang *et al.*, 2003; Campbell, 2006), contrastando con los valores más positivos reportados en los

carbonatos marinos que varían alrededor de -5 y 0‰ (Hoefs, 2009).

En Chile, se han reportado al menos tres sitios de *cold seeps* de metano activos en la plataforma continental y el talud submarino, a profundidades que fluctúan entre los 350 y los 1.000 m. Los sitios se ubican frente a las costas del Quisco (~33° S), Concepción (~36° S) y más al sur, frente a Taitao (~47° S). En estos lugares se desarrollan, y eventualmente se preservan, costras carbonáticas y brechas de fango carbonatado. Estos sitios constituyen hábitats para las comunidades bentónicas, caracterizadas por altas dominancias ecológicas de invertebrados tales como: poliquetos, braquiópodos, escafópodos, crustáceos y particularmente conchas de bivalvos de las familias *Vesicomyidae*, *Solemyidae* y *Lucinidae* (Sellanes et al., 2004, 2007, 2008; Quiroga y Levin, 2010). A la fecha, solo se ha documentado un sumidero de hidrocarburo en aguas someras de isla Mocha (38°20' S, 73°55' W), en el margen centro-sur de Chile (Sellanes et al., 2011; Jessen et al., 2011). Sin embargo, en este sitio no se han desarrollado costras de carbonato autigénico, ya que en presencia de oxígeno, la oxidación aeróbica de metano origina la producción de H₂CO₃, un ácido débil que genera disolución del carbonato (Levin, 2005).

Por otra parte, a través de datos geoacústicos de alta resolución (Klaucke et al., 2012), se ha detectado y descrito la ocurrencia de *cold seeps* en áreas del talud superior y medio de Chile central (36,5° S y 36,8° S). La interpretación de estos registros ha permitido identificar numerosos sitios de *cold seeps*, tanto activos como fósiles (mayoritariamente), situados entre los 600 a 1.000 m de profundidad.

En la playa de la localidad de Navidad, se encuentra un afloramiento de carbonato de calcio con fósiles, que reúne las características determinativas de un *paleoseep*, el primero en ser reportado en un área emergida del margen continental chileno. Nuevos hallazgos en cuencas marinas exhumadas resultan altamente esperables, considerando las condiciones geológicas y tectónicas asociadas a la subducción activa desde el Mesozoico temprano (e.g., Mpodozis y Ramos, 1989). Por lo anterior, resulta fundamental documentar y contribuir en el conocimiento de estos particulares ecosistemas y sus implicancias. El objetivo de este artículo es caracterizar y aportar los antecedentes mineralógicos, paleontológicos y geoquímicos que han permitido confirmar la presencia en este lugar, del primer *paleoseep* reconocido en la

costa de Chile central (Mena et al., 2011; Contardo y Mena, 2012), estratigráficamente asociado a las rocas de la Formación Navidad.

1.1. Ubicación y accesos

La localidad de Navidad se encuentra en la costa de Chile central, en la sexta región del Libertador Bernardo O'Higgins, al sur de la desembocadura del río Rapel. La zona de hallazgo se sitúa al nivel de la playa, en los 33°56'28,09" S, 71°51'11,10" W. El acceso se realiza desde la localidad de Las Brisas, en dirección hacia el sur, o bien, desde la localidad de Matanzas hacia el norte (Fig.1). El afloramiento de carbonato de calcio, objeto de este estudio, se emplaza en la zona supralitoral de la playa de Navidad, asociada a un campo de dunas. Este sector se encuentra rodeado por acantilados constituidos de rocas estratificadas marinas neógenas (Figs. 2a y 2b).

1.2. Marco geológico local

En el área de estudio predomina una secuencia de rocas estratificadas marinas neógenas, correspondientes a la Formación Navidad, que conforman la zona de acantilados costeros. Sus afloramientos se distribuyen de manera discontinua a lo largo de la costa de Chile central entre Valparaíso y Punta Topocalma. Esta unidad ha sido estudiada por numerosos autores quienes, a partir de Darwin (1846), han planteado diferentes interpretaciones en cuanto al ambiente de depositación, límites estratigráficos y rangos de edad (e.g., Steinmann, 1895; Brüggén, 1934; Fuenzalida y Varela, 1964; Tavera, 1968, 1979; Etchart, 1973; Cecioni, 1978; Covacevich y Frassinetti, 1986, 1990; Frassinetti y Covacevich, 1993; Gana et al., 1996; Wall et al., 1996; Encinas et al., 2006, 2008, 2014; Finger et al., 2013; Gutiérrez et al., 2013; Le Roux et al., 2014). En términos generales, las secuencias que conforman la Formación Navidad corresponden a un nivel basal de conglomerado cubierto por secuencias de arenisca y limolitas; estas se reconocen depositadas en ambiente marino, con interpretaciones que van desde un entorno de plataforma somera (e.g., Cecioni, 1978; Gutiérrez et al., 2013), hasta profundidades de ambiente de talud (Encinas et al., 2006, 2008; Finger et al., 2013). Los rangos de edad propuestos para esta unidad abarcan

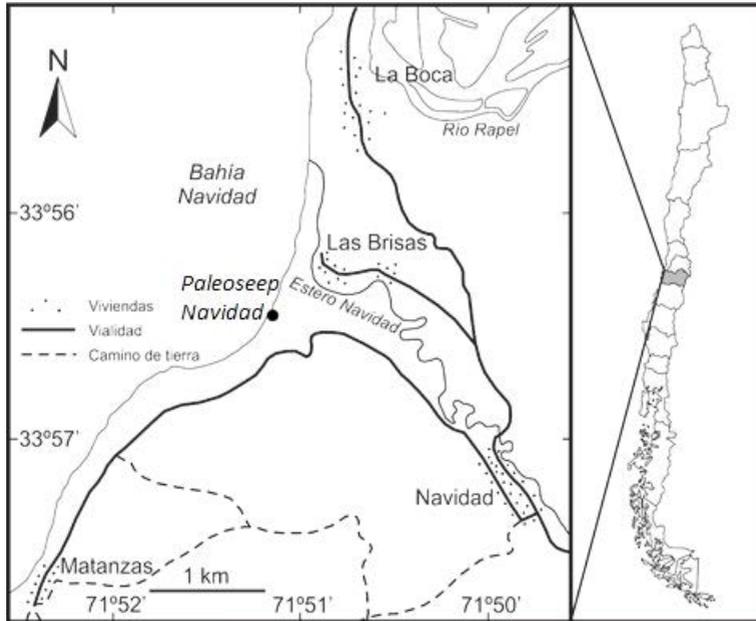


FIG. 1. Mapa de ubicación y accesos.



FIG. 2. **a-b.** Afloramiento del *paleoseep* de Navidad. Las variaciones estacionales en los meses de invierno y verano determinan considerables diferencias respecto de su grado de exposición en la playa. En la imagen superior (a), tomada en agosto de 2011, se aprecia ~30% del afloramiento respecto de la imagen inferior (b) tomada en diciembre de 2011. En segundo plano se observan los acantilados costeros, correspondientes a estratos de la Formación Navidad.

desde una base Oligoceno Superior (Darwin, 1846; Brüggén, 1950)-Mioceno Temprano (Tavera, 1979; Gutiérrez et al., 2013; Finger et al., 2013), hasta un límite superior situado en el Plioceno Temprano (Gana et al., 1996; Wall et al., 1996; Encinas et al., 2006). El esquema estratigráfico de Encinas et al. (2006) eleva al rango de formación a la secuencia previamente descrita como Miembro Navidad, definiéndola como ambiente de talud y estableciendo en principio sus límites de edad, entre el Mioceno Tardío y el Plioceno Temprano (Tortoniano-Zancleano). Según esta definición, la base de la formación sobreyace en discordancia de erosión a los estratos Cretácicos de la Formación Punta Topocalma, así como al basamento granítico del Paleozoico (Cecioni, 1978) y subyace en paraconformidad a la Formación Licancheu. De acuerdo a lo anterior, la Formación Navidad alcanza una potencia máxima de 200 m, conformada por un conglomerado basal, seguido por una alternancia de areniscas y limolitas. Asociado a la descripción de estas secuencias, destacan las facies sedimentarias dominadas por flujos de gravedad, abundancia de trazas fósiles *Chondrites* isp. y *Zoophycos* isp. y presencia de foraminíferos bentónicos, constituyendo características distintivas de un ambiente de talud (Encinas et al., 2006; Encinas et al., 2008). Por su parte, Gutiérrez et al. (2013) concuerdan con el esquema estratigráfico propuesto por Encinas et al. (2006), pero difieren en la interpretación del ambiente y rangos de edad para la formación, señalando un ambiente marino costero a plataforma externa, con edades en el rango de Mioceno Temprano a Medio (Le Roux et al., 2013). Posteriormente, un nuevo análisis de Encinas et al. (2014) determina que el ambiente de formación de estas unidades se extiende desde el margen de la plataforma externa, hasta zonas más profundas en el talud superior a medio. Además, coinciden con Finger et al. (2013), Gutiérrez et al. (2013) y Le Roux et al. (2013), en que al menos parte de la Formación Navidad fue depositada durante el Mioceno Temprano.

Las formación de estas cuencas marinas neógenas, se asocia a un evento de subsidencia del antearco durante el Tortoniano, como resultado de la erosión tectónica del margen continental, aparentemente, influenciada por la subducción de la dorsal de Juan Fernández (Laursen et al., 2002). Posteriormente durante el Plioceno, la cuenca habría sido sometida al alzamiento debido a la acreción basal de sedimentos,

determinando la disposición actual de los acantilados costeros de la localidad de Navidad (Encinas et al., 2008; Laursen et al., 2002).

2. Materiales y métodos

La determinación de las características macroscópicas del afloramiento, tales como su composición, estructura, texturas, contenido fosilífero y presencia de conductos, constituyó un elemento fundamental para la primera fase de identificación de la estructura carbonática. Estas observaciones se sumaron a la determinación de la composición isotópica del carbono en los carbonatos que constituyen el afloramiento. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de isótopos ambientales de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), mediante espectrometría de masas. Los resultados de estas mediciones fueron expresados en partes por mil ($\delta^{13}\text{C} \text{‰}$) referidos al estándar PDB. Se realizaron análisis para determinar los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en conchas de bivalvos (PSN-C) y en el carbonato precipitado, diferenciándose entre la matriz (PSN-M), las costuras (PSN-P) y una muestra homogénea (PSN-H), representativa de la roca completa (Tabla 1). Los componentes fósiles y minerales se identificaron macro y microscópicamente. Para la observación en secciones delgadas, se utilizó microscopio polarizante NIKON Eclipse LV100 POL del laboratorio de microscopía de la Universidad Andrés Bello. La determinación de la mineralogía cualitativa fue realizada por el laboratorio de difracción de Rayos X (DXR) de SERNAGEOMIN.

3. Resultados

El PSN constituye una estructura de carbonato de calcio, preservada en la playa de la localidad de Navidad. La exposición de este montículo de

TABLA 1. VALORES DE $\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ PDB DETERMINADOS EN LAS MUESTRAS DE CARBONATO DEL PSN ($-33^{\circ}56' \text{ S}$).

Identificación	Observación	$\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ PDB
PSN-P	Precipitado de carbonato	-40,2
PSN-C	Muestra de carbonato (conchas)	-29,5
PSN-M	Matriz	-41,4
PSN-H	Concha, matriz y precipitado	-39,6

carbonato, varía según los volúmenes de arena que lo cubren, debido a las marcadas fluctuaciones estacionales. Durante las visitas, efectuadas en los meses de mayo y agosto, se ha observado alrededor de 30 a 40% del afloramiento. En contraste, en el período estival (diciembre), se aprecia una mayor superficie expuesta (Figs. 2a y b). Se identificó, además, una segunda acumulación carbonática de la misma naturaleza, orientada en dirección paralela al afloramiento principal, a una distancia de 19 m al norte de la primera. Este trabajo se enfoca en la descripción del afloramiento principal, en el cual se realizaron las primeras observaciones, muestreo y determinaciones isotópicas.

El PSN constituye un montículo alargado, dispuesto en dirección N45° W, perpendicular a la línea de costa. Las dimensiones máximas -observadas durante el período estival- normalmente abarcan los 3 m de ancho, 7 m de largo y 1,60 m de alto. Este particular afloramiento de carbonato de calcio, se presenta con

aspecto macizo y en costras irregulares, muy bien compactado (Figs. 3a, b, c). En él se identificaron conductos tubulares, de hasta 3 cm de diámetro, en algunos casos con precipitado carbonático en su interior (Fig. 3d). Vetillas de calcita de color blanco lechoso de 0,4 cm de espesor y gris oscuro de ~1,5 cm en dirección casi perpendicular al eje mayor del afloramiento (Fig. 4).

Entre sus componentes fósiles destacan bivalvos, gasterópodos, teredos y estromatolitos asociados a comunidades de gusanos calcáreos (Fig. 5). Como bivalvo predominante se destaca la especie de *Lucinoma promaucana* (Nielsen, comunicación verbal, 2011). Esta se encuentra distribuida en todo el afloramiento. Los teredos se encuentran en fragmentos leñosos carbonatizados, con aspecto fibroso característico de la madera, bien preservado. En la figura 5b se muestra la icnofacies Teredolites, resultado de la perforación de la madera por moluscos xilófagos del género *Teredo* (Kelly y Bromley, 1984;

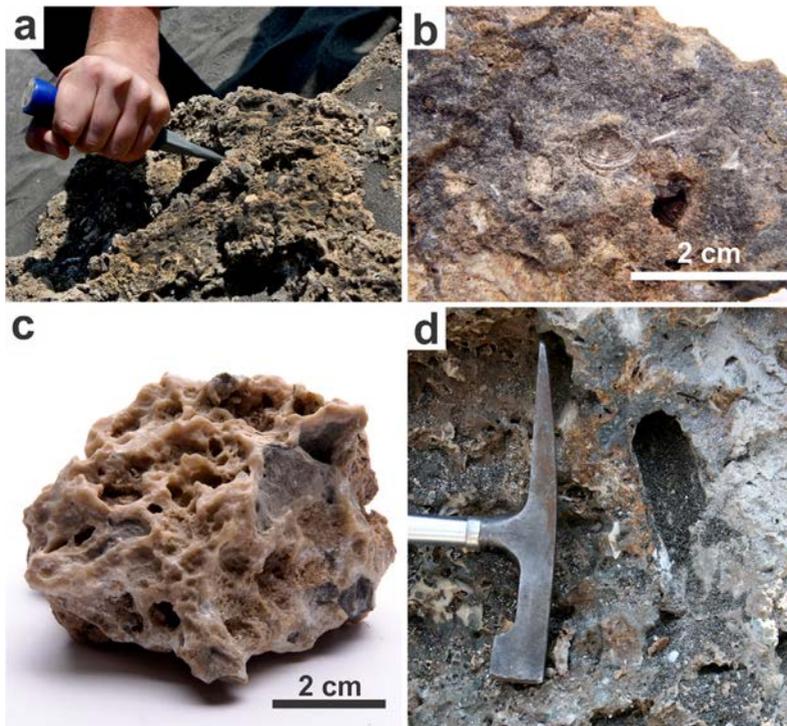


FIG. 3. **a.** *Paleoseep* de Navidad (PSN). La roca consiste de carbonato de calcio, con aspecto de costras irregulares, muy bien compactada; se observa fuerte reacción al HCl; **b.** Matriz del PSN, de tono grisáceo y aspecto microgranular, consiste principalmente de carbonato de calcio (micrita); en el centro de la imagen se observa molde externo de bivalvo; **c.** Costra irregular de carbonato de calcio, de color blanco lechoso; **d.** Conducto tubular de 3 cm de diámetro en el afloramiento carbonático, indicando una zona de emisión de gases mientras el seep estaba activo. En las paredes de este conducto se distinguen delgadas capas de precipitado carbonático.

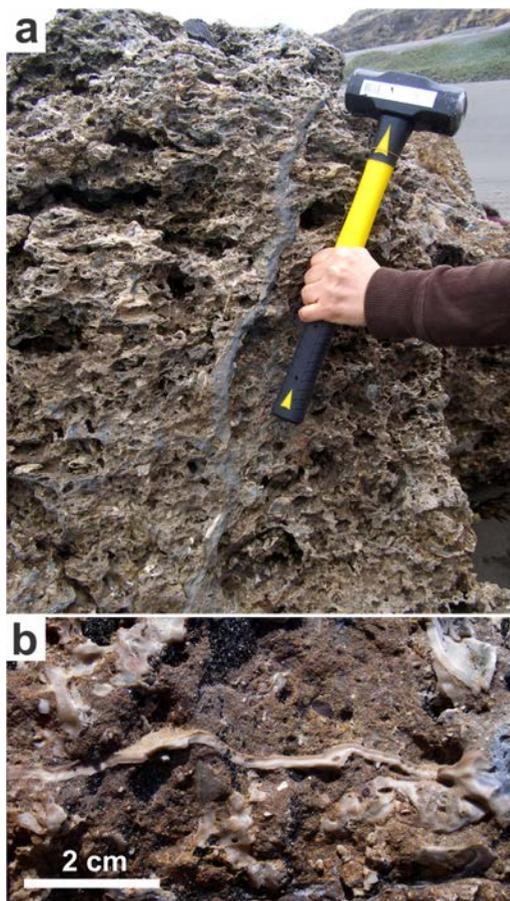


FIG. 4. Vetillas de calcita que atraviesan el afloramiento. **a.** Vetilla gris oscura de ~1,5 cm de espesor que atraviesa el afloramiento en dirección N88° E/72° N; **b.** Vetilla de calcita de ~4 mm de espesor color blanco lechoso a translúcido en los bordes N40° E/vertical.

Ferrer y Gilbert, 2005), cavidades que se encuentran rellenas con material carbonatado.

La presencia de estromatolitos fósiles o microbialitas (Figs. 5c y d) se representa en estructuras organosedimentarias caracterizadas por laminaciones en tonos pardo rojizo y blanco lechoso, indicativos de la alternancia de capas milimétricas de sedimento y carbonato. En secciones transparentes, las estructuras estromatolíticas están definidas por la presencia de calcita esparita y asociado a esta, se observaron con frecuencia diseminaciones de pirita framboidal (Figs. 5e y f).

Asociado a los estromatolitos se identificaron además comunidades de anélidos de la clase polychaeta completamente carbonatados, por lo que

se encuentran muy bien conservados (Figs. 6a y b). Presentan dimensiones de 2 cm de largo por 3 mm de diámetro, dispuestos en forma elongada y vertical respecto del afloramiento; se observan asociados al carbonato de estructura maciza, es decir, un sustrato originalmente blando de fango carbonatado.

Los componentes minerales y las microtexturas del carbonato fueron identificados a través de secciones transparentes, donde se determina una matriz soportada carbonatada (75-85%), principalmente micrítica y entre un 15-25% de granos minerales y líticos. En función de sus características texturales, las litologías principales se clasifican como *mudstone* y *wackestone* (Dunham, 1962). Adicionalmente, las costras de carbonato blanco lechoso corresponden principalmente a esparita, normalmente asociada a pirita framboidal (Figs. 5e y f). La composición de los granos consiste, en su mayoría, en minerales individuales de cuarzo anguloso (Figs. 7a y b) y plagioclasa subhedral (principalmente albita), seguido de fragmentos líticos y en menor proporción de anfíboles, ortoclasa y microclina. Los líticos son predominantemente volcánicos, los bioclastos son minoritarios (e.g., restos de conchas, foraminíferos).

El análisis de difracción DRX se realizó en una costra de carbonato (PSN-P) y en una muestra de matriz carbonatada (PSN-M), en las cuales se detectó calcita magnésica y cuarzo; en la primera muestra se determinó además yeso, aragonito y albita ordenada, mientras que en la segunda, plagioclasa y barrerita.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ determinados en la matriz y en conchas de bivalvos varían entre -41,4‰ en y -29,5‰ PDB (Tabla 1).

4. Discusión

El afloramiento del PSN, corresponde a cuerpo macizo de carbonato de calcio, cuya composición, génesis y emplazamiento, difieren notablemente de la naturaleza de las rocas estratificadas circundantes, pertenecientes a la Formación Navidad. Sin embargo, el contenido fosilífero y las relaciones de contacto (discordante respecto de la estratificación) permiten establecer una relación espacio temporal entre el PSN y la Formación Navidad.

El segundo montículo carbonático, paralelo al afloramiento principal, presenta abundante y variado contenido fosilífero que corresponde a un segundo *paleoseep*.

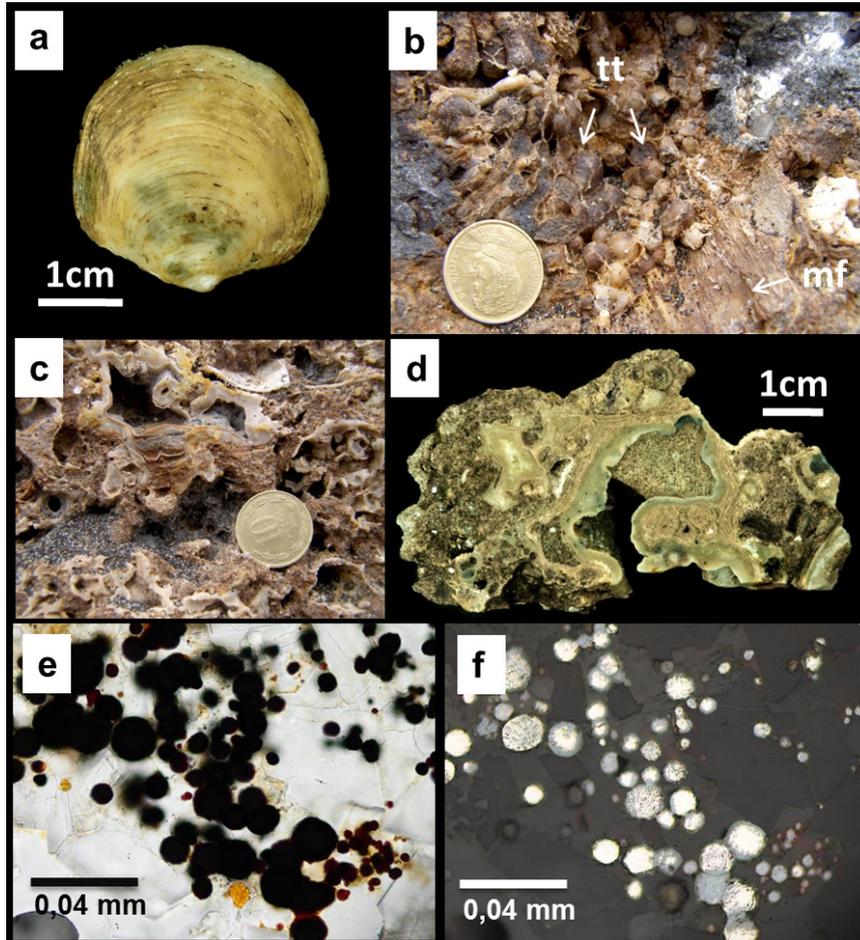


FIG. 5. **a.** *Lucinoma promaucana*, bivalvo fósil frecuentemente observado en el PSN (Nielsen, S. comunicación verbal, 2011); **b.** Tubos de teredo (tt) en madera fósil (mf); en esta última se distingue por su textura fibrosa; **c.** Imagen macroscópica que muestra un estromatolito fósil, estructura organosedimentaria identificada en el *paleoseep* de Navidad; se observan en primer plano, las laminaciones características en tonos rojizos y blanco lechoso, indicativos de la alternancia entre carbonato precipitado y sedimento en suspensión atrapado entre las colonias microbianas; **d.** Sección de estromatolito que muestra en el centro una estructura tipo coliflor en colores rosa pálido y está envuelto por capas paralelas de precipitado carbonático en tonalidad blanco translúcido a blanco lechoso hacia los bordes; **e.** Microfotografía de pirita framboidal asociada a calcita esparita, en nicoles cruzados; **f.** Microfotografía de pirita framboidal, en nicoles paralelos.

4.1. Identificación de las facies carbonatadas del PSN

Si bien no se ha desarrollado aún una nomenclatura formal para las facies carbonáticas de origen quimiosintético, en este estudio se utilizó la clasificación de Dunham (1962) para la determinación en secciones transparentes de las facies predominantes, identificadas como *mudstone* y *wackstone*. Esta clasificación resulta adecuada en función de sus características texturales (porcentaje de matriz *versus*

granos), pero difiere de la definición original en la composición de los intraclastos, ya que en este caso, no corresponden a fragmentos carbonatados, sino principalmente a monominerales y componentes líticos silicoclásticos.

4.2. Contenido fosilífero e implicancias

4.2.1. *Lucinoma promaucana*

Entre los organismos fósiles identificados en el PSN, cabe destacar como especie predominante la

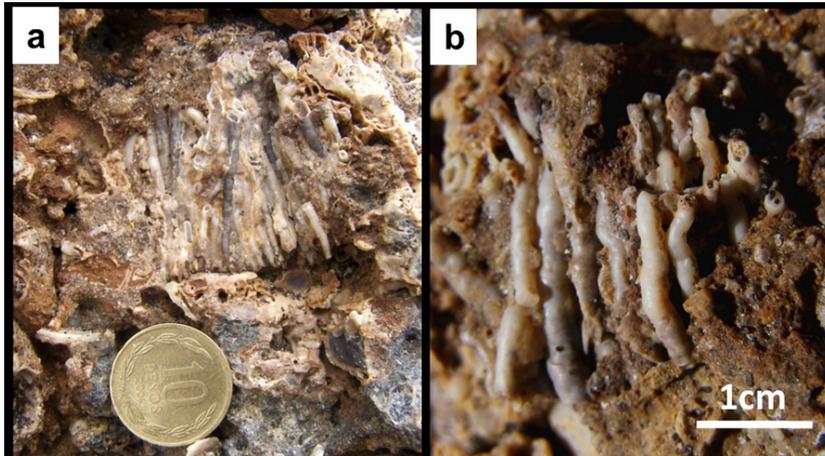


FIG. 6. **a.** Se observan abundantes tubos de poliqueto fósiles, muy bien preservados. La fotografía muestra su disposición vertical, tal como se disponen en el afloramiento; **b.** Detalle que muestra el excelente grado de preservación los tubos de gusanos fósiles.

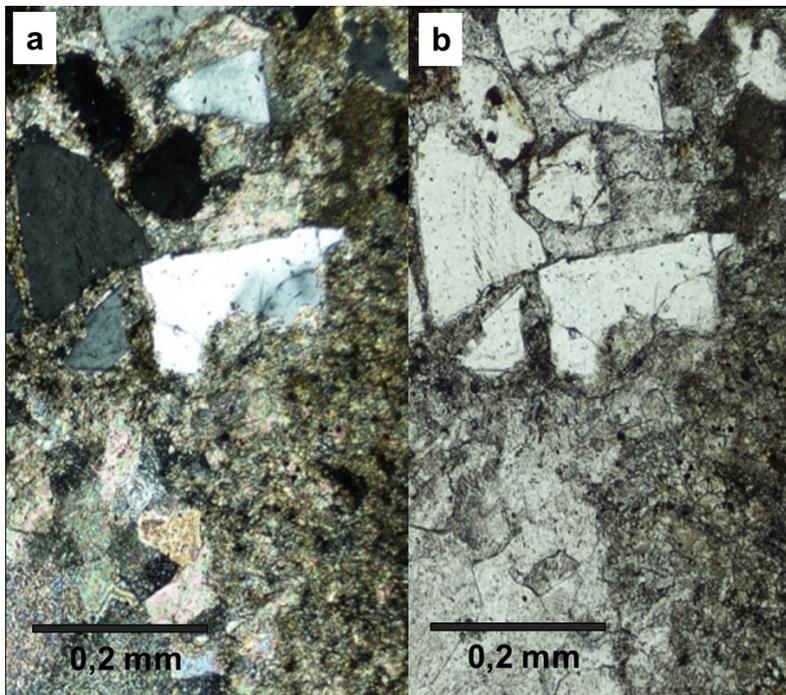


FIG. 7. Sección transparente **a** en nicols cruzados y **b** en nicols paralelos. Se observa predominantemente micrita y esparita y granos anhedrales y angulosos de cuarzo.

Lucinoma promaucana, reportada también en los estratos marinos neógenos que afloran en el área de Navidad. Esta especie fue descrita por primera vez por Philippi (1887), asignándole un rango de edad Oligoceno a Mioceno Medio; Tavera (1979)

quien también la identifica en formaciones neógenas restringe su rango de edad al Mioceno Inferior. Frassinetti y Covacevich (1993) reconocieron esta especie en los niveles inferiores de la Formación Navidad, a los que asignan un rango de Mioceno

Temprano a Medio. De acuerdo a lo anterior, la especie *Lucinoma promaucana* identificada en el PSN, se relaciona espacial y temporalmente con la Formación Navidad, abarcando al menos un rango de edad de Mioceno Temprano a Medio, correspondiente al período de actividad de los flujos de metano que dieron origen al PSN.

La familia *Lucinidae*, forma parte de un diverso grupo de bivalvos quimio-simbióticos que se distribuye desde el intermareal hasta más de 2.500 metros de profundidad (Taylor y Glover, 2006; Cosel y Bouchert, 2008; Kiel *et al.*, 2010). Estos bivalvos se caracterizan por estar asociados a sedimentos sulfato reductores y deficientes en oxígeno, tales como chimeneas hidrotermales y *cold seeps* (Campbell y Bottjer, 1995). Las *Lucinomas* asociadas a ambientes de *seeps* son dominantes a profundidades de 300 hasta 1.700 m (Taylor y Glover, 2006; Levin, 2005). Según los registros existentes a través del margen continental del Pacífico Norte, el género *Lucinoma* ha sido dominante en *cold seeps* del Oligoceno y Neógeno (Campbell, 2006; Kiel *et al.*, 2010). Para el Pacífico Sur, en tanto, la existencia de este género, asociado a *cold seeps* fósiles, solo se había reportado previamente en afloramientos de Nueva Zelanda, correspondientes a ambientes de talud del Mioceno Temprano a Tardío (Campbell, 2006; Campbell *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior, la especie *Lucinoma promaucana*, dominante en el PSN, sería consistente con profundidades de talud y edades Mioceno Temprano a Medio.

Es importante destacar que si bien en Chile ha sido reportada la ocurrencia de *Lucinoma promaucana* en otras formaciones marinas neógenas a lo largo del margen continental (Tavera, 1942; Tavera y Veyl, 1958; Tavera, 1979; Frassinetti y Covacevich, 1993; Kiel y Nielsen, 2010), no se había descrito previamente su característica quimiosimbionte y su asociación con un *paleoseep*. Por lo anterior, su identificación en otras unidades neógenas de similares características y edad, con presencia de estructuras de deslizamiento, diques de arena o volcanes de barro, representan potenciales indicios de flujos de hidrocarburos desde el subsuelo marino. Esto debe ser corroborado mediante isotopía, con la determinación de los típicos valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ en las conchas de lucinomas (Sellanes *et al.*, 2011; Jessen *et al.*, 2011). El desarrollo o no de acumulaciones carbonatadas, dependerá de la profundidad y condiciones fisicoquímicas del medio al momento de las emisiones.

4.2.2. Estromatolitos quimiosintéticos

Las estructuras estromatolíticas identificadas en el PSN (Figs. 5c y d) y en otros sumideros fríos de metano (Gómez-Pérez, 2003), revelan que estas no se restringen a zonas someras, ni son formadas exclusivamente por microbialitas fotosintéticas, sino que también se forman a partir de la actividad microbiana basada en la oxidación anaeróbica del metano, como la que se encuentra en los *cold seeps* (Jenkins e Hikida, 2011). Adicionalmente, la asociación del carbonato autigénico y la pirita framboidal, evidencia procesos de reducción bacteriana de sulfatos (SR), siendo esta última reconocida como un indicador o geomarcador para detectar procesos de oxidación de metano (Merinero *et al.*, 2010).

La información respecto de la distribución de los estromatolitos de aguas profundas es extensa (*e.g.*, Hoffman, 1974; Böhm y Brachert, 1993; George, 1999). Greinert *et al.* (2002) describen estructuras estromatolíticas asociadas a ambientes de *cold seeps* situados a profundidades superiores a 4.800 m, por lo que se ha llegado a mencionar inclusive la necesidad de una revisión del origen de los estromatolitos silúricos (Jenkins e Hikida, 2011).

La existencia de estromatolitos asociados con comunidades de anélidos poliquetos tubulares en una acumulación de carbonato anómala, como la descrita en el presente estudio (Figs. 6 a y b) fue reportada por primera vez en la cuenca de Neuquén, Argentina (Gómez-Pérez, 2003). La autora determinó que el origen de la particular estructura estaba asociado a emisiones de metano en el fondo marino jurásico de la Formación Los Molles, unidad consistente de pelitas y turbiditas silicoclásticas, en una cuenca marina relativamente profunda (Weaver, 1931; Digregorio y Uliana, 1980; Gulisano y Gutiérrez-Pleimling, 1995).

4.2.3. Troncos fósiles carbonatizados

La existencia de troncos petrificados con buena preservación de la estructura fibrosa distintiva de la madera, que se encuentra en este caso transformada en carbonato, se destaca como un proceso de OAM contemporáneo con la depositación, es decir, no es un reemplazo diagenético posterior. Su asociación con el PSN, característico de un ambiente de talud, indica no solo un considerable recorrido desde el margen continental, probablemente a través de cañones, sino también una importante actividad de flujos de metano, que en condiciones anaeróbicas

determinaron una rápida transformación de la materia orgánica en carbonato.

4.3. Valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$

Los valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ detectados en las muestras del PSN en este estudio son compatibles con un origen autigénico del carbonato como producto de la oxidación anaeróbica del metano (OAM). Este rango, que fluctúa entre $-41,4\text{‰}$ y $-29,5\text{‰}$ PDB (Tabla 1), sugiere un origen termogénico del metano, cuyos valores de referencia para $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre -20‰ a -50‰ PDB (Whiticar, 1999; Campbell, 2006).

4.4. Analogía entre *cold seeps* actuales y fósiles

Las características observadas entre *seeps* activos, encontrados en zonas de talud, a lo largo del margen continental de Chile (Sellanes et al., 2004, 2008; Quiroga y Levin, 2010; Mena et al., 2011) y el PSN, evidencian notables similitudes. Ambos se encuentran asociados a secuencias silicoclásticas y comparten características litológicas e isotópicas. En los *cold seeps* actuales, se han detectado valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre $-39,9\text{‰}$ y -32‰ PDB (Mena et al., 2011; Contardo y Mena, 2012), consistente con los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos en el PSN. Por otro lado, entre los organismos identificados en *seeps* actuales frente a las costas de Chile, se señala la existencia del género *Lucinoma*, con especies como: *Lucinoma lamellata*, *Lucinoma anemiophila* y *Lucinoma aequizonata* (Holmes et al., 2005; Sellanes et al., 2008).

Considerando los hallazgos descritos frente a las costas de Chile centro sur (Sellanes et al., 2004, 2007, 2008; Quiroga y Levin, 2010; Klauke et al., 2012), resulta esperable la existencia de flujos de metano actuales y fósiles, controlados por estructuras activas en el talud sumergido, frente a las costas de la localidad de Navidad. Del mismo modo, podrían encontrarse nuevas evidencias de flujos de metano fósil en el continente.

4.5. Desestabilización de los hidratos de gas

Finalmente, otra manifestación de la distribución de los sitios con acumulaciones o reservorios de metano, se representa en la actual distribución de hidratos de gas, registrados en los BSRs (i.e., reflector simulador del fondo marino). La zona de estabilidad de los hidratos de gas, se encuentra bajo la cobertura

de sedimento, en zonas del talud superior y medio, a lo largo del margen continental (Grevenmeyer et al., 2003; Contardo et al., 2008). Sin embargo, cambios importantes de presión y temperatura pueden producir una disociación y escape brusco del metano y generar grandes deslizamientos. Mecanismos como cambios eustáticos, tectónicos, calentamiento global o episodios de rápida sedimentación, son potenciales para generar la liberación de este poderoso gas invernadero (Dimitrov, 2002; Kopf, 2002). La emisión de importantes volúmenes de metano, ha sido considerada como gatillante en las variaciones climáticas del pasado geológico (e.g., Dickens et al., 1995; Kennett et al., 2003) y por tanto un factor a considerar en la evolución paleoambiental de las formaciones neógenas.

5. Conclusión

El *paleoseep* de Navidad (PSN) constituye el primer hallazgo documentado en Chile de un sumidero de hidrocarburo fósil exhumado, asociado a una cuenca marina silicoclástica. Este corresponde a un afloramiento de carbonato de calcio anómalo respecto de las rocas estratificadas neógenas presentes en el área, que se asocia espacial y temporalmente a las rocas sedimentarias de la Formación Navidad. La presencia de *Lucinoma promaucana* como especie dominante en el PSN permite establecer que su periodo de actividad está comprendido entre el Mioceno Inferior a Medio, contemporáneo con el rango de edad de las rocas pertenecientes a la Formación Navidad.

El montículo que constituye el PSN se emplaza a lo largo de una estructura de rumbo $\text{N}45^\circ \text{W}$. La mineralogía asociada consiste principalmente de calcita magnésica y en menor porcentaje de cuarzo, albita, anfíboles, ortoclase microclina, fragmentos de líticos volcánicos y bioclastos. En ausencia de una denominación formal para las facies de origen quimiosintéticos, las facies carbonatadas presentes en el PSN han sido clasificadas como *mudstone* y *wackestone* según la clasificación de Dunham (1962), sin que ello implique consideraciones genéticas.

La asociación faunística predominante consiste de lucinomas, teredos, anélidos y estromatolitos fósiles, que junto con las características previamente señaladas, constituyen evidencias para la identificación de este *paleoseep*. La determinación de los valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ en las muestras de PSN permite establecer la naturaleza autigénica del carbonato,

formado por OAM a partir de la emisión de flujos de metano desde el fondo marino.

Es importante considerar que la existencia del PSN en la costa emergida de la localidad de Navidad, constituye el primer registro fósil de la migración de hidrocarburos, movilizadas desde el subsuelo marino a través de fallas y fracturas, reflejando una importante actividad al menos desde el Mioceno Temprano en el margen continental de Chile.

La presencia de la especie *Lucinoma promaucana* en otras formaciones marinas neógenas de la costa chilena, sumado a la ocurrencia de estructuras como slumps, diques de arena y volcanes de barro, representan indicios de la actividad de flujos de hidrocarburo desde el subsuelo marino en el pasado geológico.

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por un proyecto D.I. iniciación 2011, de la PUCV: "Determinación e implicancias del promisorio hallazgo de un potencial *paleoseep* de metano, en la zona costera de la localidad de Navidad" (037306/2011). Se destacan las observaciones y aportes en terreno de la Dra. K. Campbell, de la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda, especialista en *cold seeps* y del Dr. S. Nielsen, de la Universidad Austral de Valdivia, Chile, que contribuyeron al desarrollo exitoso de este estudio.

Se agradece al grupo de estudiantes de oceanografía de la PUCV que participaron y motivaron la realización de la primera excursión a terreno donde se realizó el hallazgo.

Referencias

- Abrams, M.A. 2005. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment. *Marine and Petroleum Geology* 22 (4): 457-477. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.08.003>.
- Böhm, F.; Brachert, T.C. 1993. Deep water stromatolites and Frutexitas MASLOV from the Early and Middle Jurassic of S-Germany and Austria. *Facies* 28: 145-168.
- Beauchamp, B.; Harrison, J.C.; Nassichuk, W.W.; Krouse, H.R.; Eliuk, L.S. 1989. Cretaceous Cold-Seep Communities and Methane-Derived Carbonates in the Canadian Arctic. *Science* 244 (4900): 53-56.
- 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.
- Campbell, K.A. 1992. Recognition of a Mio-Pliocene Cold Seep Setting from the Northeast Pacific Convergent Margin, Washington. U.S.A. *Palaios* 7 (4): 422-433. doi: 10.2307/3514827.
- Campbell, K.A. 2006. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232 (2-4): 362-407. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.018>.
- Campbell, K.A.; Bottjer, D.J. 1995. Brachiopods and chemosymbiotic bivalves in Phanerozoic hydrothermal vent and cold seep environments. *Geology* 23 (4): 321-324. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0321:ba cbip>2.3.co;2.
- Campbell, K.A.; Farmer, J.D.; Des Marais, D. 2002. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and paleoenvironments. *Geofluids* 2 (2): 63-94. doi: 10.1046/j.1468-8123.2002.00022.x.
- Campbell, K.A.; Francis, D.A.; Collins, M.; Gregory, M.R.; Nelson, C.S.; Greinert, J.; Aharon, P. 2008. Hydrocarbon seep-carbonates of a Miocene forearc (East Coast Basin), North Island, New Zealand. *Sedimentary Geology* 204 (3-4): 83-105. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.01.002>.
- 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.
- Contardo, X.; Jensen, A. 2009. Evidencias e implicancias de un volcán de barro (Lautaro) en el antearco submarino de Chile central. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 12, S4-004, 22-26. Santiago.
- Contardo, X.; Mena, E. 2012. Evidencias, caracterización e implicancias del primer *seep* fósil descubierto en la costa emergida de Chile central. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 13, Actas: CD-Rom T5: 663-665. Antofagasta.
- Contardo, X.; Cembrano, J.; Jensen, A.; Díaz-Naveas, J. 2008. Tectono-sedimentary evolution of marine slope basins in the Chilean forearc (33°30'-36°50'S): Insights into their link with the subduction process. *Tectonophysics* 459 (1-4): 206-218. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2007.12.014>.
- Conti, S.; Fontana, D. 2002. Sediment instability related to fluid venting in Miocene authigenic carbonate deposits of the northern Apennines (Italy). *International Journal*

- of Earth Sciences 91 (6): 1030-1040. doi: 10.1007/s00531-002-0282-y.
- Cosel, R.; Bouchet, P. 2008. Tropical deep-water lucinids (Mollusca: Bivalvia) from the Indo-Pacific: essentially unknown, but diverse and occasionally gigantic. *In* Tropical Deep Sea Benthos 25 (Héros, V.; Cowie, R.; Bouchet, P.; editors). Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle 196: 115-213. Paris.
- 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. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV13n2-3-a03>.
- 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.
- Dickens, G.R.; O'Neil, J.R.; Rea, D.K.; Owen, R.M. 1995. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene. *Paleoceanography* 10 (6): 965-971.
- Digregorio, J.; Uliana, M. 1980. Cuenca Neuquina. *In* Geología Regional Argentina 2 (Turner, J.; editor). Academia Nacional de Ciencias: 985-1032. Córdoba.
- Dimitrov, L.I. 2002. Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews* 59: 49-76.
- Dimitrov, L.I. 2003. Mud volcanoes-a significant source of atmospheric methane. *Geo-Marine Letters* 23 (3-4): 155-161. doi: 10.1007/s00367-003-0140-3.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In* Classification of carbonate rocks (Ham, W.E.; editor). American Association of Petroleum Geologists Memoir 1: 108-171.
- Encinas, A.; Le Roux, J.P.; Buatois, L.A.; Nielsen, S.N.; Finger, K.L.; Fourtanier, E.; Lavenu, A. 2006. Nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos mio-pliocenos del área de Navidad (33°00'-34°30'S), Chile central. *Revista Geológica de Chile* 33 (2): 221-246. doi: 10.5027/andgeoV33n2-a02.
- Encinas, A.; Finger, K.L.; Nielsen, S.N.; Lavenu, A.; Buatois, L.A.; Peterson, D.E.; Le Roux, J.P. 2008. Rapid and major coastal subsidence during the late Miocene in south-central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 25 (2): 157-175. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2007.07.001>.
- Encinas, A.; Finger, K.L.; Nielsen, S.N.; Contardo, X. 2014. Comment on Reply to Comment of Finger et al. (2013) on: 'Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation (central Chile): Paleontological, paleoclimatic and tectonic implications' of Gutiérrez et al. (2013, *Andean Geology* 40 (1): 66-78). *Andean geology* 41 (3): 639-656. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV41n3-a07>.
- Etchart, H. 1973. Geología del área San Enrique-Bucalemu, provincia de Santiago. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 176 p.
- Ferrer, O.; Gibert, J. M. de. 2005. Presencia de Teredolites en la formación Arcilla de Morella (Cretácico Inferior, Castellón). *Revista Española de Paleontología*, N.E. X, 39-47. ISSN 0213-6937.
- Finger, K.L.; Encinas, A.; Nielsen, S.N. 2013. Comment on 'Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation (central Chile): Paleontological, paleoclimatic and tectonic implications' of Gutiérrez et al. (2013, *Andean Geology* 40 (1): 66-78). *Andean geology* 40 (3): 571-579. doi: 10.5027/andgeoV40n3-a10.
- Frassinetti, D.; Covacevich, V. 1993. Bivalvos del Mioceno marino de Matanzas (Formación Navidad, Chile central). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural, Chile* 44: 73-97.
- 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.
- George, A.D. 1999. Deep-water stromatolites, Canning Basin, northwestern Australia. *Palaios* 14: 493-505. doi: 10.2307/3515399.
- Gómez-Pérez, I. 2001. Estromatolitos de aguas profundas en la Formación Los Molles (Neuquén, Argentina): ¿chimeneas de metano en el fondo marino jurásico? *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 8: 1-14.
- Gómez-Pérez, I. 2003. An Early Jurassic deep-water stromatolitic bioherm related to possible methane seepage (Los Molles Formation, Neuquén, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 201 (1-2): 21-49. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00508-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00508-X).
- Greiner, J.; Bohrmann, G.; Elvert, M. 2002. Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crusts: result of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4,850 m water depth.

- International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau) 91 (4): 698-711. doi: 10.1007/s00531-001-0244-9.
- Grevenmeyer, I.; Díaz-Naveas, J.L.; Ranero, C.R.; Villinger, H.W. 2003. Heat flow over the descending Nazca plate in central Chile, 32°S to 41°S: observations from ODP Leg 202 and the occurrence of natural gas hydrates. *Earth and Planetary Science Letters* 213 (3-4): 285-298. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00303-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00303-0).
- Gulisano, C.A.; Gutiérrez-Pleimling, A.R. 1995. The Jurassic of the Neuquen Basin, a) Neuquén Province. *In* International Congress on Jurassic Stratigraphy and Geology No. 4, Field guide, Serie E, Asociación Geológica Argentina: 111 p. Buenos Aires.
- Gutiérrez, N.M.; Hinojosa, L.F.; Le Roux, J.P.; Pedroza, V. 2013. Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation (central Chile): Paleontological, paleoclimatic and tectonic implications. *Andean geology* 40 (1): 66-78. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n1-a03>.
- Hoefs, J. 2009. Stable isotope geochemistry, sixth edition. Springer-Verlag: 285 p. Berlin.
- Hoffman, P. 1974. Shallow and deepwater stromatolites in lower Proterozoic platform-to-basin facies change, Great Slave Lake, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 58: 865-867.
- Holmes, A.M.; Oliver P.G.; Sellanes, J. 2005. A new species of *Lucinoma* (Bivalvia: Lucinoidea) from a methane gas seep off the southwest coast of Chile. *Journal of Conchology* 38 (6): 673-681.
- Jenkins, R.; Hikida, Y. 2011. Carbonate Sediments Microbially Induced by Anaerobic Oxidation of Methane in Hydrocarbon-Seeps. *In* STROMATOLITES: Interaction of Microbes with Sediments (Tewari, V.; Seckbach, J.; editors). Springer: 591-605. Netherlands.
- Jessen, G.L.; Pantoja, S.; Gutiérrez, M.A.; Quiñones, R.A.; González, R.R.; Sellanes, J.; Kellermann, M.Y.; Hinrichs, K.-U. 2011. Methane in shallow cold seeps at Mocha Island off central Chile. *Continental Shelf Research* 31 (6): 574-581. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.012>.
- Jiang, G.; Kennedy, M.J.; Christie-Blick, N. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature* 426 (6968): 822-826. doi: http://www.nature.com/nature/journal/v426/n6968/supinfo/nature02201_S1.html.
- Judd, A.G.; Hovland, M.; Dimitrov, L.I.; García Gil, S.; Jukes, V. 2002. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change. *Geofluids* 2 (2): 109-126. doi: 10.1046/j.1468-8123.2002.00027.x.
- Kasting, J.F. 2004. When methane made climate. *Scientific American* 291(1): 78-85.
- Kasting, J.F.; Siefert, J.L. 2002. Life and the Evolution of Earth's Atmosphere. *Science* 296 (5570): 1066-1068.
- Kelly, S.R.; Bromley, R.G. 1984. Ichnological nomenclature of clavate borings. *Paleontology* 27: 793-807.
- Kennett, J.P.; Cannariato, K.G.; Hendy, I.L.; Behl, R.J. 2003. Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis. *American Geophysical Union: 217 p.* Washington, D.C. doi: 10.1002/9781118665138.ch0.
- Kennicutt, M.C.; Brooks, J.M.; Bidigare, R.R.; Fay, R.R.; Wade, T.L.; McDonald, T.J. 1985. Vent-type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature* 317 (6035): 351-353.
- Kiel, S.; Nielsen, S.N. 2010. Quaternary origin of the inverse latitudinal diversity gradient among southern Chilean mollusks. *Geology* 38: 955-958. doi: 10.1130/G31282.1
- Kiel, S.; Campbell, K.A.; Gaillard, C. 2010. New and little known mollusks from ancient chemosynthetic environments. *Zootaxa* 2390: 26-48.
- Klaucke, I.; Weinbe, W.; Linke, P.; Kläschen, D.; Bialas, J. 2012. Sidescan sonar imagery of widespread fossil and active cold seeps along the central Chilean continental margin. *Geo-Marine Letters* 32 (5-6): 489-499. doi: 10.1007/s00367-012-0283-1.
- Kopf, A.J. 2002. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40 (2): 1005. doi: 10.1029/2000RG000093.
- Kulm, L.D.; Suess, E.; Moore, J.C.; Carson, B.; Lewis, B.T.; Ritger, S.D.; Kadko, D.C.; Thornburg, T.M.; Embley, R.W.; Rugh, W.D.; Massoth, G.J.; Langseth, M.G.; Cochrane, G.R.; Scamman, R.L. 1986. Oregon Subduction Zone: Venting, Fauna, and Carbonates. *Science* 231 (4738): 561-566.
- Laursen, J.; Scholl, D.W.; von Huene, R. 2002. Neotectonic deformation of the central Chile margin: Deepwater forearc basin formation in response to hot spot ridge and seamount subduction. *Tectonics* 21 (5): 1-27. doi: 10.1029/2001tc901023.
- Le Pichon, X.; Iiyama, T.; Boulègue, J.; Charvet, J.; Faure, M.; Kano, K.; Lallemand, S.; Okada, H.; Rangin, C.; Taira, A.; Urabe, T.; Uyeda, S. 1987. Nankai Trough and Zenisu Ridge: a deep-sea submersible survey. *Earth and Planetary Science Letters* 83 (1): 285-299. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90072-0](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(87)90072-0).
- Le Roux, J.P.; Gutiérrez, N.M.; Hinojosa, L.F.; Pedroza, V.; Becerra, J. 2014. Reply to Comment of Encinas *et al.*

- (2014) on: "Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation (central Chile): Paleontological, climatic and tectonic implications" of Gutiérrez et al. (2013, Andean Geology 40 (1): 66-78). Andean geology 41 (3): 580-588. doi: 10.5027/andgeoV40n3-a11.
- Levin, L.A. 2005. Ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. *In* Oceanography and Marine Biology - an Annual Review 43 (Gibson, R.N.; Atkinson, R.J.A.; Gordon, J.D.M.; editors). Crc Press-Taylor & Francis Group: 1-46. Boca Raton.
- Levin, L.; Baco, A.; Bowden, D.; Colaco, A.; Cordes, E.; Cunha, M.; Demopoulos, A.; Gobin, J.; Ben Grupe, B.; Le, J.; Metaxas, A.; Netburn, A.; Rouse, G.; Thurber, A.; Tunnicliffe, V.; Van Dover, C.; Vanreusel, A.; Watling, L. 2016. Hydrothermal vents and methane seeps: Rethinking the sphere of influence. *Frontiers in Marine Science* 3: 1-23. doi: 10.3389/fmars.2016.00072.
- Mena, E.; Contardo, X.; Silva, N.; Quiroga, E. 2011. Primeras evidencias isotópicas y caracterización de un *paleoseep* de metano identificado en la zona costera de la localidad de Navidad, Chile. *In* Congreso de Ciencias del Mar, No. 31, Libro de resúmenes: 116 p. Viña del Mar.
- Merinero, R.; Lunar, R.; Martínez-Frías, J. 2010. Carbonatos Metanógenos y Pirita Framboidal Autigénica: Geomarcadores de la Actividad de Organismos Quimiosintéticos en el Golfo de Cádiz. *Macla* 12: 28-37.
- Mpodozis, C.; Ramos, V. 1989. The Andes of Chile and Argentina, *In* Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources (Ericksen, G.E.; Cañas, M.T.; Reinemund, J.A.; editors). Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series 11: 59-90. Houston, Texas.
- Nyman, S.L.; Nelson, C.S.; Campbell, K.A., 2010. Miocene tubular concretions in East Coast Basin, New Zealand: Analogue for the subsurface plumbing of cold seeps. *Marine Geology* 272 (1-4): 319-336. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.021>.
- Paull, C.K.; Hecker, B.; Commeau, R.; Freeman-Lynde, R.P.; Neumann, C.; Corso, W.P.; Golubic, S.; Hook, J.E.; Sikes, E.; Curry, J. 1984. Biological Communities at the Florida Escarpment Resemble Hydrothermal Vent Taxa. *Science* 226 (4677): 965-967.
- Peckmann, J.; Thiel, V.; Michaelis, W.; Clari, P.; Gaillard, C.; Martire, L.; Reitner, J. 1999. Cold seep deposits of Beauvoisin (Oxfordian; southeastern France) and Marmorito (Miocene; northern Italy): microbially induced authigenic carbonates. *International Journal of Earth Sciences* 88 (1): 60-75. doi: 10.1007/s005310050246.
- Peckmann, J.; Reimer, A.; Luth, U.; Luth, C.; Hansen, B.T.; Heinicke, C.; Hoefs, J.; Reitner, J. 2001. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea. *Marine Geology* 177 (1-2): 129-150. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00128-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00128-1).
- Philippi, R. 1887. Los fósiles terciarios i cuartarios de Chile. Brockhaus: 256 p. Leipzig.
- Quiroga, E.; Levin, L.A. 2010. *Eunice pennata* (polychaeta: eunicidae) from active and passive cold seep sites in central and southern Chile (36°-46°S). *Anales del Instituto de la Patagonia* 38: 31-37.
- Sahling, H.; Rickert, D.; Lee, R.W.; Linke, P.; Suess, E. 2002. Macrofaunal community structure and sulfide flux at gas hydrate deposits from the Cascadia convergent margin, NE Pacific. *Marine Ecology Progress Series* 231: 121-138. doi: 10.3354/meps231121.
- Sellanes, J.; Quiroga, E.; Gallardo, V. 2004. First direct evidence of methane seepage and associated chemosynthetic communities in the bathyal zone off Chile. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 84 (05): 1065-1066. doi: 10.1017/S0025315404010422h.
- Sellanes, J.; Quiroga, E.; Quiñones, R. 2007. Shelf and slope reducing settings associated to methane seepage off the Chilean margin. *Newsletter Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental* 15: 1-2.
- Sellanes, J.; Quiroga, E.; Neira, C. 2008. Megafauna community structure and trophic relationships at the recently discovered Concepción Methane Seep Area, Chile, ~36°S. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 65 (7): 1102-1111. doi: 10.1093/icesjms/fsn099.
- Sellanes, J.; Zapata-Hernández, G.; Pantoja, S.; Jessen, G.L. 2011. Chemosynthetic trophic support for the benthic community at an intertidal cold seep site at Mocha Island off central Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 95 (4): 431-439. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.016>.
- Steinmann, G. 1895. Das Auftreten und Alter der Quiri-quina-Schichten. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Beilage Band* 10: 1-31.
- Suess, E.; Carson, B.; Ritger, S.D.; Moore, J.C.; Jones, M.L.; Kulm, G.R.; Cochrane, G.R. 1985. Biological

- communities at vent sites along the subduction zone off Oregon. *Bulletin of the Biological Society of Washington* 6: 475-484.
- Tavera, J. 1942. Contribución al estudio de la estratigrafía y paleontología del Terciario de Arauco. *Anales del Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología* 2: 580-632.
- 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.
- Tavera, J.; Veyl, C. 1958. Reconocimiento geológico de la Isla Mocha. *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Publicación* 12: 157-188.
- Taylor, J.D.; Glover, E.A. 2006. Lucinidae (Bivalvia) - the most diverse group of chemosymbiotic molluscs. *Zoological Journal of the Linnean Society* 148 (3): 421-438. doi: 10.1111/j.1096-3642.2006.00261.x.
- Valentine, D. 2002. Biogeochemistry and microbial ecology of methane oxidation in anoxic environments: a review. *Antonie Van Leeuwenhoek* 81 (1-4): 271-282. doi: 10.1023/a:1020587206351.
- 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.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous from west central Argentina. *University of Washington, Memoir* 1: 1-496.
- Whiticar, M.J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology* 161 (1-3): 291-314. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00092-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00092-3).