

## REVISIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA Y POTENCIAL PETROLÍFERO DE LA ANTEFOSA PALEÓGENA DE LA CUENCA DE ANTEPAÍS MAGALLANES, CHILE

Jesús Pinto<sup>1</sup>, Danilo González<sup>1</sup>, Cristóbal Agurto<sup>1</sup>, Álvaro Pérez<sup>1</sup>, Romina Ojeda<sup>1</sup>

1: ENAP Magallanes. jpintor@enap.cl; dagonzlez@enap.cl; cagurto@enap.cl; aperezp@enap.cl; rojeda@enap.cl

Palabras clave: Chile, cuenca de antepaís, cronoestratigrafía, paleógeno, potencial petrolífero

### ABSTRACT

During the last few years, interest for oil and gas exploration in the Magallanes Foreland Basin of southern Chile has shifted to Paleogene siliciclastic deposits strata of the foredeep realm. However, the task is made difficult by a remarkable tectono-sedimentary complexity. Based on previous work, seismic and well data, and recent biostratigraphic and detrital-zircon U-Pb dating, the purpose of the present work is to revise the stratigraphic framework and petroleum potential of the foredeep succession. This succession is exposed along the Andes Cordillera and at the subsurface lies at a depth of ~2300-6000 m. In the study area, potential tight-gas reservoirs vary from ~30-100 m in thickness and comprises sandstones and minor conglomerates associated with gravity-flows. Locally, some overpressured reservoirs has produced gas and condensate from a depth of 2500 m farther east. Interbedded mudrocks may act as effective barriers to fluid flows in structurally simple areas. Thermal maturity of potential source rocks below ~2500 m depth is 0.6 %Ro or higher. Total organic carbon is commonly low (<0.8 wt. %), but range between 0.2-1.8 wt. %, and is mainly associated with gas-prone Type-III kerogens. Traps are said to be structural, stratigraphic, or combined and the quality of the reservoirs is generally poor because moderate to intense diagenetic processes. Nevertheless, tight intervals located in the platform areas of the basin are just recently attracting attention for development with multi-well pad and hydraulic fracturing techniques.

### INTRODUCCIÓN

La Cuenca de Magallanes en el sector de Chile (*sensu* Biddle *et al.* 1986), junto con la Cuenca Malvinas, constituye la provincia sedimentaria más meridional de América del Sur (Fig. 1). Ambas cuencas se desarrollaron a partir del Triásico-Jurásico como consecuencia de la tectónica de placas y la compleja geodinámica Andina (e.g., Biddle *et al.* 1986, Galeazzi 1998, Ghiglione *et al.* 2010). La Cuenca de Magallanes, que se extiende en territorio argentino, donde recibe el nombre de Cuenca Austral, es una depresión profunda y de forma ovalada que abarca más de 200000 km<sup>2</sup> con una orientación NNO-SSE.

Desde comienzos del siglo XX la cuenca ha sido de interés petrolero para la industria nacional y desde entonces se han llevado a cabo un sin número de trabajos locales y regionales destinados al entendimiento de su evolución estructural, historia de depositación y potencial petrolífero (e.g., Decat y Pomeyrol 1931, Keidel y Hemmer 1931, Ruby 1945, Thomas 1949, García *et al.* 1952, 1953, García y Cortes 1952, González y Tapia 1953, Cortés *et al.* 1955, Barwick 1955, Cecioni 1957, Katz 1963, González 1965, Charrier y Lahsen 1969, Natland *et al.* 1974, Mobil 1979, Dalziel 1981, Winslow 1982, Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991, Herrero *et al.* 1999, Hervé *et al.* 2004, Moraga *et al.* 2004, Fildani *et al.* 2008, Ghiglione *et al.* 2010, Mpodozis *et al.* 2011). De acuerdo con estos estudios, la cuenca está caracterizada por tres aspectos muy relevantes para la exploración petrolera: (1) ocurrencia de prominentes estructuras como pliegues, fallas, altos y grábenes, que no solo constituyen piezas fundamentales en el estilo de migración y entrapamiento de fluidos, sino también controles principales en la fuente, distribución y depositación de sedimento para determinado período de tiempo; (2) cambio radical y diacrónico hacia el oeste (Cordillera de Los Andes) del terreno principal de aporte de sedimentos a partir del Cretácico Tardío, ubicado inicialmente hacia el este y noreste (i.e., región continental); y (3) desarrollo de intervalos prospectivos y productivos tanto en el Jurásico-Cretácico, como en el Paleógeno, este último depositado en un contexto de antepaís y foco de esta contribución.

El aumento de la demanda doméstica de gas y el carácter maduro a marginal de la producción petrolera a partir de yacimientos convencionales mesozoicos ha provocado durante los últimos años una redefinición del paradigma exploratorio en la cuenca. Un resultado de esto es el descubrimiento de acumulaciones importantes y comerciales de gas no convencional en el Paleoceno de los bloques Arenal al norte de Tierra del Fuego y Dorado-Riquelme en la región continental, ambos cerca de la transición entre los distritos petroleros Springhill y Terciario definidos por Harambour (1978) para la porción chilena de la cuenca (Fig. 1). Con la finalidad de incrementar las reservas y garantizar un suministro ininterrumpido de gas para la región a largo plazo, estos yacimientos se han convertido en importantes objetivos de exploración.

Durante los últimos años, consecuentemente, se ha hecho un gran esfuerzo para la definición de un marco geológico que permita no solo prever con mayor exactitud el comportamiento de los reservorios actualmente productores sino también expandir nuevas posibilidades de localización y desarrollo hacia las partes más profundas de la Cuenca. Los estudios y perforaciones previos han demostrado la ocurrencia de hidrocarburos, especialmente gas, en rocas apretadas de la antefosa paleógena del antepaís; no obstante, hasta ahora su verdadero potencial se desconoce. En esta porción de la cuenca, los intervalos reservorios yacen a ~2500-6000 m de profundidad y muchos de los pozos perforados indican condiciones locales de sobrepresión. Los gradientes térmicos calculados a partir de temperaturas de fondo son generalmente altos (~3,4-5,6 °C/100m). El contenido de carbono orgánico total es generalmente bajo (<1%) pero puede llegar hasta 2% en muestras de afloramiento. A partir de los ~2500 m los valores de vitrinita supera el 0,6% indicando

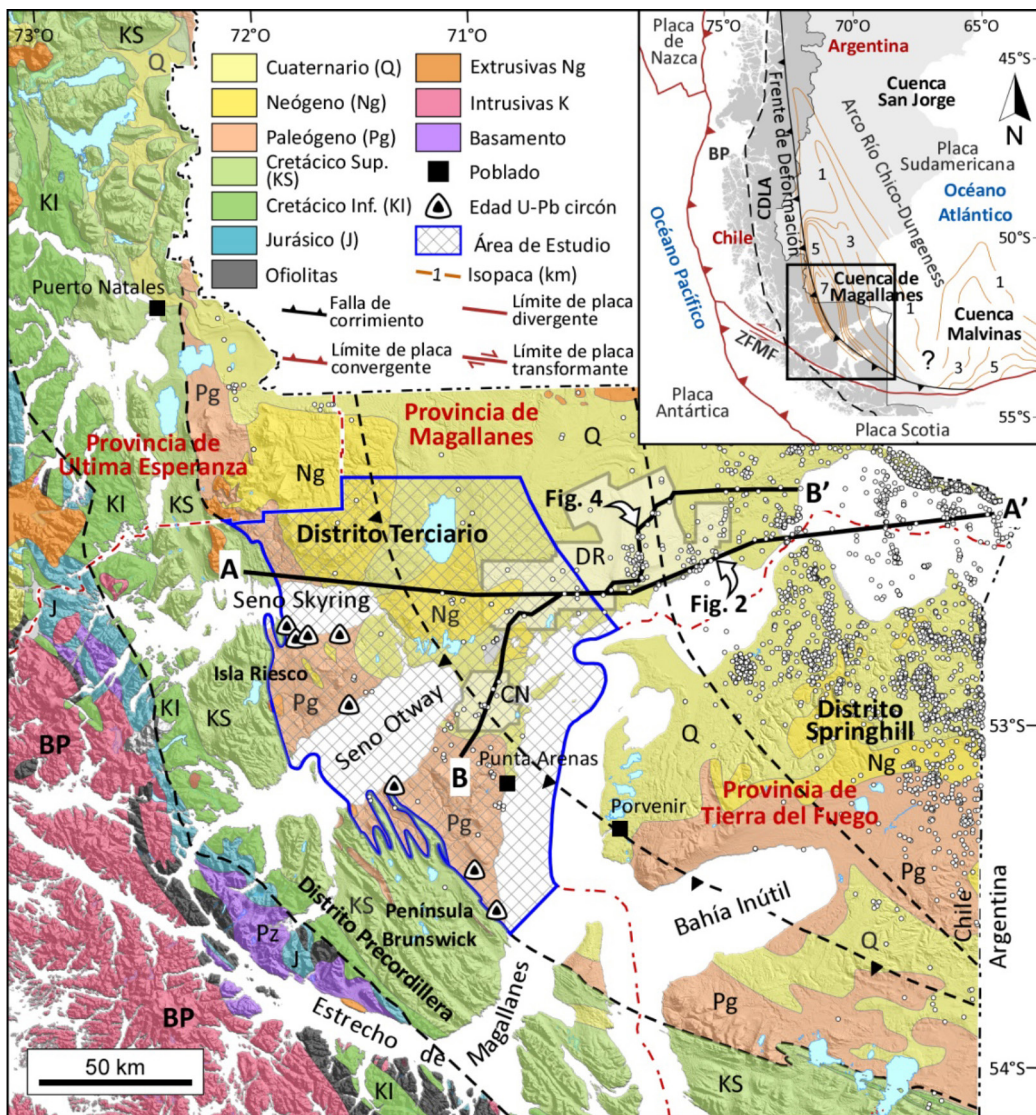


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la Región de Magallanes mostrando el área de estudio, distritos petroleros (según Harambour 1978), distribución de pozos (puntos blancos) y ubicaciones relativas con edades U-Pb en circón detrítico incluidas en este estudio. BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes, CN= cubo sísmico 3D Cabo Negro, DR = cubo sísmico Dorado-Riquelme, ZFMF = zona de fallas Magallanes-Fagnano.

que todas las rocas con potencial de roca madre por debajo o inmediatamente adyacente a los potenciales reservorios debe haber alcanzado la madurez térmica. Bajo estas premisas, y en un contexto de exploración de yacimientos no convencionales, esta contribución constituye un reporte del estatus y perspectivas del potencial petrolífero de la antefosa paleógena sobre la base de una revisión de sus características tectono-estratigráficas. El trabajo se benefició grandemente del material bibliográfico existente (interno y externo), en la interpretación de datos sísmicos y de pozos disponibles. Además, se incluye un nuevo esquema cronoestratigráfico para el Paleógeno del área de estudio sobre la base de nuevos datos geocronológicos obtenidos a partir de U-Pb en circones detríticos.

## UBICACIÓN Y ESCENARIO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está enmarcada dentro de la Provincia de Magallanes (Fig. 1). Desde el punto de vista petrolero se circunscribe al Distrito Terciario de Harambour (1978). A diferencia del distrito Springhill, que incluye la mayor parte de los pozos perforados hasta ahora (~95%), el distrito Terciario solo cuenta con aproximadamente 200 pozos dispersos, generalmente someros y antiguos, que se traducen en un control deficiente para interpretaciones geológicas regionales. Desde el punto de vista tectono-estratigráfico, este distrito ocupa una posición de antefosa (“foredeep”) de antepaís entre los estratos fuertemente plegados y fallados del Cinturón de Deformación de Los Andes al oeste y los estratos más estables y menos deformados de la Plataforma Springhill hacia el este (Fig. 2).

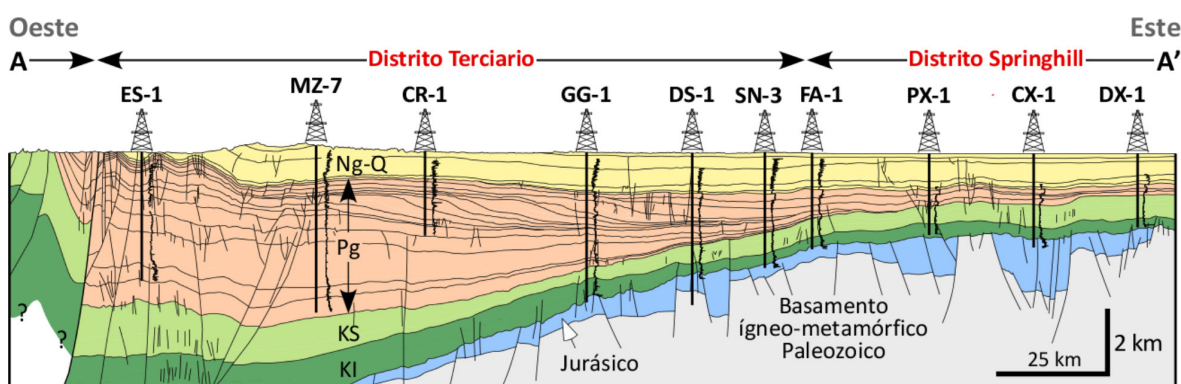


Figura 2. Sección geológica regional oeste-este mostrando la configuración y relleno de la Cuenca de antepaís Magallanes (véase Fig. 1 para ubicación). KI = Cretácico Inferior, KS = Cretácico Superior, Pg = Paleógeno, Ng = Neógeno, Q = Cuaternario.

La evolución geológica a cuenca de antepaís fue compleja y estuvo íntimamente vinculada a la geodinámica Andina a lo largo del margen Pacífico de América del Sur (Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991). Los patrones de sedimentación y subsidencia indican tres fases principales de desarrollo de cuenca, cada una asociada con actividad volcánica prominente: (I) distensión y fragmentación continental (“rifting”) de los terrenos de Gondwana meridional durante el Jurásico Medio-Tardío (Bruhn y Dalziel 1977, Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991, Pankhurst *et al.* 2000), (II) extensión y desarrollo de una cuenca de tras-arco (Rocas Verdes) durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Dalziel 1981, Wilson 1991), y (III) inversión y establecimiento de cuenca de antepaís durante el Cretácico Tardío-Paleógeno (Natland *et al.* 1974, Winslow 1982, Biddle *et al.* 1986, Wilson 1991). Luego de una disminución en los movimientos compresivos y la deformación, la región experimentó un régimen transpresivo y una sedimentación más continental acompañada de vulcanismo a partir del Neógeno (Winslow 1982).

La sucesión estratigráfica de la fase I, acumulada discordantemente sobre el basamento Ígneo-metamórfico paleozoico (Fig. 2), está dominada por rocas volcánicas, esencialmente piroclásticas

y clásticas asignadas a la Formación Tobífera. Esta sucesión estuvo íntimamente ligada a la fase temprana del desarrollo de la Cuenca Rocas Verdes (Dalziel 1986, Wilson 1991, Mpodozis *et al.* 2011, Fosdick *et al.* 2014). La Formación Tobífera tiene localmente buena capacidad de yacimiento y contiene intervalos ricos en materia orgánica tipo I, II y III con potencial de roca madre (e.g., Herrero *et al.* 1999, Moraga *et al.* 2004). Durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, la subsidencia térmica de la cuenca Rocas Verdes provocó una transgresión generalizada y el depósito de una gruesa sucesión siliciclástica que en el subsuelo del distrito Springhill incluye en la base las areniscas de la Formación Springhill, el principal yacimiento convencional de la cuenca, seguida de lodolitas y lutitas de estratos con Favrella, la roca madre por excelencia, rica en materia orgánica tipo II y en menor proporción tipo III. El resto de la sucesión lo conforma lutitas con ftanitas, que también tiene potencial de roca madre, y margas, que actúa como sello regional.

La transformación de cuenca extensional a cuenca de antepaís estuvo asociada con movimientos compresivos causados por la formación de los Andes australes y el cinturón de deformación de la Patagonia durante, o poco después de, la transición Cretácico Temprano a Tardío (Biddle *et al.* 1986, Dalziel 1986, Wilson 1991, Fildani *et al.* 2008, Ghiglione *et al.* 2010). La deformación y, consecuentemente, la fase inicial de antepaís debido al cierre de la cuenca de Rocas Verdes (Ronda *et al.* 2019) fue progresiva y diacrónica, estimándose una edad cercana al Aptiano-Albiano hacia el norte 46° S (Lago Cochrane-Pueyrredon, Ghiglione *et al.* 2015) y Turoniano o más joven en la porción chilena de la Cuenca (Mpodozis *et al.* 2011, Bernhardt *et al.* 2012, Malkowski *et al.* 2015). Esto causó varios eventos diferenciales de levantamiento y subsidencia por flexión cuyo resultado fue el desarrollo progresivo de varias discordancias regionales y el depósito en los depocentros de una gran variedad de rocas terrígenas y volcánicas. La sucesión cenozoica, que yace discordantemente sobre el Cretácico, es predominantemente siliciclástica y puede alcanzar los 6 km de espesor en la parte más profunda (antefosa) de la cuenca (Fig. 2).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis estratigráfico se basó en la integración de datos de afloramientos de Isla Riesco y Península Brunswick (Fig. 1) y varios pozos seleccionados hacia el este con la finalidad de construir un esquema de correlación en dirección oeste-este que representara un perfil paleo-batimétrico de antefosa a rampa de antepaís (Fig. 2). Los datos de pozo incluyeron registros básicos y mediciones a partir de ripios y testigos. Finalmente, la información geocronológica y estratigráfica fue contrastada con la sísmica y la información bioestratigráfica disponible para refinar el marco cronoestratigráfico y comparar las nuevas edades obtenidas con la de los pisos de la Cuenca propuestas por Natland *et al.* (1974), posteriormente revisadas por MOBIL (1979).

Para el marco sísmico-estratigráfico se consideraron líneas sísmicas 2D y dos cubos sísmicos 3D (Cabo Negro, CN, y Dorado-Riquelme, DR, Fig. 1). Una vez calibrada la relación sísmica-

pozo se procedió a la interpretación de reflectores asociados con el intervalo de estudio. Se utilizaron atributos sísmicos de descomposición espectral y “sweetness” para resaltar las bandas RGB y anomalías de amplitud presentes en varios niveles para definir zonas de interés.

Datos petrográficos de estudios previos (e.g., Mobil 1979; LCV 2011) se combinaron con nuevos análisis para establecer un esquema de clasificación litológica e inferir cambios diagenéticos en potenciales reservorios. Se consideraron mediciones de porosidad en los tres pozos más profundos del área de estudio (MZ-5, MZ-7 y MC-1).

Para la evaluación de rocas con potencial de roca madre se revisó y utilizó medidas indirectas obtenidas a partir de muestras de “cuttings” y testigos de 18 pozos exploratorios (Fig. 1). La información incluye contenido de carbono orgánico total (COT), pirólisis Rock-Eval, porcentaje de reflectancia de vitrinita (%Ro) y petrografía orgánica. La interpretación se basó en tres aspectos principales siguiendo la propuesta de Dembicki (2009): (1) contenido de materia orgánica, estimado a partir de los valores de COT y combinada con datos de pirólisis Rock-Eval S2 para estimar la cantidad de hidrógeno y la capacidad real de la materia orgánica para generar hidrocarburos; (2) madurez térmica, usando como indicadores el %Ro y la temperatura máxima de pirólisis (Tmax); y (3) tipo de hidrocarburo generado, interpretado a partir de diagramas de van Krevelen y, en algunos pozos, petrografía orgánica disponible.

Este reporte incluye 8 dataciones U-Pb en circones detríticos provenientes de las formaciones paleógenas de antefosa en afloramientos de Isla Riesco y Península Brunswick (Fig. 1). Las muestras fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de Geoanalítica de la Universidad Estatal de Washington, EE. UU. Cada muestra fue triturada y tamizada para aislar la fracción <300  $\mu$ m. Los circones se separaron de otros minerales usando un separador magnético Frantz combinado con líquidos pesados siguiendo métodos estándares. Los circones estándares, incluyendo el FC de edad  $1099 \pm 0,6$  Ma (FC-1 de Paces y Miller 1993) utilizado como el estándar de edad primaria, y los desconocidos fueron montados en discos de “epoxy” de ~2.5 cm de diámetro que luego fueron pulidos para exponer las partes internas de los cristales. Los análisis de datación U-Pb se realizaron por medio de ablación láser acoplado a un espectrómetro de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (LA-ICPMS, por sus siglas en inglés) (Gehrels *et al.* 2008). La ablación de los circones se llevó a cabo con un sistema láser de estado sólido New Wave que produjo cavidades de 20-30  $\mu$ m de diámetro. El material generado fue luego introducido al ICPMS para la medición de los isótopos de U, Th y Pb. El Pb común fue calculado utilizando el modelo Pb común para la Tierra de Stacey y Kramer (1975). La edad seleccionada para circones <1000 Ma es la  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . Para la estimación de edad máxima de sedimentación (EMS) se omitieron dataciones con contenido de Uranio >1000 ppm y/o edades con discordancia mayor a 20 % y discordancia inversa menor a -5 %. La EMS está dada por el grupo de por lo menos los tres granos más jóvenes cuyos errores se solapan a dos desviaciones estándares (2s) de la muestra (YGC2s de Dickinson y Gehrels 2009).

## RESULTADOS E INTERPRETACIONES

### Bosquejo Cronoestratigráfico para el Paleógeno de Antefosa

La Fig. 3 muestra un esquema cronoestratigráfico Paleógeno para superficie y subsuelo de la Cuenca de antepaís Magallanes. Las edades cronoestratigráficas y curvas del nivel del mar internacionales

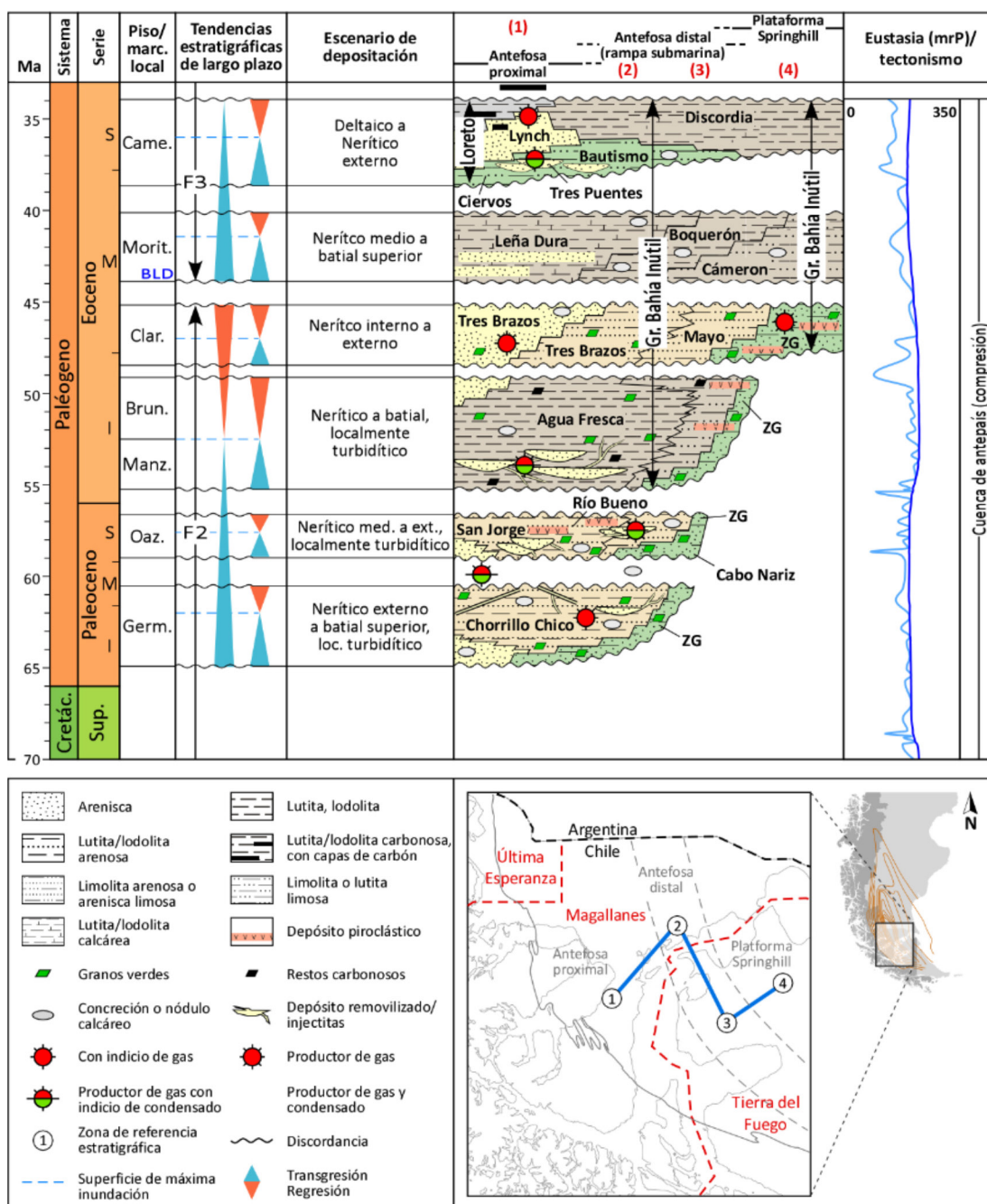


Figura 3. Diagrama cronoestratigráfico para el Paleógeno de la antefosa y plataforma Springhill de la Cuenca en las provincias de Magallanes y Tierra del Fuego. Megasecuencias F2-F3 según Mpodozis *et al.* (2011). mrP = metros con respecto al Presente.

se derivan de la Carta Cronoestratigráfica Internacional (Gradstein *et al.* 2020), mientras que los pisos locales se corresponden con los propuestos por Natland *et al.* (1974) posteriormente tratados por Mobil (1979) y más recientemente revisados para este trabajo. Los nombres de formaciones y/o divisiones estratigráficas corresponden a los definidos por ENAP para la porción chilena de la cuenca.

Para el esquema cronoestratigráfico se consideran dos áreas geográficas (véase mapa índice en la leyenda de la Fig. 3): (1) occidental (área de estudio), conformada por Isla Riesco y el sector meridional continental incluyendo la Península Brunswick y (2) oriental (para comparación), conformada por una parte del sector continental y el noroeste de la Isla Tierra del Fuego. La descripción de unidades estratigráficas se enfocará para el área de estudio (i.e., Provincia de Magallanes), donde las unidades están aflorando. La sucesión paleógena, representada por el Paleoceno-Eoceno debido a erosión o no deposición del Oligoceno, constituye las megasecuencias de antepaís 2 y 3 propuesta por Mpodozis *et al.* (2011). Cada una de estas megasecuencias pueden ser subdivididas en por lo menos tres secuencias simples o compuestas de 3er o mayor orden. Todo el intervalo comprende una extensa y potente cuña que se inicia con una transgresión generalizada sobre depósitos cretácicos parcialmente erosionados (Figs. 2 y 4). En el área de estudio, estos depósitos son asignados a la Formación Rocallosa, cuya edad basada en U-Pb de circones detríticos varía de  $78 \pm 2,5$  Ma (Campaniano medio, Hervé *et al.* 2004) a  $73,5 \pm 1,3$  Ma (Campaniano superior, Rivera *et al.* 2020).

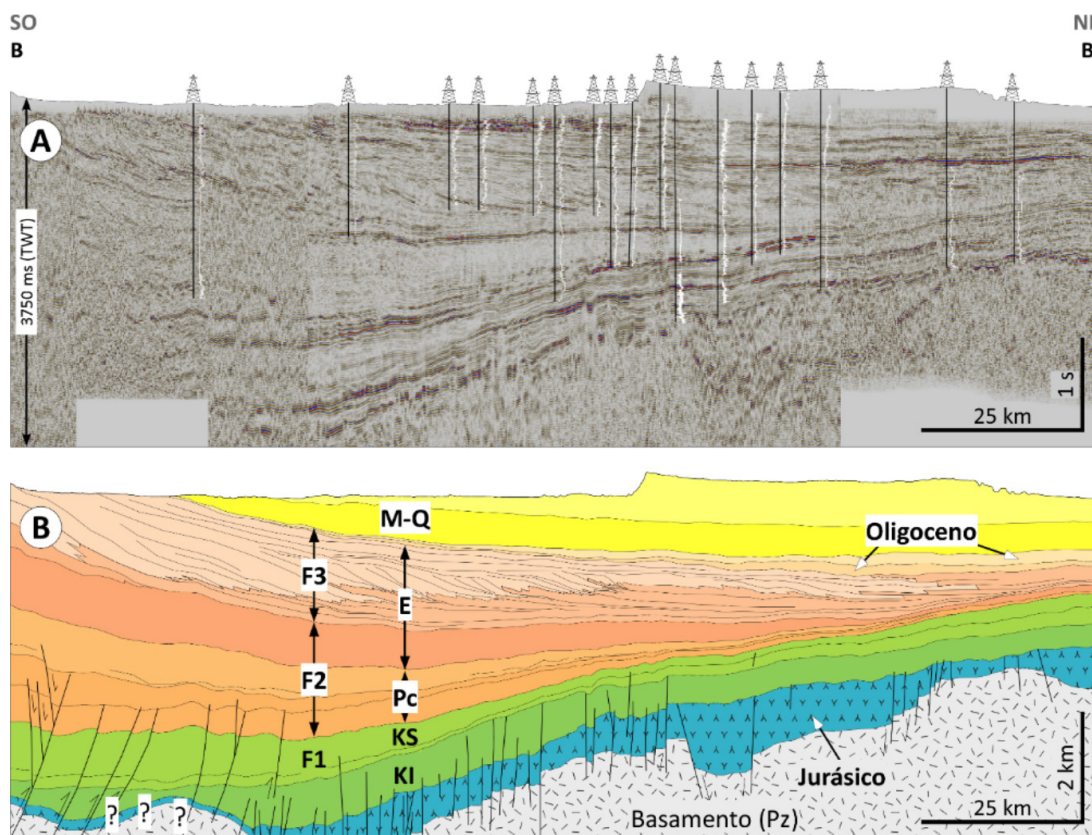


Figura 4. Sección sísmica compuesta sin interpretar (A) e interpretada (B) mostrando las megasecuencias de antepaís (según Mpodozis *et al.* 2011), cronoestratigrafía y relaciones estratigráficas a escala regional en la Cuenca de Magallanes.

Aunque el esquema inicialmente fue basado en correlaciones litoestratigráficas y paleontológicas tradicionales (e.g., Barwick 1955, Natland *et al.* 1974, ENAP 1977, Mobil 1979), aquí incluye modificaciones de acuerdo con datos más recientes en bioestratigrafía (e.g., Quattrocchio 2010, Malumián *et al.* 2013, Bijl *et al.* 2021) y geocronología de circones detríticos, tanto publicados (e.g., Hervé *et al.* 2004, Otero *et al.* 2012, Fosdick *et al.* 2015) como los obtenidos por ENAP en los últimos años a partir de muestras de afloramientos (Fig. 5). A continuación, se describen en orden estratigráfico ascendente las distintas unidades de interés.

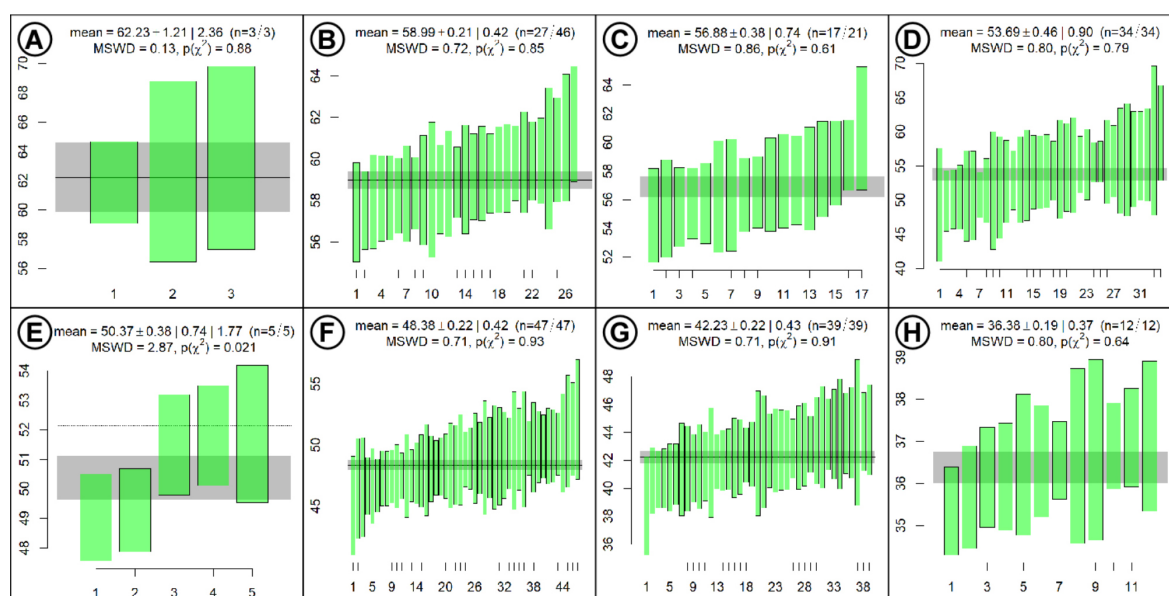


Figura 5. Gráficos de promedio ponderado de edades U-Pb en circones detríticos para muestras de rocas aflorantes de la antefosa en el área de estudio; diagramas a partir del programa Isoplot R (Vermeesch 2018). A = Formación Chorrillo Chico, B-C = Formación San Jorge, D-E, Formación Agua Fresca, F = Formación Tres Brazos, G = Formación Leña Dura, H = Formación Loreto. (Ver texto y Fig. 1 para ubicación).

La Formación Chorrillo Chico (Thomas 1949) en su localidad tipo de Punta Rocallosa en Seno Skyring (Fig. 1) consiste en unos 440 m de limolitas glauconíticas, arcillosas y duras, con capas delgadas de caliza y concreciones calcáreas. En Punta Prat, costa septentrional de la Península Brunswick (Fig. 1), la sección expuesta está dominada por una alternancia de lodolitas y limolitas de plataforma media a externa. Esta sucesión está cortada por diques clásticos compuestos por arenisca gris verdoso de granulometría fina a media (Fig. 6). El dique más grueso (~1 m de espesor) se extienden con ángulo bajo por decenas de metros en una dirección aproximada este-oeste, abarcando toda la extensión del afloramiento. La composición y edad U-Pb de circones de este dique sugiere que la fuente proviene de la suprayacente formación San Jorge.

El carácter neto e irregular de los contactos entre el dique clástico y la roca caja, además de la incorporación de clastos sub-redondeados de la roca caja en las intrusiones indica una penetración forzosa del material arenoso en una sucesión parcialmente litificada. Esto es soportado por la



Figura 6. Afloramiento de la Formación Chorrillo Chico en Punta Prat, costa meridional del Seno Otway. La sucesión de lodolitas y limolitas es cortada por un dique clástico (inyectita) compuesto de arenisca gris-verdoso rica en feldespatos y líticos volcánicos de granulometría fina a muy fina.

ocurrencia de plegamiento ptigmático en algunas intrusiones, probablemente causado por la compactación diferencial pos-inyección de las lodolitas de la roca caja (Hiscott 1979). Además, la mayoría de los diques se bifurcan y adelgazan hacia abajo, sugiriendo que el aporte de material arenoso fue generalmente desde arriba (Pinto *et al.* 2018).

La edad de la Formación Chorrillo Chico ha sido tradicionalmente tema de investigación y debate. Sobre la base de correlaciones regionales y la presencia de estratos con amonites progresivamente más antiguos en dirección sur-norte, geólogos de ENAP establecieron una relación discordante entre Chorrillo Chico y el Cretácico y le asignaron una edad terciaria. Más tarde, Thomas (1949) y García y Cortés (1952) propusieron una edad Cretácico debido a las similitudes litológicas con los depósitos de Rocallosa. Robles y Gómez (1956) sobre la base de estudios de foraminíferos le atribuyeron una edad Paleoceno. Charrier y Lahsen (1969) indicaron que el contacto entre Rocallosa y Chorrillo Chico es transicional y que de acuerdo con su análisis bioestratigráfico el contacto K/Pg se ubicaría en Chorrillo Chico, dividiendo la unidad en dos intervalos: uno inferior Cretácico y otro superior Paleoceno. Quattrocchio (2010), sobre la base de dinoflagelados, sugiere que la formación no puede ser más joven que el Selandiano debido a la presencia de *Palaeoperidinium pyrophorum*. La ocurrencia en otras secciones del foraminífero bentónico *Praeglobobulimina kickapoensis*, el nanofósil calcáreo *Hornibrookina teuriensis* y el cisto de dinoflagelado *Spiniferites cryptovesiculatus* soportan esa edad.

Desde el punto de vista geocronológico, Hervé *et al.* (2004) reportaron una edad de  $58 \pm 2,2$  Ma para circones detríticos obtenidos a partir de una muestra de la formación Chorrillo Chico en Punta Canelos y sugiere un hiato Maastrichtiano tardío-Paleoceno medio (Selandiano) entre las formaciones Rocallosa y Chorrillo Chico. Álvarez *et al.* (2006) sugieren una edad de  $61,0 \pm 1,8$  Ma para una muestra de la formación en Punta Eulogio, norte de Seno Skyring. Edades similares fueron reportadas por Rivera *et al.* (2020) en la Península Brunswick,  $64,7 \pm 0,7$  Ma en la parte sur y  $60,7 \pm 2,2$  Ma en el norte. La muestra analizada para este trabajo y proveniente de Punta Rocallosa (Isla Riesco) (Fig. 1) arrojó una edad de  $62,2 \pm 1,2$  Ma usando el promedio ponderado

de los tres circones más jóvenes con errores solapantes (Fig. 5A). Debido a su contenido fósil, edades U-Pb de circones detríticos y la edad Thanetiano asignada para la formación San Jorge suprayacente, asumimos tentativamente una edad Daniano-(?)Selandiano para la unidad.

La formación San Jorge (Von Goetsche y Huca 1953) en su localidad tipo de Bahía San Jorge, costa meridional de la Península Brunswick (Fig. 1), consiste en unos 420 m de lodolitas marrón oscuro, duras, con estratos de areniscas arcillosas y limolitas marrón oscuro tanto en su base como en su tope. Varios de los paquetes arenosos más espesos muestran la típica secuencia Bouma en turbiditas (Fig. 7). Clastos de lutita verde son común en toda la sucesión y contiene grandes concreciones calcáreas (de 1 m o más de diámetro) en la parte media. Localmente, las areniscas pueden ser gris verdoso a verdosas dependiendo de la cantidad de clastos verdes presentes.

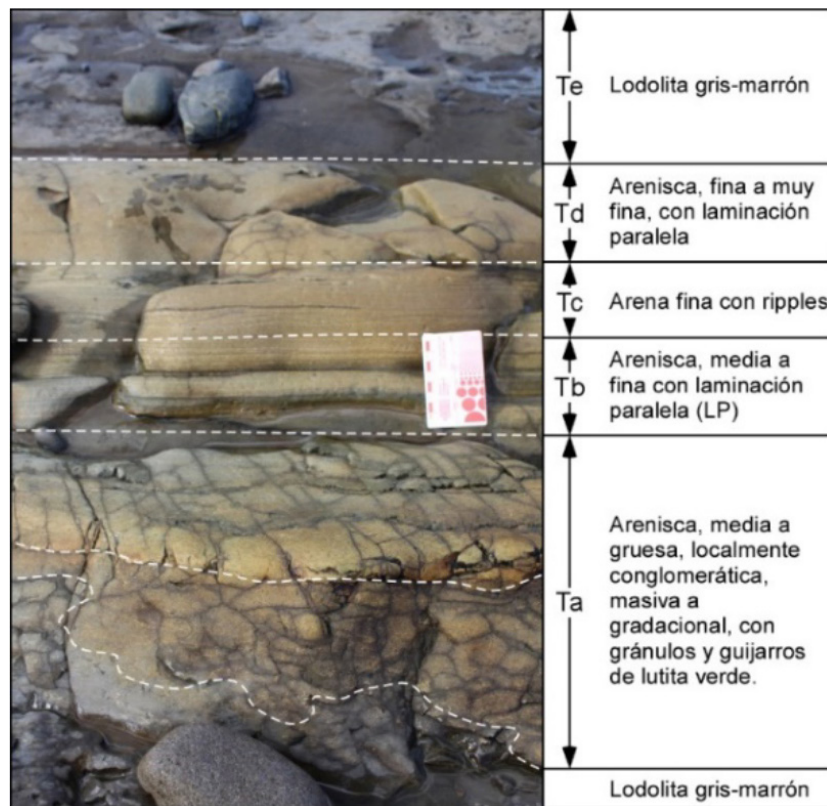


Figura 7. Areniscas turbidíticas de la formación San Jorge, mostrando la típica secuencia Bouma, costa suroccidental de la Península Brunswick. Ta, depósito de flujo de alta energía y turbulento; Tb, depósito de energía moderada bajo condiciones de régimen de flujo superior; Tc, depósito de energía moderada bajo condiciones de régimen de flujo inferior; Td, depósito de baja energía; Te, depósito hemipelágico de muy baja energía. Tarjeta de escala granulométrica 10 cm de largo.

La edad de la Formación San Jorge hasta hace poco había permanecido elusiva. Geólogos de ENAP le asignaban una edad no más vieja que Paleoceno debido a la edad de Chorrillo Chico obtenida por Robles y Gómez (1956). La revisión bibliográfica y la disponibilidad de nuevos datos micropaleontológicos tanto en afloramientos como en pozos sugieren una edad Paleoceno

superior (Thanetiano). La unidad se caracteriza, además de la asociación de foraminíferos bentónicos reportados por Natland *et al.* (1974), por contener *Globanomalina ovalis* (foraminífero planctónico) y *Bomolithus megastypus* (nanofósil calcáreo) de edad Thanetiano. Por otra parte, los límites bioestratigráficos de la unidad están marcados por la desaparición del *Palaeoperidinium pyrophorum* en el contacto inferior con Chorrillo Chico y la aparición en el Eoceno del género *Elphidium* en el contacto superior con la Formación Agua Fresca (e.g., Malumian *et al.*, 2013).

Los dos nuevos resultados de U-Pb en circones detríticos para muestras de afloramientos, una tomada del dique clástico que corta a Chorrillo Chico en Punta Prat ( $59,0 \pm 0,2$  Ma) (Fig. 5B y 6) y la otra una toba de granulometría fina a media en el Chorrillo Quema Angosta al sur de la Península Brunswick ( $56,9 \pm 0,4$  Ma) (Fig. 5C), sugieren una edad Thanetiano. De acuerdo con estos datos, se asume esa edad para la unidad y así, hacia el este sería equivalente de parte de la Zona Glauconítica en el subsuelo del Distrito Springhill, Isla Tierra del Fuego. Los reservorios del yacimiento Cahuil arrojaron una edad similar que junto con las correlaciones regionales indicarían una equivalencia temporal (Pinto *et al.* 2016).

La Formación Agua Fresca (Thomas 1949) alcanza unos 2100 m en la localidad tipo del Río Agua Fresca en la Península Brunswick y está compuesta por lutitas claras, que se meteorizan fácilmente y que contienen capas calcáreas discontinuas o concreciones calcáreas alargadas (Fig. 8A). En Chorrillo Alicia, tributario del Río Agua Fresca en la parte meridional de la Península Brunswick, ocurre una sucesión estrato decreciente de areniscas gris verdoso, cuarzo-lítico-feldespáticas, moderadamente consolidadas, interrumpidas por capas de lodolita gris relativamente delgadas (Fig. 8B). La base de las areniscas es comúnmente erosiva y ligeramente irregular, mientras que el contacto superior con las lodolitas es transicional. En general, la granulometría de las areniscas varía de media en la base a fina hacia el tope, indicando una gradación normal. Otras estructuras sedimentarias en las areniscas incluyen capas “masivas”, estratificación cruzada de bajo ángulo, laminación plano-paralela y, aunque no muy bien expuestas, marcas de corriente. Las lodolitas son laminadas y relativamente blandas. Las variaciones en el tamaño de grano y

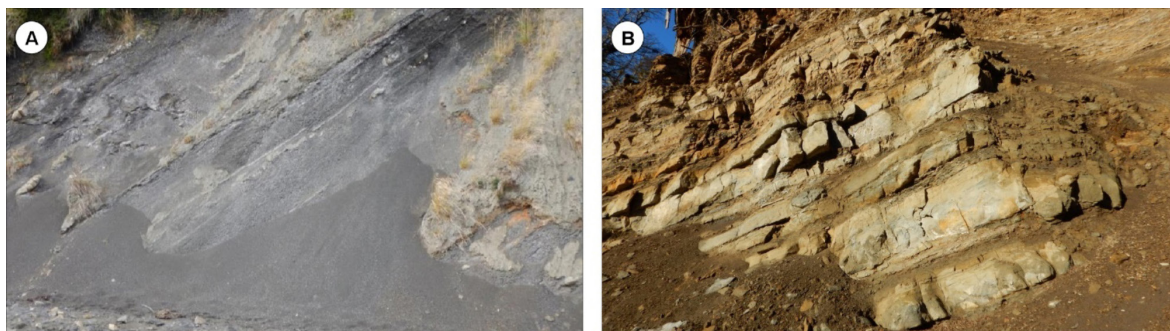


Figura 8. Afloramientos de la Fm. Agua Fresca a lo largo del Río Canelos (A) y en Chorrillo Alicia, tributario del Río Agua Fresca (B), Península Brunswick. (A) Típica litología lutítica gris oscuro de la formación, son comunes las concreciones calcáreas elipsoidales centimétricas a decimétricas. El ancho del afloramiento en la foto es de ~15 m. (B) Base de la formación compuesta por una sucesión estrato decreciente de areniscas gris-verdoso intercaladas con capas de lodolita gris. Las areniscas despiden un fuerte olor a hidrocarburo.

las estructuras sedimentarias, además de su carácter estrato decreciente, sugieren una naturaleza turbidítica. Una característica importante de este afloramiento es que las areniscas desprenden un fuerte olor a hidrocarburo en superficies frescas.

Kniker (1949) sobre la base de su contenido de *Elphidium*, un foraminífero bentónico característico del Eoceno en otras partes del mundo consideró la Formación Agua Fresca como Eoceno medio superior o Eoceno superior, mientras que Charrier y Lahsen (1969) la consideraron Paleoceno superior-Eoceno Inferior. Malumián *et al.* (2013) la restringen al Eoceno debido a que contiene *Globanomalina australiformis*, un foraminífero que en altas latitudes australes marca el límite Paleoceno/Eoceno. Además, los mismos autores sugieren que el género *Elphidium* aparece en la Cuenca a partir del Eoceno. Recientemente, Bjil *et al.* (2020) encontraron *Apectodinium homomorphum* en muestras de la unidad en Isla Riesco, sugiriendo una edad Eoceno inferior.

Las edades U-Pb en circones detríticos para dos muestras seleccionadas de esta unidad en este trabajo promedian 52 Ma. Las muestras provienen de la costa norte de Isla Riesco ( $53,7 \pm 0,5$  Ma) (Fig. 5D) y Chorrillo Alicia, tributario del Río Agua Fresca en la costa sur de la Península Brunswick ( $50,4 \pm 0,4$  Ma) (Fig. 5E). Bajo estas premisas, en este trabajo la edad de la Formación se considera principalmente Ypresiano, aunque no se descarta que llegue hasta la parte inferior del Lutetiano. La Formación Agua Fresca sería equivalente lateral de la mayor parte de la Zona Glauconítica en el subsuelo del Distrito Springhill. De acuerdo con Todd y Kniker (1952), Agua Fresca subyace discordantemente (hiato de  $\sim 3$  ma) a la Formación Tres Brazos suprayacente.

La formación Tres Brazos (Ruby 1945) pudiera alcanzar los 1300 m en su localidad tipo a lo largo del Río Tres Brazos, parte meridional de la Península Brunswick (Fig. 9A). La unidad se caracteriza por areniscas ricas en granos verdes, de grano medio, con capas de concreciones arenosas cementadas por sílice y pocas concreciones calcáreas fosilíferas (Thomas, 1949). En la costa meridional de Isla Riesco, entre las puntas Grimal y Lackwater, sector de la Mina Invierno, ocurren concreciones arenosas casi perfectamente redondas que promedian  $\sim 1$  m de diámetro (Fig. 9B). Estas concreciones no parecen acrecionarias sino más bien el producto de cementación diferencial; la bioturbación, muy marcada y casi exclusivamente dominada por el icnogénero *Ophiomorpha*, se preserva muy bien tanto en las concreciones como en la roca caja. La granulometría también permanece invariable a través de los bordes de las concreciones. Estos elementos diagenéticos son muy similares a las famosas “Moerakis” de Nueva Zelanda, concreciones arenosas esféricas en la Formación Moerakis del Paleógeno, interpretados en general como productos de una cementación diferencial “esférica” por arcillas o carbonato de calcio, no completamente entendida hasta ahora (e.g., Doe 2004).

El espesor de Tres Brazos es significativo en la parte occidental del área de estudio (hasta  $\sim 1500$  m) pero desaparece drásticamente hacia el extremo occidental. El acuñaamiento de la unidad hacia el este fue interpretado por Thomas (1949) como producto de una discordancia en el tope de la Formación, previo al depósito de la Formación Leña Dura suprayacente. Esta

relación estratigráfica es visible en algunas líneas sísmicas regionales y Bijl *et al.* (2020) también la reconocieron y estimaron un hiato de unos 4 ma.

La Formación Tres Brazos fue considerada por Thomas (1949) como de edad Eoceno superior. Mobil (1979) le asignó una edad Eoceno inferior-medio, edad que más o menos concuerda con la sugerida por los nuevos datos bioestratigráficos de Malumián *et al.* (2013), que ubican a la Formación no más joven que 43,7 Ma, i.e., Eoceno medio. No obstante, Bijl *et al.* (2020) sobre la base de cistos de dinoflagelados sugieren una edad Eoceno inferior (52-49 Ma). Una muestra tomada en la costa sur de Isla Riesco arrojó una edad U-Pb de circones detríticos de  $48,4 \pm 0,2$  Ma (Fig. 5F). Para este trabajo se asumió tentativamente una edad Ypresiano-Lutetiano.



Figura 9. (A) Afloramiento de la Fm. Tres Brazos a lo largo del cauce del Río Tres Brazos, Península Brunswick, mostrando paquetes gruesos de areniscas de grano medio. La altura del afloramiento es de ~15 m. (B) Concreciones esféricas decimétricas a métricas en afloramiento de Tres Brazos en costa meridional de Isla Riesco.

Las areniscas de la Formación Tres Brazos han mostrado indicios de gas en varios pozos dentro y fuera del área de estudio. García y Cortés (1952) obtuvieron valores de porosidad y permeabilidad de hasta 30,5 % y 137,5 mD, respectivamente. La Formación Tres Brazos grada lateralmente como parte del Grupo Bahía Inútil en el subsuelo del Distrito Springhill.

La Formación Leña Dura (Barwick 1955) tiene unos 300 m de espesor en la localidad tipo a lo largo del Río Leña Dura (Fig. 10), costa sur de la Península Brunswick. La unidad está compuesta por lutitas grises y duras, con estratos de hasta 1 m de espesor con concreciones calcáreas esferoidales y fosilíferas que incluyen abundantes foraminíferos. Localmente ocurren capas delgadas de limolitas y areniscas gris verdoso de granulometría fina a muy fina.

Thomas (1949) y Barwick (1955) consideraron la Formación Leña Dura como Eoceno superior, mientras que Kniker (1949), Mobil (1979) y más recientemente Malumián *et al.* (2013) la asignaron al Eoceno medio. Bijl *et al.* (2020), debido a la abundancia y continuidad de *Enneadocysta* spp., sugieren una edad no más vieja que 45 Ma. La edad U-Pb de circones detríticos para una muestra de la unidad en la costa norte de Isla Riesco, arrojó una edad de  $42,2 \pm 0,2$  Ma (Fig. 5G). Hacia el este, en el subsuelo del Distrito Springhill, la Formación es incluida dentro del Grupo Bahía Inútil.



Figura 10. Afloramiento de lodolitas limosas y limolitas arcillosas de la Fm. Leña Dura a lo largo del Río Leña Dura, sector centro-oriental de la Península Brunswick, al sur de Punta Arenas. Son comunes las concreciones calcáreas esféricas. El ancho del afloramiento en la foto es de ~25 m.

La Formación Loreto (Keidel y Hemmer 1931) tiene un espesor variable de 700-100 m en la localidad tipo de la Mina Loreto (Thomas 1949) y los afloramientos a lo largo del Chorrillo Lynch, parte oriental de la Península Brunswick. Barwick y García (1951-53) en (Hoffstetter *et al.* 1957) propusieron una división tripartita para la unidad, de base a tope: (1) miembro Ciervos, con su mejor expresión en el Río de Los Ciervos, 540 m de limolitas y lutitas limolíticas grises, con pocas intercalaciones de areniscas calcáreas de grano fino; (2) miembro Lynch, descrito en el Chorrillo Lynch, como una sucesión de 250 m de areniscas arcillosas de grano grueso y estratificación cruzada, ligeramente glauconíticas con pocas intercalaciones de limolitas; y (3) miembro carbonoso, con su mejor expresión en el Río Las Minas, 350 m de areniscas, limolitas y lutitas carbonosas con capas de carbón. Este último miembro se reconoce al norte de la Península donde fue explotado para carbón en la Mina Pecket (Fig. 11).

Thomas (1949) propuso una edad tentativa Mioceno, mientras que Hoffstetter *et al.* (1957) sugirieron una edad Oligoceno o Eoceno inferior. Mobil (1979) le atribuyó una edad Eoceno superior. Las dataciones en circones detríticos llevadas a cabo por Otero *et al.* (2012) parecen corroborar esa edad, los 98 granos obtenidos a partir de dos muestras de la parte superior de la Formación arrojaron un valor principal de 36-37 Ma. Bjil *et al.* (2020), sobre la base de cistos de dinoflagelados y edades U-Pb en circones detríticos, propusieron una edad basal para la unidad no más vieja que 38 Ma en la Mina Pecket. Nuestra muestra tomada en las inmediaciones de Mina Pecket arrojó una edad U-Pb en circones detríticos de  $36,4 \pm 0,2$  Ma (Fig. 5H). Así, la edad de Loreto es principalmente Priaboniano (Eoceno superior) pero su depositación pudo haber comenzado un poco antes, durante el Bartoniano más tardío. De acuerdo con las interpretaciones sísmicas el contacto entre Loreto y Leña Dura es discordante.

Hacia el este, los equivalentes de la Formación Loreto serían las formaciones Bautismo y Discordia (Fig. 3), ambas definidas originalmente por Barwick (1949). La Formación Bautismo, referida como limolita Bautismo por Barwick (1949) y como Formación por Hoffstetter *et al.* (1957), tiene su localidad tipo en la desembocadura del Río Bautismo, costa sur de Bahía Inútil.

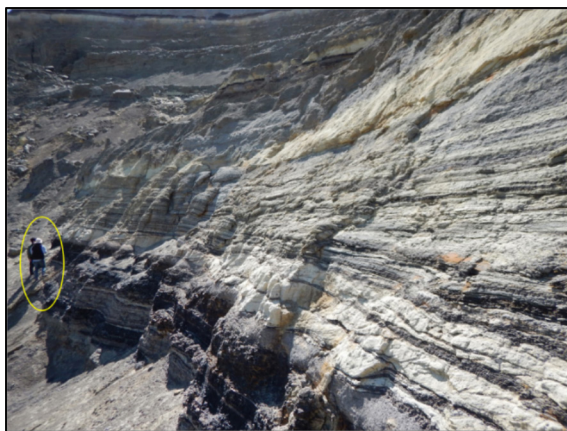


Figura 11. Afloramiento de la Fm. Loreto en la Mina Pecket, ubicada en la parte septentrional de la Península de Brunswick. La sección consiste en una alternancia de capas de carbón, lodolitas carbonosas y areniscas localmente bioturbadas; entre las trazas más comunes se encuentran *Thalassinoides*, *Ophiomorpha* y *Teredolites*. Considere las dos personas a la izquierda para la escala.

Está compuesta por unos 250 m de limolitas con concreciones calcáreas. Barwick (1955) la correlacionó con el miembro Ciervo de Loreto. La Formación Discordia, referida como lutita Discordia por Barwick (1949) y como Formación por Hoffstetter *et al.* (1957), tiene su localidad tipo en el Río Discordia, costa norte de Bahía Inútil. Está dominada por lutitas con concreciones calcáreas, aunque ocurren pocas capas relativamente delgadas de limolitas. El espesor varía de 650-1750 m.

### Principales Características de Potenciales Rocas Yacimiento

El espesor de los cuerpos arenosos en el área de estudio puede variar de unos pocos centímetros a varias decenas de metros. En la parte central del área de estudio, los análisis de registros de pozo indican potenciales intervalos reservorio de 80-100 m de espesor. En general, la expresión del registro de rayos gamma de estos depósitos varía de embudo en la base, a cilíndrico en la parte media, a campana hacia el tope, sugiriendo respectivamente patrones de apilamiento estratigráfico progradante, agradante y retrogradante, (Fig. 12). Desde el punto de vista estratigráfico secuencial, estos patrones podrían estar asociados con un estadio de nivel alto (HST) en la parte inferior, separado por una discordancia o límite de secuencia (SB) del estadio de nivel bajo (LST) suprayacente, el cual es seguido a partir de una superficie de inundación (FS) por un estadio transgresivo (TST).

De acuerdo con las correlaciones regionales y edades geocronológicas y bioestratigráficas obtenidas para otras áreas, la discordancia en la base del paquete arenoso de interés, que separa el Selandiano (Paleoceno medio) del Thanetiano (Paleoceno superior), pudiera tener asociado un hiato implícito de aproximadamente 500 mil años o más (Fig. 3). En la Fig. 12 también se indican dos posibles superficies de máxima inundación (MFS) o por lo menos superficies de máxima profundidad de agua para el intervalo de interés, una perteneciente a la secuencia 1 (Selandiano) y la otra a la secuencia 2 (Thanetiano).}

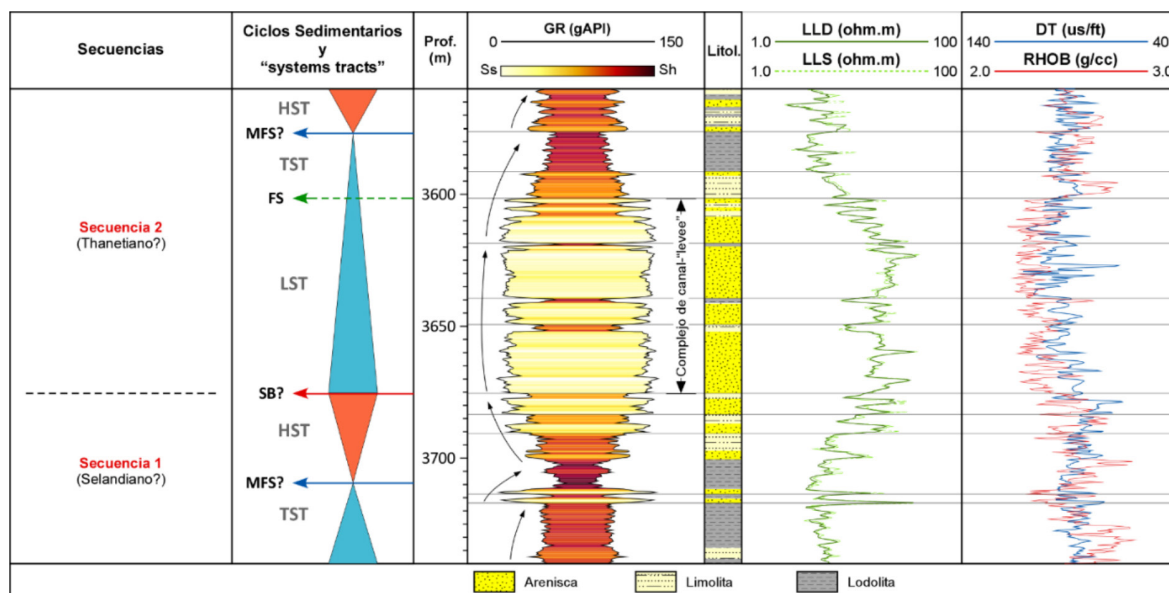
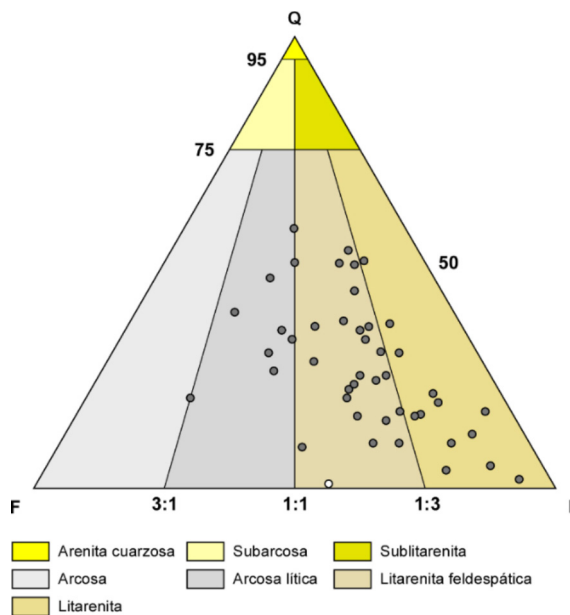


Figura 12. Registros de pozo exploratorio en el área de estudio mostrando la expresión cilíndrica del intervalo con potencial de reservorio. Se incluye una subdivisión tentativa desde el punto de vista secuencial indicando superficies importantes. La superficie en la base del complejo arenoso posiblemente representa el tope del Selandiano, lo que dejaría este complejo en el Thanetiano y equivalente, al menos en parte, a la Formación San Jorge.

En general, el paquete arenoso principal se puede dividir en tres tipos litológicos, identificados a partir de la información de “mudlogging”, las expresiones de registros de pozo (GR) y los datos petrológicos obtenidos para rocas lateralmente equivalentes en pozos cercanos: (1) areniscas, (2) limolitas y (3) lodolitas/lutitas. Aunque las areniscas parecen ser la litología dominante, estas se encuentran interrumpidas localmente por litologías más finas (limolitas y/o lodolitas) que subdividen el cuerpo principal en por lo menos 4 zonas arenosas más discretas que individualmente superan los 10 metros de espesor, siendo la unidad basal de la secuencia 2 la más gruesa, con unos 25 m de espesor (Fig. 12).

Las correlaciones estratigráficas y asociaciones paleontológicas en el área de estudio sugieren profundidades de agua que van desde nerítico medio a no mayores que batial superior. Así, la expresión del GR con forma de embudo por debajo de la discordancia del Selandiano, pudiera representar sedimentación marina ya sea en una plataforma o en un delta progradantes. Las expresiones cilíndricas predominantemente arenosas, pudieran variar de depósitos en manto a flujos canalizados asociados con ambientes turbidíticos. Finalmente, el intervalo con forma de campana hacia el tope podría estar asociado con sedimentación deltaica o de plataforma en un contexto transgresivo.

Los análisis petrográficos de muestras de la antefosa paleógena indican que las rocas con potencial de yacimiento varían principalmente de litarenitas y litarenitas feldespáticas a arcosas líticas (Fig. 13). En general, las areniscas contienen cantidades de cuarzo <60 % y comúnmente de 20-40 %. Las proporciones de fragmentos líticos (especialmente ígneos) y feldespatos (principalmente plagioclasas) es variable, pero en conjunto tienden a superar el 50 % de la composición total.



Los depósitos paleocenos en la cuenca han sufrido una historia diagenética compleja que incluye procesos tempranos (eogenéticos) a tardíos, durante la etapa de soterramiento (mesogenéticos). No obstante, en la antefosa paleógena, debido a la profundidad y edad de los cuerpos arenosos de interés, se espera el dominio de procesos mesogenéticos. De acuerdo con las observaciones petrográficas en muestras de afloramiento y testigos (e.g., Mobil 1979, LCV 2011), Los procesos tempranos característicos incluyen bioturbación, compactación mecánica, cloritización/glaucunitización parcial o total y revestimiento de clorita, este último alrededor de granos o formando anillos en espacios vacíos. Dentro de los procesos más tardíos se encuentran la cementación por calcita o cuarzo (sobrecrecimiento), disolución de granos (feldespato y fragmentos de roca), desarrollo de clorita debido a la disolución de feldespato y fracturamiento. Efectos producidos por la generación de hidrocarburos en las adyacencias del intervalo arenoso principal no se descartan.

En general, y de acuerdo con los estudios petrográficos, la porosidad primaria esperable sería muy baja a nula. La porosidad secundaria pudiera variar de 5-25 %, con un promedio de 10-20 %, este último en el mejor de los casos. La porosidad en las muestras analizadas está dominada por disolución y es la porosidad que pudiera predecirse para los reservorios en la antefosa. Además, la sobrepresión estimada para el área pudiera haber ayudado significativamente en la preservación de la porosidad (e.g., Osborne y Swarbrick 1999). La cementación con calcita y cuarzo son esperables, lo que pudiera tener un efecto negativo en la preservación de la porosidad; sin embargo, sobre la base de las muestras analizadas estas tienden a ocurrir localmente y para el caso de la calcita no es completa a escala de reservorio. El desarrollo de arcilla autigénica, especialmente el de revestimiento de clorita, también pudiera haber ayudado en la preservación de la porosidad, debido a la capacidad que esto puede tener como agente reductor en el sobrecrecimiento de

cuarzo (e.g., Taylor *et al.* 2004). La arcilla detrítica pudiera variar y ser localmente importante, pero considerando sus valores en las muestras analizadas, se espera que sea menor al 35 %.

## Roca Madre

En la Cuenca de Magallanes se reconocen cuatro sistemas petrolíferos principales (e.g., Herrero *et al.*, 1999; ENAP, 2003; Fuenzalida *et al.* 2004): pre-Cretácico, Cretácico Inferior, Cretácico Superior y Paleógeno. Debido a que la generación y migración de hidrocarburos a partir de los tres primeros pueden ser relevantes para el potencial petrolífero del Paleógeno de la Cuenca, todos son considerados bajo el concepto de sistema petrolífero total compuesto del Terciario. Este concepto es utilizado cuando se presume que el hidrocarburo contenido en una unidad de interés proviene de dos o más rocas madres (e.g., Magoon y Schmoker 2000). El diagrama de eventos en la Fig. 14 resume los elementos esenciales de roca madre, roca reservorio, roca sello y sobrecarga, además de los procesos de generación, migración y preservación necesarios para la acumulación de hidrocarburos en el Terciario.

El contenido total de carbono orgánico (COT) en las rocas más lodosas de la antefosa paleógena varía de ~0,2-1,8 % en el rango de pobre a bueno, pero con un promedio regular o aceptable de 0,4-0,8 % (Fig. 15). En general, la cantidad de COT aumenta progresivamente hacia las formaciones más jóvenes.

Dentro del rango de COT considerado bueno se destacan algunas capas en las formaciones Chorrillo Chico, San Jorge y Agua Fresca, lo que pudiera sugerir buen potencial de generación de hidrocarburo; no obstante, el contenido de hidrógeno asociado es bajo. El valor de S2 en las

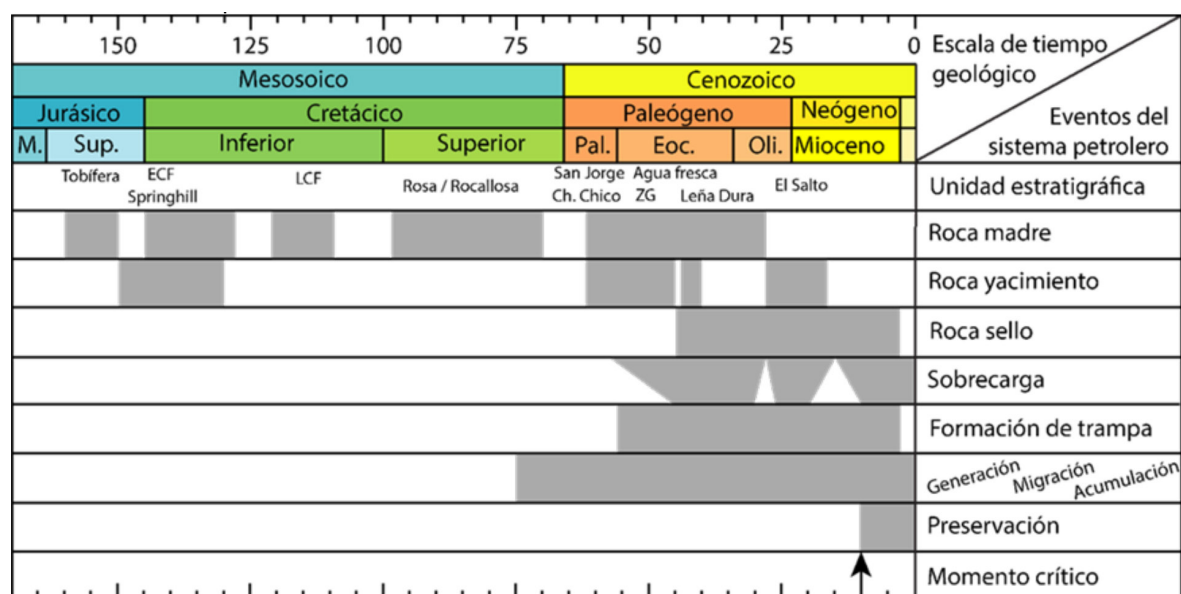
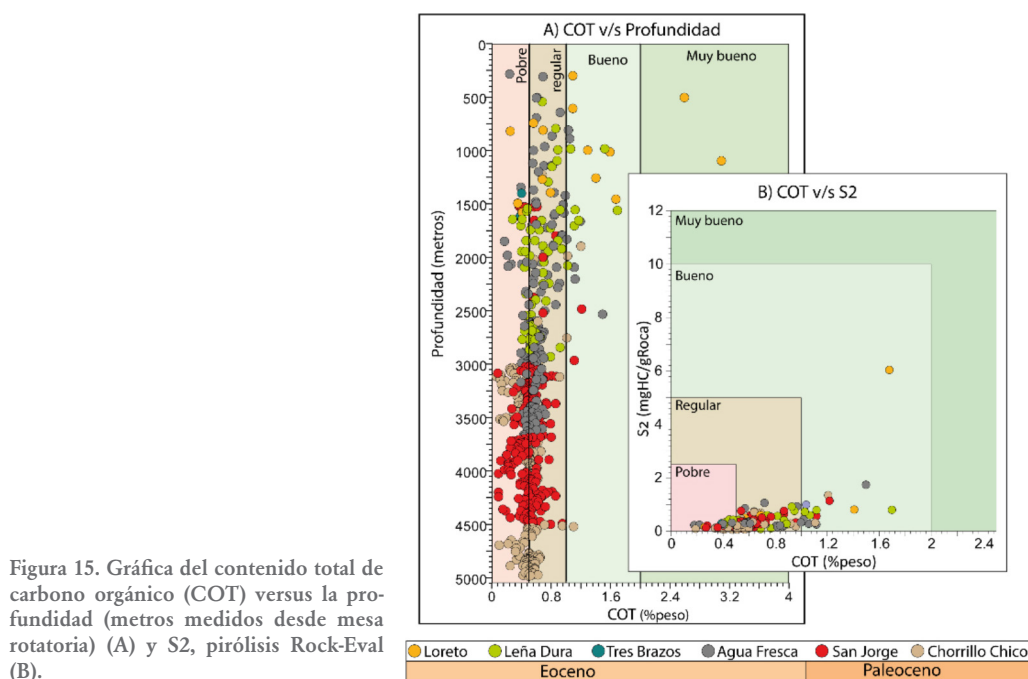


Figura 14. Carta de eventos propuestos para el sistema petrolífero total compuesto del Cenozoico de la Cuenca de Magallanes, Chile. Datos recopilados a partir de Herrero *et al.* (1999), ENAP (2003), Moraga *et al.* (2004) y Moraga *et al.* (2016).

unidades estratigráficas del área es menor a 2 (mgHC/gRoca) y en su mayoría no supera 1 mgHC/Roca. En la parte septentrional del área de estudio, Yrigoyen (1967) reportó una sola muestra con potencial generador de petróleo en la formación Chorrillo Chico a más de 4000 m de profundidad.

El tipo de hidrocarburo que podrá ser generado dependerá del tipo de querógeno que domina los sedimentos y su madurez térmica (Dembicki 2009). Los tres querógenos básicos reconocidos son: Tipo I, el cual posee relaciones atómicas H/C iniciales altas y O/C iniciales bajas, deriva principalmente de material de algas depositadas principalmente en ambientes lacustres que produce principalmente petróleo parafínico; Tipo II, la relación atómica H/C es moderadamente alta y la relación atómica O/C es moderada, deriva de materia orgánica autóctona depositada bajo condiciones reductoras en ambientes marinos que producen principalmente petróleo nafténico; y Tipo III, de relación atómica H/C inicial baja y O/C inicial alta, deriva de desechos de plantas terrestres y/o materia orgánica acuática depositado en un ambiente oxidante que produce principalmente gas (Tissot *et al.* 1974). Además de los tres tipos principales de querógenos, se han definido varios otros, entre los cuales debemos destacar el querógeno tipo IV, que resulta de la alteración severa y/u oxidación de la materia orgánica en el ambiente de depositación; tiene una relación atómica H/C inicial muy baja y una relación atómica O/C inicial variable y es esencialmente inerte sin potencial de generación de hidrocarburos (Tissot y Welte 1984).



Según los datos provenientes de pirólisis Rock-Eval y representados en el diagrama Pseudo-Van Krevelen de la Fig. 16A, la materia orgánica dominante en los niveles muestreados está principalmente compuesta de querógenos tipos III y IV. El querógeno Tipo III es húmico y

propenso a generar hidrocarburos gaseosos; no obstante, su ocurrencia es relativamente menor. El Tipo IV, que predomina en las muestras analizadas, no tiene potencial de generación. Excepto por dos muestras de la Formación Loreto, que probablemente provengan de carbones o rocas afines, los índices de hidrógeno (HI) son bajos ( $<150$  mgHC/gRoca). Los índices de oxígeno (OI) ocupan un amplio rango de valores, llegando a superar los  $200$  mgCO<sub>2</sub>/gCOT. Con excepción de algunas muestras de las formaciones Agua Fresca, Chorrillo Chico, San Jorge y Loreto, los valores de S<sub>2</sub> no superan los  $100$  mgHC/gRoca, siendo los más altos ( $250$ - $400$  mgHC/gRoca) los de Loreto. Esto es soportado por la petrografía orgánica (Fig. 16B), que establece a la vitrinita como el maceral principal en muchas de las muestras. Solo cuatro muestras de las formaciones San Jorge y Agua Fresca caen en la zona de mezcla de querógenos ricos en liptinitas y exinitas, que son más propensos a generar hidrocarburos líquidos.

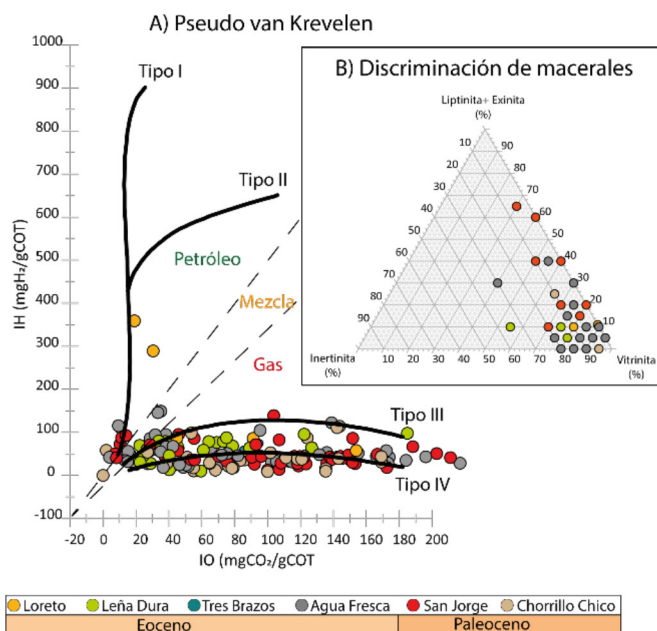


Figura 16. (A) Diagrama pseudo-Van Krevelen (OI vs HI) para rocas con potencial de roca madre en la antefosa de la Cuenca de Magallanes. (B) Diagrama ternario de discriminación de macerales.

Harding (1993a) propuso que el contraste entre la petrografía orgánica que visualiza niveles de querógenos más sapropélicos y el análisis de datos provenientes de pirólisis (querógeno gasífero a inerte) probablemente refleja condiciones oxidantes en el ambiente de depositación. Además, en un pozo exploratorio de Isla Riesco se recuperó petróleo líquido de areniscas glauconíticas de la Formación Agua Fresca a 1540 m de profundidad, lo que fue considerado como derivado de precursores terrestres por Harding (1993b).

Las unidades estratigráficas que han alcanzado la madurez térmica suficiente para generar hidrocarburos fueron discriminadas utilizando datos de reflectancia de vitrinita (Fig. 17). Los valores de %Ro para las formaciones Chorrillo Chico, San Jorge y Agua Fresca, dominadas por querógenos propensos a generar gas, indican a partir de los ~2500 m de profundidad niveles de

madurez temprana a avanzada (pico de generación de gas). A partir de esta profundidad, también ocurre un aumento significativo de los valores de %Ro. Hunt (1996) asoció un comportamiento similar de los datos de %Ro en la Cuenca Powder River en Wyoming, USA, a cambios en el gradiente geotérmico en una zona de alta presión. Por otra parte, Collins (1990) y más tarde Veale y Bastow (2004), interpretaron el quiebre de los valores de %Ro en tres pozos del área de estudio como resultado de pérdida de sección por erosión. Esta transición ocurre aproximadamente en el contacto entre las formaciones Tres Brazos y Leña Dura, que se corresponde con una discordancia (Fig. 3) y un aumento en el régimen de temperatura y presión (Pinto *et al.* 2016).

Figura 17. A) valores de reflectancia de vitrinita (%Ro) desplegados en profundidad (metros por debajo del nivel del mar). El color de los círculos corresponde a cada formación muestreada. Además, se han delimitado las distintas etapas dentro de la ventana de generación para materia orgánica propensa a producir petróleo líquido o gas (límites según Down 1977, Senftle y Landis 1991). B) Índice de producción (IP) versus Tmax provenientes de pirolisis Rock-Eval.

## Trampas y Sellos

Una de las características más destacada en la Cuenca de Magallanes es la ocurrencia de prominentes rasgos estructurales como fallas y pliegues que han ejercido un control fundamental no solo en la fuente local, distribución y propiedades del sedimento para determinado período de tiempo, sino también en el estilo de entrapamiento de hidrocarburos de la región.

De acuerdo con Herrero *et al.* (1999) la formación de trampas en la Cuenca ha sido episódica y controlada por los eventos tectónicos ocurridos en el Jurásico (“rifting”) y el Cretácico Tardío-Paleógeno (antepaís). En la sucesión mesozoica Tobífera-Springhill, las trampas más comunes son estructurales e incluyen pliegues (anticlinales), bloques fallados, intersecciones de fallas y zonas de transferencia (e.g., Bravo y Herrero 1997; Herrero *et al.* 1999). Entre las trampas estratigráficas mencionadas por los mismos autores se encuentran cambios de facies, acuñamientos y truncamientos que para el caso de la anfosa paleógena serían muy probables; localmente, las discordancias y cambios bruscos de facies podrían jugar un papel crucial en la acumulación. Las trampas estructurales podrían estar asociadas con plegamiento por propagación de fallas y reactivación de fallas cretácicas, como lo sugirieron Herrero *et al.* (1999), o con pliegues o combas locales producidos en zonas de despegues. Una combinación de elementos estructurales y estratigráficos pudiera ser el estilo de entrapamiento dominante en varios sectores del área de estudio.

Los principales sellos del sistema estarían compuestos por los sedimentos finos de las formaciones Agua Fresca, Leña Dura, Loreto superior, que al este del área de estudio estarían incluidas en el Grupo Bahía Inútil.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

De acuerdo con los nuevos datos geocronológicos (U-Pb en circones detríticos), es necesario corregir algunas edades asignadas a unidades terciarias de la Cuenca. Los resultados ayudan a mejorar la correlación cronoestratigráfica, lo que se traduce en un mayor entendimiento de las relaciones tanto verticales como laterales que conforman la sucesión de antefosa, especialmente la de los reservorios Paleógenos para futuras ubicaciones de pozos exploratorios. Las correlaciones regionales e interpretaciones de datos geocronológicos, bioestratigráficos y sísmicos indican que, durante el Paleógeno, la antefosa experimentó varias pausas temporales en las transgresiones generales, probablemente como resultado de la interacción de movimientos verticales y cambios en el nivel del mar, provocando localmente períodos de erosión y/o no depositación.

En el subsuelo, la sucesión de antefosa yace a ~2300-6000 m de profundidad y varios pozos exploratorios indican condiciones locales de sobrepresión. Los gradientes térmicos calculados a partir de temperaturas de fondo son generalmente altos (~3,4-5,6 °C/100m), sugiriendo que a profundidades de reservorios cualquier intervalo con potencial de roca madre estaría por lo menos en ventana de generación de hidrocarburos, especialmente las del Cretácico. En el caso de las terciarias, aun cuando varias de formaciones están en ventana de generación, los datos sugieren que su potencial generador sería de pobre a moderado y generalmente gas.

En general, los intervalos con potencial de reservorio en el área de estudio pueden variar de pocos metros a decenas de metros de espesor. Las litologías dominantes son areniscas, limolitas y lodolitas/lutitas que, estas últimas posiblemente actuando como sello en varias partes de la antefosa. Estas litologías representan ambientes de sedimentación asociados con sistemas deltai-cos, areniscas de plataforma y/o de lóbulos o abanicos que incluyen canales, diques (*“levee”*) y desborde (*“splay”*). Las areniscas son predominantemente litarenitas y litarenitas feldespáticas con proporciones menores de arcosas líticas.

Los procesos diagenéticos están dominados por compactación mecánica, cloritización/glauc-onitización parcial o total, desarrollo de clorita autigénica, cementación por calcita o cuarzo (so-brecrecimiento) y disolución de granos (feldespatos y/o fragmentos de roca). Efectos producidos por fracturamiento y generación de hidrocarburos dentro o en las adyacencias del intervalo are-noso principal no se descartan. El principal tipo de porosidad es secundaria y probablemente por disolución de granos lábiles. Factores como la sobrepresión y el desarrollo de clorita autigénica, pudieran haber contribuido en la preservación de la porosidad.

De acuerdo con esta revisión, la antefosa paleógena ofrece varios *“leads”* que podrían ser catalogados como no convencionales, incluyendo areniscas apretadas (formaciones Chorrillo Chico, San Jorge y parte basal de Agua Fresca), lutitas gasíferas (Formación Agua Fresca) y gas metano a partir de intervalos ricos en carbón (Formación Loreto). Debido a que las acumulaciones serían esencialmente del tipo estratigráfica, el área involucrada y sus recursos pueden ser mayores

a lo previamente estimado. No obstante, la producción de estos reservorios potenciales dependerá en gran medida de la implementación de técnicas de recuperación secundaria.

Quizás, la mayor incertidumbre en estos prospectos lo constituye el grado de llenado de las trampas con hidrocarburos, debido a que las rocas madres adyacentes se encuentran muy maduras (Cretácico Inferior) o son pobres en contenido y calidad de la materia orgánica, como es el caso de las formaciones terciarias Chorrillo Chico, San Jorge y Agua Fresca.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a las gerencias de ENAP Magallanes y SIPETROL por permitir la publicación de este trabajo y por brindar su invaluable apoyo en la logística y fondos para la adquisición de la información. Extendemos las gracias a los evaluadores, Dr. Matías Ghiglione y Boris Ploszkiewicz, por sus revisiones y comentarios constructivos.

## REFERENCIAS CITADAS

- Álvarez, P., Elgueta, S., Mpodozis, C., Briceño, M., Vieytes, H., Radic, J.P. y Mella, P., 2006. Proyecto Tranquilo-Otway Informe Final. ENAP, Reporte Interno (inédito).
- Barwick, J.S., 1949. The Tertiary stratigraphy and structure of northern Tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno, 52 p. + 6 figs. + 1 anexo.
- Barwick, J.S., 1955. The surface stratigraphy of portions of Magallanes Province, Chile. ENAP, Reporte Interno, 96 p. + 14 figs.
- Bernhardt, A., Jobe, Z.R., Grove, M. and Lowe, D.R., 2012. Palaeogeography and diachronous infill of an ancient deep-marine foreland basin, Upper Cretaceous Cerro Toro Formation, Magallanes Basin, Basin Research, v. 24, p. 269-294.
- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum Jr., R.M., Fitzgerald, M.G., and Wright, R.C., 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America, in Allen, P.A., and Homewood, P., eds., Foreland Basins. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, p. 41-63.
- Bjil, P.K., Guerstein, G.R., Sanmiguel-Jaimes, E.A., Sluijs, A., Casadio, S., Valencia, V., Amenabar, C.R. y Encinas, A., 2020. Campanian-Eocene dinoflagellate cyst biostratigraphy in the Southern Andean foreland basin: Implications for Drake Passage through-flow. Andean Geology, v. 48, p. 185-218.
- Bravo, P. y Herrero, C., 1997. Reservorios naturalmente fracturados en rocas volcánicas jurásicas, Cuenca de Magallanes, Chile. Colombia, Cartagena de Indias, VI Simposio Bolivariano, 14-17 de septiembre de 1997, 19 p.
- Bruhn, R. L. y Dalziel, I.W.D., 1977. Destruction of the Early Cretaceous marginal basin in the Andes of Tierra del Fuego, en Talwani M., y Pitman, W. C., Ill, eds., Island arcs, deep sea trenches, and back-arc basins. American Geophysical Union, Maurice Ewing Series, v. 1, p. 395-406.
- Cecioni, G., 1957. Cretaceous Flysch and molasse in Departamento Última Esperanza, Magallanes Province, Chile. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, v. 41, p. 538-564.

- Charrier, R. y Lahsen, A., 1969. Stratigraphy of Late Cretaceous-early Eocene, Seno Skyring-Strait of Magellan area, Magallanes Province, Chile. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, v. 53, p. 568-590.
- Collins, A.G., 1990. Organic geochemistry, including oil-source rock correlation, in four Magellan Basin wells: Corey-3, Kon Aiken-2, Vulcano-1 and Mina Rica 2. The Robertson Group, Enap, Reporte Interno (inédito), Archico Técnico ENAP.
- Cortés, R., Céspedes, S., Rodríguez, F. y Rivera, R., 1955. Levantamiento geológico del área Filaret-Río Chico, Tierra del Fuego. ENAP, Reporte Interno 01.0100.0010, 24 p. + 4 adjuntos y 2 figuras.
- Dalziel, I.W.D., 1981. Back-arc extension in the Southern Andes—a review and critical reappraisal. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A 300, p. 319-335.
- Dalziel, I.W.D., 1986. Collision and Cordilleran orogenesis—an Andean perspective. In Coward, M.P. and Ries, A.C., eds., Collision tectonics. Geological Society of London Special Publication 19, p. 389-404.
- Decat, J. y Pomeyrol, R., 1931. Informe geológico sobre las posibilidades petrolíferas de la región Magallánica. Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería, v. 43, p. 763-772.
- Dembicki, H.Jr., 2009. Three common source rock evaluation errors made by geologists during prospect or play appraisals. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 93, p. 341-356.
- Dickinson, W.R. and Gehrels, G.E., 2009. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau—evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment. Geological Society of America Bulletin, v. 121, p. 408-433.
- Doe, N.A., 2004. Great balls of Stone—Concretions: Shale, v. 9, p.
- Dow, W., 1977. Kerogen studies and geological interpretations. Journal of Geochemical Exploration, v. 7, p. 79-99.
- ENAP, 1977. Nota explicativa del mapa geológico de la XII Región-Magallanes—Cuenca de Magallanes, estratigrafía, definición y descripción de las unidades. ENAP, Reporte Interno (inédito), 15 p. + 2 figs.
- ENAP, 2003. Sistemas petroleros de la Cuenca de Magallanes. ENAP, Reporte Interno (inédito), Tomo I, Capítulos 1-5, 290 p.
- Fildani, A., Romans, B.W., Fosdick, J.C., Crane, W.H. y Hubbard, S.M., 2008. Orogenesis of the Patagonian Andes as reflected by basin evolution in southernmost South America, In Spencer, J.E. and Titley, S.R., eds., Ores and orogenesis—Circum-Pacific tectonics-geologic evolution and ore deposits. Arizona Geological Society Digest, v. 22, p. 259-268.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, 184 p.
- Fosdick, J.C., Grove, M., Graham, S.A., Hourigan, J.K., Lovera, O. y Romans, B.W., 2015. Detrital thermochronologic record of burial heating and sediment recycling in the Magallanes foreland basin, Patagonian Andes. Basin Research, v. 27, p. 546-572.
- Fuenzalida, R., *et al.*, 2004. Sistemas petroleros de la Cuenca de Magallanes: ENAP, Reporte Interno (inédito), 297 p.
- Galeazzi, J.S., 1998. Structural and stratigraphic evolution of the western Malvinas Basin, Argentina. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 82, p. 596-636.

- García, F., von Gotsche, G. y Cortés, R., 1952. Geología de superficie en la parte noreste de la Isla Riesco. ENAP, Reporte Interno (inédito), 54 p. 4 figs. + 4 anexos.
- García, F. y Cortés, R., 1952. Geología de superficie en la parte sureste de Isla Riesco. ENAP, Reporte Interno (inédito), 40 p. 3 figs. + 4 anexos.
- García, F., Tapia, G. y Aracena, S., 1953. Informe geológico del área de Tres Puentes Península Brunswick. ENAP, Reporte Interno (inédito), 20 p. 3 figs. + 4 anexos.
- Gehrels, G.E., Valencia, V.A. and Ruiz, J., 2008. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation-multicollector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, American Geophysical Union, v. 9, 13 p.
- Ghiglione, M.C., Quinteros, J., Yagupsky, D., Bonillo-Martínez, P., Hlebszevitch, H., Ramos, V.A., Vergani, G., Figueroa, D., Quesada, S. and Zapata, T., 2010. Structure and tectonic history of the foreland basins of southernmost South America. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, p. 262-277.
- Ghiglione, M.C., Naipauer, M., Sue, C., Barberón, V., Valencia, V., Aguirre-Urreta, B. and Ramos, V.A., 2015. "U-Pb zircon ages from the northern Austral basin Patagonia". *Cretaceous Research*, v. 55, p. 116-128.
- González, E., 1965. La cuenca petrolífera de Magallanes. Apartado de la Revista *Minerales*, 21 p.
- González, E. y Tapia, G., 1953. Levantamiento geológico estructural en el área de la Estancia El Salto-Sección Las Coles. ENAP, Reporte Interno (inédito), 9 p. + anexos.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M., eds, 2020. *The Geologic Time Scale 2020*. Elsevier, Amsterdam.
- Harambour, S., 1978, Exploración petrolera en Magallanes. ENAP, Informe Interno 07.0100.0007, 15 p. + 3 figs.
- Harding, R.W., 1993a. Geochemistry of 4 wells and field samples from 4 sectors of the precordillera, Chile. ENAP, Reporte Interno (inédito), Archico Técnico ENAP.
- Harding, R.W., 1993b. Petroleum Geochemical Evaluation of the Chilenita-2 Well: Interval 200m to 3452 m. ENAP, Reporte Interno (inédito), Archico Técnico ENAP.
- Herrero, C., Mella, P., Moraga, J. y Donoso, L., 1999. Cuenca de Magallanes—situación actual y proyección de la exploración. ENAP, Informe Interno, 33 p. + 40 figs. y 2 anexos.
- Hervé, F., Godoy, E., Mpodozis, C. y Fanning, C.M., 2004. Monitoring magmatism of the Patagonian Batholith through the U-PB shrimp dating of detrital zircons in sedimentary units of the Magallanes Basin, in Carcione, J., Donda, F. y Lodolo, E., eds., *International Symposium on the Geology and Geophysics of the Southernmost Andes, the Scotia Arc and the Antarctic Peninsula*. *GeoSur*, v. 45, p. 113-117.
- Hiscott, R.N., 1979, "Clastic sills and dykes associated with deep-water sandstones, Tourelle Formation, Ordovician, Quebec", *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 49, p. 1-10.
- Hoffstetter, R., Fuenzalida, H. y Cecioni, G., 1957. Chile, In *Lexique Stratigraphique International*. France, Centre National de la Recherche Scientifique, v. 5, 444 p.
- Hunt, J.M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W.H. Freeman, 743 p.
- Katz, H.R., 1963. Revision of Cretaceous stratigraphy in Patagonian Cordillera Ultima Esperanza, Magallanes Province, Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 47, p. 506-524.

- Keidel, I. y Hemmer, A., 1931. Informe preliminar sobre las investigaciones en la región petrolífera de Magallanes en los meses de verano de 1928-1929. Boletín del Departamento de Minas y Petróleo, Ministerio de Fomento, p. 44-55.
- Kniker, H., 1949. Ages of the Tertiary formations of Magallanes Province. ENAP, Reporte Interno (inédito), 25 p.
- LCV, 2011. Estudio sedimentológico, petrográfico, diagenético y mineralógico, Bloque Otway, Cuenca de Magallanes, Chile. ENAP-Magallanes, Reporte Interno (inédito), 274 p.
- Magoon, L.B. y Schmoker, J.W., 2000. The total petroleum system—the natural fluid network that constrains the assessment unit, in U.S.G.S. world petroleum assessment 2000—descriptions and results. U.S. Geological Survey Digital Data, Series 60, p. 1-20.
- Malkowski, M.A., Sharman, G.R. and Graham, S.A., 2015. Characterization and diachronous initiation of coarse clastic deposition in the Magallanes-Austral foreland basin, Patagonian Andes. Basin Research, doi: 10.1111/bre.12150.
- Malumián, N., Hromic, T. y Nández, C., 2013. El Paleógeno de la Cuenca de Magallanes—Bioestratigrafía y discontinuidades. Anales del Instituto de la Patagonia, v. 41, p. 29-52.
- Mobil, 1979. Hydrocarbon potential of the Magallanes Basin, Chile. ENAP, Reporte Interno 01.0201.0109, v. 2-3, 124 p. + 36 figs.
- Moraga, J., Mella, P., Vieytes, H., Méndez, D., Briceño, M., Álvarez, P. y Laval, E., 2004. Potencial de hidrocarburos en la Cuenca de antepaís Magallanes. ENAP, Reporte Interno (inédito), Tomos 1-3.
- Moraga, J., Méndez, D., Gschaidner, T. y Zapata, R., 2016. Sistemas petroleros del Jurásico superior y Cretácico inferior, en los bloques Arenal y Dorado- Riquelme, Cuenca de Magallanes. Reporte Interno (inédito), Archivo Técnico ENAP Magallanes.
- Mpodozis, C., Mella, P. y Padva, D., 2011. Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la Cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile. Instituto Argentino de Petróleo y Gas, VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar de Plata, Argetina, 8-12 de noviembre, 2011, Resúmenes, p. 97-137.
- Natland, M.L., González, E., Cañón, A. and Ernst, M., 1974. A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments. Geological Society of America, Memoir 139, p. 1-126.
- Osborne, M.J., y Swarbrick, R.E., 1999. Diagenesis in North Sea HPHT clastic reservoirs—consequences for porosity and overpressure prediction. Marine and Petroleum Geology, v. 16, p. 337-353.
- Otero, R.A., Torres, T., Le Roux, J.P., Hervé, F., Fanning, C.M., Yury-Yáñez, R.E. and Rubilar-Rogers, D., 2012. A late Eocene age proposal for the Loreto Formation (Brunswick Peninsula, southernmost Chile), based on fossil cartilaginous fishes, paleobotany and radiometric evidence. Andean Geology, v. 39, p. 180-200.
- Paces, J.B. and Miller, J.D., 1993. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota—geochronological insights to physical, petrogenic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. Journal of Geophysical Research, v. 98, p. 13997-14013.
- Pankhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. and Kelley, S.P., 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and Antarctic Peninsula—chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. Journal of Petrology, v. 41, p. 605-625.

- Pinto, J., González, D., Mella, P., Zapata, R.A., Aguirre, G., Carpinelli, A.A. y Zurita, E.A., 2016. Removilización e inyección de arena en el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de antepaís Magallanes, Chile—Características e implicancias para la exploración y producción petrolífera del Paleógeno. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, noviembre 5-9 de 2018, Mendoza, Argentina, 22 p.
- Pinto, J., Mella, P., Aguirre, G., Pérez, A. y González, D., 2016. Revisión de la Estratigrafía y del Potencial Petrolífero del Distrito Terciario, Cuenca de Magallanes (Faja Tranquilo—Península Brunswick). Enap, Reporte Interno (inédito), 107 p. + 3 anexos.
- Quattrocchio, M.E., 2010. Paleogene dinoflagellate cysts from Punta Prat, southern Chile. *Palynology*, v. 33, p. 141-156.
- Rivera, H.A., Le Roux, J.P., Farías, M., Gutiérrez, N.M., Sánchez, A. y Palma-Heldt, S., 2020. Tectonic controls on the Maastrichtian-Danian transgression in the Magallanes-Austral foreland basin (Chile)—Implications for the growth of the Southern Patagonian Andes. *Sedimentary Geology*, v. 403, p. 1-23.
- Robles, M.L. y Gómez, M., 1956. Foraminíferos del Cretácico Superior y del Paleoceno de la Provincia de Magallanes, Chile. ENAP, Reporte Interno (inédito), 8 p. + 1 anexo.
- Ronda, G., Ghiglione, M.C., Barberón, V., Coutand, I., and Tobal, J., 2019. Mesozoic—Cenozoic evolution of the Southern Patagonian Andes fold and thrust belt (47°-48° S): Influence of the Rocas Verdes basin inversion and onset of Patagonian glaciations. *Tectonophysics*, v. 765, p. 83-101.
- Ruby, G., 1945. General map of the Brunswick Peninsula—geology of region around Fuerte Bulnes. ENAP, Reporte Interno 4SUP-8A-01-A.
- Senftle, J. T. and C. R. Landis, 1991. Vitrinite reflectance as a tool to assess thermal maturity, in R.K. Merrill, ed., *Source and migration processes and evaluation techniques*. AAPG Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, p. 119-125.
- Stacey, J.S. and Kramer, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 26, p. 207-221.
- Taylor, T.R., Stancliffe, R., Macaulay, C.I. y Hathon, L.A., 2004. High temperature quartz cementation and the timing of hydrocarbon accumulation in the Jurassic Norphlet Sandstone, offshore Gulf of Mexico, U.S.A., en Cubitt, J.M., England, W.A., y Larter, S., eds., *Understanding petroleum reservoirs—towards an integrated reservoir engineering and geochemical approach*. Geological Society (London) Special Publication 237, p. 257-278.
- Thomas, C.R., 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 33, p. 1553-1578.
- Tissot, B.P. and Welte, D. H., 1984. *Petroleum formation and occurrence*. New York, Springer-Verlag, 699 p.
- Tissot, B.P., Durand, B., Espitalie, J. and Combaz, A., 1974. Influence of the nature and diagenesis of organic matter in the formation of petroleum. *AAPG Bulletin*, v. 58, p. 499-506.
- Todd, R. and Knicker, H.T., 1952. An Eocene foraminiferal fauna from the Agua Fresca shale of Magallanes Province, southernmost Chile. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research Special Publication 1*, p. 1-28.

- Veale, C.J. y Bastow, M.A., 2004. Petroleum geochemical evaluation of Manzano-1 well, Magallanes Basin, Chile. Robertson Research International limited, ENAP Magallanes, Reporte Interno (inédito).
- Vermeesch, P., 2018. Isoplot R—a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, v.9, p. 1479-1793.
- Von Goetsche, G. y Huca, J.R., 1953. Informe geológico del área Tres Morros, Agua Fresca y San Isidro. ENAP, Reporte Interno (inédito), 74 p. 7 figs. + 6 anexos.
- Wilson, T.J., 1991. Transition from back-arc to fore-land basin development in the southernmost Andes—stratigraphic record from the Última Esperanza District, Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, v. 103, p. 98-111.
- Winslow, M.A., 1982. The structural evolution of the Magallanes basin and neotectonics in the southernmost Andes. *International Union of Geological Sciences, series B*, v. 4, p 143-154.
- Yrigoyen, M. R., 1967. Análisis de “source potential” de muestras del pozo ENAP Manzano N°7, Cuenca de magallanes, Chile. ENAP, Reporte Interno (inédito).

