

PROVENIENCIA DE LA FORMACIÓN SPRINGHILL EN LAS CUENCAS AUSTRAL Y MALVINAS A PARTIR DE EDADES U/PB EN CIRCONES DETRÍTICOS

Juan Pablo Lovecchio¹, Maximiliano Naipauer²

1: YPF S.A., Gerencia de Exploración *Offshore*. juan.lovecchio@ypf.com

2: Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (UBA-CONICET). maxinaipauer@ingeis.uba.ar

Palabras clave: Springhill, Malvinas, Austral, circones, proveniencia

ABSTRACT

The Austral-Magallanes and Malvinas basins, located at the southern end of the South American continent, limit to the west with the Andean volcanic arc, to the east with the Malvinas (Falkland) islands, and are separated by the Rio Chico High, a southern extension of the Deseado Massif. These basins were originated in the Mesozoic and are associated with a generalized *rifting* episode that affected Patagonia in the Early-Middle Jurassic, characterized by profuse volcanism (Chon Aike Magmatic Province, Tobífera Series). Since the Late Jurassic-Early Cretaceous, these basins went into a passive margin phase, with the onset of deposition of the transgressive sandstones of the Springhill Formation (main reservoir unit across the study area).

This study integrates U-Pb radiometric dating on detrital zircons of the Springhill Formation recovered from six drilling cuttings samples from hydrocarbon exploration wells in the Austral basin and six core samples from the Malvinas basin. The objective was to determine maximum deposition ages, and to characterize sediment provenance to better understand the participation of different sediment provenance areas and the contemporaneous volcanic arc.

The external morphological analysis of the zircon grains highlighted differences between both basins. Idiomorphic and prismatic zircons (of volcanic origin) predominate in the Austral basin, while in Malvinas rounded and sub-rounded zircons are more common and were related to a larger degree of reworking and a different source.

Regarding provenance, the histogram pattern of U-Pb ages for the Springhill Formation in the Malvinas basin shows dominance of Mesoproterozoic and Neoproterozoic-Cambrian sources related to the Deseado Massif and Rio Chico High. In the Austral-Magallanes basin Neoproterozoic-Cambrian zircons dominate while Mesoproterozoic zircons are absent; this was interpreted as produced by a more local source in Tierra del Fuego. Jurassic Chon Aike sources are present in both sets, as Springhill Formation regionally overlies Tobífera Series (synrift volcanism). Despite the scarcity of contemporaneous Andean volcanic arc-related zircons in the Springhill Formation, it was possible to determine Tithonian to Hauterivian maximum ages of deposition.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas Austral-Magallanes y de Malvinas se ubican en el extremo sur de la placa Sudamericana, limitan al oeste con el arco volcánico andino, al este por las Islas Malvinas, y están

separadas entre sí por el Alto de Río Chico, una prolongación austral del Macizo del Deseado (Figura 1). Su apertura mesozoica está relacionada con un período de *rifting* generalizado en la Patagonia en el Jurásico Temprano a Medio, asociado a un profuso volcanismo sinextensional englobado en la Serie Tobífera (Provincia Magmática de Chon Aike, Pankhurst *et al.*, 2000; véase Lovecchio *et al.*, 2019, 2020).

Contexto regional

Las cuencas de la Patagonia austral se emplazaron sobre un basamento complejo, del cual se tiene limitado conocimiento, por estar mayormente cubierto por sedimentos y vulcanitas del Mesozoico y Cenozoico, y por los depósitos de las glaciaciones cuaternarias. Calderón *et al.* (2016) compilaron muchas de las edades del basamento paleozoico de la Patagonia austral. Es posible diferenciar dos dominios de basamento, los complejos metamórficos andinos emplazados a lo largo del borde suroccidental de Gondwana y que conforman hoy la cordillera de los Andes Patagónicos y Australes (Figura 1), y los núcleos de basamento extra-andinos, al este, donde se destacan el Macizo del Deseado, el Alto de las Islas Malvinas y el Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego.

El Macizo del Deseado (DM en Figura 1) es un bloque de basamento elevado que separa las cuencas del Golfo de San Jorge al norte, de la cuenca Austral al sudoeste, con escasos afloramientos comprendidos entre el Río Deseado y el Río Chico de Santa Cruz (Ramos, 1996). Las rocas de basamento se encuentran cubiertas localmente por distintas unidades pérmicas (Formación La Golondrina), triásicas (Grupo El Tranquilo) y el evento efusivo jurásico del Grupo Bahía Laura (correspondiente a la provincia magmática de Chon Aike). El Complejo Río Deseado (Viera y Pezzuchi, 1976) aflora en el sector oriental del macizo (localidades de Estancia Tres Hermanas, Dos Hermanos, El Sacrificio, Bajo de la Leona y Bahía Laura; véase Giacosa *et al.*, 2002 y referencias allí mencionadas) y está compuesto por rocas metasedimentarias (metacuarcitas, filitas, esquistos) afectadas por distintos tipos de intrusivos (granitoides foliados, diques y filones gabro-dioríticos, etc.) según la localidad. En la localidad de Dos Hermanos (DH en Figura 1), Pankhurst *et al.* (2003) establecieron, a partir de edades U-Pb SHRIMP de circones detríticos de una filita, una edad máxima de sedimentación para el protolito sedimentario de 565 Ma (Neoproterozoico), que es consistente con la edad de 540 ± 20 Ma (K-Ar; Pezzuchi, 1978) de los intrusivos que afectan a estas filitas. El patrón de edades detríticas obtenido por Pankhurst *et al.* (2003) se presenta en la Figura 2a, donde se destacan las edades entre 565 y 590 Ma, así como picos en 630, 780, 865, 1000, 1060 y 1080 Ma. Respecto de los intrusivos que afectan al basamento metamórfico, Guido *et al.* (2004) describen los siguientes eventos magmáticos: i) evento Ordovícico medio a superior, representado por los clastos graníticos incorporados en la Formación La Golondrina (476 ± 4 y 472 ± 5 Ma, Pankhurst *et al.*, 2003) y a la intrusión granítica en Dos Hermanos (450 ± 6 Ma); ii) evento Silúrico

representado por el granito de El Sacrificio (425 ± 4 Ma) y diques graníticos en el área de Tres Hermanas (423 ± 3 Ma); iii) evento Devónico correspondiente a la tonalita de El Laurel (395 ± 4 Ma) y a las intrusiones graníticas de Bahía Laura (393 ± 2 Ma); iv) evento Carbonífero dado por las rocas plutónicas del Bajo de la Leona (344 ± 4 Ma).

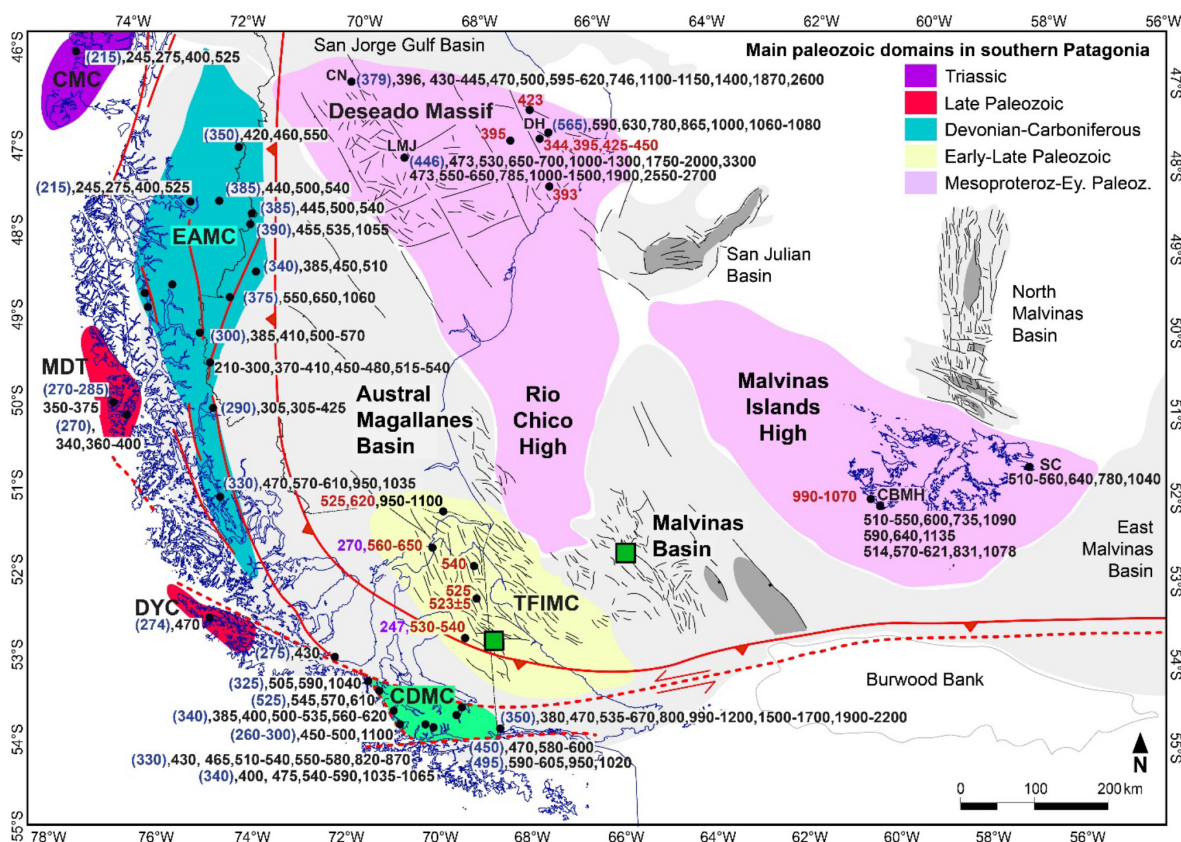


Figura 1. Edades U-Pb SHRIMP de circones de los dominios paleozoicos de basamento de la Patagonia e Islas Malvinas (UTM21S). En rocas metamórficas las edades detríticas más jóvenes se muestran entre paréntesis en azul y se presentan como las edades máximas de sedimentación. Las edades de cristalización de rocas plutónicas y gneissicas se indican en rojo, mientras que las edades más viejas corresponden a herencia de otros componentes corticales. Las edades indicadas en violeta corresponden a edades metamórficas medidas en sobrecimientos de circones. Los recuadros verdes indican las zonas de estudio de donde se recuperaron las muestras analizadas en este trabajo. Modificado de Calderón *et al.* (2016), Hervé *et al.* (2003, 2010a, 2010b), Pankhurst *et al.* (2003), Augustsson *et al.* (2006), Augustsson y Bahlburg (2008); Moreira *et al.* (2013), Permuy Vidal *et al.* (2014), Malkowski *et al.* (2015), Castillo *et al.* (2016), Ramos *et al.* (2017), Suarez *et al.* (2019) y Cao *et al.* (2022).

En el sector occidental del Macizo del Deseado, el basamento metamórfico está constituido por la Formación La Modesta que aflora en las estancias La Modesta, La Josefina y El Tranquilo, y está compuesto por esquistos micáceos, cuarzo-micáceos, filitas y metacuarcitas. Moreira *et al.* (2013) realizó dataciones U-Pb SHRIMP en circones detríticos separados de esquistos de la Formación La Modesta (Figura 2b), para la que obtuvo una edad máxima de sedimentación de 446 ± 6 Ma (Ordovícico tardío), y un pico muy importante en el Ordovícico temprano (473 Ma) consistente con la edad de intrusivos graníticos que afectan al Complejo Río Deseado. Los

circones más antiguos presentan picos de edades brasilianas, grenvillianas y más antiguas, entre 530-700, 750-1500, 1750-2000 y 2550-2700 Ma.

Las rocas de basamento metamórfico más jóvenes del Macizo del Deseado fueron reportadas por Permuy Vidal *et al.* (2014) para el distrito Cerro Negro (CN en la Figura 1). Allí, circones detríticos recuperados de una muestra de esquisto arrojaron una edad máxima de sedimentación de 379 ± 4 Ma (Devónico tardío). El patrón de edades detríticas muestra también picos en 396, 430-445, 475 y picos menores en 500, 595-620, 746, 1100-1150, 1400, 1870 y 2600 Ma (Figura 2c).

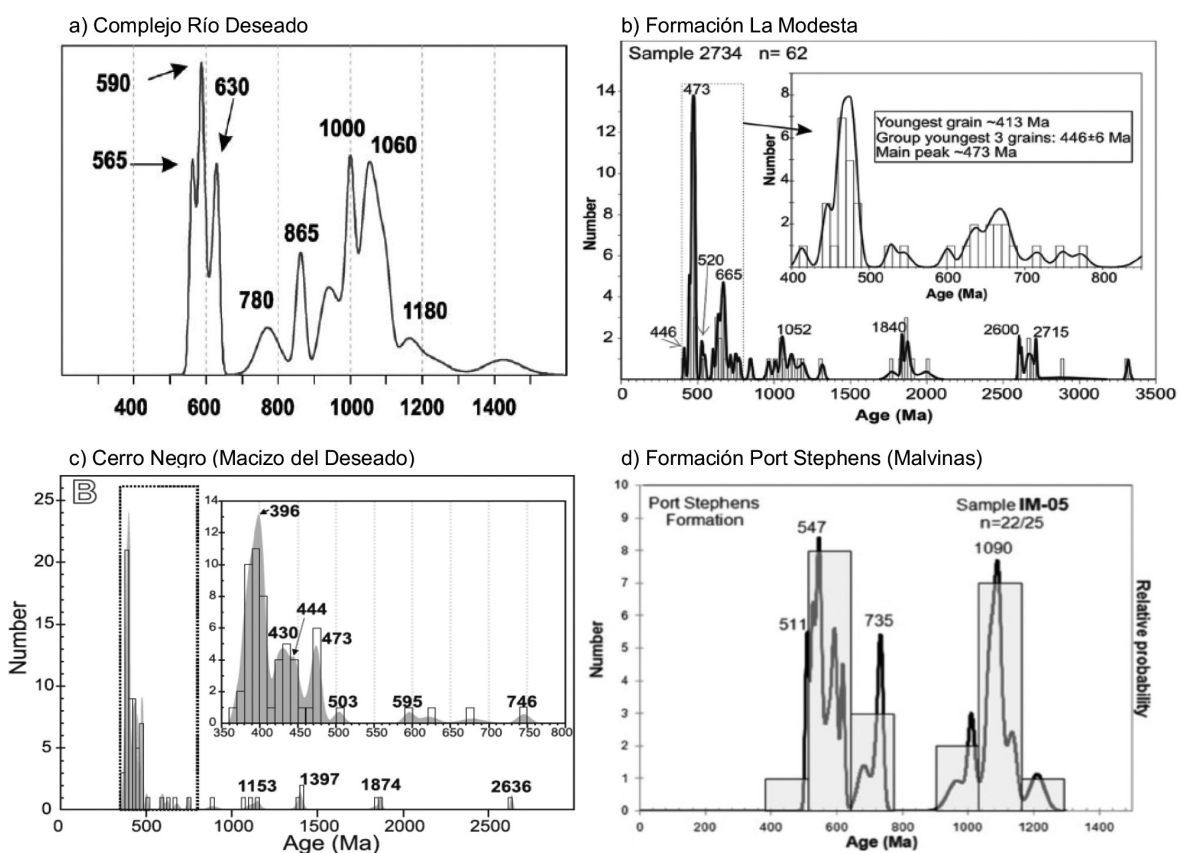


Figura 2. Patrones de edades U-Pb SHRIMP de circones detríticos de distintas unidades sedimentarias y metasedimentarias de la zona de estudio: a) Complejo Río Deseado (Pankhurst *et al.*, 2003); b) Formación La Modesta (Moreira *et al.*, 2013); c) Distrito Cerro Negro (noroeste del Macizo del Deseado) tomado de Permuy Vidal *et al.* (2014); y d) Formación Port Stephens (Islas Malvinas) tomada de Ramos *et al.* (2017).

El Alto de las Islas Malvinas es un alto morfoestructural que separa la cuenca de Malvinas (al oeste) de la cuenca de Malvinas Oriental y *Plateau* de Malvinas (al este, Figura 1). En el sector sur de la Isla Gran Malvina, aflora el basamento ígneo-metamórfico de las islas, denominado Complejo Cabo Meredith (Cingolani y Varela, 1976) compuesto por gneises y granitos datados por Jacobs *et al.* (1999) entre $989,2 \pm 3,4$ Ma (Ar-Ar) y 1067 ± 9 Ma (U-Pb). Por encima de este basamento apoyan las secuencias clásticas de la Formación Port Stephens. Ramos *et al.* (2017)

dataron circones detríticos de cuatro muestras de la Formación Port Stephens en la localidad de Meredith Hill. La Figura 2d muestra la distribución de edades U-Pb para una muestra tomada inmediatamente por encima del contacto con el basamento grenvilliano. Los circones más jóvenes presentan edades entre 510 ± 5 Ma and 536 ± 35 Ma, mientras que los picos de edad principales están en 547 (28%), 735 (14%) and 1090 Ma (45%, edad del basamento infrayacente). La misma secuencia aflora también en la isla Soledad al este (Sparrow Cove, SC en Figura 1, véase Ramos *et al.*, 2017 para un análisis de los resultados). La sucesión sedimentaria de las islas sobrepone por encima del Paleozoico inferior y mediante discordancia angular, a los depósitos de la glaciación Gondwánica (Carbonífero-Pérmico).

El último de los dominios extra-andinos de gran importancia para el área de estudio es el constituido por el basamento de la cuenca Austral-Magallanes en el sector de la Isla de Tierra del Fuego. El mismo ha sido investigado a partir de testigos de pozos de exploración petrolera, donde se han descrito gneises y granitoides de edad cámbrica (525 Ma; Söllner *et al.*, 2000). Hervé *et al.* (2010a) pudieron a su vez identificar que toda la zona, y en particular estos granitos cámbricos (con una edad U-Pb central en 540 Ma) estuvieron sometidos a metamorfismo de alto grado durante el Pérmico (~ 270 Ma, con sobrecrecimiento de circones).

El límite occidental del área de estudio está dado por el sector andino, donde han sido identificados distintos complejos metamórficos compuestos por rocas metasedimentarias polideformadas. Las edades U-Pb SHRIMP para estos complejos fueron incluidas en el mapa de la Figura 1 y a continuación se dará una breve descripción de los mismos (véase Calderón *et al.*, 2016, para mayor detalle).

El Complejo Metamórfico Andino Oriental (EAMC, por sus siglas en inglés, Figura 1) consiste principalmente en sucesiones turbidíticas paleozoicas polideformadas, con una participación menor de calizas y metabasitas, con edades de sedimentación devónicas a carboníferas tempranas (Hervé *et al.*, 2003; Augustsson *et al.*, 2006; Augustsson y Balhburg, 2008), que alcanzarían edades permo-trásicas al oeste. Estas rocas componen el basamento de la cuenca Austral-Magallanes en el sector occidental de Argentina, y fueron correlacionadas por Permuy Vidal *et al.* (2014) con las Formaciones Bahía La Lancha y Río Lácteo y con los esquistos de Cerro Negro.

El Complejo Metamórfico de Cordillera Darwin (CDMC en Figura 1) está emplazado al sur del archipiélago fueguino y compuesto por rocas metasedimentarias, metaplutónicas y metavolcánicas de edad paleozoica tardía a mesozoica temprana, con un evento metamórfico único superpuesto del Mesozoico tardío. Destacan picos de edades carboníferas tempranas (~ 330 -340 Ma), con participaciones menores de edades devónicas, ordovícicas cámblicas neo y mesoproterozoicas (Hervé *et al.*, 2010b).

El terreno de Madre de Dios (MDT en Figura 1, Forsythe y Mpodozis, 1979) se habría acrecionado al margen SO de Gondwana en el Mesozoico temprano. Se caracteriza por la presencia de la Caliza Tarlton de edad carbonífera-pérmica, que apoya sobre corteza oceánica

representada por el Complejo Denaro. El Complejo Duque de York (DYC en Figura 1) es una sucesión turbidítica que apoya mediante discordancia sobre las dos unidades antes mencionadas y se habría depositado a medida que el terreno se aproximaba al margen continental. El Complejo Duke de York se caracteriza por la presencia de circones detríticos de edad pérmica (~270-290 Ma) con participación de fuentes carboníferas, devónicas y hasta ordovícicas.

El Complejo Metamórfico de Chonos (Pimpirev *et al.*, 1999, CMC en la Figura 1), al norte del área de estudio, está compuesto por metaturbiditas con participaciones menores de metabasitas y metacherts. Presenta una edad de sedimentación triásica tardía (~215 Ma, Hervé y Fanning, 2000), con participación de edades pérmicas, carboníferas, devónicas y cámbricas (Hervé *et al.*, 2003).

Rifting Mesozoico

Por encima de un basamento complejo, como el descrito anteriormente, se emplazaron las cuencas Austral-Magallanes y de Malvinas en el Mesozoico. Las edades más antiguas del *rift* fueron establecidas en el Triásico tardío (~215 Ma) para una brecha volcánica rellenando un depocentro extensional en la zona del Alto de Río Chico (pozo Erizo, cuenca de Malvinas, Lovecchio *et al.*, 2019). En el Jurásico se desarrolla el evento principal de *rift* conjuntamente con el desarrollo del magmatismo de Chon Aike. El relleno de los depocentros está dado por la Serie Tobífera, donde intercalan sucesiones volcánicas con sedimentación continental (fluvio-aluvial volcanoclástica y lacustre). La Serie Tobífera fue datada por Pankhurst *et al.* (2000) en el pozo Gaviota-6 (Isla de Tierra del Fuego, Chile) donde está rellenando un hemigraben. Su edad fue establecida en $178 \pm 1,4$ Ma (Jurásico temprano). Lovecchio *et al.* (2019) publicaron una edad de $169,6 \pm 2$ Ma (Jurásico medio) para tobas e ignimbritas en el tope de la Serie Tobífera en Malvinas (pozo Calamar). La Figura 3 presenta un diagrama cronoestratigráfico que sintetiza la evolución tectono-sedimentaria de las cuencas Austral-Magallanes y Malvinas para el Mesozoico. Un nuevo pulso extensional en el Jurásico Tardío produce apertura de cuencas y volcanismo bimodal en el oeste de la cuenca Austral-Magallanes, con el emplazamiento del Complejo El Quemado ($154,5 \pm 1,4$ Ma, Pankhurst *et al.*, 2000) y la posterior apertura de la cuenca marginal de Rocas Verdes con acreción de corteza oceánica (complejos ofiolíticos de Sarmiento, Capitán Aracena y Tortuga, véase Klepeis *et al.*, 2010). Un buen resumen de la evolución diacrónica del *rift* y oceanización hacia el norte fue presentado por Malkowski *et al.* (2015).

La evolución del volcanismo de la provincia magmática de Chon Aike (Kay *et al.*, 1989; Pankhurst *et al.*, 1998) fue acotada en edades por Pankhurst *et al.* (2000), quienes establecieron una evolución en tres eventos principales: V1 (188–178 Ma), V2 (172–162 Ma) y V3 (157–153 Ma). Los productos silícicos de V1 serían fundidos de corteza inferior que incorporan material de la corteza superior, mientras que la geoquímica de las ignimbritas de los eventos V2 y V3 tiene mayor signatura de retroarco. Los autores notan también una migración del volcanismo desde

una posición intracontinental (quizás relacionada a la pluma de Karoo en África) hacia el margen convergente del sudoeste de Gondwana. Lo cual, considerando un contexto extensional en el retroarco, también es consistente con la migración diacrónica del *rifting* hacia la trinchera.

La Formación Springhill

La oceanización de la cuenca de Rocas Verdes fue coetánea con la apertura del Mar de Weddell (ver Lovecchio *et al.*, este congreso). El inicio de la acreción de corteza oceánica produce un importante cambio en la dinámica de las cuencas y la generación de una importante discordancia que marca el tope de la Serie Tobífera (breakup unconformity). Dicha discordancia marca también el inicio de la etapa de sag, sobre la que apoyan las areniscas de la Formación Springhill (Thomas, 1949), principal reservorio productivo en la zona de estudio (véase para la cuenca Austral: Pedrazzini y Cagnolatti, 2002; Arbe y Fernández Bell Fano, 2002; y para la cuenca de Malvinas: Galeazzi, 1998).

La Formación Springhill está compuesta por varias secuencias transgresivas que producen el relleno de valles incisos con facies fluviales, estuarinas y litorales (véase Arbe, 2002; Schwartz *et al.*, 2011) y que van profundizando hacia arriba pasando transicionalmente a la Formación Río Mayer/Pampa Rincón.

Hay un primer ciclo transgresivo de edad jurásica (Oxfordiano-Kimmeridgiano) que apoya sobre la Serie Tobífera en subsuelo o Complejo El Quemado (Figura 3) en los afloramientos del oeste de la provincia de Santa Cruz, que ha sido denominado Salmón (por el pozo donde fue descripto en la cuenca de Malvinas). Este ciclo está relacionado a la apertura de la cuenca marginal de Rocas Verdes y del Mar del Weddell.

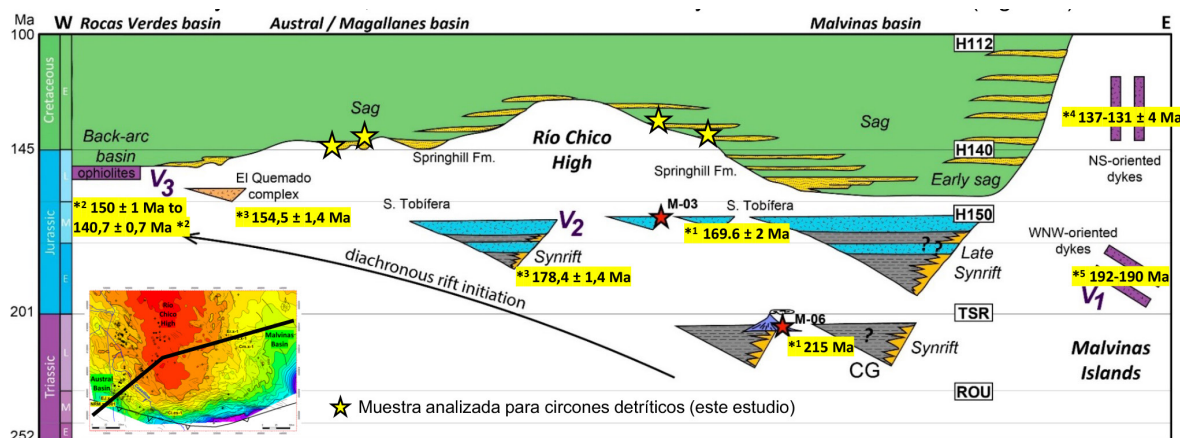


Figura 3. Diagrama cronoestratigráfico para el Triásico a Cretácico Temprano de las cuencas de Rocas Verdes (Oeste), Austral-Magallanes y Malvinas, y el Alto de las Islas Malvinas al Este (modificado de Lovecchio *et al.*, 2019). Edades tomadas de *1: Lovecchio *et al.* (2019); *2: Mukasa y Dalziel (1996); *3: Pankhurst *et al.* (2000); *4: Stone *et al.* (2008); *5: Mussett y Taylor (1994). Las estrellas amarillas indican esquemáticamente la posición de las muestras analizadas en este estudio. Principales líneas tiempo: ROU: *rifi* onset unconformity, TSR: Top Synrift 1, H150: marker Top Serie Tobífera.

En Tierra del Fuego (onshore y *offshore*) fueron descriptos varios ciclos transgresivos sucesivos: Hidra, Argo, Paloma y Carina (véase Robiano *et al.*, 1996) que inician como relleno de valles con facies continentales y estuarinas (Figura 4), prevaleciendo hacia arriba las facies costeras y marinas abiertas. Estos ciclos se van apoyando diacrónicamente sobre el Alto de Río Chico, tanto desde el oeste, desde la cuenca Austral fueguina, como desde el sur y este del Alto, desde la cuenca de Malvinas y el Mar de Wedell al Sur (Figura 6).

Las secuencias transgresivas de la Formación Springhill han sido históricamente datadas por bioestratigrafía (Malumián, 1990; Ronchi y Angelozzi, 1994; Pérez Panera, 2012, y numerosos reportes inéditos). A la fecha, excepto los resultados preliminares de este estudio que fueron presentados en Ancheta *et al.* (2019), no ha habido estudios de análisis de circones detríticos que permitan establecer edades máximas de sedimentación y conocer la proveniencia de estas arenas. Con este objetivo, se hizo foco en dos áreas, para la cuenca Austral-Magallanes, se muestrearon cuttings de pozo durante la perforación de dos pozos exploratorios con objetivo Springhill en Tierra del Fuego. Para caracterizar la proveniencia de la Formación Springhill en la cuenca de Malvinas, se muestrearon coronas de la Formación Springhill en tres pozos exploratorios perforados sobre el flanco oriental del Alto de Río Chico (véanse los cuadrados verdes en la Figura 1, que indican las zonas donde se encuentran los pozos muestreados).

Se tomó como hipótesis de trabajo, que las principales áreas de aporte para la Formación Springhill serían: el profuso magmatismo Jurásico de la Patagonia y que rellena los hemigrábenes de las cuencas Austral-Magallanes y Malvinas (Serie Tobífera) de la provincia magmática de Chon Aike, un arco volcánico andino que ya podría haber estado activo desde el fin del Jurásico y Cretácico temprano, y los basamentos paleozoicos del área (Figura 1): Complejo Río Deseado, Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego y fuentes paleozoicas andinas.

METODOLOGÍA

El presente estudio se basó en un análisis detallado de las poblaciones de circones detríticos descriptas en función de parámetros morfológicos externos, texturas internas de los cristales y principalmente por sus edades U-Pb (LA-ICP-MS). Se dataron 12 muestras de areniscas de composición silicoclástica de la Formación Springhill. Seis de ellas corresponden a recortes de perforación (cuttings) de dos pozos exploratorios ubicados en la Isla Grande de Tierra del Fuego y corresponden al relleno de un hemigraben de la cuenca Austral-Magallanes en el centro de la isla (EJ.x-1 y NRM.x-2001; Figura 4). Mientras que las otras seis fueron tomadas de testigos corona de tres pozos de perforación del *offshore* de la cuenca de Malvinas (Calamar.x-1, Erizo.x-1 y Camarón.x-1).

La concentración y separación de los minerales pesados se realizó en el laboratorio de La.Te. Andes, provincia de Salta, Argentina. El proceso incluyó las etapas de trituración, molienda,

tamizado, lavado con agua para la extracción de la fracción fina y concentración de circones con técnicas estándares gravimétricas (líquidos pesados) y magnéticas (Frantz). El concentrado de minerales se analizó bajo lupa binocular y en alcohol en el Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (UBA-CONICET), Buenos Aires, Argentina. Se determinaron las especies de minerales pesados más representativas y se separaron más de 400 cristales de circón de cada muestra. Los circones detríticos para análisis de procedencia fueron separados de forma aleatoria (*random*) con el objetivo de establecer en la muestra una adecuada representatividad estadística de cada población. Los circones separados se enviaron al laboratorio geocronológico para que sean datados. Los análisis geocronológicos fueron realizados en la Universidad Estatal de Washington (Washington State University), en EEUU. Se analizaron por U-Pb entre 100 y 120 cristales de circón por muestra para definir los patrones de procedencia sedimentaria. Los cristales de circón fueron analizados con un Micromass Isoprobe Multicollector ICPMS, equipado con nueve colectores Faraday, un colector axial Daly y cuatro canales contadores de iones (Gehrels *et al.*, 2008). El Isoprobe se encuentra equipado con un sistema ArF Exchimer laser ablation, el cual tiene una longitud de onda de emisión de 193 nm. La configuración del colector permite mediciones de ^{204}Pb en un canal contador de iones, mientras que ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th y ^{238}U son medidos simultáneamente con detectores Faraday. Todos los análisis fueron realizados en modo estático con un haz de luz láser de 35 micrones de diámetro, operado por una energía de ~ 32 mJ (a 23 kV) y a una frecuencia de 8 Hz. Cada análisis consistió en una integración de 12 segundos en picos sin disparos de láser, e integraciones de veintiún segundos en picos con disparos de láser. La contribución de Hg a la masa del ^{204}Pb fue removida sustrayendo los valores de fondo. El fraccionamiento entre elementos fue monitoreado mediante el análisis de un circón estándar de la casa (FCT), el cual tiene una edad concordante ID-TIMS de $28,2 \pm 0,79$ Ma (2 σ) (Gehrels *et al.*, 2008). Este estándar fue analizado una vez cada cinco circones de edad desconocida. Los valores isotópicos de plomo fueron corregidos por Pb común, utilizando el ^{204}Pb medido, asumiendo una composición inicial de Pb de acuerdo con Stacey y Kramers (1975) y sus incertidumbres respectivas de 1,0, 0,3 y 2,0 para $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. La edad del estándar, la calibración corregida por el estándar, la composición del Pb común y la incertidumbre en la constante de decaimiento se agrupan y son conocidos como el error sistemático. Para estas muestras el error sistemático se encuentra alrededor de $\sim 1,2$ - $1,7\%$ para $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $\sim 0,8$ - $1,0$ para $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Los diagramas de probabilidad (Ludwig, 2008) utilizados en este análisis fueron contruidos utilizando la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para circones jóvenes (<850 Ma) y $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ para los granos más viejos (>850 Ma). En los circones más antiguos, las edades con $>30\%$ de discordancia o $>5\%$ de discordancia reversa son considerados poco fiables y no fueron utilizados. Además, análisis con errores mayores al 10% fueron rechazados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis morfológico y edades U-Pb en circones detríticos

En la cuenca Austral-Magallanes se analizaron muestras de cuttings de dos pozos exploratorios que fueron ubicados en un valle inciso emplazado sobre un hemigraben de la Serie Tobífera limitado al este por el Alto de Uribe (Figura 4), en ambos casos se describieron las morfologías y texturas internas de los circones detríticos separados y posteriormente se analizaron por U-Pb para obtener las edades absolutas.

En el pozo EJ.x-1 (El Jefe) se analizaron tres muestras de la Formación Springhill distribuidas en diferentes profundidades, desde el contacto basal con la Serie Tobífera, hasta el tope transicional a la Formación Pampa Rincón. La muestra A-01 pertenece al Miembro Superior marino donde se interpretó que las arenas fueron depositadas en sistemas costeros. Las muestras A-02 y A-03 corresponden al Miembro Inferior fluvio-estuarino, la muestra A-02 se tomó de la sección superior de fajas de canales confinados estuarinos, mientras que la muestra A-03 está incluida en los canales amalgamados confinados (Figura 4). En el otro pozo estudiado, NRM.x-2001 (Nacientes Río Moneta), también fueron analizadas tres muestras correspondientes al Miembro Superior marino (muestra A-05) y al Miembro Inferior fluvio-estuarino (muestras A-06 y A-07). En la Figura 4 se muestra la distribución de los pozos y en profundidad los miembros analizados, la interpretación

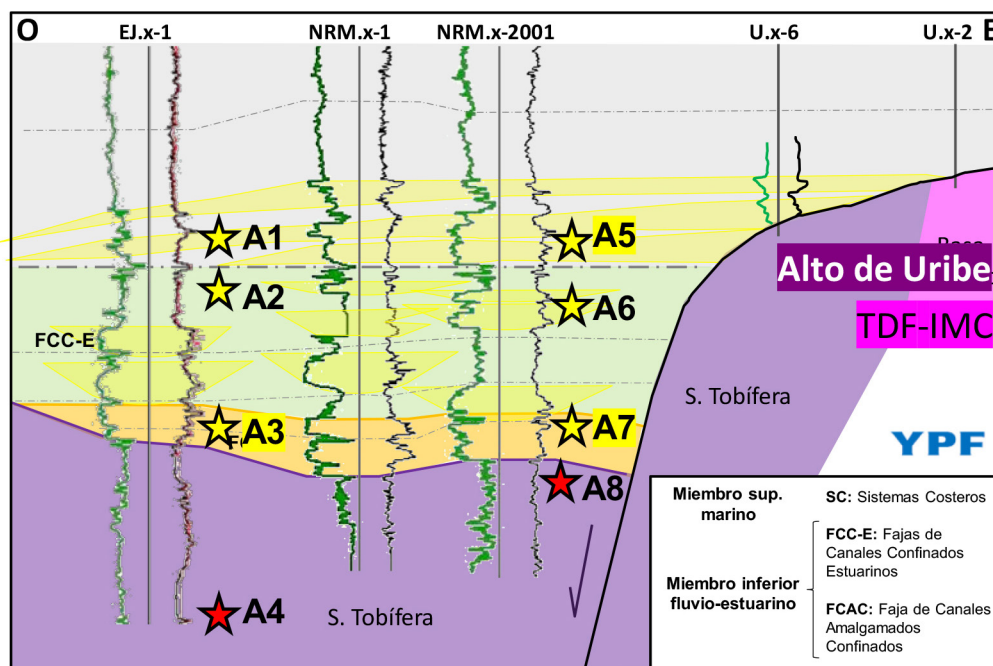


Figura 4. Modelo geológico esquemático para el relleno de un valle inciso en cuenca Austral (Isla de Tierra del Fuego, modificado de Ancheta *et al.*, 2019). No a escala. Los perfiles en verde (track izquierdo) corresponden a Gamma Ray, los perfiles en el track derecho corresponden a Resistividad. Las estrellas amarillas indican las muestras para análisis de circones detríticos analizadas en este trabajo.

de los ambientes depositacionales y sus posibles correlaciones laterales. Además, se analizaron dos muestras (A-04 y A-08) de la Serie Tobífera, pero sus resultados escapan al presente trabajo (Figura 4).

Las seis muestras analizadas presentaron numerosos circones detríticos que pudieron ser caracterizados de acuerdo con su morfología externa. La población de cristales que predomina se caracteriza por tener hábito prismático con elongación entre 3 y 4, formas idiomórficas a subidiomórficas y presentar inclusiones fluidas; la mayoría son traslúcidos y límpidos, aunque hay algunos coloreados. Estos circones posiblemente sean magmáticos de origen plutónico. En forma subordinada aparece una población con cristales de hábito prismático largo con elongación mayor a 5, forma idiomórfica y límpidos, algunos cristales presentan hábito acicular que sugieren un origen volcánico para esta población. Una tercera población muy subordinada está representada por granos de circón con formas redondeadas a subredondeadas, sugiriendo que estos cristales han sufrido más de un ciclo de sedimentación.

Las edades U-Pb obtenidas de estas muestras presentan patrones de edades muy similares, donde se pueden distinguir dos grupos de edades, lo que determina típicos patrones de proveniencia bimodales (Figura 5). El grupo más representado estadísticamente tiene edades jurásicas (entre

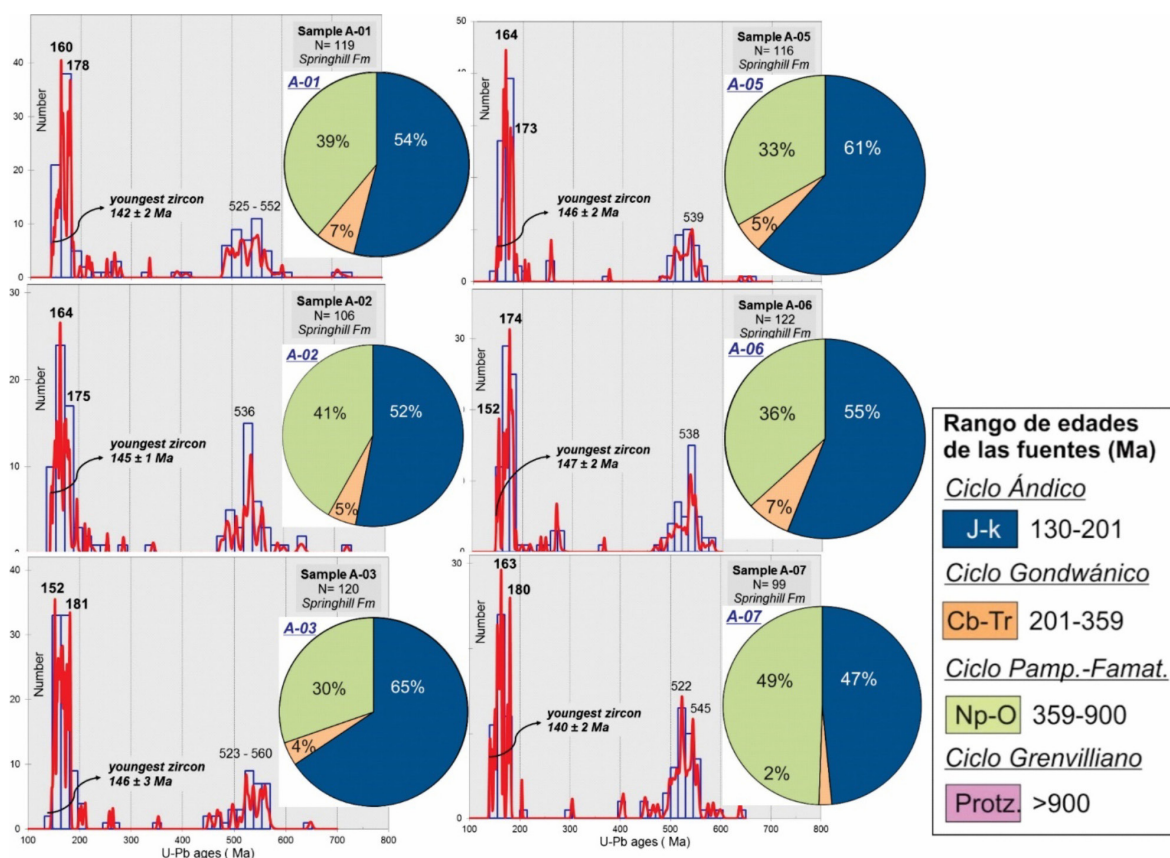


Figura 5. Histogramas de frecuencias relativas y curvas acumulativas de las edades U-Pb de los circones detríticos separados de la cuenca Austral-Magallanes. Las muestras A-01, A-02 y A-03 corresponden al pozo Ej.x-1, mientras que las muestras A-05, A-06 y A-07 corresponden al pozo NRM.x-2001 (véase Figura 4). Además, se incluyeron diagramas de torta con los porcentajes de edades de acuerdo a los tres grupos principales indicados en el cuadro de la derecha.

47% y 65%) con picos de máxima frecuencia entre 151 Ma y 181 Ma (Jurásico tardío y temprano respectivamente). Además, aparecen en todas las muestras muy pocos cristales cretácicos (entre 140 y 145 Ma) que sirvieron para determinar las edades máximas de sedimentación de las muestras (ver más adelante). El segundo grupo bien representado (entre 30% y 49%) está integrado por circones detríticos con edades del Neoproterozoico a Ordovícico, con varios picos de máxima frecuencia relativa a los 520, 525, 538, y 560 Ma. Por último, cabe destacar que aparecen pocos cristales de edad pérmica (aproximadamente 5%) y otros más antiguos con edades mesoproterozoicas (Figura 5).

En la cuenca de Malvinas se estudiaron muestras de la Formación Springhill de tres pozos exploratorios costa afuera: Calamar.x-1 (muestras M-01 y M-02), Erizo.x-1 (M-04 y M-05) y Camarón.x-1 (M-07 y M-08). Se analizaron las morfologías externas, texturas internas y edades U-Pb (LA-ICP-MS) de circones detríticos separados de testigos corona (Figura 6). Las seis muestras de testigos corona analizadas por circones corresponden a areniscas de grano medio a grueso de color gris claro, ocasionalmente se detectó la presencia de niveles de conglomerados finos. Los minerales más abundantes son cuarzo y feldespato, en algunas se observó un mineral verde (posiblemente glauconita).

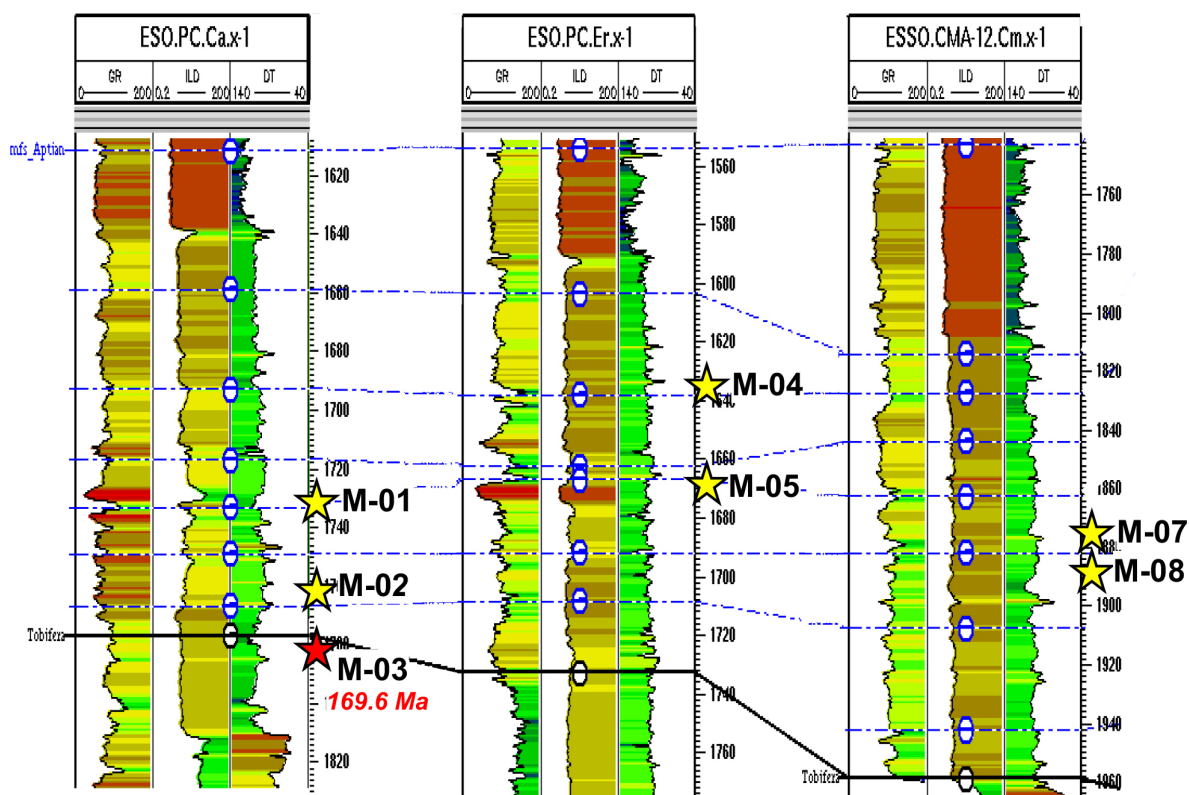


Figura 6. Correlación estratigráfica esquemática de los pozos Calamar (ESO.PC.Ca.x-1), Erizo (ESO.PC.Er.x-1) y Camarón (ESO.CMA-12.Cm.x-1) de la cuenca de Malvinas, horizontalizada a una superficie guía del Aptiano. Las líneas azules representan líneas tiempo. Las estrellas amarillas indican las muestras para análisis de circones detríticos analizadas en este trabajo.

En todas las muestras estudiadas se separaron más de 400 cristales de circón de forma aleatoria. El análisis de sus morfologías externas arrojó que la población más abundante, representada entre el 70% y 90% de todos los cristales observados, se caracteriza por su forma redondeada y con diferentes colores como rosa, marrón y amarillo, algunos cristales conservan su hábito prismático y poseen forma subredondeada; todos presentan una superficie externa de aspecto esmerilado. Estas características son propias de circones reciclados que posiblemente hayan sufrido más de un ciclo de sedimentación. En forma subordinada se determinó un segundo grupo de circones de hábito prismático largo (elongación mayor a 5) y forma subredondeada, se destaca la presencia de inclusiones fluidas alargadas en su eje mayor; este grupo posiblemente tenga un origen volcánico. Por último, se determinó en varias muestras la presencia de circones muy subordinados de hábito prismático corto (elongación entre 3 y 4), forma idiomórfica, caras bipiramidales conservadas y límpidos; indicando un origen plutónico. En todas las muestras aparecen junto con los circones abundantes cristales de piritita y en forma subordinada rutilo.

Posteriormente se analizaron entre 100 y 150 circones por muestra por el método U-Pb para obtener edades absolutas. Los patrones de proveniencia obtenidos indicaron distribuciones polimodales con varios picos de máxima frecuencia relativa en el Jurásico, Neoproterozoico-Cámbrico y Mesoproterozoico. En forma muy subordinada aparecen grupos con edades del Pérmico y del Paleoproterozoico (ca. 2000 Ma), más muy pocos cristales individuales con edades arqueanas (2580, 2671, 2927 y 2973 Ma). Los circones con edades del Neoproterozoico-Cámbrico son los más abundantes en todas las muestras, entre el 47% y 64% del total. En los histogramas

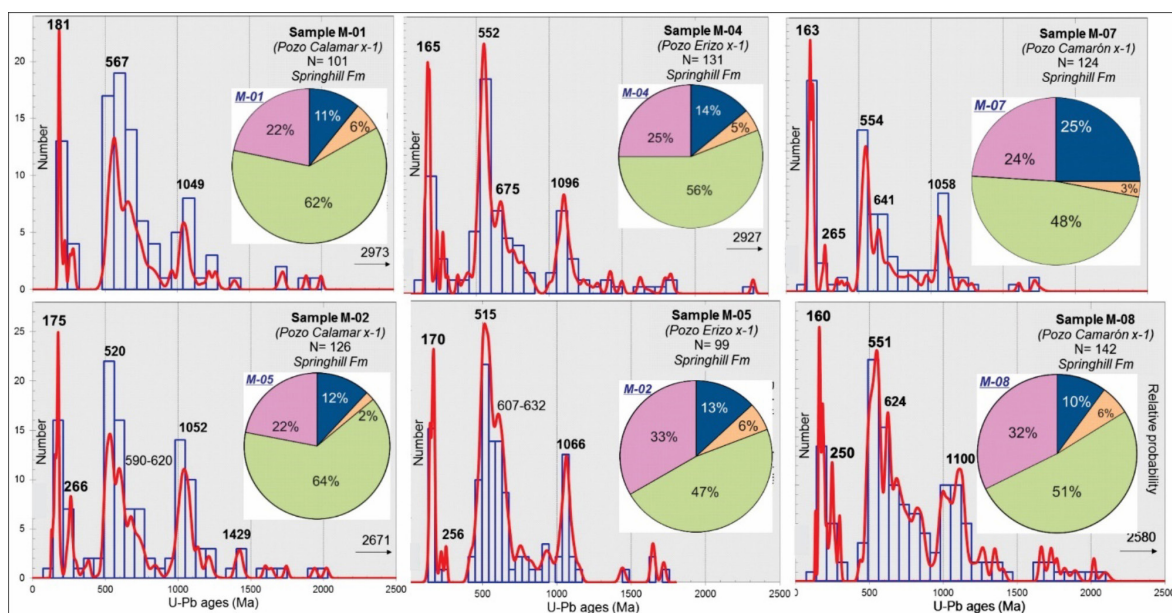


Figura 7. Histogramas de frecuencias relativas y curvas acumulativas de las edades U-Pb de los circones detríticos separados de las seis muestras de testigos corona de la cuenca de Malvinas. Las muestras M-01 y M-02 corresponden al pozo Calamar.x-1, las muestras M-04 y M-05 al pozo Erizo.x-1 y las muestras M-07 y M-08 al pozo Camarón.x-1. Dentro de cada histograma se incluyeron diagramas de torta con los porcentajes de edades de acuerdo con cuatro grupos principales, ver Figura 5 para referencias de las fuentes.

se pueden observar picos máximos a los 515, 520, 551, 554 y 567 Ma; además aparecen picos secundarios de 624, 641 y 675 Ma. El segundo grupo de edades está representado por circones mesoproterozoicos, con una abundancia que varía entre el 22% y el 33%. Los picos máximos definidos poseen valores entre 1050 y 1100 Ma, edades típicas del ciclo Grenville. El tercer grupo bien representado (entre el 10% y 25%) fue definido con las edades jurásicas y presentó picos máximos en 160, 165, 170, 175, y 181 Ma. En este grupo fueron incluidos muy pocos circones que arrojaron edades cretácicas, entre 139 y 143 Ma, pero estas edades serán discutidas cuando se determinen las edades máximas de sedimentación de las muestras. Los circones pérmicos no superan el 6% del total (Figura 7).

Edad máxima de sedimentación

Una de las aplicaciones más importante del análisis de edades U-Pb en circones detríticos es la determinación de la edad máxima de sedimentación. Este dato es particularmente valioso en secuencias sedimentarias con baja resolución bioestratigráfica, y es también útil para calibrar biozonaciones con edades absolutas. El concepto es simple y se basa en que la sedimentación no puede ser más antigua que la edad de los circones detríticos que componen la roca. Sin embargo, aparecen algunas complejidades cuando la edad de los circones detríticos más jóvenes está muy cercana a la edad de la sedimentación. Uno de los problemas más comunes es la pérdida de Pb que pueden sufrir los circones y que podría generar una edad más joven que la sedimentación. Otro problema se produce cuando el error del análisis es alto, pudiendo originar edades menores de la verdadera edad de sedimentación. Por lo tanto, en la determinación de la edad máxima de sedimentación se requiere una valoración de estos parámetros y del contexto geológico de la unidad analizada. En las muestras analizadas de las cuencas Austral-Magallanes y de Malvinas el principal problema encontrado fue la muy baja cantidad de circones jóvenes que pudieran determinar una edad máxima de sedimentación que se acercara a la edad verdadera de la sedimentación. Sin embargo, en algunos pozos de ambas muestras se encontraron circones individuales con edades cretácicas que pudieron ser datados y que permiten limitar con cierta precaución la edad de los pozos. El principal problema de estos circones es su elevado error (cerca al 2%).

Las edades máximas de sedimentación de la Formación Springhill, basada en los circones más jóvenes, en la cuenca Austral-Magallanes fueron determinadas entre 146 Ma y 142 Ma (Titoniano tardío-Berriasiano) para el pozo EJ.x-1 y entre 147 y 140 Ma (Titoniano-Berriasiano) para el pozo NRM.x-2001 (Figura 5). Por otro lado, en la cuenca de Malvinas se encontraron circones de edades más jóvenes que alcanzan el Hauteriviano. En el pozo Erizo.x-1 aparecen valores de 149 Ma y 144 Ma que sugieren una edad del pozo entre el Titoniano tardío y Berriasiano temprano), en el pozo Calamar.x-1 se dató el circón más joven a los 129 ± 4 Ma que indica una edad en el Hauteriviano

(pero destacamos su error alto), y en el pozo Camarón.x-1 el círculo más joven presentó un valor de 134 ± 4 Ma que sugiere una edad en el Valanginiano (también con error alto).

El análisis integral de las edades máximas de sedimentación de la Formación Springhill sugiere que la sucesión analizada en la cuenca Austral-Magallanes abarca el intervalo Titoniano-Berriasiano; mientras que, en la cuenca de Malvinas, si bien se observaron edades titonianas, la sedimentación llegaría hasta el Hauteriviano. Por lo tanto, es posible integrar los intervalos analizados de la Formación Springhill en ambas cuencas de acuerdo con los circones más jóvenes, sugiriendo un comienzo de la sedimentación en el Titoniano tardío-Berriasiano (secuencia Hydra) en cuenca Austral y finalizando en el Hauteriviano. Esto último posiblemente fue registrado sólo en la cuenca de Malvinas, por encontrarse en una posición estructuralmente más alta que habría sido afectada por la sedimentación de Springhill de manera más tardía, cuando la zona investigada en cuenca Austral-Magallanes ya se encontraba inundada y en facies de la Formación Pampa Rincón (Figura 8). Estos valores absolutos estarían en sintonía con las edades relativas asignadas clásicamente a la Formación Springhill por su contenido bioestratigráfico. Para la zona analizada en la cuenca Austral, análisis previos de la Formación Springhill en el pozo NRM.x-1 indicaban edades un poco más jóvenes, del Valanginiano tardío a Hauteriviano temprano (Ronchi *et al.*, 2016), nuevos estudios confirman una edad pre-Valanginiana para la Formación Springhill en EJ.x-1 (Seoane, comunicación personal). En los pozos analizados en la Cuenca de Malvinas, por otra parte, las edades de sedimentación determinadas por bioestratigrafía coinciden con las establecidas por circones detríticos para el Valanginiano tardío-Hauteriviano de acuerdo a lo que figura en los reportes finales de los pozos analizados (Goodman *et al.*, 1981, 1982a, 1982b).

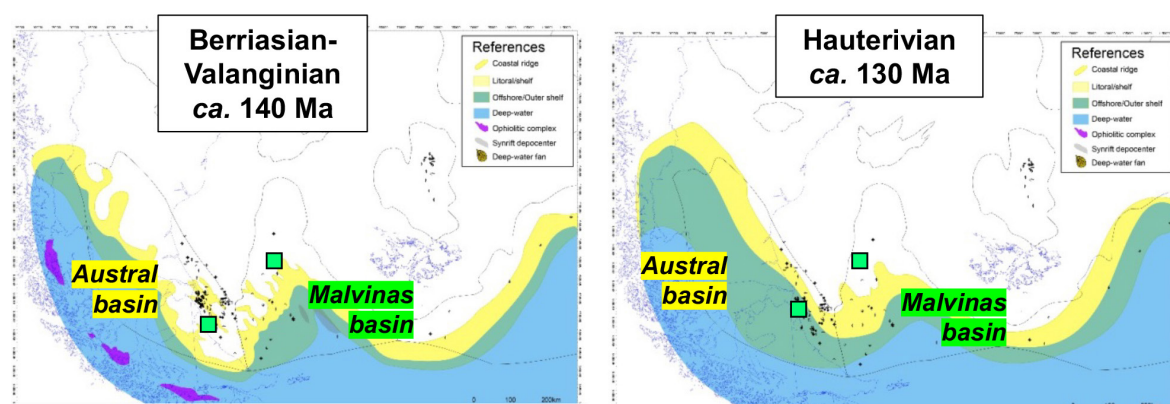


Figura 8. Modelo paleogeográfico para el desarrollo diacrónico transgresivo de la Formación Springhill en las cuencas Austral-Magallanes y Malvinas. Modificado de Lovecchio y Cayo (2017).

Análisis de Proveniencia

El análisis morfológico de los circones detríticos mostró diferencias claras entre las muestras de ambas cuencas. En las muestras analizadas de la cuenca Austral-Magallanes predominan los

cristales idiomórficos y prismáticos de origen volcánico, mientras que en las de la cuenca de Malvinas prevalecen los circones redondeados a subredondeados que evidencian un reciclado de ciclos sedimentarios previos; y por lo tanto un cambio significativo en la configuración de las áreas de procedencia principales. Los patrones de proveniencia determinados con las edades U-Pb obtenidas en los circones detríticos también mostraron una distribución claramente diferente (Figura 9).

Si consideramos un patrón de proveniencia integrado para todos los circones ($N=682$) analizados de las muestras de la cuenca Austral-Magallanes, es posible definir una clara distribución bimodal con dos picos principales de edades a los 164 Ma (Jurásico Medio) y a los ca. 540 Ma (Cámbrico temprano) (Figura 9a). Mientras que el total de circones ($N=723$) de las muestras de la cuenca de Malvinas mostraron un patrón de procedencia multimodal, con picos de máxima frecuencia a los 179 Ma (Jurásico Temprano), 260 Ma (Pérmico), 549 Ma (Neoproterozoico tardío) y 1067 Ma (Mesoproterozoico) (Figura 9b).

El análisis de las posibles fuentes de procedencia sedimentaria en base a las edades U-Pb indica que, en la cuenca de Malvinas, la Formación Springhill tuvo un área fuente donde predominaban rocas del Mesoproterozoico (35-25%) y Neoproterozoico-Cámbrico (45-65%) relacionadas claramente con el Macizo del Deseado y su extensión hacia el sur en el Alto de Río Chico. Esto es coherente con alta participación de circones redondeados posiblemente vinculados con el basamento metasedimentario del Complejo Río Deseado. Mientras que, en la zona estudiada en Cuenca Austral, los circones mesoproterozoicos están ausentes, predomina una proveniencia con edades del Neoproterozoico-Cámbrico (30-50%), vinculada con un aporte del basamento más local (Alto de Uribe, Figura 4) que es parte del Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego. Es importante aclarar que, por las características paleogeográficas de la zona analizada (ambos pozos muestreados fueron perforados en el mismo paleovalle, Figura 4), estas observaciones de

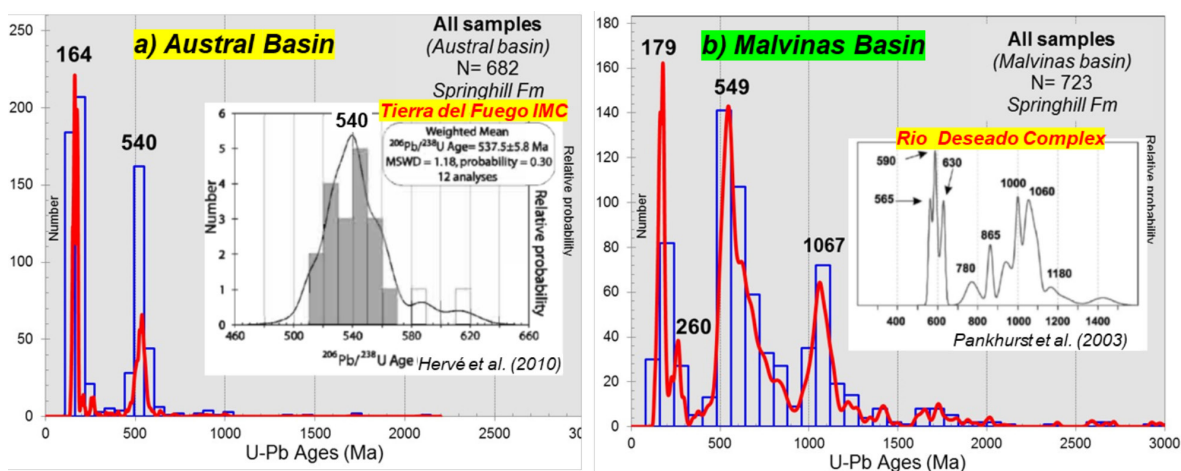


Figura 9. Patrones de proveniencias determinados con las edades U-Pb obtenidas en todos los circones detríticos de la cuenca Austral-Magallanes (a) y de Malvinas (b). Dentro de los gráficos se agregaron las edades del Complejo Ígneo Metamórfico de Tierra del Fuego (tomado de Hervé *et al.*, 2010) y del Complejo Río Deseado (Pankhurst *et al.*, 2003) para su comparación.

proveniencia son representativas de esta localidad en particular y no son extrapolables al resto de la cuenca Austral-Magallanes. Se destaca, además, la muy baja representatividad de circones con edades pérmicas en todos los pozos analizados (ambas cuencas, Figura 9).

Por otro lado, las fuentes jurásicas están presentes de manera representativa en las muestras analizadas de ambas cuencas y se las relaciona con la Serie Tobífera, parte de la Provincia Magmática de Chon Aike (Kay *et al.*, 1989; Pankhurst *et al.*, 2000) que justamente rellena los depocentros de synrift de las cuencas Austral-Magallanes y Malvinas. Las rocas volcánicas de Chon Aike fueron posiblemente la fuente principal de aporte de los circones de origen volcánico detectados en todas las muestras. En ambas cuencas es claro que los circones jurásicos analizados representan los tres eventos volcánicos definidos clásicamente para Chon Aike: V-1 (ca. 188 – 178 Ma), V-2 (ca. 172 – 167 Ma) y V-3 (162 – 153 Ma) (Pankhurst *et al.*, 2000). En la figura 10 se representaron todos los circones jurásicos y cretácicos analizados en cada cuenca, el objetivo de la figura es mostrar con mayor detalle los picos de máxima frecuencia y su correspondencia con los eventos volcánicos del Chon Aike. Otro aspecto para destacar en este gráfico y en los patrones de procedencia es la escasa participación de circones jóvenes del Cretácico, como se discutió más arriba. Sin embargo, es importante detectar la posible procedencia de estos circones. De acuerdo a su origen volcánico, forma idiomórfica y su edad joven, estarían vinculados con el arco volcánico andino contemporáneo con la sedimentación (Figura 10).

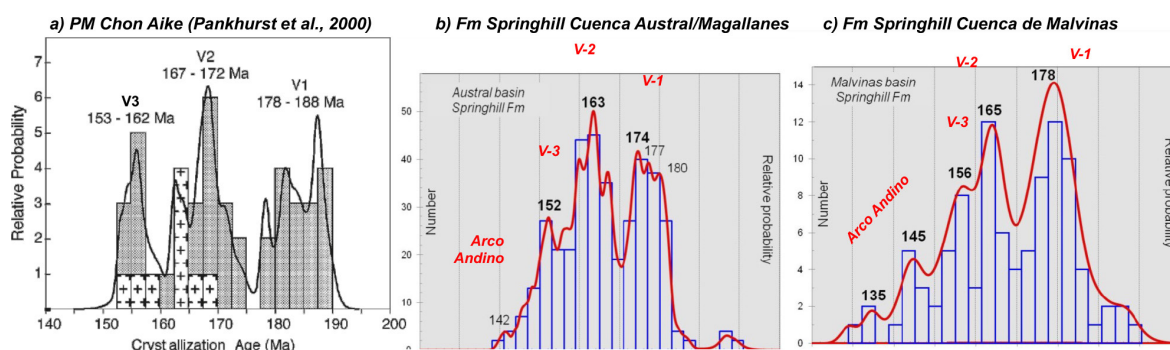


Figura 10. Comparación de a) las edades para la Provincia magmática de Chon Aike de Pankhurst *et al.* (2000), con los resultados de este estudio. Distribución de las edades de circones cretácicos y jurásicos en las cuencas Austral-Magallanes (b) y de Malvinas (c). Las edades jurásicas corresponden al volcanismo de Chon Aike, mientras que las cretácicas estarían indicando una fuente subordinada relacionada con el arco volcánico Andino.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primera comparación de análisis de circones detríticos para la Formación Springhill en el subsuelo de las cuencas Austral-Magallanes y Malvinas. En la cuenca Austral-Magallanes se tomaron seis muestras de cuttings durante la perforación de los pozos exploratorios NRM.x-2001 y EJ.x-1 perforados por YPF en la isla de Tierra del Fuego. En la

cuenca de Malvinas, se tomaron seis muestras de testigos corona de tres pozos exploratorios perforados por Esso en la década de 1980 (Calamar.x-1, Camarón.x-1 y Erizo.x-1). Las muestras fueron procesadas para separar, caracterizar y datar circones detríticos, y su análisis nos permitió establecer, a pesar de la escasez de circones jóvenes, edades máximas de sedimentación entre el Titoniano y Hauteriviano, que son consistentes con las edades de sedimentación obtenidas por bioestratigrafía.

El análisis de procedencia muestra diferencias contrastadas entre ambas cuencas. En los pozos analizados de la cuenca Austral-Magallanes, perforados en un valle inciso relleno de la Formación Springhill al pie del alto de Uribe, destacan dos picos, uno en torno al Jurásico Medio (164 Ma) y otro del Cámbrico temprano (ca. 540 Ma) que fueron interpretados como proveniencias desde la Serie Tobífera y el Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego respectivamente. La Serie Tobífera rellena los hemigrábenes que subyacen a la Formación Springhill y está presente en toda la cuenca y sobre los altos basamentales. El Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego sería el principal componente del Alto de Uribe, y es una fuente de sedimentos muy importante a nivel local. En la Cuenca de Malvinas, por su parte, además de las edades neoproterozoicas-cámbricas (ca. 549 Ma) y jurásicas (ca. 179 Ma), aparecen picos menores en el Pérmico (260 Ma) y en el Mesoproterozoico (en torno a 1067 Ma). El pico pérmico corresponde a la edad de un importante evento metamórfico con fusión parcial de corteza, mientras que las edades mesoproterozoicas son consistentes con las reportadas para el Complejo Río Deseado por Pankhurst *et al.* (2003). De esta manera, por encontrarse los pozos muestreados sobre el flanco oriental del Alto de Río Chico y considerando a éste como la principal área fuente de los sedimentos de la Formación Springhill en la zona, interpretamos que el Alto de Río Chico costa afuera estaría compuesto principalmente por facies del Complejo Río Deseado.

Finalmente, la distribución de circones mesozoicos nos permitió identificar los principales eventos de Chon Aike. El evento V-1, de entre 180 y 174 Ma en la cuenca Austral-Magallanes, y en torno a 178 Ma en Malvinas (que es consistente con la edad de la Serie Tobífera en la isla de Tierra del Fuego de 178 Ma, reportada por Pankhurst *et al.*, 2000). El pico de V-2 también es bastante claro, en torno a 165-163 Ma, consistente con la edad del tope de la Serie Tobífera datada en la cuenca de Malvinas en el pozo Calamar.x-1 (Lovecchio *et al.*, 2019). El evento V-3 es el más joven de los eventos de Chon Aike, corresponde al *rifting* relacionado a la apertura de la cuenca Marginal de Rocas Verdes, y en nuestras muestras se observa en torno a 156 y 152 Ma en las cuencas de Malvinas y Austral respectivamente. También pudimos determinar la presencia de una fuente más joven, contemporánea a la sedimentación, que correlacionamos con el ciclo Ándico, y donde destacamos picos en 145, 142 y 135 Ma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF por poner a disposición el set de datos necesarios para la preparación de este trabajo, y a los revisores que contribuyeron con sus comentarios a la mejora de este manuscrito.

REFERENCIAS CITADAS

- Ancheta, D., Lovecchio, J.P., Covellone, G., Naipauer, M., Aspiroz, G., Atencio, M. y Meissinger, V., 2019. New insights in the characterization of the Springhill Formation Play in the Austral Basin, Tierra del Fuego, Argentina. AAPG International Conference and Exhibition, Buenos Aires 2019, Search and Discovery Article 11327
- Arbe, H.A., 2002. Análisis estratigráfico del Cretácico de Cuenca Austral. En Haller, M.J. (ed.). Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Santa Cruz. Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino, El Calafate. I-8, p. 103-128.
- Arbe, H.A. y Fernández Bell Fano, F., 2002. Los reservorios de la Formación Springhill Costa afuera de la Cuenca Austral. En Schiuma, M. (ed.) Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, p. 75-89.
- Augustsson, C., Münker, C., Bahlburg, H., y Fanning, C.M., 2006. Provenance of the Late Paleozoic metasediments of the SW South American Gondwana margin: a combined U-Pb and Hf-isotope study of single detrital zircons. Geological Society of London 163, p. 983-995
- Augustsson, C., y Bahlburg, H., 2008. Provenance of late Palaeozoic metasediments of the Patagonian proto-Pacific margin (southernmost Chile and Argentina). Int. J. Earth Sc. 97, p. 71-88
- Calderón, M., Hervé, F., Fuentes, F., Fosdick, J.C., Sepúlveda, F., y Galaz, G., 2016. Tectonic evolution of Paleozoic and Mesozoic Andean metamorphic complexes and the Rocas Verdes Ophiolites in southern Patagonia. In: Ghiglione, M.C. (ed.), Geodynamic Evolution of the Southernmost Andes. Springer Earth System Sciences, p. 7-36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39727-6_2.
- Cao, S. J., Torres Carbonell, P. J., Bordese, S., y Lovecchio, J. P., 2022. Early *rifting* during marginal basin development: Petrography, microstructure, and detrital zircon U- Pb geochronology of the Lapataia Formation, Argentine Fuegian Andes. Basin Research, 34(4), p. 1400-1420. <https://doi.org/10.1111/bre.12664>
- Castillo, P., Fanning, C.M., Hervé, F., y Lacassie, J.P., 2016. Characterization and tracing of Permian magmatism in the south-western segment of the Gondwana margin; U-Pb age, Lu-Hf and O isotopic compositions of detrital zircons from metasedimentary complexes of northern Antarctic Peninsula and western Patagonia. Gondwana Research 36, p. 1-13.
- Cingolani, C. y Varela, R., 1976. Investigaciones geológicas y geocronológicas en el extremo sur de la isla Gran Malvina, sector cabo Belgrano (Cabo Meredith), Islas Malvinas. 6º Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires. Actas 1, p. 457-474

- Forsythe, R.D. y Mpodozis, C., 1979. El Archipiélago de Madre de Dios, Patagonia Occidental, Magallanes: rasgos generales de la estratigrafía y estructura del basamento pre-Jurásico Superior. *Rev. Geol. Chile* 7, p. 13–29
- Galeazzi, J.S., 1998. Structural and Stratigraphic Evolution of the Western Malvinas Basin, Argentina. *AAPG Bulletin*, 82, p. 596–636.
- Gehrels, G., Valencia, V. y 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*, 9(3), Q03017.
- Giacosa, R.E., Márquez, M.M. y Panza, J.L., 2002. Basamento Paleozoico inferior del Macizo del Deseado. En Haller, M.J. (ed.). *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. Relatorio 15° Congreso Geológico Argentino*, p. 33–44.
- Goodman, D.K., Hanna, J.C., Lamb, J.L., y Smith, L.A., 1981. Paleontological Analysis of the Esso CMA.12.Ca.x-1 (Calamar-1) well, *Offshore* Argentina. Exxon Production Research Company. Reporte bioestratigráfico figurante en el Reporte Final del pozo Calamar.x-1, 89 pp.
- Goodman, D.K., Hanna, J.C., y Wright, R.C., 1982a. Biostratigraphic Analysis of the Esso CMA.12. Cm.x-1 (Camarón-1) well, *Offshore* Argentina. Exxon Production Research Company. Reporte bioestratigráfico figurante en el Reporte Final del pozo Camarón.x-1. 60 pp.
- Goodman, D.K., Hanna, J.C., y Wright, R.C., 1982b. Paleontological Analysis of the Esso CMA.12. Er.x-1 (Erizo-1) well, *Offshore* Argentina. Exxon Production Research Company. Reporte bioestratigráfico figurante en el Reporte Final del pozo Erizo.x-1. 58 pp.
- Guido, D.M., Escayola, M.P., Schalamuk, I., 2004. The basement of the Deseado Massif at Bahía Laura, Patagonia, Argentina: a proposal for its evolution. *Journal of South America Earth Sciences*, 16, p. 567–577.
- Hervé, F. y Fanning, C.M., 2000. Late Triassic zircons in meta-turbidites of the Chonos Metamorphic Complex, southern Chile. *Rev. Geol. Chile* 28, p. 91–104
- Hervé, F., Fanning, C.M. y Pankhurst, R.J., 2003. Detrital zircon age patterns and provenance in the metamorphic complexes of Southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 16(107), pp. 123
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C.M., Kraus, S., Pankhurst, R.J., 2010a. SHRIMP chronology of the Magallanes basin basement, Tierra del Fuego: Cambrian plutonism and Permian high-grade metamorphism. *Andean Geology* 37(2), p. 253–275
- Hervé, F., Fanning, C.M., Pankhurst, R.J., Mpodozis, C., Klepeis, K., Calderón, M. y Thomson, S.N., 2010b. Detrital zircon SHRIMP U–Pb age study of the Cordillera Darwin Metamorphic Complex of Tierra del Fuego: sedimentary sources and implications for the evolution of the Pacific margin of Gondwana. *Geological Society of London* 167, p. 555–568
- Jacobs, J., Thomas, R.J., Armstrong, R.A. y Henjes-Kunst, F., 1999. Age and thermal evolution of the Mesoproterozoic Cape Meredith Complex, West Falkland. *Journal of the Geological Society of London*. 156, p. 917–928.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., Mpodozis, C. y Sruoga, P., 1989. Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: analogy to the Middle Proterozoic in North America? *Geology*, 17, p. 324–328.

- Klepeis, K., Betka, P., Clarke, G., Fanning, C.M., Hervé, F., Rojas, L., Mpodozis, C. y Thomson, S.N., 2010. Continental underthrusting and obduction during the Cretaceous closure of the Rocas Verdes *rift* basin, Cordillera Darwin, Patagonian Andes. *Tectonics*, 29, TC3014
- Lovecchio, J.P. y Cayo. L.E., 2017. Cuenca de Malvinas. Reporte Interno de YPF, 27 pp.
- Lovecchio, J.P., Naipauer, M., Cayo. L.E., Rohais, S., Giunta, D., Flores, G., Gerster, R., Bolatti, N.D., Joseph, P., Valencia, V.A. y Ramos, V.A., 2019. *rifting* evolution of the Malvinas basin, *offshore* Argentina: New constrains from zircon U-Pb geochronology and seismic characterization. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, 102253.
- Lovecchio, J. P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N. y Ramos, V. A., 2020. Mesozoic *rifting* evolution of SW Gondwana: a poly-phased, subduction-related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin. *Earth Science Reviews*, 203, 103138, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103138>
- Ludwig, K. R., 1999. User's manual for Isoplot/Ex, Version 2.10, A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1, 46 pp.. Berkeley Geochronology Center, 2455 Ridge Road, Berkeley CA 94709 USA.
- Malkowski, M. A., Grove, M. y Graham, S. A., 2015. Unzipping the Patagonian Andes - Long-lived influence of *rifting* history on foreland basin evolution, *Lithosphere* 8 (1), p. 23–28. <https://doi.org/10.1130/L489.1>
- Malumián, N., 1990. Foraminíferos bentónicos del Cretácico de Cuenca Austral, Argentina. En: Volkheimer, W. (ed.) *Bioestratigrafía de los Sistemas Regionales del Jurásico y Cretácico de América del Sur*. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico, Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, p. 429-496
- Moreira, P., Fernández, R., Hervé, F., Fanning, C.M., y Schalamuk, I.A., 2013. Detrital zircons U-Pb SHRIMP ages and provenance of La Modesta Formation, Patagonia Argentina. *J. South Am. Earth Sci.* 47, p. 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.05.010>
- Mukasa, S.B. y Dalziel, I.W.D., 1996. Southernmost Andes and South Georgia Island, North Scotia Ridge: Zircon U-Pb and muscovite $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ age constraints on tectonic evolution of Southwestern Gondwanaland. *J. South Am. Earth Sci.* 9, p. 349–365.
- Mussett, A.E. y Taylor, G.K., 1994. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages for dykes from the Falkland Islands with implications for the breakup of southern Gondwanaland. *Journal of the Geological Society of London* 151, p. 79-81.
- Pankhurst, R. J., Leat, P. T., Sruoga, P., Rapela, C. W., Marquez, M., Storey, B. C. y Riley, T. R., 1998. The Chon Aike silicic igneous province of Patagonia and related rocks in Antarctica: a silicic LIP. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81, p. 113–136.
- Pankhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. y Kelley, S.P., 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the breakup of Gondwana. *Journal of Petrology* 41, p. 603–625
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Loske, W.P., Márquez, M. y Fanning, C.M., 2003. Chronological study of the pre-Permian basement rocks of southern Patagonia. *Journal of South American Earth Sci-*

- ences, 16, p. 27–44
- Pedrazzini, M. y Cagnolati, M., 2002. Los Reservorios de la Formación Springhill en el Territorio Continental de la Cuenca Austral, República Argentina. En Schiuma, M. (ed.) Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, p. 75-89.
- Pérez Panera, J.P., 2012. Nanofósiles calcáreos y Bioestratigrafía del Cretácico del sudeste de la cuenca Austral, Patagonia, Argentina. *Ameghiniana*, 49(2), p. 137-163
- Permuy Vidal, C., Moreira, P., Guido, D.M., y Fanning, C.M., 2014. Linkages between the southern Patagonia Pre-Permian basements: new insights from detrital zircons U-Pb SHRIMP ages from the Cerro Negro District. *Geologica Acta*, 12(2), p. 137–150.
- Pezzuchi, H., 1978. Estudio geológico de la zona de estancia Dos Hermanos, estancia 25 de Marzo y adyacencias, Dpto. Deseado, Prov. de Santa Cruz. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, (Inédito).
- Pimpirev, C., Miller, H. y Hervé, F., 1999. Preliminary results on the lithofacies and paleoenvironmental interpretation of the Paleozoic turbidite sequence in Chonos Archipelago, Southern Chile. *Comunicaciones* 48-49, p. 3–12
- Ramos, V. A., Cingolani, C., Junior, F. C., Naipauer, M. y Rapalini, A., 2017. The Malvinas (Falkland) Islands revisited: The tectonic evolution of southern Gondwana based on U-Pb and Lu-Hf detrital zircon isotopes in the Paleozoic cover. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, p. 320–345.
- Richards, P.C., Stone, P., Kimbell, G.S., McIntosh, W.C. y Phillips, E.R., 2013. Mesozoic magmatism in the Falkland Islands (South Atlantic) and their *offshore* sedimentary basins. *J. Pet. Geol.* 36, p. 61–73. <https://doi.org/10.1111/jpg.12542>
- Ronchi, D. y Angelozzi, G., 1994. Bioestratigrafía del Cretácico-Terciario en dos pozos ubicados al Oeste de la Cuenca Austral. *Boletín de Informaciones Petroleras*, Tercera Época 10, p. 65-76.
- Ronchi, D.I., Angelozzi, G.N. y Ottone, E.G., 2016. Análisis Bioestratigráfico y Paleoambiental integral del pozo PAE.TF.NRM.x-1 (Nacientes Río Moneta), Cuenca Austral. *Y-TEC*. 52 pp.
- Robiano, J., Arbe, H. y Gangui, A., 1996. Cuenca Austral Marina. In: Ramos, V., Turic, M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 343-358.
- Schwarz, E., Veiga, G.D., Spalletti, L.A. y Massafiero, J.L., 2011. The transgressive infill of an inherited-valley system: The Springhill Formation (lower Cretaceous) in southern Austral Basin, Argentina. *Mar. Pet. Geol.* 28, p. 1218–1241. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.11.003>
- Söllner, F., Miller, H. y Hervé, M., 2000. An Early Cambrian granodiorite age from the pre-Andean basement of Tierra del Fuego (Chile): the missing link between South America and Antarctica? *Journal of South American Earth Sciences* 13, p. 163–177.
- Stacey, J.S. y Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26, p. 207-221
- Stone, P., Richards, P.C., Kimbell, G.S., Esser, R.P. y Reeves, D., 2008. Cretaceous dykes discovered in the Falkland Islands: implications for regional tectonics in the South Atlantic. *J. Geol. Soc. London*. 165, p. 1–4. <https://doi.org/10.1144/0016->

76492007-072

Suarez, R.J., Ghiglione, M.C., Calderón, M., Sue, C., Martinod, J., Guillaume, B., y Rojo, D., 2019. The metamorphic rocks of the Nunatak Viedma in the Southern Patagonian Andes: Provenance sources and implications for the early Mesozoic Patagonia-Antarctic Peninsula connection. *Journal of South*

American Earth Sciences 90, p. 471-486

Viera, R. y Pezzuchi, H., 1976. Presencia de sedimentitas pérmicas en contacto con rocas del "Complejo metamórfico" de la Patagonia Exrandina, estancia Dos Hermanos, provincia de Santa Cruz. *Revista Asociación Geológica Argentina*, nota breve, 31(4), p. 281-283.

