

EDADES U-PB DEL GRUPO CHUBUT EN EL CODO DEL RÍO SENGUERR, CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE (PATAGONIA EXTRAANDINA): CALIBRACIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA E IMPACTO EN EL ANÁLISIS DEL SISTEMA PETROLERO

José Oscar Allard¹, Nicolás Foix^{1,2}, Norman Urrez³, María Josefina Cuello³

1: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud,
Departamento de Geología. joseoallard@yahoo.com.ar

2: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. nicofaix@hotmail.com

3: YPF S.A. al momento de realizar el trabajo. normanurrez@hotmail.com, josefinacuello@gmail.com

Palabras clave: Grupo Chubut, datación U/Pb, toba, volcániclastico, source-to-sink

ABSTRACT

The Golfo San Jorge basin has more than 100 years of history in the exploration and production of hydrocarbons in Argentina, with the main petroleum system associated to the Chubut Group. Nonetheless, the chronostratigraphic framework of this unit is immature, affecting the comprehension of the basin evolution. The Codo del río Senguerr anticline is the southernmost expression of the San Bernardo Fold Belt. There, the Chubut Group reaches a 1650 m thick succession, from where we obtained five samples and analyzed their U/Pb ages. The stratigraphic distributions of the samples involve all the outcropped formations: Pozo D-129 (n: 2), Castillo (n: 1), and Bajo Barreal (n: 2). Their sedimentological features and geochronological results evidence the dominance of reworked volcanic ash and subordinated distal primary fall-out. Taking this into account, we calibrated the Chubut Group chronostratigraphy using the youngest zircon ages. The upper deltaic levels of the Pozo D-129 Formation were reassigned to the Albian (103,1 Ma), while the ages of the overlying high-accommodation fluvial deposits were also modified: i) the Castillo Formation to the early Cenomanian (98,3 Ma), ii) the lower Bajo Barreal Formation to the middle Cenomanian (96,8 Ma), and the upper Bajo Barreal Formation to the early Coniacian (88,4 Ma). These results have an impact on all the components of the petroleum system, like the modeling of the subsidence rate and the timing of the fold belt construction which conditions the trap generation. Finally, the case study demonstrates the age variability in volcanic distal tuffs affected by different rework intensities.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Usos y limitaciones de dataciones U/Pb

Los modelos en geociencias están condicionados por la variable tiempo, abarcando procesos de distinta escala de duración desde segundos a millones de años. El uso del decaimiento

radimétrico en geocronología permite asignar una edad numérica acotada al registro geológico, con una precisión y exactitud que evolucionan con los avances tecnológicos. La datación U/Pb en circones es particularmente poderosa ya que presenta dos sistemas isotópicos con vidas medias acordes a la mayoría de los procesos evolutivos terrestres, utiliza sistemas de decaimiento vinculados y el isótopo ^{204}Pb no radimétrico permite estimar el contenido de Pb al momento de la formación del cristal (Gehrels 2012). Una de las características más importantes de las dataciones U/Pb en circones es la temperatura de cierre del sistema isotópico mayor a los 900°C , valor que supera a la temperatura de solidus de muchos magmas, lo cual le otorga estabilidad durante los procesos geológicos superpuestos (Rossignol *et al.* 2019). Por otro lado, este mineral es un resistato lo cual favorece su preservación durante procesos exógenos y diagenéticos (Chew *et al.* 2020). Estas características permiten que un cristal ígneo pueda sobrevivir varios ciclos sedimentarios/metamórficos y reciclarse en procesos magmáticos sin ser reseteado, registrando crecimientos que luego pueden ser diferenciados y datados.

El uso de métodos geocronológicos de alta precisión como las dataciones U/Pb se ha transformado en una metodología tradicional para el análisis de cuencas sedimentarias, permitiendo calibraciones cronoestratigráficas, correlaciones de alta resolución, cálculos de tasas de sedimentación, cuantificación de hiatos, timing de eventos tectónicos, y evaluación de las áreas fuentes a partir de la edad de circones detríticos (ver referencias en Sharman y Malkowski 2020). El escenario geológico más favorable para utilizar las dataciones U/Pb en sucesiones sedimentarias es en el cual se registran intercalaciones de niveles volcánicos o piroclásticos fértiles en circones. Sin embargo, las edades radimétricas deben ser utilizadas con extrema precaución debido a que las mismas pueden no estar representando la edad de la roca que contiene los cristales datados, definiendo una edad aparente más antigua. En este contexto, las fuentes principales de error pueden ser i) analíticas de laboratorio, ii) metodológicas vinculadas al muestreo, y iii) asociadas a la elección y tipos de cristales datados (Rossignol *et al.* 2019). En este último caso, los cristales pueden tener diferencias sutiles o sustanciales respecto del episodio o época eruptiva a la que se asocian, clasificándose en autocristales, antecristales, epicristales, xenocristales y cristales heredados. La figura 1 sintetiza la génesis de cada tipo de cristal y su relación temporal con el evento eruptivo que se asocia.

Los autocristales son óptimos para ser datados ya que el tiempo transcurrido entre la cristalización y la depositación es mínimo, por lo cual representan el episodio eruptivo contemporáneo al registro sedimentario. Sin embargo, no todos los episodios eruptivos tienen una densidad favorable de circones (Chew *et al.* 2020), y puede haber algún tipo de sesgo durante la selección de cristales a datar que diluya o no represente los autocristales (Rossignol *et al.* 2019). Los antecristales ya tienen una edad relativa respecto del episodio volcánico que puede alcanzar algunos cientos de miles de años, lo cual impide considerarlos sin-sedimentarios *sensu stricto*. Este desfase puede superar la precisión del método geocronológico, planteando una

	TIPO DE CRISTAL	EDAD RELATIVA CON EL EVENTO MAGMÁTICO-VOLCÁNICO	PROCESO GENÉTICO
Endógeno	Autocristal	~Contemporáneo: cientos a miles de años.	Cristalización desde el episodio magmático más joven.
	Antecristal	Decenas a cientos de miles de años.	Cristalización en un episodio temprano del mismo sistema magmático e incorporado en un episodio magmático posterior.
	Xenocristal	Por lo menos varios millones de años.	Cristal asimilado al magma desde la roca de caja, no presenta relación con la época magmática evaluada.
	Heredado	Por lo menos varios millones de años.	Cristal derivado de la fusión parcial de la corteza.
Exógeno	Epicristal	Por lo menos varios millones de años.	Cristal detrítico asociado a la meteorización de rocas pre-existentes. No se genera en la cámara magmática de la época magmática evaluada.
	Pseudo-epicristal (<i>nov. nom.</i>)	Cientos de miles de años a algunos millones de años (?).	Cristal detrítico asociado al reciclado intracuencal por erosión de depósitos volcanoclásticos o rocas muy poco litificadas.

Figura 1. Tipos de cristales datables en un depósito volcanoclástico distal (modificado de Sharman y Malkowski 2020). En base a su génesis, se agrupan en cristales de ciclo endógeno y exógeno.

incertidumbre que impide acotar una edad sin-eruptiva precisa. A pesar de estas limitaciones, es común vincular niveles tobáceos a una época eruptiva sin evaluar los tipos de cristales analizados o utilizando cristales con diferencias de edad que sugieren poblaciones de auto- y antecristales (Rossignol *et al.* 2019). Los cristales heredados y xenocristales se encuentran en la cámara magmática pero ya presentan edades relativas de millones de años respecto del episodio volcánico, descartando su utilidad para dataciones de alta precisión. Un caso particular es el de los epicristales, estos no se vinculan a un episodio o época volcánica ya que surgen de la meteorización de rocas preexistentes, por lo cual se utilizan para definir circones detríticos que acotan la edad de máxima depositación (Maximum Depositional Age: MDA). Este concepto es relativamente simple, ya que implica que el cristal detrítico más joven pone un límite a la edad que puede tener el estrato que lo contiene ya que este nivel no puede ser previo; cabe destacar que la MDA puede diferir sustancialmente de la edad verdadera de depositación (True Depositional Age: TDA) (Sharman y Malkowski 2020; Dröllner *et al.* 2021). Teniendo en cuenta lo mencionado, es evidente que las edades U/Pb son un paradigma geocronológico que no puede independizarse de la complejidad geológica, y las dataciones deben ser evaluadas en un contexto estratigráfico lo más ajustado posible, condicionadas por la información bioestratigráfica disponible.

Datación U/PB de sistemas volcanoclásticos distales

La actividad volcánica eruptiva genera importantes volúmenes de material que se incorporan a los sistemas sedimentarios (Smith 1991; Kataoka y Nakajo 2002; Manville *et al.* 2009, entre otros). En este contexto, la datación absoluta de niveles contemporáneos requiere el registro de material volcánico o piroclástico primario; sin embargo, el volumen de estos materiales decrece de manera exponencial al alejarse de la fuente eruptiva dificultando

su preservación en sucesiones fósiles (Fisher y Schmincke 1984; Cas y Wright 1987; d'Atri *et al.* 1999). A pesar de esto, son comunes los niveles tobáceos en cuencas distales al arco magmático contemporáneo, como por ejemplo la cuenca del Golfo San Jorge (CGSJ) que registra miles de metros de sucesiones continentales cretácicas con influencia variable de ceniza volcánica (Clavijo 1986; Sylwan 2001; Figari y Hechem 2021; Paredes *et al.* 2021). Esta paradoja requiere de una revisión y consenso en el concepto de toba, ya que puede tener una connotación genética o composicional. Desde el punto de vista genético hace referencia a la caída directa de ceniza volcánica, mientras que composicionalmente es una roca compuesta por material piroclástico inferior a 2 mm (McPhie *et al.* 2005). Esta última definición puede involucrar material retrabajado y resedimentado por agentes exógenos implicando un origen volcaniclástico, este tipo de roca híbrida es un desafío para los estudios geocronológicos ya que puede mezclar distintas poblaciones de cristales datables (Rossignol *et al.* 2019).

Los sistemas volcaniclásticos distales constituyen un complejo esquema source-to-sink donde el material primario se genera en episodios volcánicos discretos agrupados en épocas volcánicas (Manville *et al.* 2009), almacenándose en las cabeceras de los sistemas de transferencia fluvio-eólicos, desde donde se retransporta hacia las cubetas sedimentarias (ej. Kataoka y Nakajo 2002). Rossignol *et al.* (2019) abordan el problema del tiempo de almacenaje-retrabajo a partir de sucesivas dataciones en una misma columna sedimentaria, lo cual permite identificar patrones verticales asociados a actividad volcánica sin-sedimentaria en zonas distales. El criterio es simple, conociendo las edades sucesivas y su incertidumbre, se analiza la tendencia vertical (temporal); capas que se vuelven más jóvenes en la vertical y no superponen sus edades, cumplen con el criterio de superposición de estratos y se vinculan a episodios o épocas eruptivas discretas. Otros patrones pueden asociarse a retrabajo, secuencias de destechado, mezcla de material o erodabilidad relativa. Esta metodología es poco común ya que en general los estudios geocronológicos en sucesiones volcaniclásticas se asocian a dataciones puntuales que permiten ampliar las zonas analizadas, como ser las recientes calibraciones cronoestratigráficas de las cuencas patagónicas del Golfo San Jorge (Suarez *et al.* 2014; Genise *et al.* 2020) y Cañadón Asfalto (Cúneo *et al.* 2013; Hauser *et al.* 2017; Krause *et al.* 2020; Fantasía *et al.* 2021). Esta contribución aborda de manera inédita para la CGSJ la datación múltiple de una columna volcaniclástica continental de ~1650 m, definiendo un caso de estudio de relevancia local e internacional. Los resultados arrojan luz sobre los alcances y limitaciones que deben tenerse en cuenta al momento de calibrar la cronoestratigrafía, y su potencial efecto en el entendimiento de la evolución de sistemas petroleros volcaniclásticos.

CASO DE ESTUDIO: EL CICLO CHUBUTIANO DE LA CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

Marco tectonoestratigráfico

La CGSJ es una de las mayores productoras de hidrocarburos de Argentina, avalada por más de 100 años de historia y más de 37.000 pozos perforados (Sylwan *et al.* 2011; Hechem 2015). Desde el punto de vista geodinámico, es una cuenca intracratónica ubicada en la Patagonia Extraandina, cuyos límites son al norte la cuenca de Cañadón Asfalto, al oeste la Precordillera Patagónica, al sur la región del Deseado y al este la plataforma continental (Allard *et al.* 2021). Su columna estratigráfica supera los 8000 m en el centro de cuenca, caracterizada por un basamento económico conformado por volcanitas jurásicas sobre el cual se desarrollan los depósitos del Ciclo Neocomiano (Kimmeridgiano-Hauteriviano) y del Ciclo Chubutiano (Barremiano-Maastrichtiano), a partir de los cuales se definen los dos sistemas petroleros principales, D-129-Bajo Barreal (!) y A.A. Bandera-Bajo Barreal (!) (Figari *et al.* 2021). El sector on-shore se subdivide en base a la macroarquitectura estructural en tres dominios extensionales que definen el Flanco Norte, Centro de Cuenca y Flanco Sur. Estas zonas pasan en transición hacia el oeste a la Faja Plegada de San Bernardo (FPSB) caracterizada por fallas NNO-SSE a NNE-SSO vinculadas a inversión tectónica positiva que definen pliegues ciegos o aflorados. El sector más occidental de la cuenca se denomina Flanco Oeste o Subcuenca Río Mayo, caracterizado por fallas normales NO-SE, NE-SO y E-O sin evidencias de inversión tectónica o con bajo grado de inversión (Fig. 2.a).

La FPSB es una ventana al subsuelo que ha provisto de análogos de afloramiento desde los inicios de la exploración petrolera (Hechem 2015; Allard *et al.* 2021). En particular, la morfoestructura del Codo del río Senguerr (CDS) expone una de las columnas estratigráficas del ciclo Chubutiano más continuas y completas, la cual alcanza un espesor total de ~1650 m. Los 150 m basales expuestos en el núcleo del anticlinal pertenecen a la Fm. Pozo D-129 y corresponden a niveles lacustres y deltaicos (Paredes *et al.* 2014). Suprayacen, en orden decreciente de edad, niveles fluviales con macroarquitectura de bajo apilamiento asociados a la Fm. Castillo (~950), Bajo Barreal inferior (~300) y Bajo Barreal superior (~250). Estos afloramientos han sido objeto de numerosos estudios estratigráficos y sedimentológicos que permitieron ajustar el conocimiento de sucesiones análogas productoras de hidrocarburos (Vinda 1928; Feruglio 1949; Teruggi y Rossetto 1963; Lesta y Ferello 1972; Sciutto 1981; Meconi 1990; Bridge *et al.* 2000; Paredes *et al.* 2014, 2015, 2016). Los niveles estratigráficos del limbo dorsal del CDS están en concordancia y se proyectan a la margen sur del río Senguerr, donde pasan en transición y concordancia a los niveles basales del estratotipo compuesto de la Fm. Lago Colhué Huapi (Casal *et al.* 2015). Al norte del CDS continúa la columna del Gr. Chubut con la Fm. Laguna Palacios caracterizada por un dominio de paleosuelos y un desarrollo restringido a la FPSB (Sciutto 1981; Genise *et al.* 2002).

Desde el punto de vista estructural, el CDS se define como un anticlinal asimétrico buzante al sur con flanco abrupto al oeste con inclinaciones de hasta 70° y suave al este con valores máximos de 40° grados. El desarrollo de valles sobredimensionados sustenta un crecimiento cenozoico hacia el sur por migración del tipo de la estructura (Allard *et al.* 2021). El pliegue es angosto respecto de otros anticlinales de inversión de la FPSB, sugiriendo el desarrollo de una geometría tipo pop-up growth fold, comparable con otras estructuras paradigmáticas de la FPSB como los anticlinales de la Sierra Silva y Perales (Allard *et al.* 2020).

El conocimiento tectónico de la región occidental de la CGSJ no se corresponde con los avances estratigráficos, ya que actualmente no hay consenso acerca del marco estructural-tectónico vinculado a la depositación del Ciclo Chubutiano. De manera simplificada, la visión tradicional asocia estos depósitos a reactivación extensional y subsidencia termal, mientras que recientes estudios retoman un contexto compresivo a partir del Aptiano-Albiano (ver síntesis en Allard *et al.* 2021). Esta situación condiciona el modelado del sistema petrolero en el sector occidental de la CGSJ, lo cual se amplifica ante la incertidumbre de edades en algunos intervalos del registro cretácico.

Esquemas cronoestratigráficos inmaduros

El conocimiento cronoestratigráfico de la CGSJ es relativamente pobre respecto de otras cuencas sedimentarias patagónicas (ej. cuenca Austral, cuenca Neuquina), situación fomentada por los escasos registros fósiles con importancia bioestratigráfica a lo largo de la columna chubutiana. En este contexto general, Vallati *et al.* (2021) sintetizan la importancia y sistemática de la flora fósil y palinofloras de las distintas unidades cretácicas de la CGSJ. Al tope de la Fm. Pozo D-129 se le asigna una edad Barremiano tardío/Aptiano en base a palinomorfos, ostrácodos y carófitos recuperados de los niveles cuspidales expuestos en el núcleo del anticlinal de Sierra Silva (Hechem *et al.* 1987; Musacchio 1989; Vallati 2013; Carignano *et al.* 2017), edad que se le otorga a la Fm. Matasiete por engranaje lateral (Sciutto 1981; Hechem *et al.* 1989; Hechem y Strelkov 2002; Paredes *et al.* 2007, 2014; Figari y García 2018). Suprayace la Fm. Castillo sin fósiles que permitan su calibración bioestratigráfica, la cual da paso en transición a la Fm. Bajo Barreal que presenta abundantes fósiles de dinosaurios asignados al intervalo Cenomaniano temprano Turoniano tardío (ver síntesis en Casal *et al.* 2021). Recientes estudios de subsuelo realizados por Perez Loinaze *et al.* (2021) en el Flanco Sur documentan palinomorfos que definen una edad Turoniana - Coniaciana para el tope de la Fm. Cañadón Seco, equivalente de subsuelo de la Fm. Bajo Barreal. Un contexto particular arroja la Formación Lago Colhué Huapi, la cual ha sido muy fértil en microfósiles/polen/esporas/dinosaurios que acotan su edad cuspidal al Maastrichtiano (Vallati *et al.* 2021), mientras que su base se asigna al Coniaciano en base a restos de dinosaurios (Casal *et al.* 2015, 2021). Este esquema incompleto de edades bioestratigráficas del Grupo Chubut

se complementa con escasas edades radimétricas obtenidas en afloramientos de la FPSB. Bridge *et al.* (2000) aportaron dataciones Ar/Ar en distintas localidades de esta región, otorgándole a la Fm. Castillo una edad de 97,9 Ma (Codo del Senguerr), mientras que a la Fm. Bajo Barreal le asignaron edades de 91 Ma (Cerro Ballena), 94,2 Ma (Codo del río Senguerr) y 95,8 Ma (Cerro Colorado de Galveniz), y a la Fm. Laguna Palacios 85,1 Ma (Cerro Colorado de Galveniz). Estas edades se mantuvieron como referencia hasta las dataciones U/Pb del estudio de Suarez *et al.* (2014), quienes asignaron una edad de 99,3 Ma para la Fm. Bajo Barreal en el Codo del río Senguerr, y propusieron una edad sustancialmente más antigua para la Fm. Laguna Palacios de 96 Ma y 97,6 Ma en el Cerro Colorado de Galveniz. Estas edades de alta precisión motivaron múltiples propuestas cronoestratigráficas/tectonoestratigráficas con hiatos del Cretácico Superior en la FPSB y Centro de Cuenca con valores de hasta 20 Ma, utilizados para argumentar y calibrar eventos mayores de modelos geodinámicos (Gianni *et al.* 2015; Navarrete *et al.* 2015, entre otros). Estos hiatos no se corresponden con la ausencia de discordancias o elementos estratigráficos que indiquen superficies de erosión - no deposición de esas magnitudes (Allard *et al.* 2021). Finalmente, recientes estudios realizados por Genise *et al.* (2020) aportaron edades Ar/Ar en niveles tobáceos de la Fm. Castillo en el cañadón Tronador y cerro Colorado de Galveniz, con valores de 100,14 Ma y 100,13 Ma respectivamente. Se define así un escenario cronoestratigráfico inmaduro y discrepante que motivó el presente estudio enfocado en: i) realizar dataciones U/Pb en distintos niveles estratigráficos de la columna Chubutiana expuesta en el CDS, a fin de calibrar las edades cronoestratigráficas y ii) evaluar la (in)certidumbre estratigráfica de edades U/Pb en sucesiones volcánicas distales.

METODOLOGÍAS

El estudio realizado analiza las edades de cinco muestras distribuidas en el total de la columna chubutiana aflorada en el CDS, con un espaciado definido con criterio estratigráfico para evaluar las edades de todas las unidades (Figs. 2.b,c,d,e). Cabe destacar que esta morfoestructura es la más austral de la sierra de San Bernardo y limita con yacimientos de la FPSB aportando niveles guía temporales extraordinarios para la calibración de subsuelo (Fig. 2.f). El objetivo del muestreo en las diferentes unidades litoestratigráficas fueron niveles de tobas de caída y/o que presenten el menor retrabajo posible. Las tobas analizadas están enmarcadas en antecedentes estratigráficos de alta resolución de las formaciones Pozo D-129 (Paredes *et al.* 2014), Castillo (Paredes *et al.* 2015) y Bajo Barreal (Paredes *et al.* 2016) (Figs. 3.a,b, 4). Las muestras se obtuvieron de estratos simples o compuestos, utilizando niveles individuales con potencias inferiores a 0,6 m, macizos o con laminación paralela. De particular interés fueron los niveles que presentaron lapilli acrecional ya que sustentan la caída directa de ceniza volcánica (Schumacher y Schmincke 1995). Con el objetivo de reducir la señal de retrabajo volcánicoclástico se seleccionaron niveles

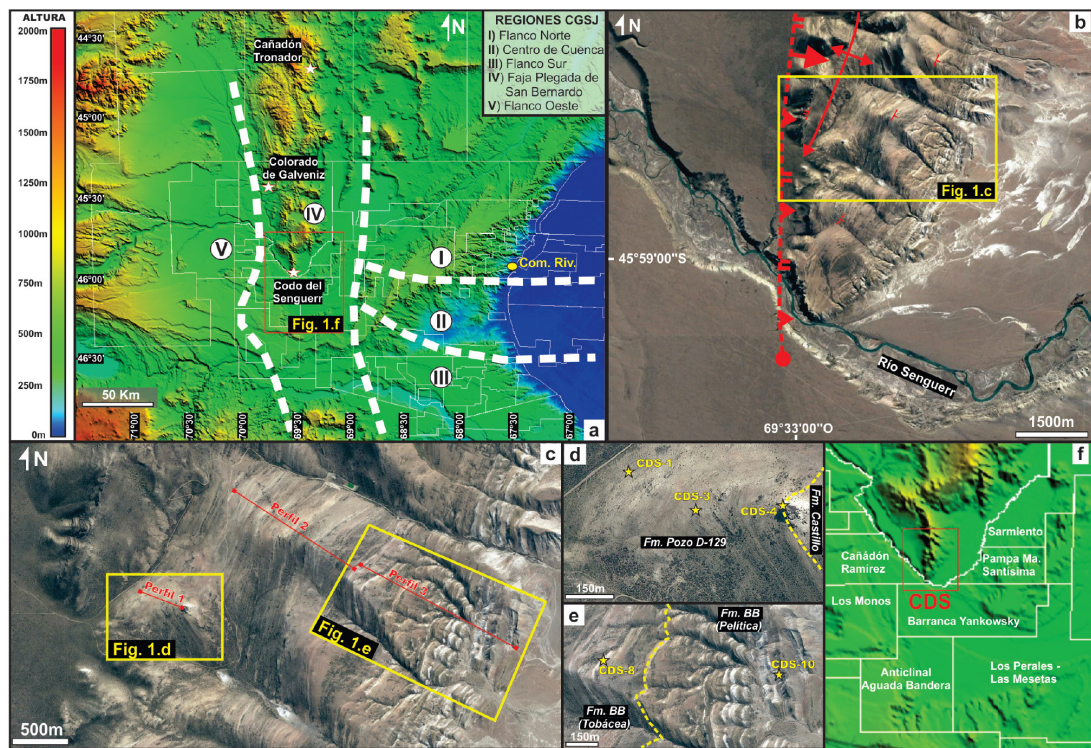


Figura 2. a) Imagen radar de la cuenca del Golfo San Jorge indicando sus regiones estructurales (basado en Figari *et al.*, 1999) y los límites de los yacimientos petroleros. b) Imagen satelital del anticlinal Codo del río Senguerr. c, d, e) Detalles de la ubicación de las muestras datadas. f) Detalle de imagen radar indicando los yacimientos petroleros co-lindantes a la morfoestructura.

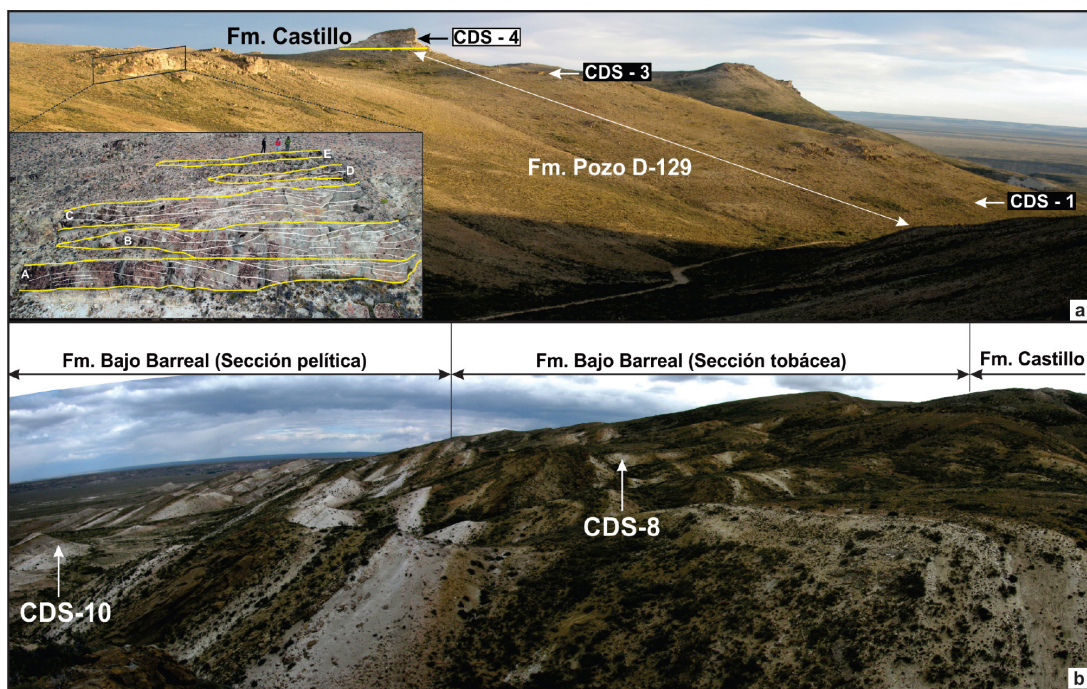


Figura 3. a) Núcleo del anticlinal del Codo del río Senguerr con afloramientos de las formaciones Pozo D-129 y Castillo. Se incluye un detalle del complejo canal-barra de los deltas volcanoclásticos de la Fm. Pozo D-129, las personas de escala miden 1,8 m. Ubicación de las muestras CDS-1, CDS-3 y CDS-4. b) Vista panorámica al sur del flanco oriental del anticlinal del Codo del río Senguerr, donde se observa la parte cuspidal de la Fm. Castillo y la Fm. Bajo Barreal (Secciones Tobácea y Pelítica). Ubicación de las muestras CDS-8 y CDS-10. Notar la concordancia de los estratos.

sin evidencias de estratificación entrecruzada generada por flujos tractivos diluidos, ni fábricas con clastos flotantes que sugieran flujos densos o hiperconcentrados (Smith y Lowe 1991).

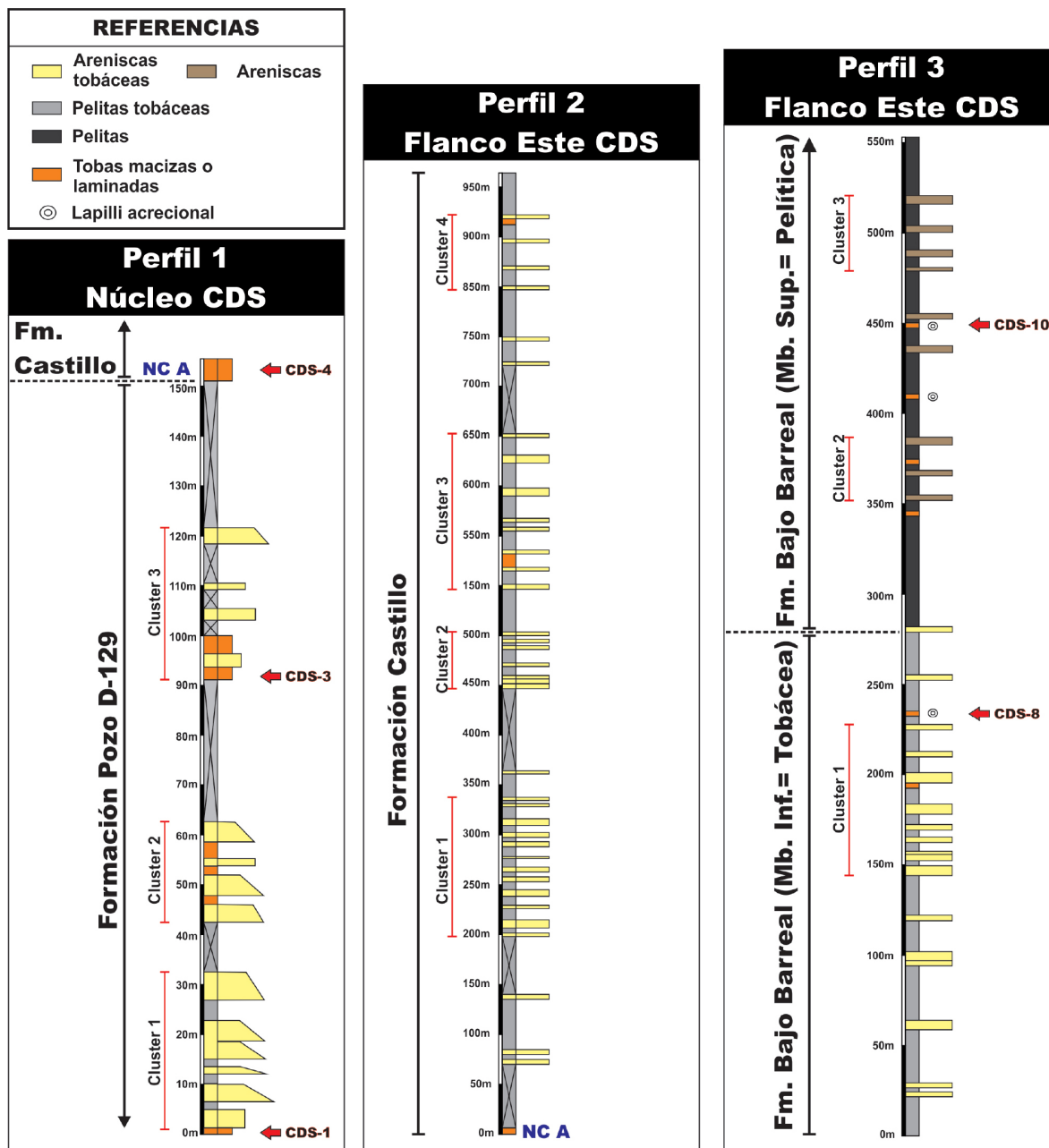


Figura 4. Perfiles estratigráficos simplificados del Grupo Chubut aflorado en el anticlinal del Codo del río Senguerr, indicando las muestras datadas. Perfiles modificados de Paredes *et al.* (2014, 2015 y 2016). Se indican los sectores con clusters de cuerpos arenosos (deltaicos o fluviales). Notar el bajo apilamiento de toda la sucesión volcanoclástica.

Los análisis geocronológicos se realizaron en el laboratorio LA.TE.ANDES, desde la obtención de circones en las muestras de afloramiento hasta la estadística para determinar las edades U/Pb. Los concentrados de circones fueron obtenidos a partir de aproximadamente

2 Kg de roca, utilizando técnicas gravimétricas, magnéticas y ópticas en el laboratorio. Los concentrados de circones fueron purificados de minerales pesados por separación manual (*hand picking*) bajo lupa binocular. Los circones seleccionados fueron montados y la probeta fue pulida a espejo mediante desbaste y pulido con pastas diamantadas.

Los análisis U/Pb se realizaron con una combinación instrumental de LA-ICP-MS (*Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), el cual consiste en un láser de ablación Resolution 183 nm fabricado por Australian Scientific Instruments y un ICP-MS triple cuadrupolo modelo 8900 fabricado por Agilent Technologies. Esta técnica permite realizar análisis isotópicos puntuales en granos individuales de circones. El diámetro de spot se seleccionó de acuerdo al tamaño y la homogeneidad de los circones, pudiendo variar entre 20, 24 o 30 μm . Los detalles sobre los protocolos de sintonización, obtención de concentraciones elementales, material de referencia, análisis de precisión y exactitud a partir de testigos están desarrollados en el informe Geocronología U/PB CGSJ (LATE ANDES 2020).

La secuencia analítica comprendió 30 segundos de mediciones de fondo (sin ablación), seguidas de 30 segundos de ablación y 7 segundos de lavado (láser apagado). Se monitorearon las siguientes masas mediante ICP-MS: 89 (Y, 10 ms), 96 (Zr, 10 ms), 111 (Cd, 10 ms), 131 (La, 10 ms), 206 (Pb, 50 ms), 207 (Pb, 50 ms), 208 (Pb, 50 ms), 232 (Th, 40 ms), 235 (U, 50 ms) y 238 (U, 40ms). Para la reducción de los datos se utilizó el Software LADR 1.1.2.0 y el procesamiento posterior se realizó con Isoplot 4.15 (K.R. Ludwig, 2008). Las edades obtenidas se referenciaron respecto de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional v.2022/02 (ICS 2022).

RESULTADOS

Muestra CDS-1

Caracterización. Esta muestra corresponde a los primeros niveles aflorados de la Fm. Pozo D-129 en el núcleo del CDS, ubicada 105 m por debajo del tope de la unidad (Figs. 3.a, 4). El estrato muestreado tiene una potencia máxima de 46 cm y está constituido por limolitas tobáceas finas y macizas (Figs. 5.a,b).

El análisis geocronológico de esta muestra se realizó a partir de la medición de 82 puntos (Figs. 5.c,d,e). La distribución de edades muestra un diagrama de probabilidad unimodal con un pico de edad principal en 112,9 Ma (Albiano temprano) (Fig. 5.c), con una edad promedio de $113,40 \pm 1$ Ma (límite Aptiano-Albiano) (Fig. 5.e) y una edad del circones detrítico más antiguo de 422 Ma (Silúrico tardío). La edad más moderna de los circones de concordia es de $103,16 \pm 5,6$ Ma (Albiano tardío).

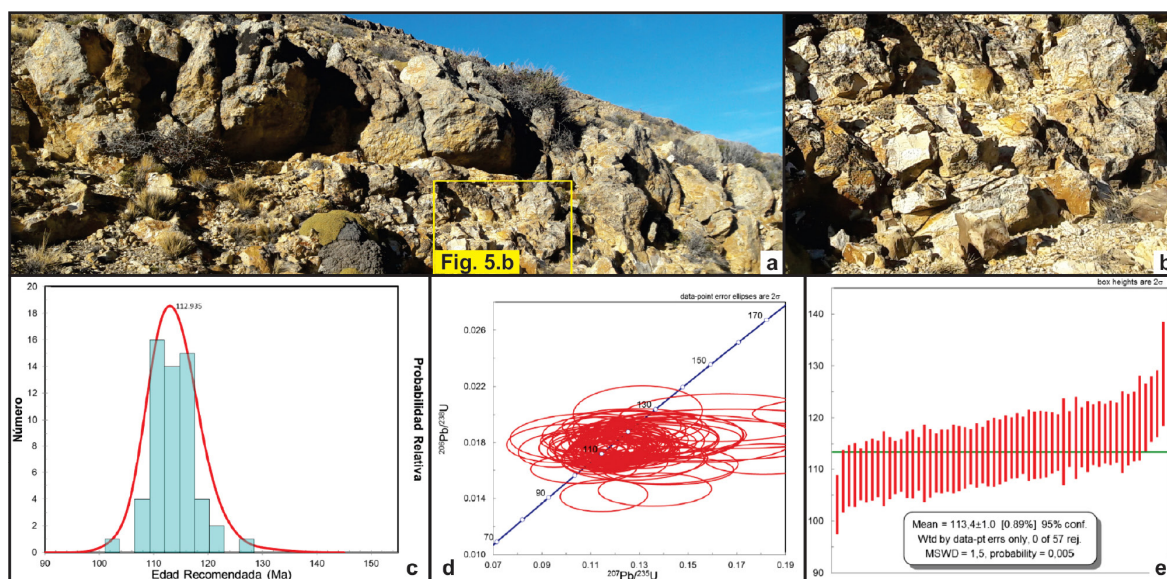


Figura 5. a, b) Nivel muestreado en la base del perfil de la Fm. Pozo D-129 (CDS-1). Suprayacen areniscas tobáceas con estratificación entrecruzada asociadas a depósitos de frente deltaico distal volcanoclástico. Coordenada Lat. 45°57'39,82"S; Long. 69°33'30,29"O. c) Diagrama de probabilidad de densidad de edades recomendadas en circones, se observa el pico principal en 112,9 Ma. d) Diagrama de concordia de Wetherill de los datos obtenidos en circones. Elipses de error de dos sigmas, se grafica la totalidad de los datos, para la gráfica solo se descarto el dato de 422 Ma. e) Datos obtenidos del pico principal con valor promedio en $113,4 \pm 1$ Ma. Datos geocronológicos tomados del informe de LA.TE.ANDES (2020).

Interpretación. La litofacies se vincula a la depositación volcanoclástica en condiciones subácuas en un contexto sublitoral lacustre (Paredes *et al.*, 2014) o de frente deltaico distal. Estas características y contexto sedimentológico definen un grado de retrabajo variable. Los antecedentes de edades bioestratigráficas de la Formación Pozo D-129 asignan una edad Aptiana para el tope de la formación en afloramiento, en consecuencia la edad Albiano obtenida en la muestra CDS-1 es más joven a lo considerado en los esquemas cronoestratigráficos previos. El registro de un circón silúrico, así como el desfase entre la edad principal y la obtenida del circón más joven, sugieren mezclas en los tipos circones datados.

Muestra CDS-3

Caracterización. Esta muestra se ubica 60 m por debajo del tope de la Fm. Pozo D-129, ubicada por encima del segundo ciclo somerizante definido por areniscas deltaicas volcanoclásticas (Figs. 3.a, 4). El nivel muestreado tiene 35 cm de potencia máxima y está compuesto por tobas blancas, macizas, con posibles lapillies acrecionales (Figs. 6.a,b). El estrato analizado constituye la base de un estrato compuesto definido por el apilamiento de al menos 5 niveles similares que le otorgan un espesor total de 1,6 m.

El análisis geocronológico de esta muestra se realizó a partir de la medición de 84 puntos (Figs. 6.c,d,e). La distribución de edades muestra un diagrama de probabilidad bimodal con una

moda principal en 112,17 Ma (Fig. 6.c), una edad promedio de $113,50 \pm 1,7$ Ma (límite Aptiano-Albiano) (Fig. 6.e) y una edad del circón detrítico más antigua de 335 Ma (Missisippiano Medio, Carbonífero). La edad más moderna obtenida de los circones de concordia es $103,3 \pm 3,8$ Ma (Albiano tardío).

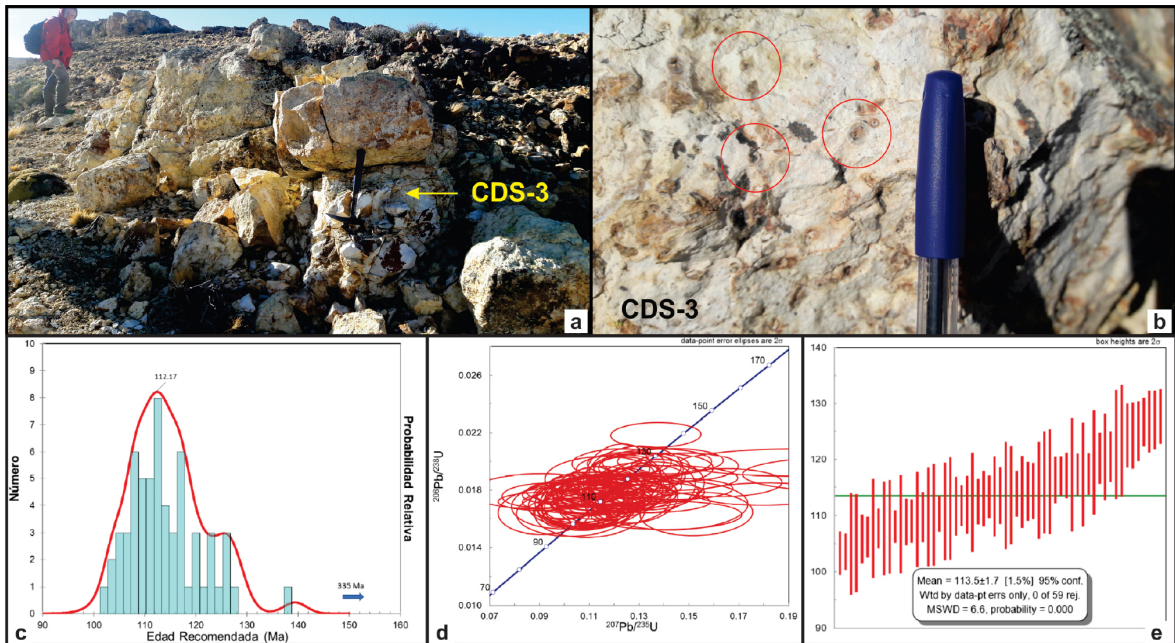


Figura 6. a) Nivel muestreado en la parte alta del perfil de la Fm. Pozo D-129 (CDS-3). Coordenada Lat. $45^{\circ}57'43,54''$ S; Long. $69^{\circ}33'20,84''$ O. b) Detalle del estrato tobáceo, en círculos rojos se indican posibles chalazolitas o lapillies acrecionales. c) Diagrama de probabilidad de densidad de edades recomendadas en circones, el pico principal está en 112,17 Ma. d) Diagrama de concordia Wetherill de datos de circones. Elipses de error de dos sigmas, se utilizaron todos los datos. e) Datos obtenidos del pico principal con valor promedio en $113,5 \pm 1,7$ Ma. Datos geocronológicos tomados del informe de LA.TE.ANDES (2020).

Interpretación. Las características litofaciales y el contexto estratigráfico permiten interpretar una depositación en condiciones subácuas en un ambiente deltaico volcániclastico (Paredes *et al.*, 2014). Los lapillies acrecionales indican volcanismo sin-sedimentario pero no son diagnósticos de condiciones subáreas o subácuas, ya que pueden preservarse en ambos escenarios (McPhie *et al.* 2005). La potencia del estrato compuesto y de los niveles individuales sustenta un grado de retrabajo variable de la ceniza volcánica (ver Discusión). Al igual que la muestra CDS-1, las edades albianas obtenidas son sustancialmente más jóvenes a lo que definen los esquemas cronoestratigráficos tradicionales. El diagrama de probabilidad de edades muestra una distribución bimodal distinta de la muestra CDS-1, con una moda principal en 112,17 Ma (cerca al límite Aptiano-Albiano) y una secundaria en 124-126 Ma. (Barremiano) (Figs. 6.c). Este patrón evidencia mezcla de circones volcániclasticos. Al mismo tiempo, la edad promedio de la muestra CDS-3 es levemente mayor que la de la CDS-1, planteando una inconsistencia estratigráfica por su posición en la columna sedimentaria, lo cual también está acorde a mezcla

de circones retrabajados (Rossingnol *et al.* 2019). El registro de un circón carbonífero sugiere mezclas en los tipos circones datados.

Muestra CDS-4

Caracterización. Esta muestra corresponde a tobas blancas-amarillentas macizas (Fig. 7.a) obtenidas de un estrato de 40 cm ubicado en la base del nivel guía asignado por Paredes *et al.* (2014, 2015) a la base de la Fm. Castillo (Figs. 3.a, 4). Este estrato de referencia tiene un espesor máximo que alcanza 11 m y está constituido por al menos ocho historias de relleno, conformadas por paquetes de espesor variable entre 0,3 -1,3 m (Fig. 7.b). Su granulometría fina y composición tobácea es homogénea en todo el intervalo, con sectores que desarrollan laminación paralela o variable grado de bioturbación. Su geometría interna es compleja, con abundantes superficies de compensación plano convexas, superficies levemente inclinadas y escasas superficies erosivas, sustentando una sucesión predominantemente agradante con intervalos de acreción oblicua (Fig. 7.b).

El análisis geocronológico de esta muestra se realizó a partir de la medición de 88 puntos (Figs. 7.c,d,e). La distribución de edades muestra un diagrama de probabilidad unimodal con un pico de 106,8 Ma (Fig. 7.c) y una edad promedio de $107,50 \pm 1,4$ Ma (Albiano medio) (Fig. 7.e). El circón más joven presenta una edad de $98,3 \pm 9,1$ Ma (Cenomaniano basal).

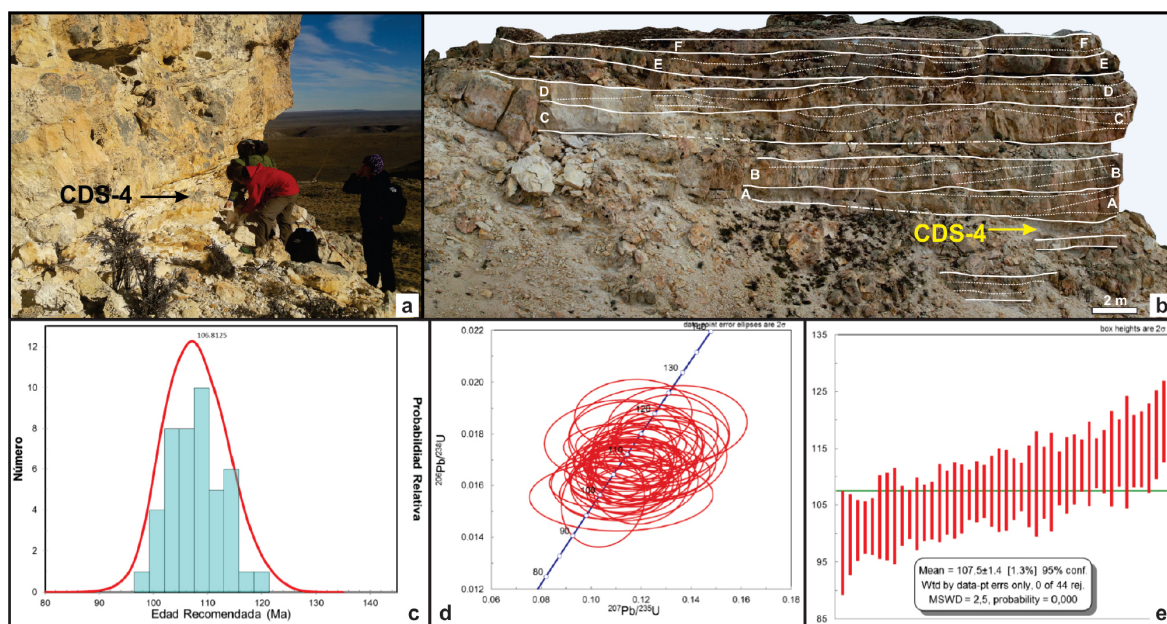


Figura 7. Niveles muestreados asignables a la base de la Fm. Castillo (CDS-4). Coordenada Lat. 45°57'42,91"S; Long. 69°33'10,16"O. a) Foto de afloramiento. b) Modelo digital de afloramiento mostrando la arquitectura estratigráfica. Las líneas sólidas indican los límites de los cuerpos mayores y las punteadas la estructuración interna. Notar las geometrías lobuladas y canalizadas. c) Diagrama de probabilidad de densidad de edades recomendadas en circones, el pico principal está en 106,8 Ma. d) Diagrama de concordia Wetherill de datos en circones. Elipses de error de dos sigmas y datos discordantes no mayor al 10%. e) Datos obtenidos del pico principal con valor promedio de $107,5 \pm 1,4$, datos discordantes no mayor al 10%. Datos geocronológicos tomados del informe de LA.TE.ANDES (2020).

Interpretación. Siguiendo el esquema litoestratigráfico donde el nivel datado se asocia al contacto entre las formaciones Castillo y Pozo D-129, es crítico definir una edad próxima a la TDA para calibrar los límites formacionales. En este sentido, la edad promedio está acorde con la edad propuesta para la Fm. Castillo en distintos esquemas regionales (ver Introducción), sin embargo, la edad del cristal más joven modificaría sustancialmente la base de dicha unidad, asignándola al Cenomaniano basal. Esta edad tiene un gran impacto en la estratigrafía regional ya que reasigna la base de la formación al Cretácico Superior temprano. El estrato compuesto de donde se obtuvo la muestra fue interpretado como niveles lagunares por Paredes *et al.* (2015), pero la microarquitectura no permite descartar depósitos deltaicos dominados por ceniza (hiperpicnitas?), en cualquier caso el grado de retrabajo sería variable favoreciendo la mezcla de circones. Este patrón no se corresponde con la ausencia de circones detríticos Paleozoicos que si se identificaron en los niveles deltaicos infrayacentes, lo cual podría asociarse a una dilución de los mismos por la sobrecarga volcániclaística expuesta en la arquitectura estratigráfica tobácea.

Muestra CDS-8

Caracterización. Esta muestra corresponde a la parte alta del Miembro Inferior de la Fm. Bajo Barreal (Sección Tobácea), la misma se obtuvo de un nivel tobáceo ubicado a 60 m

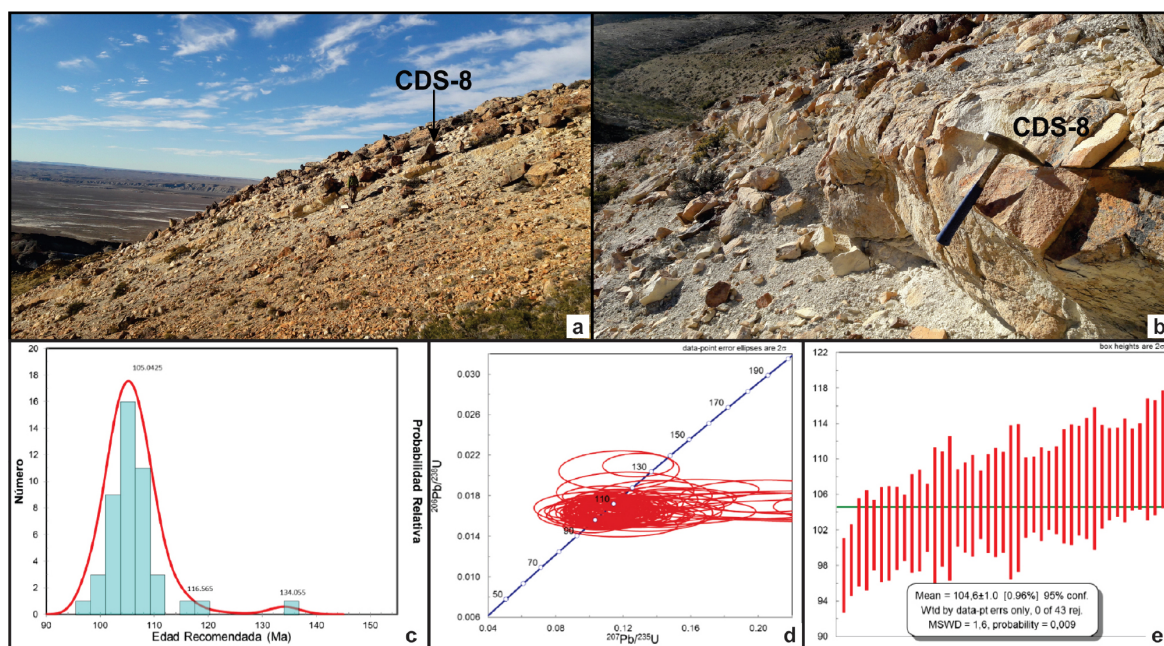


Figura 8. a) Panorámica del nivel tobáceo muestreado en la Sección tobácea (Fm. Bajo Barreal). b) Detalle del estrato correspondiente a la muestra CDS-8. Coordenada Lat. 45°57'37.37"S; Long. 69°32'3.16"O. c) Diagrama de probabilidad de densidad de edades recomendadas en circones. Se observa el pico principal en 105 Ma. d) Diagrama de concordia Wetherill de datos obtenidos en circones detríticos. Elipses de error de dos sigmas, se grafica la totalidad de los datos. e) Datos obtenidos del pico principal con valor promedio de $104,6 \pm 1$ Ma. Datos geocronológicos tomados del informe de LA.TE.ANDES (2020).

por debajo de la base del Miembro Superior de la Fm. Bajo Barreal (Sección Pelítica) (Figs. 3.b, 4). El nivel muestreado es la base de un estrato compuesto de 1,5 m de potencia, con geometría tabular definida por paquetes levemente lobulados y lateralmente compensados (Figs. 8.a,b). La roca analizada es una toba blanca de 0,6 cm, maciza, con cristaloclastos de biotita.

El análisis geocronológico de esta muestra se realizó a partir de la medición de 75 puntos (Figs. 8.c,d,e). El diagrama de probabilidad unimodal muestra un pico de 105,04 Ma (Fig. 8.c), una edad promedio de $104,6 \pm 1$ Ma (Albiano medio) y un cristal de 134 Ma (Valanginiano) (Fig. 8.e). La edad más joven informada es de $96,8 \pm 4,2$ Ma. (Cenomaniano).

Interpretación. La Sección Tobácea de la Fm. Bajo Barreal es la transición entre una sucesión fluvial dominada por el stress volcánico-lástico (Fm. Castillo) y otra con eventos discretos de aporte volcánico-lástico (Sección Pelítica, Fm. Bajo Barreal) (Paredes *et al.* 2015, 2016). En este contexto, la muestra datada se asociaría al estadio final del climax volcánico-lástico-piroclástico, donde la edad cenomaniana del circón más joven es comparable con la edad más moderna de la actividad plutónica más intensa en el magmatismo mesozoico del Batolito Patagónico (Rolando *et al.* 2002). La potencia y características internas de este nivel sugieren procesos genéticos contrastantes. Por un lado, la abundancia de cristaloclastos de biotita y posibles lapillies acrecionales se asocian al registro de una toba de caída, mientras que el espesor del nivel y las superficies internas documentan el retrabajo y resedimentación del material volcánico-lástico en un subambiente de planicie de inundación fluvial proximal. Estas últimas características permiten inferir una subestimación de edad debido a la mezcla de circones.

Muestra CDS-10

Caracterización. Esta muestra se ubica 450 m por encima de la base del Miembro Superior de la Fm. Bajo Barreal (Sección Pelítica) (Figs. 3.b, 4, 9.a). La roca muestreada corresponde a un estrato tobáceo de 0,6 m de potencia, internamente macizo o con laminación paralela, y geometría externa tabular con base y techo netos (Fig. 9.b). Su posición estratigráfica en el límite oriental del limbo aflorado del CDS está próxima al inicio de fangolitas rojizas asignables a la base de la Fm. Lago Colhué Huapi, por lo cual se interpreta una posición cercana al tope de la Sección Pelítica (Miembro Superior de la Fm. Bajo Barreal).

El análisis geocronológico de esta muestra se realizó a partir de la medición de 80 puntos (Figs. 9.c,d,e). La distribución estadística de edades define un diagrama de probabilidad unimodal con pico de 97 Ma (Fig. 9.c), una edad promedio de $96,9 \pm 1,3$ Ma (Cenomaniano Medio) y un cristal de 167 Ma (Jurásico medio)(Fig. 9.e), mientras que el circón datado más joven presenta una edad de $88,4 \pm 2,4$ Ma (Coniaciano).

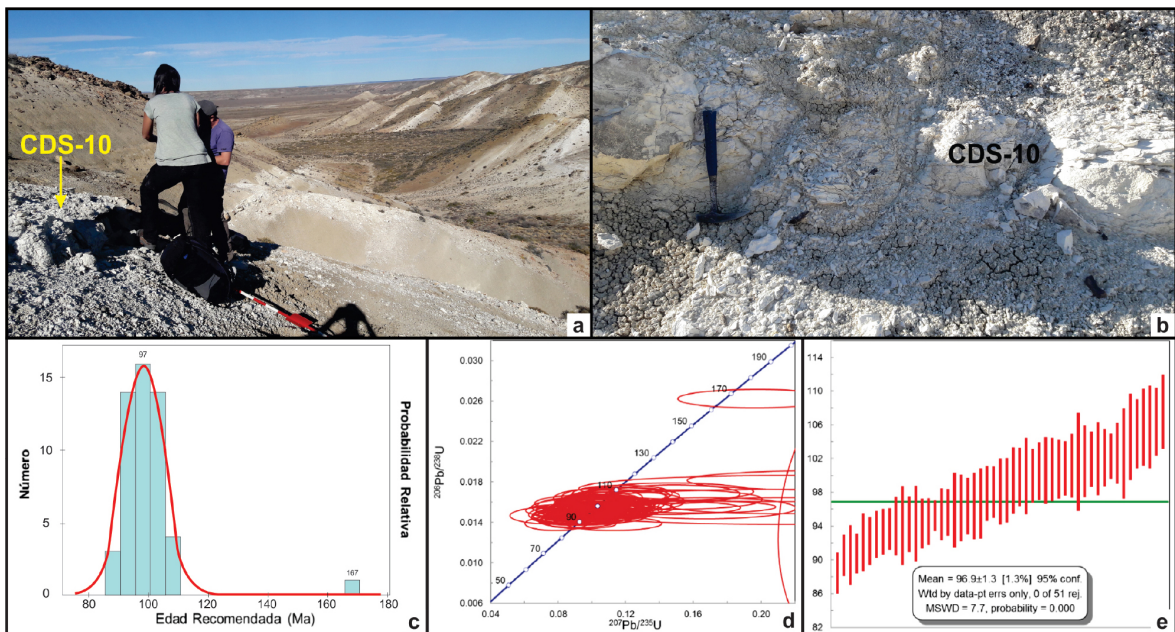


Figura 9. a) Nivel tobáceo muestreado en la Sección Pelítica (Fm. Bajo Barreal). Coordenada Lat. $45^{\circ}57'52.70''\text{S}$; Long. $69^{\circ}31'16.03''\text{O}$. b) Detalle del estrato donde se reconoce la laminación paralela. c) Diagrama de probabilidad de densidad de edades recomendadas en circones. Se observa el pico principal en 97 Ma. d) Diagrama de concordia de Wetherill de los datos obtenidos en circones detríticos. Elipses de error de dos sigmas. e) Datos obtenidos del pico principal con un valor promedio de $96,9 \pm 1,3$ Ma. Datos geocronológicos tomados del informe de LA.TE.ANDES (2020).

Interpretación. El nivel datado está contenido en depósitos de fangolitas grisáceas vinculadas a la planicie de inundación epiclástica de cuerpos fluviales multiepisódicos arenosos a gravo-arenosos (Paredes *et al.* 2016). La posición estratigráfica de la muestra permite una evaluación robusta de la edad cuspidal de la Fm. Bajo Barreal. Las características de campo sustentan un nivel tobáceo con laminación vinculada a decantación en un cuerpo de agua de escasa profundidad estresado por la caída de ceniza y/o el aporte volcániclastico fluvial y/o eólico. La diferencia entre la edad promedio y la edad más joven sugiere un registro volcániclastico con retrabajo. Este contexto se valida con los circones del Cretácico Inferior que no se tuvieron en cuenta para la edad promedio. La edad principal de $96,9 \pm 1,3$ Ma difiere de la obtenida por Suarez *et al.* (2014) de $99,3 \pm 0,7$ Ma (Cenomaniano) en el mismo intervalo estratigráfico (Fig. 3 de Suarez *et al.* 2014). Al mismo tiempo, la edad más joven de $88,4 \pm 2,4$ Ma (Coniaciano) contrasta considerablemente con los datos más jóvenes que mencionan estos autores con edades de $91,7 \pm 1,4$ Ma y $93,1 \pm 1,2$ Ma. (Turoniano). Estas diferencias demuestran la variabilidad de edades U/Pb en tobas equivalentes y cuestionan el sincronismo entre la edad de los niveles tobáceos y la sedimentación fluvial.

DISCUSIÓN

Calibración cronoestratigráfica del Grupo Chubut en la FPSB

El caso de estudio expone la importancia de realizar múltiples dataciones en depósitos tobáceos vinculados a sucesiones volcanoclásticas distales. Las muestras analizadas se obtuvieron de estratos dominados por ceniza volcánica depositada en un paleoambiente lacustre (CDS-1 y CDS-3) o en planicies de inundación fluviales (CDS-4, CDS-8, CDS-10). Las edades obtenidas muestran importantes desfases entre las edades promedio y las de los circones más jóvenes (Fig. 10), lo que sugiere utilizar los patrones de edades para evaluar la MDA. En este sentido, las muestras CDS-3 y CDS-8 presentan histogramas bimodales con circones paleozoicos con un origen detrítico (epicristal) o volcánico sin ser cristalizados durante período eruptivo cretácico (xenocristal o heredado). Por otro lado, la moda secundaria de la muestra CDS-3 es comparable con la edad más joven de la Fm. Apeleg de $126 \pm 1,6$ Ma obtenida por Gianni *et al.* (2019). Estos cristales neocomianos podrían responder a la etapa inicial de la época volcánica del arco Andino durante el Cretácico Inferior, la cual no habría alcanzado el umbral de registro estratigráfico de tobas durante la depositación del Grupo Las Heras (Clavijo 1986; Allard *et al.* 2018). Estas señales secundarias demuestran la variabilidad de circones en tobas acumuladas en posiciones distales, donde las edades principales de todas las muestras datadas se vinculan a materiales volcanoclásticos con mezclas de circones volcánicos cristalizados en el período eruptivo Chubutiano (*sensu lato*).

Las edades obtenidas permiten redefinir algunas relaciones cronoestratigráficas referidas a la Fm. Pozo D-129. Tanto las edades principales como de los circones más jóvenes de las muestras CDS-1 y CDS-3 otorgan una edad Albiana al registro lacustre, lo cual implica i) una edad más joven de lo considerado hasta el momento para tope de la unidad y ii) un engranaje lateral con la Fm. Castillo, tal como anticiparon Foix *et al.* (2018) a partir de relaciones estratigráficas hacia el Centro de Cuenca. La ausencia de la Fm. Matasiete en el CDS contrasta con otros afloramientos de la FPSB donde la unidad se expone en contacto neto con la Fm. Castillo. En particular, en el cerro Chenques (Sierra Silva) la Fm. Matasiete se considera aptiana por relación lateral con niveles lacustres de la Fm. Pozo D-129 datados a partir de bioestratigrafía, planteando una edad albiana inferior para la Fm. Castillo en esa localidad (Fitzgerald *et al.* 1990; Paredes *et al.* 2015). Integrando estas edades de afloramiento, se interpreta un contacto diacrónico para el techo de la Fm. Pozo-D129 que se vuelve más joven hacia el sur de la FPSB (Fig. 10).

Respecto de la Fm. Castillo, la edad del circón más joven de $98,3 \pm 9,1$ Ma (CDS-4) para la base de dicha unidad contrasta con la edad Ar/Ar de 97,9 Ma propuesta para el techo de esa unidad por Bridge *et al.* (2000) en el extremo sur del CDS. Otros pliegues ubicados al norte del CDS aportaron edades Ar/Ar más antiguas para esta formación, con valores de $100,14 \pm 0,32$

Ma en el perfil de 40 m del cañadón Tronador y $100,13 \pm 0,28$ Ma en la posición basal de una sección de 120 m en el cerro Colorado de Galveniz (Genise *et al.* 2020). Más allá de la precisión de los métodos de datación empleados, estas diferencias podrían vincularse a que las edades Ar/Ar promedio se obtuvieron de niveles volcanoclásticos sin evaluar los tipos de cristales datados y/o el efecto del retransporte. En este sentido, es importante resaltar que las edades aportadas por Genise *et al.* (2020) implicarían una correlación con las edades U/Pb promedio obtenidas en el CDS para la Fm. Bajo Barreal (Fig. 10), planteando una inconsistencia estratigráfica que define edades aparentes. Analizando el contexto de macroarquitectura fluvial, se destaca que estos niveles de borde de cuenca están separados entre ellos por 100 km y ubicados a más de 65 km del CDS (Fig. 2.a), donde el espesor formacional de 950 m los supera en un orden de magnitud, indicando importantes variaciones espaciales en las condiciones aporte/acomodación. En el caso de que todas las edades surjan de cristales neovolcánicos y que los depósitos tengan un tiempo de retransporte despreciable, este escenario cronoestratigráfico implicaría una base de la Fm. Castillo que es diacrónica y se rejuvenece hacia el sur.

Un caso particular son los resultados de la muestra CDS-8, la cual tiene edades estadísticas y del circón más joven con valores relativamente próximos a los de la muestra CDS-4. El espesor estratigráfico que separa ambas muestras cuestiona estas edades debido que implican tasas de sedimentación extremadamente elevadas, lo cual podría responder a ausencia de autocristales y al dominio de antecristales o pseudo-epicristales. De ser así, los circones datados implicarían una edad aparente que justificaría una sobreestimación de la edad del estrato tobáceo. Esta situación plantea la necesidad de ampliar las dataciones en dicho intervalo.

La edad del circón más joven del tope de la Fm. Bajo Barreal (CDS-10) es de $88,4 \pm 2,4$ Ma. Esta precisión implica: i) una edad máxima de 90,8 Ma que igualmente modifica el límite superior de la unidad al Turoniano tardío, y ii) una edad mínima de 86 Ma que se descarta, ya que se solapa con la edad basal de la Fm. Lago Cohúe Huapi (Casal *et al.* 2015) y no se corresponde con la edad Turoniana-Coniaciana para niveles equivalentes del subsuelo en el Flanco Sur (Perez Loinaze *et al.* 2021).

En síntesis, comprender los patrones de edades radimétricas requiere obligadamente de integrarlos a los procesos sedimentarios que dan origen a las tobas. Los estratos volcanoclásticos analizados tienen un origen híbrido asociado al retransporte eólico/fluvial que aportó antecristales y pseudo-epicristales, los cuales se mezclaron con la ceniza depositada por caída directa de volcanismo contemporáneo que desarrolló lapillies acrecionales y suministró los autocristales. Este complejo escenario plantea el desafío de evaluar el aporte relativo de cada tipo de cristal en la estimación de la edad estratigráfica. En este sentido, se destaca la diferencia de edades obtenidas respecto de los resultados de Suarez *et al.* (2014) en niveles equivalentes de la Sección Pelítica de la Fm. Bajo Barreal (Fig. 10). Si bien las diferencias pueden ser metodológicas y/o de muestreo de los cristales, también puede plantearse que los niveles tobáceos no presenten

una distribución homogénea de autocristales. Este escenario hipotético estaría vinculado a un efecto de dilución/concentración de autocristales debido al aporte relativo de antecristales y pseudo-epicristales, el cual estaría controlado por la proximidad del sistema fluvial que aportó el material volcániclastico que construyó la planicie proximal tobácea. Corroborar esta variabilidad intraestratal de edades requiere de dataciones comparadas a nivel litofacial en intervalos centimétricos para minimizar la mezcla de poblaciones de cristales.

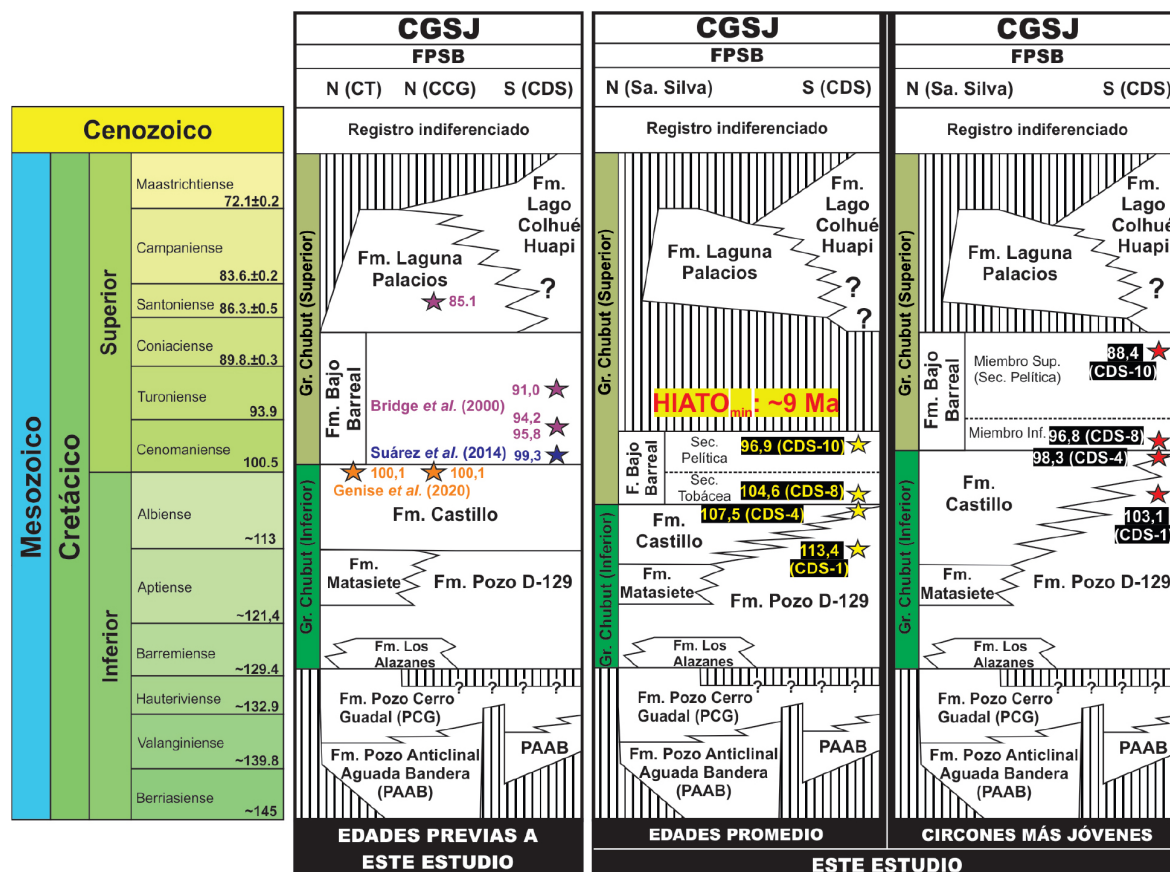


Figura 10. Propuestas cronoestratigráficas del Cretácico de la CGSJ en la FPSB. Las edades previas a este estudio no consideran el efecto del retrabajo volcániclastico, planteando inconsistencias con la arquitectura estratigráfica (modificado de Allard *et al.* 2021). Las edades U/Pb aportadas por este estudio se clasifican en edades promedio y de circones más jóvenes, estas últimas fueron las utilizadas para la calibración cronoestratigráfica. No se incluyen las desviaciones estándar de las edades. La muestra CDS-3 no se incluye en la calibración ya que presentan una posición estratigráfica suprayacente a CDS-1 pero su edad principal es más antigua, por lo cual no cumple con el principio de superposición estratigráfica. Notar el desfase de unidades entre las distintas propuestas. CT: Cañadón Tronador, CCG: Cerro Colorado de Galveniz, CDS: Codo del río Senguerr.

Controles estratigráficos en la distribución de edades

El registro analizado responde a la dinámica de sistemas volcániclasticos distales lacustre (Fm. Pozo D-129) y fluviales endorreicos (Fms. Castillo y Bajo Barreal) del Gr. Chubut en la CGSJ. Los patrones de edades sustentan la presencia de ceniza volcánica retrabajada en

todas las muestras evaluadas. Si bien este resultado era esperable en base a las características estratigráficas, los patrones de edades obtenidos permiten proponer controles up-stream vinculados al tiempo de retransporte, los cuales serían imposibles de analizar con estudios sedimentológicos tradicionales (Fig. 11). Desde el punto de vista paleogeomorfológico, un sistema fluvial transfiere agua y sedimentos desde las cabeceras hasta su nivel de base, con volúmenes que están condicionados principalmente a las dimensiones del área fuente y al clima. En sucesiones volcaniclásticas con períodos magmáticos de larga duración, el aporte de episodios magmáticos habría acumulado material de distintas edades en las áreas fuentes. En el caso de estudio, el material aportado por el volcanismo del Gr. Divisadero (Suárez *et al.* 2009; Umazano *et al.* 2009; Foix *et al.* 2020) permaneció disponible en regiones proximales y medias del arco volcánico andino cretácico. En este contexto, la orientación y dimensiones de las cabeceras fluviales controlarían la captura de autocristales y/o diferentes antecristales. Este material se habría transportado y redepositado en las planicies y canales del Grupo Chubut, con mayor eficiencia en redes de paleodrenaje integradas de grandes dimensiones ubicadas hacia el oeste. Estos sistemas implicarían: i) una mayor captura de material piroclástico y ii) canales fluviales de mayor jerarquía que tengan mayor eficiencia hidráulica para retransportar el material volcaniclástico. Los sectores de borde de cuenca con redes locales no integradas removilizarían el material de manera ineficiente depositando flujos densos como sucede en la Fm. Castillo en el extremo norte de la FPSB (Paredes *et al.* 2015). Estos niveles almacenarían mezclas de poblaciones de circones que luego podrían ser afectados por nuevos pulsos de retransporte y resedimentación aguas abajo de los tributarios fluviales. La erosión de las planicies de inundación volcaniclásticas permitiría el reciclado intracuenal aportando pseudo-epicristales, de manera similar a lo reconocido por Auchter *et al.* (2020) en el Cretácico de la cuenca Magallanes. Todos estos cristales se depositarían en niveles tobáceos subácueos o subaéreos con caída de ceniza contemporánea que aportaría los autocristales. Este esquema paleogeográfico y sedimentológico se vuelve aún más complejo con la existencia de colectores regionales o exóticos que drenen desde zonas proximales y capturen autocristales de distintos eventos magmáticos (V1, V2 y V3 de Fig. 11). Estos sistemas utilizarían corredores sedimentarios como los identificados en la Fm. Matasiete (Allard *et al.* 2015, 2017) y construirían sistemas transicionales volcaniclásticos al interactuar con la paleocosta de la Fm. Pozo D-129 (Paredes *et al.* 2014; Allard *et al.* 2017), definiendo patrones de edades muy complejos. La evolución temporal de las áreas fuentes, ya sea por procesos tectónicos y/o geomorfológicos, podría incorporar nuevas áreas de drenaje por capturas, lo cual permitiría incorporar material no disponible previamente. Otra fuente local o regional de auto- y antecristales, así como de circones detríticos, podría estar asociada a la removilización y redepositación eólica (Andersen *et al.* 2022), sumando una complejidad extra a la disponibilidad relativa de cristales en las áreas fuentes y las planicies de inundación. En

este complejo esquema *source-to-sink*, la señal de circones detríticos del sustrato sedimentario Jurásico y Paleozoico estaría diluida por la sobrecarga de circones volcanoclásticos.

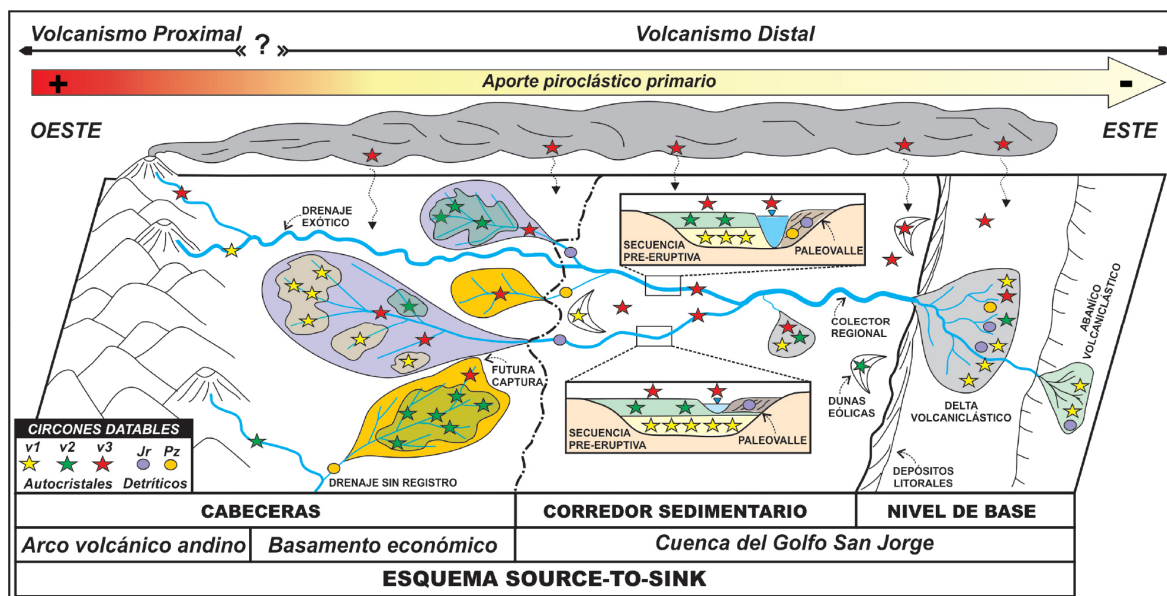


Figura 11. Esquema paleogeográfico y paleogeomorfológico que expone los controles en las fuentes de circones en un esquema *source-to-sink* volcanoclástico para la CGSJ. Los autocrístales de distintos episodios volcánicos (V1, V2, V3) se incorporan al registro por caída directa, pero también quedan disponibles en el área fuente para ser retransportados por los sistemas fluviales. La erosión de niveles volcanoclásticos fluviales y/o eólicos permitiría el reciclado intracuenal. Los drenajes exóticos con cabeceras en áreas proximales favorecerían la captura de cristales de episodios volcánicos específicos.

Impacto en el análisis del sistema petrolero

El uso de las edades U/Pb más jóvenes de los circones datados para la calibración cronoestratigráfica del Grupo Chubut en el CDS impacta en todos los elementos de los sistemas petroleros de la CGSJ. La edad Albiano tardío de la Fm. Pozo D-129 (CDS-1) implica un engranaje lateral con la Fm. Castillo, planteando la necesidad de revisión de superficies isócronas regionales que delimitan el tope de la Fm. Pozo D-129 con una edad próxima al límite Aptiano-Albiano (Sylwan 2001; Hechem y Strelkov 2002; Sylwan *et al.* 2011; Figari *et al.* 1999, 2021; Paredes *et al.* 2021 entre otros). En particular, el diacronismo en el tope del sistema lacustre ponen en discusión el uso generalizado del marker sísmico como tope de la Fm. Pozo D-129, de manera similar a la calibración litológica de este horizonte en el centro de cuenca (Foix *et al.* 2018). El ajuste cronológico de esta regresión mayor define posiciones de paleocostas conformadas por el sistema fluvial-lacustre de las formaciones Castillo - Pozo D-129, incorporando esquemas paleogeográficos para la prospección de reservorios vinculados a sistemas transicionales deltaicos y/o lóbulos profundos. Es decir que algunos niveles basales de la Fm. Castillo en la FPSB podrían reasignarse a depósitos litorales de la Fm. Pozo D-129,

por lo cual no tendrían un origen fluvial y responderían a la dinámica lacustre, desarrollando características sedimentológicas y geometrías estratigráficas específicas que condicionan su análisis como potenciales reservorios.

Las edades obtenidas también contribuyen a calibrar la evolución tectonoestratigráfica de la FPSB, que en definitiva condiciona el timing de las trampas estructurales (pliegues de inversión), los tiempos de migración y la curva de subsidencia-exhumación. En este sentido, la edad del circón más joven en el tope de la columna estratigráfica (CDS-10) evita la necesidad de un hiato entre la Fm. Bajo Barreal y Lago Colhué Huapi, el cual es incompatible con la arquitectura concordante y transicional reconocida en superficie. Por otro lado, las formaciones Castillo y Bajo Barreal no presentan evidencias estratigráficas que justifiquen su depositación simultánea a la inversión tectónica positiva (ver síntesis en Allard *et al.* 2021), por lo cual la construcción de la FPSB a la latitud del CDS sería posterior a los 88,4 Ma (Coniaciano, Cretácico Superior). Esta situación implicaría una curva de subsidencia continua que controló el espacio de acomodación y la maduración de la materia orgánica, escenario acorde al modelado del sistema petrolero realizado por Cevallos y Villar (2016) y al modelado de trazas de fisión en apatitas de muestras chubutianas (Genge *et al.* 2021). Una opción alternativa sería inferir un levantamiento incipiente que no tenga registro sedimentario (Ramos 2021) ni expresión térmica de exhumación, pero este esquema requiere evidencias que lo respalden.

La exposición en superficie del diacronismo latitudinal de las edades de la base de la Fm. Castillo puede interpretarse como un gradiente norte-sur del levantamiento post-sedimentario vinculado al grado de inversión tectónica, el cual se correlaciona con la tendencia morfoestructural de toda la FPSB. Comprender este patrón de arquitectura estructural es fundamental para evaluar la construcción de pliegues de inversión en el subsuelo (ej. Anticlinal Perales).

La propuesta cronoestratigráfica de este estudio también plantea un abanico de interrogantes que requieren futuros estudios. En particular, las tasas de sedimentación (TS) calculadas a partir de los espesores aflorados sin decompactar arrojan valores contrastantes en base a las dataciones utilizadas. Considerando el espesor total de la columna se obtiene un valor de TS: ~112 m/Ma, mientras que subdiviniendo la sucesión en base a los paleoambientes, se calcula una TS lacustre de ~31 m/Ma y una TS fluvial de ~142 m/Ma. Estos valores están dentro de los rangos normales de estudios de referencia lacustres (Montano *et al.* 2022) y fluviales (Miall *et al.* 2021); pero responden parcialmente al “efecto Sadler” que predice una disminución de las tasas de sedimentación al aumentar el espesor medido (Sadler 1981). El dato más llamativo surge de calcular la TS para el intervalo fluvial con mayor stress volcánico (Fm. Castillo y Sección Tobácea de la Fm. Bajo Barreal), ya que con edades promedio arroja un valor de ~410 m/Ma, mientras que con el circón más joven ~809 m/Ma. Estas TS son anómalas para sistemas fluviales de bajo apilamiento (Colombera *et al.* 2015), comparables con valores de sistemas progradantes marinos del Cretácico de la cuenca Magallanes-Austral (Schwartz *et al.* 2016)

y similares al registro de sistemas volcanoclásticos proximales, pero en intervalos temporales menores al millón de años (Deino *et al.* 2019). Es importante resaltar que los valores de TS anómalos superan las tasas de denudación estimadas para los ríos actuales más grandes del mundo (Leeder 2011), los cuales no son comparables con la modesta microarquitectura fluvial de la Fm. Castillo (Paredes *et al.* 2015). Comprender esta máquina sedimentaria (*sensu* Miall *et al.* 2021) requiere descartar edades aparentes y densificar el muestreo de tobas datadas para poder ajustar el efecto del tiempo de retransporte y así poder estimar edades más próximas a la TDA (Rossingnol *et al.* 2019). Avanzar en estas cuantificaciones es fundamental para analizar sistemas volcanoclásticos distales y los factores de generación de espacio de acomodación en un contexto tectonoestratigráfico intracratónico. Estas variables son críticas para comprender los patrones de apilamiento de reservorios y su variabilidad espacio-temporal.

Finalmente, cabe destacar que este estudio funciona de análogo para dataciones de subsuelo en sucesiones volcanoclásticas distales, resaltando la incertidumbre que es esperable de una edad obtenida del muestreo de cutting que respondería a múltiples niveles tobáceos. Este escenario se optimiza con la datación de coronas, sin embargo, también es probable una dispersión de edades propia de los depósitos volcanoclásticos. El contexto más favorable sería la datación de coronas en niveles de tobas centimétricos a milimétricos (Rasmussen y Fletcher 2010), los cuales se asociarían al registro primario por caída directa de ceniza garantizando un dominio de autocristales de circones del episodio volcánico sinsedimentario.

CONCLUSIONES

Las edades U/Pb obtenidas en afloramientos del Grupo Chubut en el anticlinal del CDS modifican sustancialmente los esquemas cronoestratigráficos del ciclo sedimentario Chubutiano en la CGSJ, asignándole edades más jóvenes a todas las unidades datadas (Formaciones Pozo D-129, Castillo y Bajo Barreal). Las muestras analizadas se vinculan a niveles tobáceos con patrones de edades que sustentan retransporte de circones y en consecuencia implican un tiempo de retransporte y mezcla de cristales datables. En base a las edades de los circones más jóvenes se propone una edad Albiano medio para la parte alta de la Fm. Pozo D-129, lo que implica un engranaje lateral con la Fm. Castillo. Además, esta calibración define un límite diacrónico del tope de la Fm. Pozo D-129 en la FPSB. El tope de la sucesión Chubutiana se dató en un nivel de la sección pelítica de la Fm. Bajo Barreal con una edad asignable al Coniaciano basal, la cual es cercana a la edad bioestratigráfica de la base de la Fm. Lago Colhué Huapi. Esta relación sustenta una columna estratigráfica continua sin desarrollo de hiatos durante ese intervalo.

Todos los resultados geocronológicos impactan en el modelado de cada elemento del sistema petrolero de la CGSJ. En particular se destacan: i) el potencial prospectivo de líneas de paleocostas del sistema fluvial-lacustre Castillo-Pozo D-129 dentro de niveles asignados

hasta ahora a la base de la Fm. Castillo, ii) la calibración del timing del desarrollo de trampas estructurales y iii) el ajuste de la curva subsidencia-exhumación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a YPF S.A. por autorizar la difusión de los resultados y a los revisores internos y del congreso que mejoraron la versión inicial del manuscrito. A la geóloga Yanina Basile y al Dr. Emilio Rocha por su importante participación en la fase inicial del proyecto y en la etapa de muestreo. Al Dr. José Paredes con quien compartimos innumerables campañas de campo que moldearon muchas de las ideas de este escrito. A Luis Baltuska por su hospitalidad y generosidad al permitirnos el acceso a los afloramientos desde hace 20 años. Al Dr. Pablo González por sus comentarios acerca del análisis de las edades U/Pb y a los Dres. Lucio Ibiricu y Gabriel Casal por analizar la compatibilidad de las edades con el registro fósil de vertebrados.

REFERENCIAS CITADAS

- Allard, J.O., Paredes, J.M., Foix, N. y Giacosa, R.E. 2015. Conexión cretácica entre las cuencas del Golfo San Jorge y Cañadón Asfalto (Patagonia): paleogeografía, implicancias tectonoestratigráficas y su potencial en la exploración de hidrocarburos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72, p. 21-37.
- Allard, J.O., Foix, N., Clavijo, R., Ferreira, L., Iovine, G., Urrez, N., Sánchez, F.M., Rodríguez, A.R. y Buetti, S.A., 2017. Corredores sedimentarios cretácicos (Barremiano-Aptiano) en la Cuenca del Golfo San Jorge: origen, arquitectura e impacto en la exploración de hidrocarburos. *XX Congreso Geológico Argentino, Actas digitales, ST1*, p. 7-12, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Allard, J., Foix, N., Paredes, J.M., Giacosa, R.E., Buetti, S. y Sánchez, F., 2021. Estructura y tectónica de las cuencas del Golfo San Jorge y Cañadón Asfalto. En Giacosa R. (ed.), *Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, Capítulo E.2, p. 1238-1292.
- Andersen, T., van Niekirk, H. y Elburg, M.A., 2022. Detrital zircon in an active sedimentary recycling system: Challenging the “source-to-sink” approach to zircon-based provenance analysis. *Sedimentology* doi.org/10.1111/sed.12996
- Auchter, N.C., Romans, B.W., Hubbard, S.M., Daniels, D.G., Scher, H.D. y Buckley, W., 2020. Intra-basinal sediment recycling from detrital strontium isotope stratigraphy. *Geology* 48 (10), p. 992-996.
- Bridge, J.S., Jalfin, G.A. y Georgieff, S.M. 2000. Geometry, lithofacies, and spatial distribution of Cretaceous fluvial sandstone bodies, San Jorge Basin, Argentina: outcrops analog for the hydrocarbon-bearing Chubut Group. *Journal of Sedimentary Research* 70, p. 319-337.
- Carignano, A.P., Paredes, J.M., Olazábal, S.X. y Valle, M.N., 2017. Ostracoda (Crustacea) from the Pozo D-129 Formation (upper Barremian?-

- Aptian), Golfo San Jorge basin, Patagonia, Argentina: Taxonomic descriptions, palaeoenvironments and palaeogeographical implications. *Cretaceous Research* 78, p. 206-220.
- Cas, R.A.F. y Wright, J.V., 1987. *Volcanic Successions: Ancient and Modern*. Allen and Unwin, London, 528 pp.
- Casal, G.A., Allard, J.O. y Foix, N. 2015. Análisis estratigráfico y paleontológico del Cretácico superior en la cuenca del Golfo San Jorge: nueva unidad litoestratigráfica para el Grupo Chubut. *Revista Asociación Geológica Argentina* 72, p. 81-99.
- Casal, G.A., Ibiricu, L.M. y Martínez, R.D., 2021. Vertebrados continentales cretácicos del Grupo Chubut. En Giacosa R. (ed.) *Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, Capítulo D.7, p. 806-833.
- Cevallos, M.F. y Villar, H.J., 2016. Análisis del sistema petrolero en el área Anticlinal Aguada Bandera. *Segundas Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge, Resúmenes*, p. 29-30, Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Chew, D., O'Sullivan, G., Caracciolo, L., Mark, Ch. y Tyrrell, S., 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis. *Earth-Science Reviews* 202, 103093.
- Clavijo, R., 1986. Estratigrafía del Cretácico inferior en el sector Occidental de la Cuenca del Golfo San Jorge. *Boletín de Informaciones Petroleras (Tercera Época)* 9, p. 15-32, Buenos Aires.
- Colombero, L., Muontney, N.P. y McCaffrey, W.D., 2015. A meta-study of relationships between fluvial channel-body stacking pattern and aggradation rate: Implications for sequence stratigraphy. *Geology* 43 (4), p. 283-286.
- Cúneo, R.N., Ramezani, J., Scasso, R.A., Pol, D., Escapa, I., Zavattieri, A.M. y Bowring, S.A., 2013. High-precision U-Pb geochronology and a new chronostratigraphy for the Cañadón Asfalto Basin, Chubut, Central Patagonia: Implications for terrestrial faunal and floral evolution in Jurassic. *Gondwana Research* 24, p. 1267-1275.
- d'Atri, A., Dela, Pierre, F., Lanza, R. y Ruffine, R., 1999. Distinguishing primary and resedimented vitric volcanoclastic layers in the Burdigalian carbonate shelf deposits in Monferrato (NW Italy). *Sedimentary Geology* 129 (1-2), p. 143-163.
- Deino, A.L., Dommain, R., Keller, C.B., Potts, R., Behrensmeyer, A.K., Beverly, E.J., King, J., Heil, C.W., Stockhecke, M., Brown, E.T., Moerman, J., deMenocal, P. y the Ologresailie Drilling Project Scientific Team, 2019. Chronostratigraphic model of a high-resolution drill core record of the past million years from the Koora Basin, south Kenya Rift: Overcoming the difficulties of variable sedimentation rate and hiatuses. *Quaternary Science Reviews* 215, p. 213-231.
- Dröllner, M., Barham, M., Kirkland, C.L. y Ware, B. 2021. Every zircon deserves a date: selection bias in detrital geochronology. *Geological Magazine* doi.org/10.1017/S0016756821000145
- Fantasia, A., Föllmi, K.B., Adatte, T., Spangenberg, J.E., Schoene, B., Barker R.T. y Scasso, R.A., 2021. Late Toarcian continental palaeoenvironmental conditions: An example from the Cañadón Asfalto Formation in southern Argentina. *Gondwana Research* 89, p. 47-65
- Feruglio, E., 1949. Descripción geológica de la Patagonia. *Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires, Vol. 1*, 347 pp.

- Figari, E., Strelkov, E.E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R. y Villar, H., 1999. Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, p. 197-237, Mar del Plata, Argentina.
- Figari, E.G. y García, D.G., 2018. Modelos analógicos superficie subsuelo para el Chubutiano Inferior de las cuencas de Cañadón Asfalto y del Golfo San Jorge, Argentina. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas digitales, p. 669-688, Mendoza, Argentina.
- Figari, E.G., Hechem, J., Continanzia, M.J., Gavarrino, A., Urrez, N. y Garía, D., 2021. Cuencas hidrocarbúferas, sus sistemas petroleros y principales yacimientos. En Giacosa R. (ed.), Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut, Capítulo F.2, p. 1416-1448.
- Figari, E.G. y Hechem, J.J., 2021. Cuencas volcanosedimentarias del mesozoico. En Giacosa R. (ed.), Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut, Capítulo B.3, p. 129-141.
- Fisher, R.V. y Schmincke, H.U., 1984. Pyroclastic Rocks. Springer, Berlin, 472 pp.
- Fitzgerald, M.G., Mitchum, R.M., Uliana, M.A. y Biddle, K.T., 1990. Evolution of the San Jorge Basin, Argentina. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 74 (6), p. 879-920.
- Foix, N., Allard, J.O., Ferreira, M.L. y Atencio, M., 2018. Aportes a la arquitectura estratigráfica del Grupo Chubut en el Flanco Norte, Centro de Cuenca y Off-shore de la cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, p. 779-795, Mendoza, Argentina.
- Foix, N., Allard, J.O., Ferreira, M.L. y Atencio, M., 2020. Spatio-temporal variations in the Mesozoic sedimentary record, Golfo San Jorge basin (Patagonia, Argentina): Andean vs. cratonic sources. Journal of South American Earth Science 97, 102464.
- Gehrels, G., 2012. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances, First Edition. En Busby C. y Azor A. (eds.), Blackwell Publishing Ltd. Chapter 2, p. 47-62.
- Genge, M., Derycke A., Gautheron C., Zattin, M., Witt, C., Mazzoli, S. y Quidelleur, X., 2021. Tectono-thermal history of the intraplate San Bernardo fold and thrust belt in central Patagonia inferred by low-temperature thermochronology. Journal of South American Earth Sciences 109: 103333.
- Genise, J.F., Sciutto, J.C., Laza, J.H., González, M.G. y Bellosi, E.S., 2002. Fossil bee nests, coleopteran pupal chambers and tuffaceous paleosols from the late cretaceous Laguna Palacios formation, central Patagonia (Argentina). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 177, p. 215-235.
- Genise, J.F., Bellosi, E.S., Sarzetti, L.C., Krause, M.J., Dinghi, P.A., Sanchez, M.V., Umazano, A.M., Puerta, P., Cantil, L.F. y Jicha, B.R., 2020. 100 Ma sweat bee nests: Early and rapid codiversification of crown bees and flowering plants. PLoS ONE 15 (1): e0227789.
- Gianni, G., Navarrete, C., Orts, D., Tobal, J., Folguera, A. y Giménez, M., 2015. Patagonian broken foreland and related synorogenic rifting: the origin of the Chubut Group Basin. Tectonophysics 649, p. 81-99.

- Gianni, G.M., Navarrete, C., Echaurren, A., Díaz, M., Butler, K.L., Horton, B.K., Encinas, A. y Folguera, A. 2019. Northward propagation of Andean genesis: Insights from early cretaceous synorogenic deposits in the Aysen-Río Mayo basin. *Gondwana Research* 77, p. 238-259.
- Hauser, N., Cabaleri, N.G., Gallego, O.F., Monferran, M.D., Silva Nieto, D., Armella, C., Matteini, M., Aparicio González, P.A., Pimentel, M.M., Volkheimer, W. y Reimold, W.U., 2017. U-Pb and Lu-Hf zircon geochronology of the Cañadón Asfalto Basin, Chubut, Argentina : Implications for the magmatic evolution in Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 78, p. 190-212.
- Hechem, J.J., 2015. Cien años de modelos geológicos en la cuenca del Golfo San Jorge. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (1), p. 1-11.
- Hechem, J.J., Figari, E.G. y Musacchio, E.A., 1987. Hallazgo de la Formación Pozo D-129. Información estratigráfica y paleontológica. *Petrotecnia* 28, p. 13-15.
- Hechem, J.J., Homocv, J.F. y Figari, E.G., 1989. Estratigrafía del Chubutiano en la Sierra de San Bernardo, Cuenca del Golfo de San Jorge, Provincia del Chubut. YPF. Informe Inédito, 78 pp.
- Hechem, J.J. y Strelkov, E.E., 2002. Secuencia sedimentaria mesozoica del Golfo San Jorge. In: Haller, J.M. (Ed.), *Geología y recursos Naturales de Santa Cruz*. XV Congreso Geológico Argentino, vol. 1, p.129-147, Buenos Aires, Argentina.
- ICS 2022. International Commission on Stratigraphy, International Chronostratigraphic Chart v2022/02. <https://stratigraphy.org/chart>
- Kataoka, K. y Nakajo, T., 2002. Volcaniclastic resedimentation in distal fluvial basins induced by large-volume explosive volcanism: the Ebisutoge-Fukuda tephra, Plio-Pleistocene boundary, central Japan. *Sedimentology* 49, p. 319-334.
- Krause, M.J., Ramezani, J., Umazano, A.M., Pol, D., Carbadillo, J.L., Sterli, J., Puerta, P., Cúneo, N.R. y Bellosi, E.S., 2020. High-resolution chronostratigraphy of the Cerro Barcino Formation (Patagonia): Paleobiologic implications for themid-cretaceous dinosaurian fauna of South America. *Gondwana Research* 80, p. 33-49.
- Leeder, M.R., 2011. *Sedimentology and sedimentary basins: from turbulence to tectonics*. Wiley-Blackwell, 784 pp.
- Lesta, P. y Ferello, R., 1972. Región extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En Leanza, A.F. (ed.), *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional Ciencias Córdoba, p. 601-653.
- LATE ANDES, 2020. Geocronología U/Pb CGSJ. U/Pb en zircons: Análisis de procedencia, edad de máxima deposición y edad de cristalización. Informe inédito YPF SA, 41 pp.
- Manville, V., Németh, K. y Kano, K. 2009. Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology* 220, p. 136-161.
- McPhie, J., Doyle, M. y Allen, S.R., 2005. *Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*, Centre for Ore Deposit and Exploration Studies. University of Tasmania, 198 pp.
- Meconi, G., 1990. Facies, arquitectura fluvial y paleoambientes del Grupo Chubut en el Codo del Río Senguerr, límite provincial de Chubut-Santa Cruz. III Reunión Argentina de Sedimentología, Actas 1, p. 193-196, San Juan, Argentina.
- Miall, A.D., Holdbrook, J.M. y Bhattacharya, J.P., 2021. The stratigraphy machine. *Journal of Sedimentary Research* 91, p. 595-610.

- Montano, D., Gasparini, M., Rohais, S., Albert, R. y Gerdes, A., 2022. Depositional age models in lacustrine systems from zircon and carbonate U-Pb geochronology. *Sedimentology*, doi.org/10.1111/sed.13000.
- Musacchio, E.A., 1989. Biostratigraphy of the nonmarine Cretaceous of Argentina based on calcareous microfossils. En Weidmann, J. (ed.), *Cretaceous of the western Tethys, Proceedings of the 3rd International Cretaceous Symposium*, p. 811-851.
- Navarrete, C.R., Gianni, G.M., Echaurren, A. y Folguera, A., 2015. Tectonic inversion events in the western San Jorge Gulf Basin from seismic, borehole and field data. *Journal of South American Earth Sciences* 64, p. 486-497.
- Paredes, J.M., Foix, N., Colombo Piñol, F., Nillni, A., Allard, J.O. y Marquillas, R.A., 2007. Volcanic and climatic controls on fluvial style in a high-energy system: The Lower Cretaceous Matasiete Formation, Golfo San Jorge basin, Argentina. *Sedimentary Geology* 202, p. 96-123.
- Paredes, J.M., Allard, J.O., Foix, N., Álvarez, B. y Olazábal, S., 2014. Sedimentología y perfiles de rayos gamma de la Formación Pozo D-129 (Aptiano) en la Sierra de San Bernardo, Chubut. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas p. 455-479, Mendoza, Argentina.
- Paredes, J.M., Foix, N., Allard, J.O., Colombo, F. y Tunik, M.A., 2015. Alluvial architecture of reworked pyroclastic deposits in peri-volcanic basins: Castillo Formation (Albian) of the Golfo San Jorge basin, Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina* 72 (1), p. 42-62.
- Paredes, J.M., Foix, N. y Allard, J.O., 2016. Sedimentology and alluvial architecture of the Bajo Barreal Formation (Upper Cretaceous) in the Golfo San Jorge basin: outcrop analogues of the richest oil-bearing fluvial succession in Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 72, p. 317-335.
- Paredes, J.M., Foix, N. y Allard, J.O., 2021. Estratigrafía de la Cuenca Golfo San Jorge. En Giacosa R. (ed.) *Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, Capítulo B.4, p. 142-186.
- Perez Loinaze, V.S., Giordano, S.R. y Limarino, C.O., 2021. Late Cretaceous palynomorphs from the Golfo San Jorge Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 107, p. 103151.
- Ramos, V.A. 2021. La evolución tectónica de la provincia del Chubut. En Giacosa R. (ed.) *Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, Capítulo E.7, p. 1372-1397.
- Rasmussen, B. y Fletcher, I.R., 2010. Dating sedimentary rocks in situ U-Pb geochronology of syneruptive zircon in ash-fall tuffs <1 mm thick. *Geology* 38 (4), p. 299-302.
- Rolando, A.P., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S, Fernandez, R.R., Etcheverry, R.O., Schalamuk, I.A. y McNaughton, N.J., 2002. SHRIMP zircon U-Pb evidence for extended Mesozoic magmatism in the Patagonian Batholith and assimilation of Archean crustal components. *Journal of South American Earth Sciences* 15 (2), p. 267-283.
- Rossignol, C., Hallor, E., Bourquin S., Poujol M., Jolivet, M., Pellenard, P. Ducassou, C., Nalpas, T., Heilbronn G., Yu, J., y Dabard, M., 2019. Using volcanoclastic rocks to constrain sedimentation ages: To what extent are volcanism and sedimentation synchronous? *Sedimentary Geology* 381, p. 46-64.
- Sadler, P.M., 1981. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Journal of Geology* 89, p. 569-584.

- Schumacher, R. y Schmincke, H.U., 1995. Models for the origin of accretionary lapilli. *Bulletin of Volcanology* 56, p. 626-639.
- Schwartz, T.M., Fosdick, J.C. y Graham, S.A., 2016. Using detrital zircon U-Pb ages to calculate Late Cretaceous sedimentation rates in Magallanes-Austral basin, Patagonia. *Basin Research* 1-22, p. 725-746.
- Sciutto, J.C., 1981. Geología del Codo del Río Senguerr, Chubut, Argentina. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3, p. 203-219, San Luis, Argentina.
- Sharman, G.R. y Malkowski, M.A., 2020. Needles in a haystack: Detrital zircon U-Pb ages and the maximum depositional age of modern global sediment. *Earth-Science Reviews* 203: 103109.
- Smith, G.A. y Lowe, D.R., 1991. Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow - hyperconcentrated flow continuum. En Fisher, R.V. y Smith, G.A. (eds.) *Sedimentation in Volcanic Settings*. SEPM Special Publication, 45, p. 59-70.
- Smith, G.A., 1991. Facies sequences and geometries in continental volcanoclastic sediments. En Fisher, R.V. y Smith, G.A. (eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 45, p. 10-25.
- Suárez, M., Márquez, M., De La Cruz, R. y Fanning, M., 2009. Aptian-albian subaerial volcanic rocks in central Patagonia: Divisadero and Chubut groups. XII Congreso Geológico Chileno, Actas, p. 1-4.
- Suárez, M., Márquez, M., De La Cruz, R., Navarrete, C. y Fanning, M., 2014. Cenomanian? early Turonian minimum age of the Chubut Group, Argentina: SHRIMP U-Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 50, p. 67-74.
- Sylwan, C.A., 2001. Geology of the Golfo San Jorge Basin, Argentina. *Journal of Iberian Geology* 27, p. 123-157.
- Sylwan, C., Droeven, C., Iñigo, J., Mussel, F. y Padva, D., 2011. Cuenca del Golfo San Jorge. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio Cuencas Argentinas: visión actual, Actas, p. 139-183, Mar del Plata, Argentina.
- Teruggi, M.E. y Rosseto, H., 1963. Petrografía del Chubutiano del Codo del Senguerr. *Boletín de Informaciones Petroleras* 354, p. 18-35, Buenos Aires, Argentina.
- Umazano, A.M., Bellosi, E.S., Visconti, G., Jalfin, G.A. y Melchor, R.N., 2009. Sedimentary record of a late cretaceous volcanic arc in central Patagonia: petrography, geochemistry and provenance of fluvial volcanoclastic deposits of the Bajo Barreal formation, san Jorge basin, Argentina. *Cretaceous Research* 30, p. 749-766.
- Vallati, P., 2013. A mid Cretaceous palynoflora with *Tucanopollis crisopolensis* from D-129 Formation, San Jorge Gulf Basin, Argentina. *Revista Brasileira de Paleontologia* 16: 237-244. DOI:10.4072/rbp.2013.2.06
- Vallati, P., De Sosa Tomas, A., Passalia, M.G., Perez Loinaze, V.S., Archangelsky, S. y Romero, E. 2021. Palinofloras y megaflores del Cretácico de la Cuenca del Golfo San Jorge. En Giacosa R. (ed.) *Relatorio del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, Capítulo D.12, p. 914-927.
- Vinda, V., 1928. Comodoro Rivadavia y las explotaciones petrolíferas en la región vecina al Golfo San Jorge. YPF, Comodoro Rivadavia. Informe inédito, 144 pp.

