

## Los mármoles cálcicos de El Escorial (complejo metamórfico Cushamen, macizo norpatagónico): caracterización isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y edad de sedimentación

\*Juan A. Murra<sup>1</sup>, Edgardo G. Baldo<sup>1</sup>, Sebastián O. Verdecchia<sup>1</sup>,  
Carlos D. Ramacciotti<sup>1</sup>, †Carmen Galindo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), Universidad Nacional de Córdoba (CONICET-UNC), Avda. Vélez Sársfield 1611 (5000), Córdoba, Argentina.

juan.murra@unc.edu.ar; edgardo.baldo@unc.edu.ar; sverdecchia@unc.edu.ar; carlos.ramacciotti@unc.edu.ar

<sup>2</sup> Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid, Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), 28040 Madrid, España.

\*Autor para correspondencia: juan.murra@unc.edu.ar

---

**RESUMEN.** Los mármoles de El Escorial (Complejo Metamórfico Cushamen) se encuentran asociados a anfíbolitas que forman septos metamórficos dentro de los granitoides pérmicos de la Formación Mamil Choique (261-286 Ma). El metamorfismo de los septos, determinado en gneises migmáticos en facies de granulita aflorantes 120 km al suroeste de El Escorial, ocurre a los  $311 \pm 27$  Ma (método CHIME en monacita). Los mármoles son de composición calcítica (calcita >95%, R.I.: 0,5 a 2,5%) y presentan razones de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre 0,70768 y 0,70825 (n=10). Los datos aportados en este trabajo, sumado a contribuciones previas, permiten acotar la edad de sedimentación de las sucesiones silíceo-carbonáticas del Complejo Metamórfico Cushamen entre los *ca.* 385 y 335 Ma. Esto sugiere la existencia de una plataforma mixta (carbonática-siliciclástica) al menos en la porción más austral del suroeste de Gondwana entre el Devónico Medio y el Carbonífero inferior (Misisipiano Medio).

*Palabras clave:* Mármol, Isótopos de Sr, Macizo Norpatagónico, Suroeste de Gondwana.

**ABSTRACT.** El Escorial calcitic marbles (Cushamen Metamorphic Complex, Macizo Norpatagónico):  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic characterization and age of sedimentation. The El Escorial marbles (Cushamen Metamorphic Complex) along with amphibolites form metamorphic septa within the permian granitoids of the Mamil Choique Formation (261-286 Ma). The metamorphism, determined in granulite facies migmatic gneisses septa cropping out 120 km southwest of El Escorial, occurs at  $311 \pm 27$  Ma (CHIME method in monazite). The marbles are calcitic (calcite >95%, R.I.: 0.5 to 2.5%) and show  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios between 0.70768 and 0.70825 (n=10). The data provided in this work, added to previous contributions, allow to constraints the sedimentation age of the silicic-carbonate successions of the Cushamen Metamorphic Complex between *ca.* 385 and 335 Ma. This suggests the existence of a mixed carbonate-siliciclastic platform at least in the southernmost portion of southwestern Gondwana between Middle Devonian and early Carboniferous (Middle Mississippian).

*Keywords:* Marble, Sr isotopes, Norpatagonian Massif, Southwest Gondwana.

## 1. Introducción

Las curvas de variaciones seculares de las composiciones isotópicas de Sr, C y O para el agua oceánica en el mundo han sido establecidas con suficiente precisión, lo que hace factible la correlación temporal de carbonatos y rocas metacarbonatadas marinas, en los cuales se conservaron las relaciones isotópicas adquiridas durante su formación (Veizer *et al.*, 1999; Jacobsen y Kaufman, 1999; Montañez *et al.*, 2000; Melezhik *et al.*, 2001; Jiang *et al.*, 2007; Prokoph *et al.*, 2008; Halverson *et al.*, 2010; Zaky *et al.*, 2019). Las variaciones de las razones isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en rocas carbonáticas son las más utilizadas, en tanto que el uso de los isótopos del O y C está más restringido debido a que estos son afectados con mayor facilidad por la interacción con el agua meteórica y con fluidos intersticiales de alta temperatura (Fairchild *et al.*, 1990). A pesar de la movilidad relativamente alta de los carbonatos durante los procesos de diagénesis y metamorfismo, en determinadas condiciones estas rocas pueden comportarse como un sistema cerrado (*e.g.*, microambientes diagenéticos y/o metamórficos en donde no hay interacción con fases fluidas externas al sistema) y conservar sus improntas geoquímicas originales, permitiendo determinar la edad de sedimentación de los protolitos carbonáticos de complejos metamórficos, aún en condiciones de grado medio a alto (Brand y Veizer, 1980; Melezhik *et al.*, 2001).

El Macizo Norpatagónico (MNP), ubicado en el sector norte de la Patagonia argentina, está conformado por un basamento ígneo-metamórfico Paleozoico a Triásico Inferior, el cual se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos, volcánicos y sedimentarios mesozoicos-cenozoicos. Ha sido motivo de numerosos estudios en los últimos 15 años (*e.g.*, Martínez Dopico *et al.*, 2011; Rapalini *et al.*, 2013; Ramos y Naipauer, 2014; Hervé *et al.*, 2016, 2018; Rapela y Pankhurst, 2020; Serra Varela *et al.*, 2020; González *et al.*, 2021; entre otros), y cuenta con abundantes dataciones radiométricas, fundamentalmente sobre las rocas ígneas y, en menor medida, en las rocas metasedimentarias que lo componen. Estas dataciones han permitido conocer edades de cristalización y metamorfismo, como así también las edades máximas de depositación y proveniencia de los protolitos sedimentarios. Sin embargo, las rocas carbonáticas han sido poco estudiadas como un acotador de la edad

de sedimentación debido a que los afloramientos son muy escasos, y han sido mayormente vinculadas al Ediacariano-Cámbrico medio (*e.g.*, López de Luchi *et al.*, 2010; González *et al.*, 2011; Varela *et al.*, 2014).

En la región central de la provincia de Chubut se expone una secuencia de mármoles conocida como El Escorial (43°05'18,4" S; 68°32'36,2" O), los que han sido descritos como integrantes de la Formación Cushamen (Miembro El Escorial, Proserpio, 1987; Murra *et al.*, 2017), y corresponden a los afloramientos más orientales de esta unidad geológica (Figuras 1A y B).

La Formación Cushamen (Volkheimer, 1964) está compuesta por una secuencia de rocas paraderivadas metamorfizadas en condiciones de bajo grado (filitas y metapsammitas), esquistos micáceos y cuarzo-micáceos y metacuarcitas que localmente gradan a gneises y migmatitas. Recientemente, Serra-Varela *et al.* (2020) han propuesto renombrar esta unidad litoestratigráfica como Complejo Metamórfico Cushamen (CMC), en función de su alta complejidad debido a su gran variedad litológica, fuerte deformación y metamorfismo, por lo que en el presente trabajo se adoptará la denominación sugerida por estos autores.

La edad máxima de sedimentación de los protolitos del CMC ha sido restringida al Devónico Medio a partir de edades herencia en circones detríticos (*ca.* 385 Ma; *e.g.*, Hervé *et al.*, 2005, 2018), mientras que el metamorfismo de esta unidad estaría acotado por el emplazamiento de granitoides no deformados del Pérmico temprano de la Formación Mamil Choique, datados en 286-261 Ma (Dalla Salda *et al.*, 1994; Cerredo, 1997; Cerredo y López de Luchi, 1998; Duhart *et al.*, 2002; Giacosa *et al.*, 2004; Lucassen *et al.*, 2004; Varela *et al.*, 2005; Pankhurst *et al.*, 2006, 2014; López de Luchi *et al.*, 2011; Renda *et al.*, 2021). De esta manera, la edad de sedimentación del CMC está pobremente definida entre 385-286 Ma.

La presente contribución aporta nuevos datos que permiten acortar con mayor precisión la edad de sedimentación y metamorfismo del CMC. En este sentido, el trabajo da a conocer los primeros valores isotópicos de Sr de los mármoles correspondientes a la Unidad El Escorial del CMC, e indica la posibilidad de la existencia de una plataforma mixta hacia el suroeste del Gondwana suroccidental entre el Devónico tardío y el Carbonífero temprano. También se presenta la edad del metamorfismo del CMC en la región centro-sur del MNP, obtenida

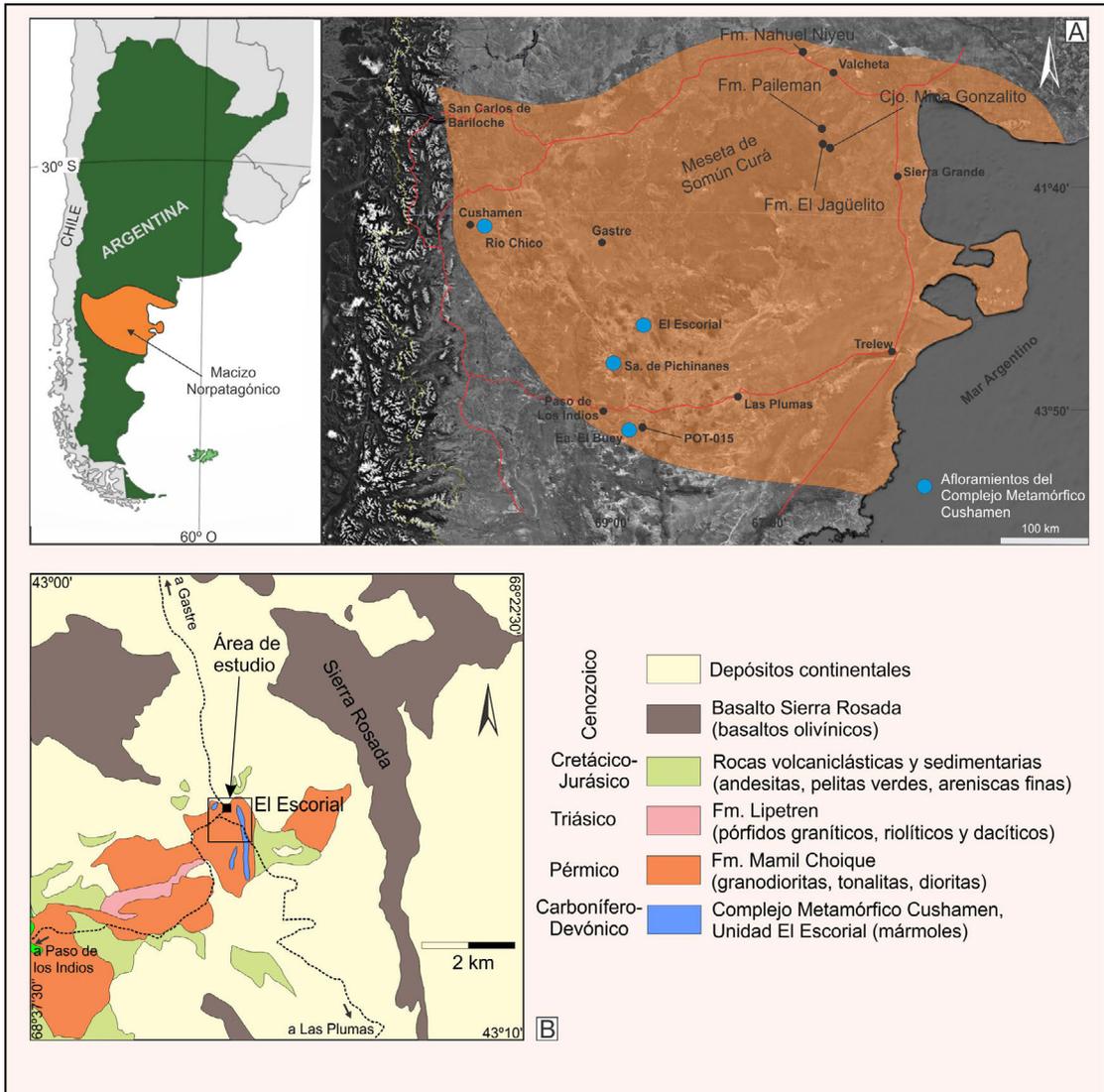


FIG. 1. A. Ubicación de los principales afloramientos del Complejo Metamórfico Cushamen en el contexto del Macizo Norpatagónico y de otros afloramientos de rocas carbonáticas. B. Mapa geológico del área de El Escorial, tomado de Anselmi *et al.* (2004).

mediante el método de datación CHIME (Chemical Th-U-total Pb Isochron Method) en monacitas de gneises migmatíticos.

## 2. Marco geológico

El basamento premesozoico de la Patagonia extrandina está subdividido en el MNP al norte y el Macizo del Deseado hacia el sur. El límite norte del MNP con el margen suroccidental de Gondwana se encuentra cubierto por la cuenca mesozoica-cenozoica

del Colorado (Lesta *et al.*, 1980). En este sector nororiental del MNP, las unidades del basamento son rocas metasedimentarias del Paleozoico inferior (530 Ma, Formación Jagüelito; 513 Ma, Formación Nahuel Niyeu; 475 Ma, Formación Mina Gonzalito), intruidas por unidades ígneas con edades comprendidas entre los 545 y 246 Ma (Pankhurst *et al.*, 2006; Rapalini *et al.*, 2013; Greco *et al.*, 2015; González *et al.*, 2021 y referencias allí citadas). La meseta de Somún Curá (Fig. 1A), compuesta por rocas y sedimentos del Mesozoico-Cenozoico, divide

esta región del sector suroccidental del MNP, cuyo basamento metamórfico está compuesto por rocas metasedimentarias del Paleozoico medio (CMC:  $362\pm 10$  Ma y  $371\pm 33$  Ma, Ostera *et al.*, 2001;  $335-286$  Ma, Hervé *et al.*, 2005; 329 Ma, Gneis El Maitén, Pankhurst *et al.*, 2006) intruidas por unidades ígneas de edad carbonífera a triásica.

En el MNP, entre los pocos estudios sobre las unidades metacarbonáticas existentes, se puede citar a Varela *et al.* (2014), quienes utilizan quimioestratigrafía de Sr sobre las calizas de la Formación El Jagüelito y sobre los mármoles de bajo grado del Complejo Mina Gonzalito y la Formación Pailemán (Fig. 1A), atribuyéndoles edades de sedimentación del Ediacariano medio a superior al Cámbrico inferior. En el sector noreste del MNP, González *et al.* (2011) han reconocido bloques de calizas dentro de metaconglomerados (Formación El Jagüelito) a las que le asignan una edad cámbrica inferior sobre la base de la presencia de arqueociátidos pobremente preservados. En la región de Valcheta (Fig. 1A), López de Luchi *et al.* (2010) mencionan la presencia de esporádicos niveles de mármoles y anfibolitas como integrantes de la Formación Nahuel Niyeu del Cámbrico tardío a medio (Fig. 1A). Hacia el sector centro y sur del MNP, Proserpio (1987) señala afloramientos de “calizas cristalinas” de reducidas dimensiones en las cercanías de Paso de Indios, y hace referencia también a otros autores que las mencionan en sus respectivos estudios (ver referencias en Proserpio, 1987). Según este autor, la distribución de los afloramientos de mármoles consiste en tres cuerpos que originariamente formaban uno solo, y que se desmembraron debido a un fallamiento moderno. Por otra parte indica que, hacia el sector sur de El Escorial, se encuentran enclaves metamórficos de hasta 1 km de largo de metapsammitas, incluidos en una masa granodiorítica-tonalítica, con una foliación penetrativa importante y compuestos por cuarzo-feldespato-clorita-mica blanca de grano fino±epidoto±apatita±circón.

Dentro de este marco geológico se han propuesto algunas hipótesis sobre la evolución geodinámica de la Patagonia extrandina, en las se propone un origen parautoctono, en donde la Patagonia se adosó al borde suroccidental de Gondwana a finales del Paleozoico (*e.g.*, Ramos, 2008); mientras que otras se inclinan por un origen autóctono, con el MNP como parte de Gondwana en tiempos precarboníferos, según evidencias geocronológicas e isotópicas, que

indicarían que el magmatismo del extremo nororiental del MNP tiene características similares al generado en los orógenos Pampeano y Famatiniano, por lo que se concluye que representa la extensión de estos ciclos orogénicos hacia el sur (Dalla Salda *et al.*, 1991; Rapalini *et al.*, 2010, 2013; Pankhurst *et al.*, 2006; Martínez Dopico *et al.*, 2011; Greco *et al.*, 2015, 2017; Heredia *et al.*, 2018). En este último modelo, Pankhurst *et al.* (2006) proponen que la región al sur del MNP (el Macizo del Deseado) se adosa al Gondwana suroccidental, genera hacia los 335 Ma una subducción con vergencia al noreste (por debajo del MNP), con aporte de sedimentos desde el norte (coordenadas actuales) y, posteriormente, origina el Complejo Metamórfico Cushamen.

### 3. Muestreo y técnicas analíticas

#### 3.1. Análisis isotópicos de mármoles

Se recolectaron 37 muestras, de las cuales 25 fueron seleccionadas para petrografía y 10 para análisis químicos e isotópicos. Para estimar inicialmente la cantidad de calcita y dolomita, se cortaron losas ( $6\times 3\times 1$  cm) y la superficie se tiñó con alizarina roja S (0,3 g de alizarina en 100 ml de solución de HCl al 1,5%) durante 4 minutos, y luego se lavó suavemente con agua destilada. El porcentaje de calcita manchada en la superficie de la losa se determinó mediante imágenes por ordenador (utilizando el programa Image-J 1.48v, Rasband, 2017). Se seleccionaron muestras con calcita >90% en su mayoría ( $n=14$ ) (Tabla 1). Luego fueron analizados Ca, Mg y Mn, y se determinó el residuo insoluble (R.I.). Las muestras con bajos valores de R.I. se sometieron a un cribado químico de acuerdo con las relaciones Mn/Sr y Mg/Ca (Brand y Veizer, 1980; Melezhik *et al.*, 2001 y referencias allí citadas) para elegir aquellas que no habrían sufrido un impacto significativo de alteraciones postsedimentarias (Tabla 2). Los análisis del Sr se realizaron en el Centro de Geoquímica Isotópica y Geocronología de la Universidad Complutense de Madrid. Para excluir la contaminación de otros minerales, las muestras de carbonato (30 mg) fueron lixiviadas en una solución de ácido acético al 10% y luego centrifugadas para eliminar el residuo insoluble (Fuenlabrada y Galindo, 2001). Además, se determinó el residuo insoluble (R.I. en % en peso). La solución se evaporó posteriormente y luego se disolvió en 3 ml de HCl 2,5 N. El Sr se separó por

TABLA 1. UBICACIÓN, DESCRIPCIÓN DE CAMPO Y PETROGRAFÍA DE MUESTRAS DE LOS MÁRMOLES EL ESCORIAL Y LA ROCA DE CAJA.

Muestra	latitud	longitud	Descripción	% calcita (teñido)	Mineralogía (abreviación mineral según Whitney y Evans, 2010)
MNP-28O21*	43°05'17,6"	68°32'26,3"	anfíbolita en contacto con mármol	-	Am-Pl-Qz-Bt
MNP-28O22*			aplita, rosada, grano muy fino (<1 mm)	-	Qz-Kfs-Ms
MNP-28O23*			granodiorita grano grueso (1-5 mm)	-	Qz-Pl-Bt±kfs
MNP-28O24*			mármol gris claro, grano medio, homogéneo	91,56	Cal-Srp-Opq-Ol
MNP-28O25*			mármol gris claro, grano fino, bandeado	89,56	Cal-Qz-Opq-Di-Phl
MNP-28O26*			mármol blanco, grano fino, homogéneo	91,81	Cal-Qz-Opq
MNP-28O27*			mármol gris claro a blanco, grano fino, bandeado	76,98	Cal-Qz-Opq-Phl
MNP-28O28*			mármol gris, grano fino, bandeado	71,51	Cal-Qz-Opq-Phl
MNP-28O29*			mármol celeste, grano grueso, homogéneo	84,81	Cal-Qz-Phl
MNP-28O30*			mármol gris, grano fino, bandeado	76,81	Cal±Phl-Qz
MNP-28O31*			mármol gris, grano grueso, bandeado	79,52	Cal-Qz-Opq-Di-Phl
MNP-28O32*			anfíbolita en contacto con mármol	-	Am-Pl-Qz-Bt
MNP-28O33*			granodiorita grano grueso (1-5 mm)	-	Qz-Pl-Bt±kfs
MNP-28O34-2	43°05'17,6"	68°32'26,3"	mármol gris, grano fino, homogéneo	98,56	Cal±Phl
MNP-28O34-3			mármol blanco, grano medio, masivo, deformado	98,43	Cal±Phl-Qz
MNP-28O34-4			mármol blanco, grano medio, homogéneo	98,66	Cal±Phl-Qz
MNP-28O34-5a			mármol blanco, grano fino, homogéneo	95,31	Cal±Phl-Qz
MNP-28O34-5b			mármol blanco, grano fino, bandeado	95,21	Cal±Phl-Qz
MNP-28O34-6*			mármol celeste, grano grueso, homogéneo	14,64	Cal-Qz-Opq-Phl
MNP-28O34-8			mármol gris, grano medio, homogéneo	78,04	Cal-Srp-Opq-Ol
MNP-28O34-9a			mármol blanco, grano medio, homogéneo	85,36	Cal-Qz-Opq
MNP-28O34-9b			mármol blanco, grano medio, bandeado	91,88	Cal-Qz-Phl
MNP-28O34-10			mármol blanco, grano fino, bandeado	97,45	Cal-Qz-Opq
MNP-28O34-11	43°05'12,6"	68°32'35,5"	mármol blanco, grano medio, homogéneo	98,07	Cal-Qz-Opq-Grt
MNP-28O34-12a	43°05'10,1"	68°32'40,4"	mármol celeste, grano fino, homogéneo	86,01	Cal-Qz-Opq-Di-Phl
MNP-28O34-12b			mármol gris, grano grueso, homogéneo	95,75	Cal-Qz-Opq-Di-Phl
MNP-28O35-15	43°05'35,1"	68°32'08,2"	mármol gris, grano medio, homogéneo	97,29	Cal-Opq
MNP-28O35-16*			mármol gris claro, grano grueso, homogéneo	54,61	Cal-Opq
MNP-28O35-17a*			mármol gris, grano fino, bandeado	96,23	Cal-Opq-Grt
MNP-28O35-17b	43°05'34,5"	68°32'12,2"	mármol blanco, grano fino, homogéneo	97,81	Cal-Opq-Grt

\* No analizado para geoquímica.

TABLA 2. CONTENIDO DE CA, MG, MN Y RB, Y COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL SR DE LOS MÁRMOLES DE EL ESCORIAL.

Muestra	Ubicación	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	Ca % peso	Mg % peso	Rb (ppm)	Mn (ppm)	Mg/Ca	Mn/Sr	R.I. %
MNP-28034-2	Banco La Cruz	325	0,707936	45,55	0,21	3	210	0,00461	0,64615	2,50
MNP-28034-3		513	0,708183	46,21	0,22	2	38	0,00432	0,07407	0,93
MNP-28034-4		528	0,708214	46,02	0,33	2	59	0,00717	0,11174	1,63
MNP-28034-5a		242	0,707757	45,49	0,25	1	107	0,00549	0,44214	2,31
MNP-28034-5b		242	-	44,81	0,49	1	66	0,01093	0,27272	2,46
MNP-28034-8		438	-	41,31	3,41	1	10	0,08231	0,02283	0,86
MNP-28034-9a		427	-	42,44	1,51	2	162	0,03534	0,37939	2,31
MNP-28034-9b		427	0,707681	44,71	0,38	2	129	0,00851	0,30211	2,09
MNP-28034-10		270	0,707923	45,56	0,31	1	89	0,00658	0,32962	1,47
MNP-28034-11		789	0,708198	45,86	0,24	3	34	0,00523	0,04309	0,39
MNP-28034-12a		379	-	41,69	2,09	2	165	0,05013	0,43535	2,18
MNP-28034-12b		589	0,708249	43,84	1,77	2	14	0,040374	0,02376	1,12
MNP-28035-15	Banco La Escuela	423	0,707875	45,31	0,32	1	143	0,00706	0,33806	2,29
MNP-28035-17b		728	0,708228	45,15	0,28	2	119	0,00621	0,16346	1,48

R.I. % peso: residuo insoluble.

medio de columnas de intercambio catiónico rellenas con resina BioRad® 50 W X12 (malla 200/400). El blanco de procedimiento era inferior a 2 ng para Sr. La composición isotópica de Sr se determinó en un espectrómetro automatizado Multicollector SECTOR 54® y los valores de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr se normalizaron a un valor <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr de 0,1194. La norma NBS-987 se analizó rutinariamente junto con las muestras del estudio y dio un valor medio de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de 0,710251±0,00002 (2σ, n=7). La incertidumbre analítica general se estima en ±0,01%. Para el Rb, las muestras se hicieron reaccionar con ácido acético 0,5 M, se centrifugaron a 4.000 rpm y se recogió el lixiviado para su análisis. El residuo se lavó dos veces con agua Millipore centrifugada y se añadió el nuevo lixiviado al primero. Posteriormente se secó y se volvió a disolver con 1 ml de HNO<sub>3</sub> 0,1 M para análisis por ICP-MS. Además de los datos químicos obtenidos, se realizó la petrografía de 16 muestras de mármoles y de las respectivas rocas encajonantes de cada uno de los afloramientos (otras 7 muestras).

### 3.2. Geocronología en monacita

La edad del metamorfismo fue determinada en una muestra de gneis (POT-015) del Complejo

Metamórfico Cushamen, mediante el método CHIME (Chemical Th-U-total Pb Isochron Method o datación EPMA) en monacitas, el cual se basa en las concentraciones de U, Th, Pb y Tierra Raras (REE). El análisis de las monacitas se realizó con una microsonda electrónica SX-100 de la Universidad de Oviedo (España) bajo condiciones de 25 kv y 100 nA, siguiendo los protocolos de Scherrer *et al.* (2000). Las edades obtenidas fueron corroboradas con el estándar de monacita IGME 6883A (1.083±1,5 Ma, U-Pb ID-TIMS; EMPA 1.079±6 Ma). Se obtuvieron 53 análisis puntuales. El cálculo de la edad se efectuó según la propuesta de Williams *et al.* (1999) y Montel *et al.* (1996). La edad media ponderada (2σ) se obtuvo mediante Isoplot 4.15 (Ludwig, 2003). Para más detalles sobre el tratamiento de datos y cálculo de edad ver Fernández González *et al.* (2009).

## 4. Resultados

### 4.1. Mármoles El Escorial

Corresponden a afloramientos restringidos a una franja lentiforme, de unos 3 km de largo por 100 a 300 m de espesor y con una orientación general

N-S (Fig. 1B), asociados generalmente a pequeños lentes de anfibolitas que forman septos dentro de granodioritas, tonalitas y filones aplíticos de espesores no mayores a 15-20 cm (Fig. 2). Los mármoles configuran bancos heterogéneos con variaciones en el tamaño del grano (0,5 a 3 mm), de las tonalidades (blancos, celestes, grises y rosados) y de las estructuras internas (macizos a levemente bandeados y plegados). La foliación principal observada en los bancos es

de 315°-320°/50°NE, visible fundamentalmente en el bandeo composicional (Fig. 3).

En su mayoría, los mármoles son de composición calcítica (Tabla 1) con contenidos menores de dolomita±flogopita±cuarzo±diópsido±serpentina±granate±grafito. Petrográficamente, las rocas tienen una textura granoblástica de grano medio a fino (~0,1 a 2 mm). En general, se presentan como mosaicos granoblásticos de calcita polygonal, con

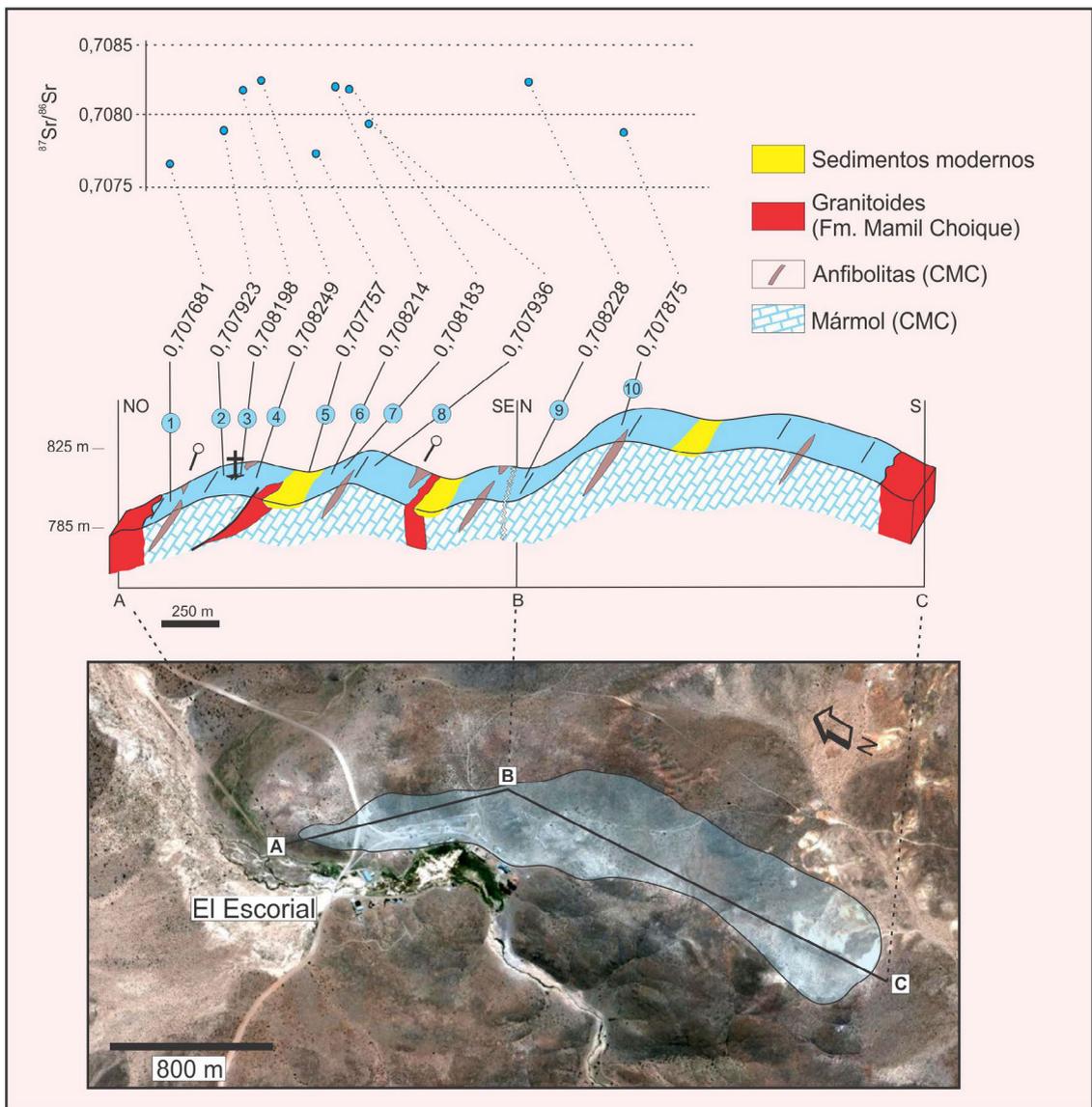


FIG. 2. Perfil esquemático de la sección estudiada con la ubicación de las muestras de mármol analizadas y el valor de sus razones isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Muestras: 1. MNP-28034-9b; 2. MNP-28034-10; 3. MNP-28034-11; 4. MNP-28034-12b; 5. MNP-28034-5a; 6. MNP-28034-4; 7. MNP-28034-3; 8. MNP-28034-2; 9. MNP-28035-17b; 10. MNP-28035-15.



FIG. 3. A-D. Fotografías de los afloramientos más representativos de los mármoles de El Escorial. E-H. Fotografías de muestras macroscópicas mostrando algunas de las variedades de mármoles encontradas en los afloramientos.

tamaños de grano medio de 1 a 2 mm (Fig. 4A y B). Particularmente, hay sectores con un tamaño de grano mucho menor, entre 0,1 y 0,5 mm (Fig. 4C), y en ocasiones puntuales se observa leve deformación

representada por la orientación de granos de calcita de la matriz que rodean a porfidoblastos de mayor tamaño, elongados y con extinción ondulante (Fig. 4D). Los minerales accesorios principales son diópsido,

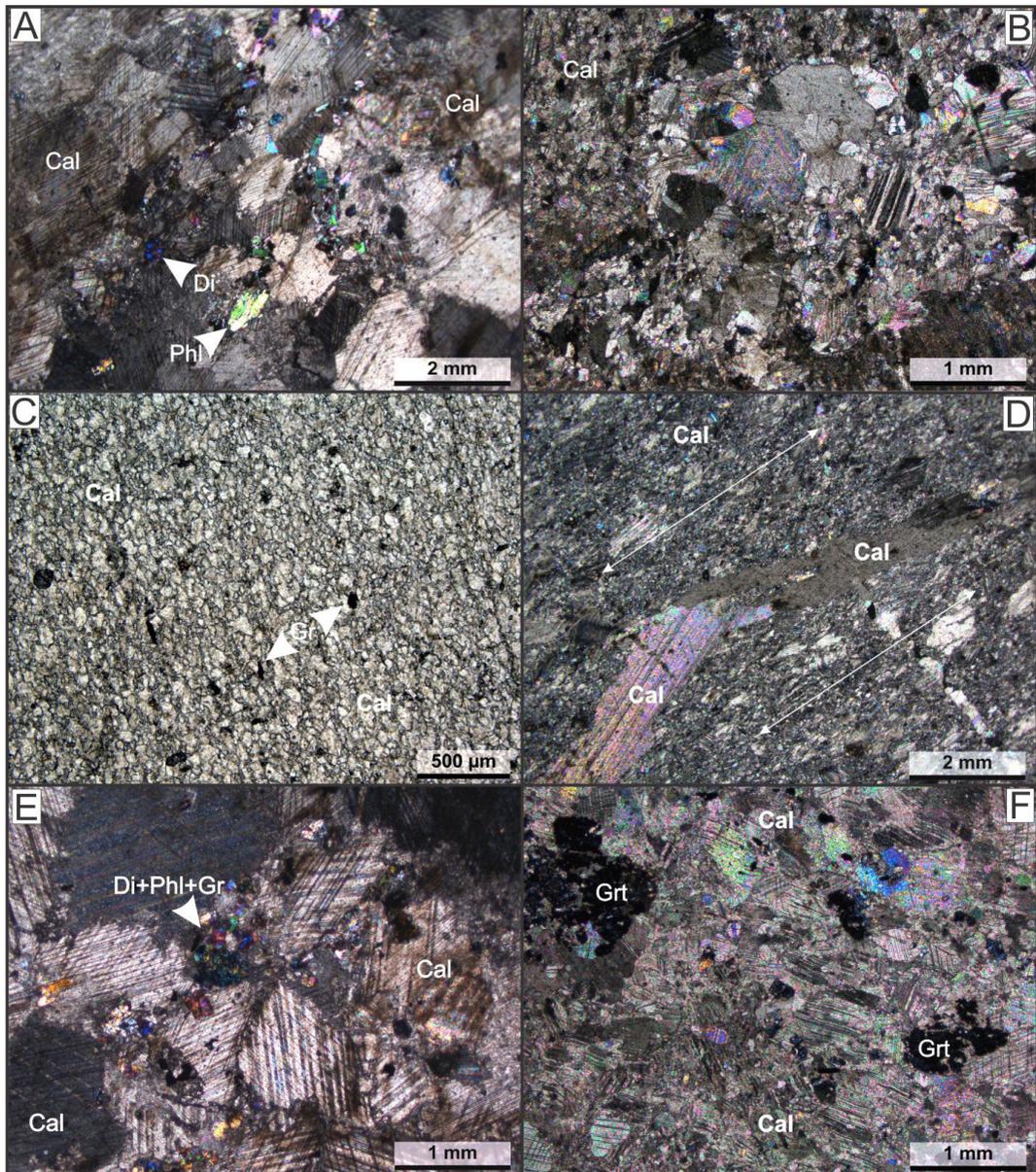


FIG. 4. Fotomicrografías de las muestras representativas de las variedades presentes en los afloramientos de mármoles. En D se indica la dirección de estiramiento de la calcita debido a deformación frágil-dúctil en sectores localizados. A. B. D. E. F. Nícoles cruzados. C. Nícoles paralelos. Abreviatura de minerales según Whitney y Evans (2010).

flogopita, granate y cuarzo en cantidades variables, lo que depende de los niveles que se analicen; por sectores las cantidades de minerales accesorios varían entre el 2 y 5% volumen modal, mientras que en bandas con mayores impurezas llegan al 15-20%. En estos últimos, es común encontrar a modo de agregados o nódulos, la asociación diópsido-flogopita-grafito

(Fig. 4E). Diópsido y flogopita se localizan, además, en blastos individuales subhedrales a anhedrales de tamaños entre 0,7-0,3 mm (Fig. 4A). El granate es esporádico (<2%): en las variedades de grano fino, se lo observa de manera anhedral en el mosaico poligonal calcítico (Fig. 4C) y en las de grano medio, con formas subhedrales desmembradas (Fig. 4F).

La paragénesis calcita+flogopita+diópsido+granate, registrada en los niveles impuros, indica que estas rocas alcanzaron condiciones de grado medio a alto de metamorfismo.

Desde el punto de vista químico (Tabla 2), los mármoles analizados son de composición cálcica, con porcentajes modales de calcita superiores al 95% y bajos porcentajes de residuos insolubles (R.I.: 0,5 a 2,5% peso). Del total de 14 muestras, 4 fueron descartadas por posibles alteraciones postsedimentarias atendiendo a sus valores elevados de las razones Mn/Sr (0,02-0,64) y Mg/Ca (0,004-0,082). Los valores de Rb son todos inferiores a 3 ppm, lo cual es un indicador de que no se ha formado Sr radiogénico durante procesos postsedimentarios. En las 10 muestras restantes se determinó la razón  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  cuyos valores varían entre 0,70768 y 0,70825 (Fig. 5, Tabla 2).

#### 4.2. Edad del metamorfismo en el gneis (POT-015) del CMC

La muestra analizada (POT-015) es un gneis bandeado con alternancia de niveles melano- y leucocráticos granoblásticos. Ella fue extraída en el paraje La Potranca (44°08'09,7" S; 68°38'53,5" O, Fig. 1A), a 120 km al sur de los mármoles El Escorial. Son afloramientos discontinuos, de dimensiones reducidas, fuertemente alterados y observables en pequeñas ventanas erosivas de la cubierta sedimentaria moderna, que exhiben una foliación principal con

orientación N45-57° y buzamientos de 60-70° SE. Estas unidades de basamento metamórfico, al igual que los mármoles El Escorial, forman septos incluidos en granitos postmetamórficos de la Formación Mamil Choique (289±2 Ma; Pankhurst *et al.*, 2006).

La mineralogía del gneis está representada por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, granate, biotita, cordierita y escasa sillimanita y los minerales accesorios lo están por cirlón, apatita, monacita e ilmenita. La muscovita está presente como mineral de alteración. Posibles pseudomorfos de clorita+biotita según ortopiroxeno son reconocidos en esta muestra. La presencia de texturas de fusión parcial y posible asociación mineral con ortopiroxeno sugiere condiciones en facies de granulitas para el picro metamórfico.

La monacita se encuentra como inclusión en granate y en la matriz de la roca. Son granos subredondeados, poco fracturados y con tamaños de entre 20 y 30  $\mu\text{m}$ . Poseen una composición relativamente homogénea con tenores promedio (n=49) de  $\text{Ce}_2\text{O}_3=27,21\%$  (25,46-29,53),  $\text{Y}_2\text{O}_3=2,33\%$  (0,33-4,68),  $\Sigma_{\text{Tierras Raras restantes}}=33,23\%$  (31,9-34,1),  $\text{UO}_2=0,66\%$  (0,31-0,96),  $\text{ThO}_2=4,56\%$  (3,16-5,42) y  $\text{PbO}=0,09\%$  (0,05-0,15) (Tabla 3).

La edad calculada a partir de 49 análisis es de 311±27 Ma, con MSWD=0,40 (2 $\sigma$ , Fig. 6). De los 53 estudios realizados, cuatro fueron descartados. Tres de ellos tienen alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{SiO}_2$  indicio de posible contaminación con la matriz, mientras que el otro fue eliminado por tener una

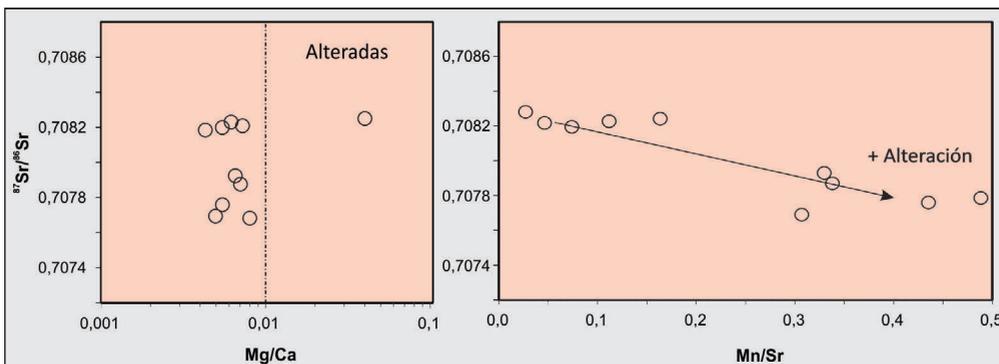


FIG. 5. Gráficos de cribado químico de los mármoles de El Escorial que muestran los límites de alteración pos-deposicionales de acuerdo con Melezhik *et al.* (2001). La diagénesis y el metamorfismo tienden a empobrecer a las rocas carbonáticas en Sr, y a enriquecerlas en Mn, y en consecuencia las relaciones Mg/Ca y Mn/Sr son los principales indicadores del grado de modificación sufrido por estas rocas. Además, es importante recalcar la escasa concentración de Rb, indicativo de un nulo o muy bajo aporte de Sr radiogénico proveniente de su desintegración.

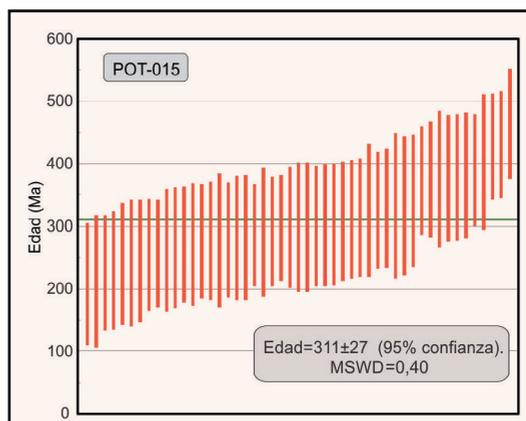
TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y EDAD OBTENIDA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE 53 CRISTALES DE MONACITAS DE LA MUESTRA POT-015.

Puntos de análisis	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Total	Edad (Ma)	Error	
% peso																							
1/1	30,366	0,022	0,214	1,082	0,332	29,529	3,211	0,103	0,000	14,554	12,231	2,296	1,360	0,044	0,011	0,000	0,075	4,682	0,605	100,716	267	96	
10/1	31,130	0,063	0,331	1,237	2,717	26,385	2,934	0,741	0,038	14,228	11,226	2,107	1,876	0,182	0,136	0,000	0,095	4,648	0,686	100,760	327	93	
12/1	31,162	0,012	0,071	1,324	3,436	25,991	2,954	0,829	0,037	13,401	11,437	2,068	1,681	0,171	0,203	0,028	0,081	4,963	0,762	100,609	258	85	
13/1	31,137	0,009	0,019	1,371	2,433	26,742	2,989	0,628	0,020	13,874	11,508	2,042	1,557	0,130	0,133	0,000	0,096	4,917	0,917	100,520	287	81	
14/1	31,087	0,065	0,307	1,067	1,484	27,578	3,093	0,422	0,001	14,080	12,069	2,188	1,536	0,104	0,071	0,000	0,080	5,111	0,535	100,880	277	91	
15/1	31,022	0,020	0,043	1,170	2,768	27,056	2,940	0,648	0,031	13,716	11,381	2,049	1,615	0,163	0,146	0,003	0,089	4,424	0,734	100,017	309	95	
18/1	31,276	0,018	0,229	1,001	2,982	27,075	3,080	0,585	0,045	13,142	12,013	2,156	1,593	0,129	0,145	0,014	0,082	4,728	0,325	100,617	334	111	
19/1	31,704	0,015	0,235	1,113	0,594	27,894	3,118	0,209	0,000	14,430	12,320	2,245	1,487	0,082	0,026	0,000	0,084	4,789	0,580	100,923	299	96	
2/1	30,215	0,003	0,144	1,059	1,143	28,769	3,155	0,370	0,006	13,889	12,017	2,433	2,038	0,125	0,043	0,000	0,079	4,292	0,596	100,376	300	103	
20/1	30,850	0,063	0,096	1,190	2,175	27,820	3,027	0,541	0,017	14,044	11,743	2,061	1,443	0,118	0,107	0,000	0,114	4,495	0,828	100,729	376	92	
21/1	30,975	0,039	0,046	1,295	2,169	27,524	2,934	0,517	0,030	14,037	11,164	1,947	1,389	0,119	0,109	0,000	0,126	4,512	0,952	99,883	391	88	
22/1	31,211	0,012	0,412	0,998	1,455	27,709	3,140	0,270	0,004	13,994	12,522	2,194	1,348	0,072	0,053	0,000	0,076	4,898	0,452	100,819	283	100	
23/1	30,781	0,169	0,339	1,049	2,082	27,109	3,064	0,498	0,024	14,016	12,022	2,108	1,519	0,113	0,107	0,000	0,065	5,004	0,528	100,598	231	94	
24/1	30,927	0,000	0,157	1,142	1,906	27,874	3,088	0,510	0,000	13,999	11,966	2,127	1,493	0,124	0,094	0,000	0,068	4,660	0,589	100,722	246	97	
25/1	30,912	0,025	0,369	1,006	0,420	28,942	3,181	0,152	0,000	14,369	12,547	2,206	1,189	0,045	0,018	0,000	0,075	5,114	0,430	100,999	272	97	
26/1	30,828	0,023	0,259	1,135	0,881	27,866	3,153	0,289	0,000	14,432	12,377	2,205	1,415	0,075	0,055	0,000	0,084	4,904	0,506	100,487	303	97	
27/1	32,140	0,000	0,016	1,123	3,021	26,599	2,971	0,764	0,032	14,024	11,662	2,017	1,584	0,160	0,186	0,021	0,077	3,851	0,736	100,982	292	102	
29/1	31,419	0,000	0,008	1,157	2,047	27,346	3,053	0,603	0,032	14,309	11,817	2,071	1,486	0,136	0,121	0,000	0,104	4,071	0,745	100,524	379	100	
3/1	29,724	0,077	0,123	1,101	2,291	28,601	3,127	0,615	0,039	14,220	11,465	2,066	1,512	0,131	0,115	0,009	0,104	3,919	0,665	99,902	404	108	
30/1	30,752	0,021	0,000	1,192	2,732	27,698	3,033	0,681	0,030	14,195	11,623	2,044	1,583	0,147	0,161	0,008	0,086	4,001	0,827	100,814	304	97	
31/1	29,665	0,116	0,306	1,139	1,446	28,100	3,144	0,377	0,000	13,195	12,199	2,292	1,599	0,101	0,051	0,000	0,067	5,155	0,563	99,513	227	92	
32/1	29,063	0,003	0,112	1,135	3,368	27,482	3,054	0,737	0,041	13,062	11,670	2,260	1,830	0,148	0,163	0,016	0,074	4,744	0,580	99,541	263	98	
33/1	31,322	0,000	0,027	1,343	3,463	25,787	2,907	0,823	0,069	13,439	11,481	2,102	1,732	0,194	0,204	0,036	0,091	5,007	0,720	100,745	293	87	
34/1	31,229	0,000	0,002	1,365	2,184	27,146	2,952	0,577	0,023	14,010	11,734	2,068	1,507	0,126	0,111	0,000	0,143	4,804	0,910	100,890	432	85	
35/1	30,572	0,000	0,103	1,174	2,190	27,258	3,042	0,566	0,031	14,081	11,881	2,122	1,552	0,125	0,124	0,000	0,091	4,976	0,571	100,457	315	94	
36/1	30,909	0,000	0,008	1,305	3,289	26,335	2,933	0,787	0,046	13,779	11,474	2,106	1,672	0,171	0,187	0,032	0,078	4,777	0,751	100,638	255	89	

continuación tabla 3.

Puntos de análisis	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Total	Edad (Ma)	Error
% peso																						
37/1	31,056	0,010	0,263	1,186	1,804	27,418	3,161	0,414	0,004	13,654	12,235	2,220	1,402	0,094	0,084	0,000	0,083	5,037	0,618	100,741	279	91
38/1	30,827	0,021	0,083	1,302	1,810	27,487	2,984	0,545	0,020	14,061	11,760	2,150	1,530	0,114	0,095	0,000	0,120	5,022	0,787	100,718	374	87
39/1	31,753	0,022	0,021	1,402	2,367	26,370	2,917	0,602	0,037	13,981	11,332	1,977	1,508	0,133	0,136	0,000	0,145	4,818	0,963	100,482	429	84
40/1	31,532	0,144	0,225	1,381	2,382	26,503	2,945	0,619	0,029	13,538	11,535	2,013	1,531	0,158	0,139	0,000	0,098	4,957	0,864	100,592	299	84
41/1	31,493	0,002	0,046	1,367	2,231	27,137	2,991	0,513	0,025	13,885	11,680	1,711	1,251	0,117	0,110	0,000	0,077	3,897	0,658	99,191	302	96
42/1	31,167	0,035	0,381	1,053	0,666	28,031	3,223	0,206	0,000	14,075	12,760	2,245	1,275	0,064	0,025	0,000	0,079	5,295	0,437	101,019	278	94
43/1	30,741	0,303	0,453	0,885	1,040	28,293	3,286	0,260	0,000	13,778	12,736	2,271	1,350	0,088	0,049	0,000	0,055	5,076	0,313	100,976	213	105
44/1	31,185	0,008	0,036	1,153	3,743	26,600	2,921	0,828	0,079	13,549	11,250	2,113	1,818	0,180	0,217	0,021	0,095	3,956	0,610	100,360	377	109
45/1	30,306	0,021	0,041	1,194	3,526	26,837	2,938	0,800	0,060	13,651	11,388	2,088	1,714	0,169	0,205	0,022	0,089	3,979	0,662	99,688	342	105
46/1	31,357	0,000	0,101	1,094	4,678	25,492	2,945	0,996	0,079	12,601	11,720	2,269	2,005	0,217	0,283	0,046	0,083	4,253	0,545	100,765	327	106
48/1	31,751	0,009	0,043	1,159	3,554	26,116	2,915	0,816	0,045	13,800	11,363	2,065	1,650	0,174	0,216	0,042	0,077	4,005	0,755	100,555	283	99
49/1	31,331	0,000	0,041	1,400	2,507	26,371	2,940	0,663	0,030	14,094	11,422	2,022	1,568	0,135	0,142	0,006	0,151	4,754	0,879	100,456	465	87
5/1	31,140	0,131	0,106	1,195	3,600	26,441	2,949	0,783	0,037	13,412	11,433	2,163	1,773	0,167	0,184	0,014	0,068	4,304	0,732	100,631	241	97
51/1	30,937	0,025	0,071	1,187	3,436	26,684	2,938	0,822	0,050	13,252	11,514	2,170	1,794	0,165	0,182	0,036	0,090	4,711	0,662	100,727	312	94
52/1	31,008	0,026	0,015	1,331	3,571	26,412	2,913	0,851	0,058	13,288	11,286	2,081	1,724	0,176	0,217	0,023	0,096	4,027	0,577	99,679	383	100
59/1	31,084	0,039	0,221	1,137	1,545	27,108	3,019	0,515	0,026	13,900	12,157	2,272	1,621	0,137	0,074	0,000	0,103	4,456	0,597	100,009	378	100
6/1	30,793	0,025	0,033	0,895	1,841	29,160	3,165	0,539	0,009	14,631	11,872	2,122	1,480	0,140	0,088	0,000	0,079	3,165	0,756	100,793	334	116
60/1	32,518	0,068	0,106	1,284	3,260	25,461	2,765	0,760	0,060	13,462	11,006	1,940	1,577	0,145	0,189	0,031	0,077	4,493	0,692	99,894	272	92
62/1	32,165	0,084	0,270	1,122	2,190	25,712	2,856	0,749	0,006	13,080	11,436	2,456	2,766	0,227	0,089	0,000	0,063	4,015	0,675	99,961	242	101
63/1	31,240	0,010	0,209	1,021	2,850	26,506	2,999	0,741	0,038	13,110	11,634	2,329	2,028	0,182	0,151	0,000	0,071	3,995	0,630	99,743	279	106
7/1	30,331	0,058	0,191	1,071	1,382	27,996	3,088	0,410	0,000	13,735	11,793	2,430	2,237	0,156	0,050	0,000	0,079	4,309	0,603	99,919	300	103
8/1	30,219	0,016	0,303	1,145	3,444	27,082	3,013	0,720	0,052	12,995	11,845	2,095	1,707	0,152	0,208	0,014	0,057	5,421	0,331	100,817	209	97
9/1	30,191	0,037	0,130	1,143	2,152	28,156	3,099	0,580	0,020	14,181	11,803	2,045	1,476	0,121	0,125	0,000	0,093	4,143	0,771	100,265	330	95
<b>Análisis descartados:</b>																						
57/1	31,247	0,011	0,028	1,076	1,977	27,238	3,074	0,594	0,027	14,387	11,850	2,172	1,585	0,134	0,103	0,000	0,161	4,343	0,879	100,886	524	92
56/1	29,072	0,000	1,447	1,390	2,838	26,474	2,916	0,708	0,051	13,345	11,392	2,064	1,596	0,169	0,145	0,013	0,141	4,855	0,879	99,495	431	86
61/1	30,493	2,256	2,925	1,028	1,778	24,806	2,761	0,541	0,011	12,589	11,019	2,153	1,893	0,161	0,072	0,000	0,063	4,243	0,624	99,415	240	98
28/1	26,355	0,000	3,045	0,821	1,805	22,915	2,560	0,392	0,020	11,750	10,065	1,602	1,055	0,100	0,091	0,000	0,261	18,039	0,127	101,003	334	36

FIG. 6. Edades obtenidas a partir de las concentraciones de Th, U y Pb en monacita del gneis migmático de la muestra POT-015. El cálculo la edad media ponderada ( $2\sigma$ ) se obtuvo mediante el uso de Isoplot 4.15 (Ludwig, 2003).



edad antigua (524 Ma) que podría señalar herencia detrítica. La edad de 311 Ma en monacita es asignada a la del evento metamórfico de alto grado del CMC en el sector centro-sur del MNP.

## 5. Discusión

Cotejando las razones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de los mármoles El Escorial con la curva de variación isotópica del Sr en el agua oceánica durante el Paleozoico-Neoproterozoico (Zaky *et al.*, 2019 y referencias allí citadas; Fig. 7), se observa que no es posible definir de manera inequívoca una edad de sedimentación. Esto se debe a que durante el Paleozoico las razones isotópicas de Sr han experimentado más de una fluctuación. Los valores de El Escorial ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,70768-0,70825$ ) podrían corresponderse a tres rangos de edades (635-625 Ma; 375-320 Ma y 300-285 Ma).

El rango de edades neoproterozoicas (635-625 Ma) puede ser descartado si se tiene en cuenta aquellas que son herencias obtenidas a partir de circones detríticos, provenientes de las unidades siliciclásticas del CMC en su localidad tipo (Hervé *et al.*, 2016, 2018), las que registran una edad de 385 Ma para el circón clástico más joven, y acotan la edad máxima de sedimentación de esta formación al Devónico Medio (~385-400 Ma).

El hecho que las sucesiones metasedimentarias del CMC están intruidas por granitos postmetamórficos de 286 y 261 Ma (edades K-Ar en muscovita, Duhart *et al.*, 2002; U-Pb en circón, Varela *et al.*, 2005; Pankhurst *et al.*, 2006) permiten descartar el rango de edades más jóvenes (300-285 Ma).

Estos mismos granitoides de la Formación Mamil Choique son los que intruyen a los mármoles de

El Escorial y sucesiones metasedimentarias del CMC, estos últimos preservados como xenolitos en afloramientos localizados inmediatamente al sur de El Escorial (Proserpio, 1987). Por otra parte, la edad de  $311 \pm 27$  Ma para el evento metamórfico principal en la muestra del gneis (POT-015) acota la edad mínima de sedimentación. Además, Pankhurst *et al.* (2006) señalan la edad del inicio de la subducción en función del magmatismo tipo-I de edad carbonífera media (*ca.* 335 Ma). De esta manera, la posible edad de sedimentación de los carbonatos de El Escorial se ubicaría entre los 385 y 335 Ma.

Aceptando que las unidades carbonáticas estudiadas forman parte del CMC, tal como fue sugerido por Proserpio (1987), estas se habrían depositado en una plataforma mixta (carbonática-siliciclástica) de edad devónica media a carbonífera inferior. Ellas fueron involucradas con posterioridad en procesos tectónicos de un margen activo, producto del inicio de la subducción hacia el este a los *ca.* 335 Ma (Pankhurst *et al.*, 2006), y fueron metamorfozadas a los  $311 \pm 27$  Ma e intruidas por el arco magmático pérmico.

Cabe la posibilidad de que los mármoles de El Escorial no tengan una relación genética con las unidades metasedimentarias del CMC, dado que no hay observaciones de campo fehacientes de que ambas litologías estén asociadas. En este caso, la edad de sedimentación podría interpretarse sobre los intervalos de aquellas más antiguas planteadas en el presente trabajo. Esto dejaría abierta la posibilidad de que los mármoles de El Escorial sean correlacionables con los estudiados por Varela *et al.* (2014) (Fig. 7) en la región noreste del MNP. Los mármoles de la Formación Pailemán ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0,70735$ ; 625 Ma)

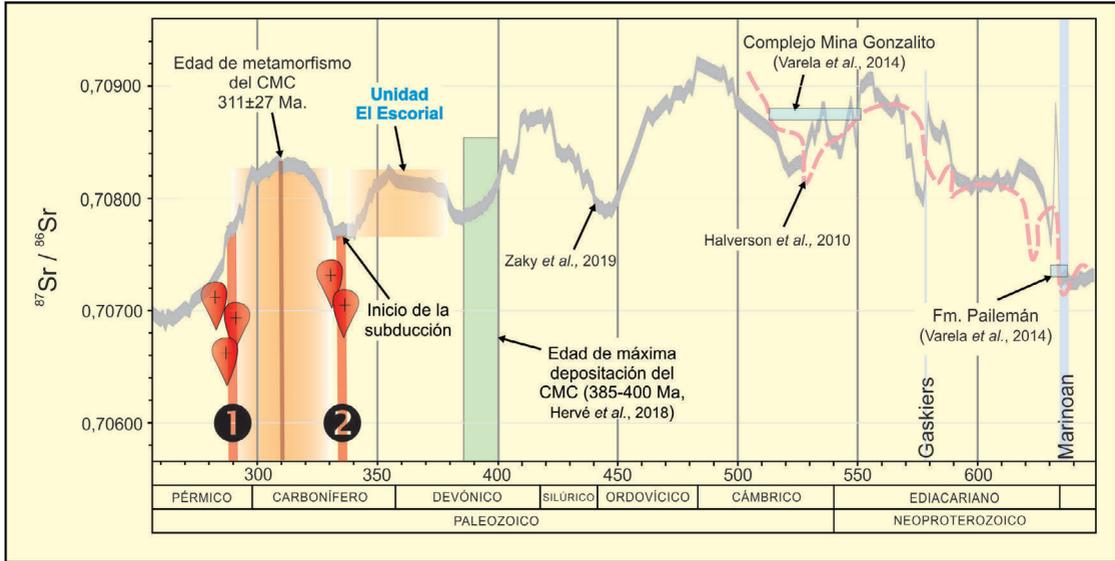


FIG. 7. Curva de variación secular de la razón isotópica de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el agua de mar para el Paleozoico/Ediacariano superior según recopilación de Zaky *et al.* (2019). Los mármoles de El Escorial indican una edad probable de sedimentación entre los 385-335 Ma, diferenciándose de otras unidades carbonáticas del MNP, con edades del Ediacariano inferior/Cámbrico inferior a medio (Varela *et al.*, 2014). 1. Inicio del magmatismo de la Formación Mamil Choique 286-261 Ma (Duhart *et al.*, 2002; Varela *et al.*, 2005). 2. Inicio del magmatismo del Carbonífero medio (Pankhurst *et al.*, 2006).

y del Complejo Mina Gonzalito ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ~0,70873; 550-510 Ma) fueron tentativamente referidos al Ediacariano temprano-Cámbrico inferior a medio, respectivamente (Varela *et al.*, 2014). Esta última posibilidad implicaría extender la plataforma carbonática, generada en el Paleozoico inferior, hacia zonas más australes del MNP; no obstante, la ausencia en el sector centro-sur del MNP, de rocas ígneas y metamórficas de edades cámbricas y ordovícicas, que forman la caja de los mármoles en el sector norte del macizo (López de Luchi *et al.*, 2010; Rapalini *et al.*, 2013) podría sugerir que estos dos sectores poseen historias diferentes.

Por el momento, y sobre la base de la información disponible, en este trabajo sostenemos la hipótesis de que las unidades del noreste del MNP no serían correlacionables con las de la zona centro-sur (Unidad El Escorial), en concordancia con las propuestas de otros autores (Giacosa *et al.*, 2014; Hervé *et al.*, 2018; Renda *et al.*, 2019, 2021; Rapela y Pankhurst, 2020; Rapela *et al.*, 2021).

## 6. Conclusiones

Los mármoles estudiados son de tipo calcítico (calcita >85-90%) con contenidos menores de dolo-

mita±flogopita±cuarzo±diópsido±serpentina±granate±grafito. Desde el punto de vista petrográfico, la paragénesis calcita+flogopita+diópsido+granate, registrada en los niveles impuros, indica que se alcanzaron condiciones de grado medio a alto del metamorfismo regional. Esto es consistente con el grado metamórfico que afectaron a las unidades siliciclásticas del Complejo Metamórfico Cushamen en regiones relativamente próximas a El Escorial, en las cuales la edad de metamorfismo es acotada a ca. 311±27 Ma.

Los altos tenores de Ca y bajos contenidos de Mn y Mg en un conjunto de muestras de mármoles indican que, en sectores específicos, estos no han sufrido importantes alteraciones postsedimentarias y que las razones isotópicas iniciales del Sr habrían permanecido lo suficientemente blindadas, validando el uso de las actuales razones isotópicas para compararlas con las variaciones seculares del agua de mar en el tiempo.

La edad de sedimentación más probable se ubica entre el Devónico Medio y el Carbonífero inferior (~385-335 Ma).

La posibilidad de que estas rocas carbonáticas del sector central del Macizo Norpatagónico se correlacionen con las del sector nororiental son

bajas, aunque no se descarta debido al problema de la cubierta sedimentaria que cubre los mármoles de El Escorial, y a que no ha sido posible constatar fehacientemente las relaciones de campo entre los mármoles y las metareniscas del Complejo Metamórfico Cushamen.

Los resultados obtenidos demuestran que el adecuado tratamiento y selección de muestras para la isotopía de Sr en metacarbonatos es una herramienta útil para la correlación entre unidades de basamento, sobre todo si se las combina con otras herramientas geocronológicas.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al LABGEO (CICTERRA-Universidad Nacional de Córdoba) y al CAI de Geocronología y Geoquímica Isotópica (Universidad Complutense de Madrid) y al grupo de investigación PAMPRE. Agradecemos también al editor, W. Vivallo, y a los revisores, S. Serra Varela y M. Márquez por las correcciones y sugerencias que mejoraron este manuscrito. El trabajo fue financiado a partir de fondos provenientes de los proyectos SECyT-UNC 18/21 N° 30720150100517CB, PIP CONICET N° 11220150100901CO, FONCyT-PICT 2017-0619 y Mineco (Ministerio de Economía), España CGL2016-76439-P. A la memoria de nuestra querida amiga y compañera Carmen Galindo.

### Referencias

Anselmi, G.; Gamba, M.; Panza, J. 2004. Hoja Geológica 4369-IV, Los Altares. Provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 313: 98 p. Buenos Aires.

Brand, U.; Veizer, J. 1980. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-1: Trace elements. *Journal of Sedimentary Petrology* 50 (4): 1219-1236.

Cerrodo, M. 1997. The metamorphism of Cushamen Formation, Río Chico area. North Patagonian Massif, Argentina. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas 2: 1236-1240. Antofagasta.

Cerrodo, M.; López De Luchi, M. 1998. Mamil Choique Granitoids, southwestern North Patagonian Massif, Argentina: magmatism and metamorphism associated with a polyphasic evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 11 (5): 499-515.

Dalla Salda, L.; Varela, R.; Cingolani, C. 1991. Los granitoides de Chasicó-Mencué, Macizo Norpatagónico, Río Negro. Su implicancia geotectónica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 46 (3-4): 189-200.

Dalla Salda, L.; Varela, R.; Cingolani, C.; Aragón, E. 1994. The Río Chico Paleozoic crystalline complex and the evolution of North Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 7 (3-4): 377-386.

Duhart, P.; Haller, M.; Hervé, F. 2002. Diamicritas como parte del protolito de las metamorfitas de la Formación Cushamen en Río Chico, Provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. *In* Congreso Geológico Argentino, No. 15, Actas 2: 97-100. El Calafate.

Fairchild, I.; Marshall, J.; Bertrand-Sarafati, J. 1990. Stratigraphic shifts in carbon isotopes from Proterozoic stromatolitic carbonates (Mauritania): influences of primary mineralogy and diagenesis. *American Journal of Science* 290-A: 46-79.

Fernández González, M.; Cuesta Fernández, A.; Rubio Ordóñez, A.; Valverde-Vaquero, P. 2009. Datación química U-Th-Pb de monacita por microsonda electrónica (CHIME-EPMA Dating): Puesta a punto y resultados. *In* Congreso Ibérico, No.7, Congreso Nacional de Geoquímica, No. 10, Actas de trabajos: 170-177. Soria.

Fuenlabrada, J.M.; Galindo, C. 2001. Comportamiento de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en disoluciones de carbonatos impuros en función de la concentración ácida y en disoluciones de sulfatos en función del tiempo. *In* Congreso Ibérico de Geología, No. 3, Actas 3: 591-595. Zaragoza.

Giacosa, R.; Márquez, M.; Nillni, A.; Fernández, M.; Fracchia, D.; Parisi, C.; Afonso, J.; Paredes, J.; Sciutto, J. 2004. Litología y estructura del basamento ígneo-metamórfico del borde SO del Macizo Nordpatagónico al oeste del río Chico, (Cushamen, Chubut, 42°10' S -70°30' O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (4): 569-577.

Giacosa, R.; González, P.; Silva Nieto, D.; Busteros, A.; Lagorio, S.; Rossi, A. 2014. Complejo ígneo-metamórfico Cáceres: una nueva unidad metamórfica de alto grado en el basamento de Gastre, Macizo Nordpatagónico (Chubut). *In* Congreso Geológico Argentino, No. 19, Actas: S21-19. Córdoba.

González, O.; Tortello, M.; Damborenea, S. 2011. Early Cambrian archaeocyathan limestone blocks in low-grade meta-conglomerate from El Jagüelito Formation (Sierra Grande, Río Negro, Argentina). *Geológica Acta* 9 (2): 159-173.

González, P.; Naipauer, M.; Sato, A.; Varela, R.; Basei, M.; Cávana, M.; Vlach, S.; Arce, M.; Parada, M. 2021. Early Paleozoic structural and metamorphic evolution of the Transpatagonian Orogen related to Gondwana assembly. *International Journal of Earth Sciences* 110: 81-111.

- Greco, G.; González, P.; González, S.; Sato, A.; Basei, M.; Tassinari, C.; Sato, K.; Varela, R.; Llambías, E. 2015. Geology, structure and age of the Nahuel Niyeu Formation in the Aguada Cecilio area, North Patagonian Massif, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 62: 12-32.
- Greco, G.; González, S.; Sato, A.; González, P.; Basei, M.; Llambías, E.; Varela, R. 2017. The Nahuel Niyeu basin: A Cambrian forearc basin in the eastern North Patagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences* 79: 111-136
- Halverson, G.; Wade, B.; Hurtgen, M.; Barovich, K. 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research* 182: 337-350.
- Heredia, N.; García-Sansegundo, J.; Gallastegui, G.; Fariás, P.; Giacosa, R.; Hongn, F.; Tubía, J.; Alonso, J.; Busquets, P.; Charrier, R.; Clariana, P.; Colombo, F.; Cuesta, A.; Gallastegui, J.; Giambiagi, L.; González-Menéndez, L.; Limarino, C.; Martín González, F.; Pedreira, D.; Quintana, L.; Rodríguez-Fernández, L.; Rubio-Ordóñez, A.; Seggiaro, R.; Serra Varela, S.; Spalletti, L.; Cardó, R.; Ramos, V. 2018. The Pre-Andean phases of construction of the Southern Andes basement in Neoproterozoic-Paleozoic times. *In The Evolution of the Chilean-Argentinean Andes* (Folguera, A.; Contreras Reyes, E.; Heredia, N.; Encinas, A.; Iannelli, S.B.; Oliveros, V.; Dávila, F.M.; Collo, G.; Giambiagi, L.; Maksymowicz, A.; Iglesia Llanos, M.P.; Turienzo, M.; Naipauer, M.; Orts, D.; Litvak, V.D.; Álvarez, O.; Arriagada, C.; editores). Springer: 111-131.
- Hervé, F.; Haller, M.; Duhart, P.; Fanning, M. 2005. SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from Cushamen and Esquel formations, North Patagonian Massif, Argentina: geological implications. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 16, Actas: 309-314. La Plata.
- Hervé, F.; Calderón, M.; Fanning, C.M.; Pankhurst, R.J.; Fuentes, F.; Rapela, C.W.; Correa, J.; Quezada, P.; Marambio, C. 2016. Devonian magmatism in the accretionary complex of southern Chile. *Journal of the Geological Society London* 173 (4): 587-602.
- Hervé, F.; Calderón, M.; Fanning, C.M.; Pankhurst, R.J.; Rapela, C.W.; Quezada, P. 2018. The country rocks of Devonian magmatism in the North Patagonian Massif and Chaitenia. *Andean Geology* 45 (3): 301-317. doi: 10.5027/andgeoV45n3-3117.
- Jacobsen, S.; Kaufman, A. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.
- Jiang, G.; Kaufman, A.; Christie-Blick, N.; Zhang, S.; Wu, H. 2007. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: Implications for a large surface-to-deep ocean  $\delta^{13}\text{C}$  gradient. *Earth and Planetary Science Letters* 261: 303-320.
- Lesta, P.; Mainardi, E.; Stubej, R. 1980. Plataforma continental argentina. *In Simposio de Geología Regional Argentina*, No. 2, Academia Nacional de Ciencias Córdoba 2: 1577-1602. Córdoba.
- López de Luchi, M.; Rapalini, A.; Tomezzoli, R. 2010. Magnetic Fabric and microstructures of Late Paleozoic granitoids from the North Patagonian Massif: Evidence of a collision between Patagonia and Gondwana? *Tectonophysics* 494: 118-137.
- López de Luchi, M.; Rapalini, A.; Martínez Dopico, C.; Cerrado, M.; Wemmer, K. 2011. Insights into the Paleozoic tectonics evolution of the North Patagonian Massif: Start up -hypothesis on a sequence of the collisional events. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 18, S1-La Patagonia en el contexto geodinámico de Gondwana: 103-104. Neuquén.
- Lucassen, F.; Trumbull, R.; Franz, G.; Creixell, C.; Vásquez, P.; Romer, R.; Figueroa, O. 2004. Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36-41 °S). *Journal of South American Earth Sciences* 17 (2): 103-119.
- Ludwig, K. 2003. Isoplot/Ex Version 4.15, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication 4.
- Martínez Dopico, C.; López de Luchi, M.; Rapalini, A.; Kleinhanns, I. 2011. Crustal segments in the North Patagonian Massif, Patagonia: an integrated perspective based on Sm-Nd isotope systematics. *Journal of South American Earth Science* 31: 324-341.
- Melezhik, V.A.; Gorokhov, I.M.; Fallick, A.E.; Gjelle, S. 2001. Strontium and carbon isotope geochemistry applied to dating of carbonate sedimentation: an example from high-grade rocks of the Norwegian Caledonides. *Precambrian Research* 108 (3-4): 267-292.
- Montañez, I.; Osleger, D.; Banner, J.; Mack, L.; Musgrove, M. 2000. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans. *Geological Society of America Today* 10 (5): 1-5.
- Montel, J.M.; Foret, S.; Veschambre, M.; Nicollet, C.; Provost, A. 1996. Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology* 131 (1-4): 37-53.
- Murra, J.; Baldo, E.; Verdecchia, S.; Galindo, C. 2017. Los mármoles cálcicos de El Escorial (Formación Cushamen), macizo Nord-Patagónico: caracterización isotópica de  $^{87}\text{Sr}$ - $^{86}\text{Sr}$  y probable edad de sedimentación. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 20, S15 La geo-

- cronología como herramienta para la resolución de problemas geológicos y tectónicos: 82-84. Tucumán. Ostra, H.A.; Linares, E.; Haller, M.J.; Cagnoni, M.C.; López de Luchi, M. 2001. A widespread metamorphic Devonian episode in Northern Patagonia, Argentina. *In* South American Symposium on Isotope Geology, No. 3, Actas CD: 52, Resúmenes: 161. Santiago.
- Pankhurst, R.; Rapela, C.; Fanning, C.; Márquez, M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Science Reviews* 76: 235-257.
- Pankhurst, R.J.; Rapela, C.W.; López De Luchi, M.G.; Rapalini, A.E.; Fanning, C.M.; Galindo, C. 2014. The Gondwana connections of northern Patagonia. *Journal of the Geological Society* 171: 313-328.
- Prokoph, A.; Shields, G.; Veizer, J. 2008. Compilation and time-series analysis of a marine carbonate  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  database through Earth history. *Earth-Science Reviews* 87: 113-133.
- Proserpio, C. 1987. Descripción Geológica de la Hoja 44e, Valle General Racedo (1:200.000), provincia de Chubut. Dirección Nacional de Minería y Geología, Boletín 201: 1-102. Argentina.
- Ramos, V. 2008. Patagonia: a paleozoic continent adrift? *Journal of South American Earth Science* 26: 235-251.
- Ramos, V.; Naipauer, M. 2014. Patagonia: where does it come from? *Journal of Iberian Geology* 40 (2): 367-379.
- Rapalini, A.; López de Luchi, M.; Martínez Dopico, C.; Lince Klinger, F.; Giménez, M., Martínez, P. 2010. Did Patagonia collide against Gondwana in the Late Paleozoic? Some insights from a multidisciplinary study of magmatic units of the North Patagonian Massif. *Geológica Acta* 8: 349-371.
- Rapalini, A.; López de Luchi, M.; Tohver, E.; Cawood, P. 2013. The South American ancestry of the North Patagonian Massif: geochronological evidence for an autochthonous origin? *Terra nova* 25: 337-342.
- Rapela, C.W.; Pankhurst, R.J. 2020. The continental crust of northeastern Patagonia. *Ameghiniana* 57 (5): 480-498.
- Rapela, C.; Hervé, R.; Pankhurst, R.; Calderón, M.; Fanning, C.; Quezada, P.; Poblete, F.; Palape, C.; Reyes, T. 2021. The Devonian accretionary orogen of the North Patagonian cordillera. *Gondwana Research* 96: 1-21.
- Rasband, W. 2017. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/> (Última visita 12/01/2022).
- Renda, E.; Álvarez, D.; Prezzi, C.; Oriolo, S.; Vizán, H. 2019. Inherited basement structures and their influence in foreland evolution: A case study in Central Patagonia, Argentina. *Tectonophysics*: 772 p.
- Renda, E.; González, P.; Vizán, H.; Oriolo, S.; Prezzi, C.; Ruiz González, V.; Schulz, B.; Krause, J.; Basei, M. 2021. Igneous-metamorphic basement of Taquetrén Range, Patagonia, Argentina: A key locality for the reconstruction of the paleozoic evolution of Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 106: 103045.
- Serra-Varela, S.; Heredia, N.; Giacosa, R.; García-Sansegundo, J.; Fariás, P. 2020. Review of the polyorogenic Palaeozoic basement of the Argentinean North Patagonian Andes: age, correlations, tectonostratigraphic interpretation and geodynamic evolution. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2020.1839798.
- Scherrer, N.C.; Engi, M.; Gnos, E.; Jakob, V.; Leichti, A. 2000. Monazite analysis; from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 80: 93-105.
- Varela, R.; Basei, M.; Cingolani, C.; Siga Jr., O.; Passarelli, C. 2005. El Basamento Cristalino de los Andes norpatagónicos en Argentina: geocronología e interpretación tectónica. *Revista Geológica de Chile* 32: 167-182. doi: 10.5027/andgeoV32n2-a01.
- Varela, R.; González, P.; Philipp, R.; Sato, A.; González, S.; Greco, G.; Naipauer, M. 2014. Isótopos de estroncio en calcáreos del noreste Patagónico: resultados preliminares. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (4): 526-536.
- Veizer, J.; Ala, D.; Azmy, K.; Bruckschen, P.; Buhl, D.; Bruhn, F.; Carden, G.A.F.; Diener, A.; Ebner, S.; Goddérís, Y.; Jasper, T.; Korte, C.; Pawellek, F.; Podlaha, O.G.; Strauss, H. 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 59-88.
- Volkheimer, W. 1964. Estratigrafía de la zona extraandina del Departamento de Cushamen (Chubut) entre los paralelos  $42^\circ$  y  $42^\circ 30'$  y los meridianos  $70^\circ$  y  $72^\circ$ . *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 19 (2): 85-107.
- Whitney, D.L.; Evans, B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Williams, M.L.; Jercinovic, M.J.; Terry, M.P. 1999. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: Deconvoluting multistage tectonic histories. *Geology* 27 (11): 1023-1026.
- Zaky, A.; Brand, U.; Buhl, D.; Blamey, N.; Bitner, M.; Logan, A.; Gaspard, D.; Popov, A. 2019. Strontium isotope geochemistry of modern and ancient archives: tracer of secular change in ocean chemistry. *Canadian Journal of Earth Sciences* 56 (3): 245-264.